e-colloque

RISQUE RUISSELLEMENT

DIAGNOSTIC ET SOLUTIONS

235ème Session du Comité Scientifique et Technique de la SHF

30 NOVEMBRE, 1ER ET 2 DÉCEMBRE 2020

ANEB
ASSOCIATION NATIONALE DES ÉLUS DES BASSINS

shf
LA SCIENCE AU SERVICE DE L'EAU

Les ACTES

COMITÉ DE PILOTAGE

Eric GAUME (Université Gustave Eiffel)
Catherine GREMILLET (ANEB)
Caroline JOIGNEAU (ANEB)
Carole PAPLOREY (SHF)
Neda SHEIBANI (SHF)

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Animateur du comité : Eric GAUME (Université Gustave Eiffel)

Patrick ARNAUD (INRAE)
Lionel BERTHET (DGPR/SRNH/STEEGBH)
Stéphanie BIDAULT (CEPRI)
Pascal BREIL (INRAE)
Olivier CERDAN (BRGM)
Vincent COURTRAY (DDTM du Gard)
Laurent DIEVAL (DREAL Nouvelle Aquitaine)
Johnny DOUVINET (Univ. Avignon)
Rémy GARCON (EDF/DTG)
Catherine GREMILLET (ANEB)
Bruno JANET (DGPR/SRNH/SCHAPI)
Michel LANG (INRAE)
Thierry LEPELLETIER (HYDRATEC)
David MONCOULON (CCR)
Loïc MOULIN (SNCF Réseau)
Agnès PAILLET (Région Occitanie)
Cicely PAMS CAPPOCIONI (SNCF Réseau)
Anne PIVETEAU (Artelia Group)
Frédéric PONS (CEREMA)
Yann QUEFFELEAN (ONF/RTM)
Fabrice RODRIGUEZ (Université Gustave Eiffel)
Ghislaine VERRHIEST-LEBLANC (DREAL PACA/MIIAM)
Béatrice VINCENDON (Météo-France)

SOUTENU PAR

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
Liberté Égalité Fraternité
GRANDLYON la métropole

EN PARTENARIAT AVEC

LHB
CCR
setec hydratec

© 2021, Société Hydrotechnique de France
ISBN : 979-10-93567-24-2

Sommaire

PROGRAMME DU E-COLLOQUE **7**

SESSION 1 : DIAGNOSTIC ET CONNAISSANCE DES PHENOMENES **13**

Programme oral session 1 **15**

Flash floods and intense rainfall and runoff : scientific state of the art (Borga) 17

Analyse de données de sinistralité en réassurance pour mieux comprendre les risques liés au ruissellement (Moncoulon *et al.*)) . . . 19

Impacts du changement climatique sur les pluies intenses et les crues en méditerranée (Tramblay *et al.*) 31

Quantification des ruissellements sur les petits bassins versants limoneux et karstiques de Normandie (Richet *et al.*)) 39

Constitution et analyse d'une base de données historiques d'incidents liés au ruissellement sur les voies ferrées (Lagadec *et al.*)) 51

Posters session 1 **63**

Enseignements des inondations exceptionnelles des 21 et 22 mai 2012 à Nancy (Gaume *et al.*) 65

Quels enseignements tirer des coulées de débris post-incendie survenues le 9 janvier 2018 à Montecito (Californie, USA) ? (Douvinet *et al.*) 75

Les observatoires du ruissellement : comprendre les processus pour améliorer les modélisations (Grangeon *et al.*) 87

Apport d'une représentation plus fine de l'occupation et de la texture des sols pour la simulation des débits des cours d'eau méditerranéens et du ruissellement (Lovat *et al.*) 103

Atlas des ruissellement et crues soudaines exceptionnels en Europe et autour de la Méditerranée (Gaume *et al.*) 115

Tendances récentes de la variabilité climatique à partir de 40 ans d'observations : le cas de la région parisienne (Habets *et al.*) 117

SESSION 2 : CARTOGRAPHIE ET EVALUATION DE L'ALEA RUISSELLEMENT ET DES RISQUES ASSOCIES **119**

Programme oral session 2 **121**

Carte de l'aléa ruissellement Suisse – un outil de réduction des risques (Magnollay *et al.*) 123
Cartographie de l'aléa de ruissellement : la modélisation va-t-elle remplacer l'expertise de terrain ? (Newinger *et al.*) 129
Une analyse des « données proxy » pour l'évaluation des cartographies des aléas liés au ruissellement intense pluvial (Breil *et al.*) 139
Premiers tests de la méthode Cartino2D sur le territoire de Toulon Provence Méditerranée (Pons *et al.*) 151
Modélisation du ruissellement : Enjeux et Réponses des modèles numériques (Piveteau *et al.*) 167

Posters session 2 **179**
Améliorer la prise en compte du ruissellement sur le bassin de la Dordogne : retour d'expérience et prospections engagées par EPIDOR (Thomas *et al.*) 181
Prévenir du risque de ruissellement via un système d'alerte basé sur l'imagerie satellite radar (James *et al.*) 189
Cartographie du ruissellement de surface - CRUS (Remy *et al.*) 199
Cartographie de l'aléa ruissellement à échelle fine (Ding *et al.*) 211
Utilisation de la méthode EXZECO pour la connaissance de l'aléa ruissellement (Thomas *et al.*) 223
Utilisation d'un MNT pour la construction de la topologie de drainage de l'agglomération de Dakar (Dieme *et al.*) 235
Cartographie automatisée des zones inondables sur les têtes de bassins versants : évaluation de 3 approches sur 3 crues rapides exceptionnelles dans le sud de la France (Hocini *et al.*) 247
Amélioration des axes de concentration du ruissellement générés sur base du LIDAR 2015 à la résolution de 1m : LIDAXES (Pineux *et al.*) 259
Éléments de cartographie du risque de ruissellement urbain intégrant les capacités d'engouffrement, construit à partir d'outils non dédiés (Braun) 265
L'expérience de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Pas-de-Calais dans l'évaluation, la cartographie et la prévention des risques de ruissellement (Doussière *et al.*) 277
Utilisation de l'approche hydrogéomorphologique pour cartographier les zones inondables par ruissellement et l'intégration réglementaire dans les PLU : retours d'expériences dans le sud de la France (Montané *et al.*) 289
Méthode de cartographie de l'aléa inondation par ruissellement : Application du modèle WaterSed sur le bassin de la Lézarde (France) (Landemaine *et al.*) 299
Potentiel de l'imagerie satellitaire à très haute résolution pour évaluer et cartographier les dommages causés par le ruissellement intense (Breil *et al.*) 311
Contexte pédoclimatique et ruissellement intense (Breil *et al.*) 323
Modélisation du ruissellement : approches, outils et perspectives (Araud *et al.*) 333
La modélisation du ruissellement pluvial : Aléa CCR à 25 mètres de résolution (Onfroy *et al.*) 345

SESSION 3 : GESTION DU RISQUE RUISSELLEMENT 355

Programme oral session 3 **357**

La gestion intégrée du risque de ruissellement urbain torrentiel à Nîmes au travers du retour d'expérience du 10 octobre 2014 (Pla *et al.*) 359

Les phénomènes de ruissellement dans le diagnostic de vulnérabilité du territoire aux inondations (Valy & Gache) 371

Analyse coût-bénéfice du programme d'actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie : évaluation des actions passées et projections futures sur le bassin versant de la Lézarde (Patault *et al.*) 383

Diagnostic de sites inondés par ruissellement et coulées de boues et propositions d'aménagements à l'échelle du bassin versant : retour d'expérience, le cas de la Wallonie (Le Roi) 395

Les seules mesures visant l'infiltration et la désimperméabilisation des sols sont-elles des solutions efficaces pour la lutte contre les inondations par ruissellement en milieu urbain ? (Vignoulle & Costanzo) 401

Tentative de différenciation entre « maîtrise des eaux pluviales » et « gestion des inondations par ruissellement » en contexte méditerranéen à partir du cas de la Métropole Aix -Marseille-Provence (Goudedranche & Langumier) 415

Le service d'avertissement sur les pluies intenses et les crues soudaines en France (Piotte *et al.*) 425

Posters session 3 **437**

Le risque pluvial : comment mieux le connaitre pour mieux le gérer ? (Meslier *et al.*) 439

Gestion du ruissellement pluvial urbain. Retours d'expériences de collectivités du bassin de la Loire et ses affluents (Le Sommer & Pierlot) 449

La désimperméabilisation sur le territoire du Grand Narbonne (Saulais *et al.*) 461

Maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols en zone maraîchère sur les hauteurs de SEDAN (Ardennes - France) : constats, études, travaux et premiers résultats (Fafournoux & Morhain) 473

Diagnostic hydrologique et proposition d'aménagements contre le risque inondation par hydrologie distribuée sur le bassin versant de la Chère (Ducatez *et al.*) 479

Construire une stratégie de gestion des risques de ruissellement dans l'arc méditerranéen (Moullin & Verrhiest-Leblanc) 489

Vers l'intégration d'un indicateur hydrologique pour une nouvelle vigilance "pluie-inondation" (Bildstein *et al.*) 499

Mise en place d'une stratégie de gestion des eaux de ruissellement sur l'Eurométropole de Strasbourg (Grabenstaetter *et al.*) 511

Applicabilité des méthodes cartographiques par somme d'indicateurs dans le cadre de la mise en oeuvre de politiques publiques de gestion intégrée des risques ruissellement (Barjot) 521

Intégrer le risque ruissellement dans le Plan Local d'Urbanisme et de l'Habitat de la Métropole de Lyon pour prévenir les inondations urbaines (Valdelfener *et al.*) 533
Gestion intégrée des eaux pluviales, l'exemple du bassin versant de la Nièvre (Mopty *et al.*) 541
La feuille de route « risque liés aux ruissellements » des opérateurs du ministère de la Transition écologique (Gaume *et al.*) 549
Mesure préventive de gestion du risque d'inondation par ruissellement (Delvaux) 559
Diagnostic de l'exposition et de la vulnérabilité à l'aléa ruissellement. Adaptation aux enjeux du réseau ferroviaire de la région Provence Alpes Côte d'Azur (Moulin *et al.*) 567
GERIMU – GEstion du Risque d'Inondation en Milieu Urbain (Saugnac *et al.*) 581

PROGRAMME DU E-COLLOQUE

LUNDI 30 NOVEMBRE 2020

10h30 - 12h30

Session 1 - Diagnostic et connaissance des phénomènes

10h30 - 11h20

Vidéos de présentation

Flash floods and intense rainfall and runoff : scientific state of the art : BORGA Marco, Université Padoue (Italie)

L'impact du ruissellement en France : analyse des données de sinistralité : MONCOULON David, CCR

Impact du changement climatique sur les pluies intenses et les crues : TRAMBLAY Yves, IRD/Hydrosciences Montpellier, CNRS

Quantifications des ruissellements sur les petits bassins versants des plateaux limoneux et karstiques de Normandie : RICHET JB., PAK L., OUVRY J.F., AREAS

Constitution et analyse d'une base de données historiques d'incidents liés au ruissellement sur les voies ferrées : LAGADEC Lilly-Rose, BRAUD I., MOULIN L., BREIL P., SNCF/INRAE

11h30 - 12h30

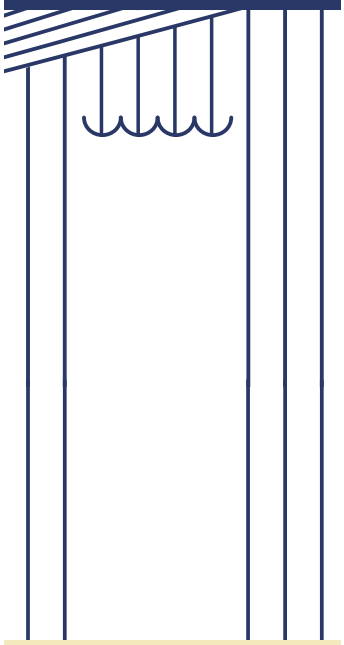
Overview des posters et discussion avec les auteurs

animée par Michel LANG, Président du Comité Scientifique et Technique de la SHF et INRAE

14h - 16h

Session 2 - Cartographie et évaluation de l'aléa ruissellement et des risques associés

14h - 14h50



Vidéos de présentation

Carte de l'aléa ruissellement Suisse : un outil de réduction des risques : MAGNOLLAY Antoine, LOAT R., OFEV (Suisse)

Cartographie de l'aléa de ruissellement : la modélisation va-t-elle remplacer l'expertise de terrain ? ROBERT Yannick, NEWINGER O., ONF

Une analyse des "données proxy" pour l'évaluation des cartographies des aléas liés au ruissellement intense pluvial : BREIL Pascal, BRAUD I., LOULIN L., LAGADEC LR., CHAZELLE B., INRAE UR RIVERLY, SNCF - DG Industrielle

Premiers tests de la méthode Cartino2D, sur le territoire de Toulon Provence Méditerranée : PONS Frédéric, ALQUI M., PAYA E., MOULIN Ch., PANIER N., Cerema, SDIS du Var, Métropole Toulon

Modélisation du ruissellement : enjeux et réponses des modèles numériques : FREY Bénédicte, PIVETEAU Anne, ARTELIA

15h - 16h

Overview des posters et discussion avec les auteurs,

animée par Régis THÉPOT, expert-consultant

MARDI 1ER DÉCEMBRE 2020

10h30 - 12h45

Session 3 - Gestion du risque ruissellement

10h30 - 11h40

Vidéos de présentation

La gestion intégrée du risque de ruissellement urbain torrentiel à Nîmes, au travers du retour d'expérience du 10 octobre 2014 : PLA Guillaume, MARRAGOU L., NUEL JL., Ville de Nîmes

Les phénomènes de ruissellement dans le diagnostic de vulnérabilité du territoire aux inondations : VALY Janique, GACHE F., EPTB Seine Grands Lacs

Analyse coût-bénéfice du programme d'actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie : évaluation des actions passées et projections futures sur le bassin versant de la Lézard : PATAULT Edouard, LEDUN J., MANDEMAINE V., SOULIGNAC A., UNIROUEN, UNICAEN, BRGM, DHI

Diagnostic de sites inondés par coulées de boues et propositions d'aménagements à l'échelle du bassin versant : REX, cas de Wallonie, LE ROI Alain, SPW - Cellule GISIER (Belgique)

L'Infiltration et la désimperméabilisation des sols sont-elles des solutions efficaces pour la lutte contre les inondations par ruissellement ? : VIGNOULLE Olivier, COSTANZO J., SCE

Tentative de différenciation entre "maîtrise des eaux pluviales" et "gestion des inondations par ruissellement" en contexte Méditerranéen à partir du cas de la Métropole Aix-Marseille-Provence : GOUDERANCHE Luce, LANGUMIER J., DDTM 13

Le service d'avertissement sur les pluies intenses et les crues soudaines : PIOTTE Olivier, BELLEUDY A., JAUFFRET C., JANET B., SCHAPI/Météo France

11h45 - 12h45

Overview des posters et discussion avec les auteurs,

animée par Stéphanie BIDAULT, directrice, CEPRI

15h30 - 17h

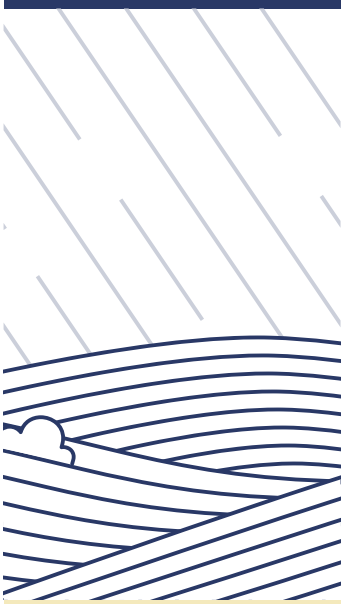
Table-ronde : Améliorer la gestion du risque ruissellement en France : du constat aux actions concrètes

Animée par : Sandrine GODFROID, Présidente de la section ressources naturelles et risques, Conseil général de l'environnement et du développement durable

Avec la participation de : Lionel BERTHET, Direction générale de la prévention des risques, Ministère de la transition écologique, Landry LEONARD, Président de l'EPTB Saône-Doubs, Conseiller Communautaire et Vice-Président du Grand Chalon, Emmanuèle SAURA, Directrice Territoriale Occitanie, SNCF Réseau, Eric GAUME, Directeur du département de géosciences, Université Gustave Eiffel

MERCREDI 2 DÉCEMBRE 2020

9h00 – 12h



12h

Atelier sur les outils de cartographie de l'aléa et des risques

Cet atelier permettra, à partir de trois études de cas, de présenter les différents types d'outils actuellement disponibles pour cartographier l'aléa et les risques associés aux ruissellements. Les participants auront la possibilité d'accéder aux différentes couches SIG produites à l'aide de ces outils, de les comparer et de les évaluer, au regard des dommages et impacts constatés sur les territoires concernés par les études de cas. L'atelier vise, sur la base d'exemples bien documentés, à permettre aux participants de mener une réflexion sur la nature de l'information produite par chaque outil, les domaines d'application de ces outils, leurs hypothèses et sources d'incertitudes.

Atelier animé par : Pascal BREIL (INRAE), Olivier CERDAN et Valentin LANDEMAINE (BRGM), Anne PIVETEAU et Guillaume BARJOT (Artelia Group), Frédéric PONS (Cerema)

Fin du e-colloque

CO-ORGANISATEURS

SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE (SHF)

www.shf-hydro.org

La SHF a été créée en 1912 par des hydro-électriciens : constructeurs, concepteurs, exploitants.

Les missions de la SHF sont de favoriser l'échange scientifique et technique par la mise en valeur et la diffusion des connaissances dans tous les domaines de la ressource en eau, de l'environnement, des énergies hydrauliques et aérauliques, de la mécanique des fluides et des sciences hydrotechniques. Aujourd'hui organisée en quatre divisions (Hydrosystèmes et ressources en eau, Hydraulique des aménagements et environnement, Hydro-technologies et Mécanique des fluides, Sciences de l'Eau), elle organise chaque année 4 à 6 séminaires et colloques. Ces manifestations réunissent étudiants, chercheurs et praticiens, mobilisant les différents métiers de la recherche, de l'industrie et de la gestion du territoire.

La SHF décerne par ailleurs chaque année quatre prix : pour les doctorants le Prix Henri Milon, prix d'Hydrologie, le Prix Jean Valembois, prix de mécanique des fluides non compressibles, le Prix Pierre Massé, prix des Sciences Humaines et Sociales et pour un ingénieur confirmé le Grand Prix d'Hydrotechnique.

ASSOCIATION NATIONALE DES ÉLUS DES BASSINS (ANEB)

www.bassinversant.org

L'ANEB réunit les élus et les acteurs engagés pour :

• Contribuer à une sensibilisation la plus large possible sur l'importance des politiques de l'eau, notamment face à l'urgence des changements climatiques ;
• Réclamer et accompagner la mise en place d'une organisation territoriale favorisant de manière pérenne et opérationnelle la gestion équilibrée, durable et intégrée de l'eau par bassin versant ;
• Défendre les principes de solidarité entre les territoires et de prise en compte des besoins des collectivités, quelle que soit leur taille, dans la définition et la mise en œuvre des politiques de l'eau.
Elle rassemble des membres élus (élus des EPTB, des EPAGE et syndicats de bassin-rivière, des collectivités locales, Présidents de CLE, élus représentants de structures têtes de réseaux, Parlementaires) et des membres institutionnels (Collectivités territoriales et leurs groupements, notamment EPTB et EPAGE, associations, organismes techniques et scientifiques, …).

SESSION 1 : DIAGNOSTIC ET CONNAISSANCE DES PHENOMENES

Programme oral session 1

Flash floods and intense rainfall and runoff : scientific state of the art (Borga)

L'article correspondant a été publié dans le journal Wires Water en 2019 et est accessible via le lien suivant : lien

Analyse de données de sinistralité en réassurance pour mieux comprendre les risques liés au ruissellement (Moncoulon *et al.*))

ANALYSE DE DONNEES DE SINISTRALITE EN REASSURANCE POUR MIEUX COMPRENDRE LES RISQUES LIES AU RUISSELLEMENT

David MONCOULON[1], Roxane MARCHAL[1], Thomas ONFROY[1]

[1] Caisse Centrale de Réassurance (CCR), Département R&D Modélisation Cat & Agro, 157 boulevard Haussmann, Paris, France
dmoncoulon@ccr.fr

En France, le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles couvre depuis 1982 les principaux périls naturels (inondations, sécheresses géotechniques, tremblements de terre, submersions marines et cyclones dans les territoires d'Outre-Mer). Le groupe CCR (Caisse Centre de Réassurance) est un réassureur public, au cœur de ce dispositif, proposant une couverture illimitée aux assureurs avec garantie de l'Etat. Ainsi, CCR dispose d'une base de données presque exhaustive des données assurantielles à l'adresse et les restitutions sont faites à l'échelle de la commune. CCR développe depuis de nombreuses années des modèles d'exposition aux risques pour fournir une estimation rapide des dommages assurés notamment après la survenance d'un événement. Les indicateurs et analyses assurantielles telles que le coût moyen par sinistre, le ratio sinistres à primes S/P ont démontré que le ruissellement urbain a pour conséquence une sinistralité élevée en termes de montant de dommages. Dans leur ensemble, les inondations représentent 55 % de la sinistralité depuis 1982. Les sinistres consécutifs au ruissellement probabiliste représentent 22 % de la sinistralité totale en France pour la période 1995-2019. En termes de coût moyen, un sinistre en zone de ruissellement se situe aux alentours de 8 k€. A l'échelle d'un bassin versant urbanisé, les sinistres liés au ruissellement représentent 78 % de la sinistralité totale. Cet article propose une analyse détaillée des données et des indicateurs utilisés pour estimer la sinistralité due au ruissellement. Une compréhension fine de ces données permet d'anticiper et de garantir la solvabilité et pérennité du régime Cat Nat français.

Mots-clefs : inondations, données assurantielles, analyse d'exposition, sinistres

ANALYSING INSURANCE DATA IN REINSURANCE TO BETTER UNDERSTAND RISKS RELATED TO URBAN RUNOFF

Résumé anglais dans le même style. Pour un texte en français, le résumé en anglais pourra être légèrement plus long (300 mots max).
In France, since 1982, the natural hazards insurance scheme covers the main natural perils (floods, shrinking-swelling Clay, earthquakes, marine submersions and cyclones in overseas territories). Caisse Centrale de Réassurance (CCR) group is a public reinsurer, at the heart of this scheme, offering an unlimited cover to insurance companies with a State guarantee. Thus, CCR has almost exhaustive database of insurance data geolocalized at address level and the restitutions are made at the community level. For many years, CCR has been developing risk exposure models to provide rapid estimate of insured losses notably after the occurrence of an event. Insurance indicators and analysis such as the average cost per claim, the S/P loss ratio have demonstrated that the urban runoff generates a high loss ratio in terms of the amount of losses. As a whole, flooding has accounted for 55 % of the claims experience since 1982. Claims resulting from probabilistic runoff represent 22 % of the global sinistrality in France for the period 1995-2019. In terms of average cost, a claim in runoff area is estimated around k€ 8. At the urbanized catchment scale, runoff claims represent 78 % of the total claims. This article proposes an in-depth analysis of the insurance data and indicators used to estimate the runoff related claims. A detailed understanding of these data allows us to anticipate and guarantee the solvency and the sustainability of the French Nat Cat scheme.

Key words: floods, insurance data, exposure analysis, claims

1. INTRODUCTION

En France, les phénomènes de débordement de cours d'eau et de ruissellement urbain représentent le principal enjeu en termes de sinistralité annuelle, certaines années comptent des montants de dommages considérables. Les phénomènes de ruissellement, sont généralement issus des précipitations qui ne s'infiltrent et ne s'évaporent pas (pluie efficace), surviennent au moment critique de la saturation des capacités de rétention du sol. Quant au ruissellement urbain, celui-ci se produit en cas de précipitations intenses qui s'écoulent en surface sur des zones habituellement hors d'eau (rues, trottoirs, …) et n'ayant pu s'être infiltrées dans le sol ou être absorbées par les réseaux d'assainissement. En d'autres termes, le ruissellement pluvial représente

l'écoulement des eaux de surfaces par des voies inhabituelles avant de rejoindre chaque exutoire (réseaux hydrographiques, mers, …) (CGEDD, 2009).

Ces événements peuvent engendrer des pertes élevées comme les inondations de mai-juin 2016 estimées à 1 MD€. Selon le GIEC, les événements extrêmes relativement rares, pourraient être plus fréquents à l'avenir (IPCC 2014). Aussi, savoir évaluer le montant des dommages reste une priorité pour CCR afin d'être en mesure de faire face aux événements avec des moyens de prévention et de protection adéquats. Outre les événements extrêmes, d'autres phénomènes d'inondation remarquables surviennent chaque année avec des conséquences en termes de dommages pouvant être significatives. Ceux-ci sont fréquents, à l'exemple exemple les inondations du Sud-Ouest en juin 2013 estimées à 240 M€, d'octobre 2015 et de 2019 sur le Sud-Est respectivement estimées à 520 M€ et entre 380-450 M€[1]. Ces montants concernent les dommages directs aux biens (contenant et contenu) mais ne considèrent pas les pertes d'exploitation ou les dommages agricoles. Les dommages résultants de tels phénomènes peuvent aussi être indirects (Merz et al. 2010; Meyer et al., 2012) à l'exemple des pertes de production suite à la coupure des réseaux en eau, électricité, gaz, télécommunications… ; manque de main d'œuvre du fait de l'indisponibilité des réseaux de transports etc.).

La connaissance de l'exposition des biens assurés et non assurés au péril inondation est une donnée clé pour la construction de scénarios d'évolution de l'exposition et l'évaluation de l'efficacité des mesures de prévention développées notamment dans le cadre du Fonds Barnier (FPRNM). CCR en tant que réassureur public propose, avec garantie de l'Etat, une couverture illimitée pour les assureurs contre les catastrophes naturelles. Ce diapositif a été et mis en place dans le cadre du régime des catastrophes naturelles en 1982. A ce titre, le groupe détient une base de données exhaustive des biens assurés (données de polices et sinistres relatifs aux Cat Nat depuis 1982) en France. Celle-ci est analysée et implémentée dans les modèles d'aléa pour permettre un meilleur calibrage des modèles et une meilleure analyse de la sinistralité globale.

Depuis 2016, CCR réalise annuellement un bilan du régime d'indemnisation des Catastrophes Naturelles en France métropolitaine et en Outre-mer, le Bilan Cat Nat. Ce document fourni notamment une analyse approfondie sur l'exposition des territoires aux risques en mettant en avant des indicateurs de sinistralité, avec par exemple un ratio de sinistres à primes (S/P). L'ensemble de ces résultats sont présentés exercice par exercice et permettent de suivre l'évolution de la sinistralité des phénomènes de ruissellement jusqu'à une échelle infra-communale.

L'objectif de cet article est de décrire la base de donnée assurantielle, rassemblant notamment toutes les données assurantielles des cédantes (assureurs clients de CCR), de préciser la méthodologie appliquée pour calculer les indicateurs assurantiels et démontrer leur pertinence en termes d'évaluation du montant des dommages. Cela proposera une vision globale et locale de la sinistralité due aux phénomènes de ruissellement en France et apportera des éléments pour améliorer la connaissance de ce type de péril.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 LA BASE DE DONNEES ASSURANTIELLE

Les données de sinistralité concernant les aléas couverts dans le cadre du régime Cat Nat (inondations, sécheresses, cyclones, séismes, submersions marines, tsunamis, éruptions volcaniques, mouvements de terrain, avalanches, etc.) sont regroupés par portefeuille d'assurance et par exercice. Ainsi, l'ensemble des polices et sinistres couverts par une compagnie d'assurance sont classés par année. CCR est le principal réassureur des catastrophes naturelles en France, ce qui lui a permis de constituer la base de donnée la plus complète du marché et les travaux d'amélioration se poursuivent en lien étroit avec les assureurs. Les risques professionnels agricoles et commerciaux sont intégrés dans la base, les sinistres portant uniquement sur les dommages aux biens sont collectés et analysés. Les dommages indirects et interruption d'activité ne sont pas pris en compte. Le tableau 1 liste les caractéristiques des types de risques assurés constituant le cœur de la base de données.

[1] Ces informations proviennent du site public https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/

Tableau 1 : Les types de risques assurés

Type de risque	Nature	Usage
1 Risques particuliers 2 Risques agricoles 3 Risques professionnels	1 Maison 2 Appartement 3 Immeuble	1 Locataire 2 Propriétaire occupant 3 Propriétaire non occupant 4 Copropriété

Les variables disponibles dans cette base de données sont listées dans le tableau 2. La valeur assurée fournie en partie par les cédantes est calculée par CCR à partir d'algorithmes développés en interne. Les valeurs assurées correspondent à l'indemnité maximale pour remettre un bien assuré en état après suite à sa destruction totale ou partielle. Le montant se décompose en trois parts : (1) la valeur de l'ensemble des biens contenus à l'intérieur du bien assuré, (2) la valeur du bâti et (3) la valeur assurée des pertes d'exploitation définie dans le contrat afin de compenser la perte de chiffre d'affaires résultant de la non-exploitation de l'activité et de couvrir les frais fixes (Rongiéras et al. 2020).
Les montants de sinistres incluent les frais de nettoyage, de remplacement du matériel et des réparations diverses.

Tableau 2 : Principales variables intégrées dans la base de données assurantielle de CCR. Les données de sinistralité sont reliées aux polices à l'aide de la clé d'identification

Informations sur la police	Informations sur le sinistre
Clé d'identification de la police Type de risque Valeur assurée (contenant, contenu, pertes exploitation) Etage du risque Géolocalisation (x,y) Nombre pièces Surface Adresse Prime Cat Nat Exercice de souscription Clé d'identification de la compagnie Date de début de souscription Date de fin de souscription	Clé d'identification de la police Montant du sinistre Date du sinistre Exercice de survenance Code événement du sinistre Clé d'identification de la compagnie

Lors de l'intégration d'un sinistre dans la base, les informations relatives à la date de survenance, la commune et le péril concerné sont croisées avec la base de données des arrêtés CatNat. L'exhaustivité des données en base est comparée avec la comptabilité de CCR et des cédantes.

2.2 DEVELOPPEMENT D'INDICATEURS DE SINISTRALITE

La profondeur historique du catalogue des sinistres recensés par événement permet de développer différents indicateurs d'exposition au risque inondations à l'échelle nationale, départementale, communale et infra-communale. Des statistiques générales peuvent être produites (par types de risques et par exercice) ou géostatistique (à l'échelle communale ou départementale) sur les primes, le nombre de risques assurés et les valeurs assurées. Ces statistiques, croisées aux données de sinistralité, offrent la possibilité de définir le coût moyen d'une reconnaissance Cat Nat par péril et par année. Ce coût moyen est calculé en faisant un rapport entre le montant du sinistre (corrigé de l'inflation) et le nombre de sinistres.
Un des indicateurs les plus utilisés dans le domaine de l'assurance est la fréquence moyenne de sinistres, calculé à partir du ratio nombre de sinistres sur nombre de polices. Quant au ratio Sinistres à Primes (S/P),

celui-ci se calcule à partir du montant des sinistres et des primes. Le taux de destruction est aussi produit. C'est le rapport entre le montant du sinistre et la valeur assurée du bien. Cet indicateur est important car il est utilisé lors de l'élaboration des courbes de dommages et d'endommagements, déterminantes dans la modélisation et l'estimation des dommages aux biens assurés. Ces fonctions sont définies par un type de risque et associent respectivement, aux paramètres hydrologiques du ruissellement (valeur des débits en m3/s pour chaque maille du modèle d'aléa) un taux de destruction puis un montant de dommages (Le Coent et al. 2019).

En plus des informations relatives aux sinistres historiques, CCR collecte des informations relatives aux demandes et validations des reconnaissances Cat Nat et des actions de prévention financées au titre du Fonds Barnier (Plans de Prévention des Risques, Plans Communaux de Sauvegarde et Programmes d'Actions de Prévention des Inondations). Ces différentes sources de données peuvent être croisées afin d'évaluer l'efficacité des dispositifs publics de prévention des inondations en utilisant les données de la sinistralité historique (Caisse Centrale de Réassurance 2020a). Cela peut être effectué à partir d'indicateurs de sinistralité entre la période précédant la mise en place du dispositif de prévention et la période suivant sa mise en place (Caisse Centrale de Réassurance 2020b).

En outre, des indicateurs reposant sur le croisement entre la modélisation de l'aléa ruissellement et les données de sinistralité sont développés pour mesurer la qualité du modèle développé en interne (Onfroy et al., 2020). Le taux de sinistralité (ou Probabilité De Détection) correspond au nombre de sinistres compté dans les zones d'aléa par rapport au nombre total de sinistres recensés sur un territoire donné. La Probabilité de Fausses Alarmes représente le nombre de polices présentes dans les zones de ruissellement d'après le modèle mais n'ayant en réalité jamais été sinistrées. Enfin, le True Skill Score (TSS) permet de mesurer l'efficacité globale du modèle d'aléa en soustrayant les deux indicateurs précédents (True Skill Score = Probabilité De Détection - Probabilité de Fausses Alarmes).

3. RÉSULTATS

3.1 COMPRENDRE LA SINISTRALITE DANS SON ENSEMBLE

En France sur l'exercice 2019, près de 94 millions de biens sont assurés (biens de particuliers, professionnels, agricoles et automobiles). En 2019 les primes Cat Nat pour le marché de l'assurance français représentent 1.71 MD€, soit une hausse de 3.5 % par rapport à 2018. Pour cette même année, le coût des dommages assurés liés aux inondations est estimé entre 530 et 690 M€ (Caisse Centrale de Réassurance 2020a). Depuis 1982, les inondations représentent 55 % de la sinistralité globale en métropole. Le coût moyen d'une reconnaissance Cat Nat au titre du péril ICB (Inondations et Coulées de Boues) s'élève à 147 k€ sur la période 1982-2019. En termes de communes touchées et reconnues le péril, on en dénombre en moyenne 3 000 par an. Pour l'année 2018, ce nombre atteint 3 868 communes reconnues tout périls confondus pour un montant total de 1,72 MD€ dont 53 % de dommages assurés consécutifs aux inondations. La figure 1 illustre les fréquences moyennes de sinistres ICB par commune pour la période 1995-2015. Les zones les plus exposées se situent sur le pourtour méditerranéen, en particulier sur les communes fréquemment impactées par les événements Cévenols.

Ce type d'épisode se produit sur les régions méridionales, dans les départements limitrophes du massif des Cévennes (notamment le Gard, l'Ardèche, l'Hérault et la Lozère) lorsque l'influence du relief est prépondérante sur le régime des précipitations. De fortes précipitations orographiques ont lieu lorsque des masses d'air chaud et humide provenant de la Méditerranée se refroidissent en altitude sur les reliefs Cévenols.

Sur ces régions, des orages exclusivement liés aux conditions météorologiques sont également à l'origine de précipitations intenses et localisées dépassant fréquemment les 200 mm par heure. Parfois des cellules stationnaires s'installent et génèrent localement des lames d'eau très importantes. Tous les départements du pourtour méditerranéen sont concernés par ce type d'événement.

Les épisodes Cévenols et les orages à caractère stationnaire peuvent générer des précipitations intenses dans des laps de temps très courts (en quelques heures) ou sur plusieurs jours (souvent entre 24h et 72h) au cours de l'automne. A l'exemple de l'événement du 29 septembre 2014 qui a généré 300mm de pluie en 3h sur Montpellier, soit l'équivalent de 6 mois de précipitations. En début de saison, ces épisodes surviennent sur des sols souvent trop secs pour une infiltration optimale des précipitations. Ensuite les pluies automnales en fin de saison, se produisent sur des sols saturés en eau et dont les capacités d'absorption sont quasi nulles.

L'imperméabilisation des sols et le risque de saturation du réseau pluvial en milieu urbain renforcent les phénomènes de ruissellement et favorise l'écoulement des eaux de surface en dehors des thalwegs originels. Lors des dernières décennies, ces événements ont été assez fréquents, les plus remarquables ayant eu lieu dans l'Aude en 1999, le Gard en 2002, le Var en 2010, en 2011sur tout le pourtour méditerranéen, à plusieurs reprises dans l'Hérault comme en 2014, dans l'Aude en 2018 et dans le Sud-Est en 2019[2].

La répétition de ces événements sur les mêmes secteurs est à l'origine de nombreux dommages à proximité des cours d'eau du réseau hydrographique particulièrement dense des régions méditerranéennes. Des études sont menées par Météo-France et le CNRS (programme HyMeX5, à l'exemple du projet PICS, Prévision Immédiate Intégrée des Impacts des Crues Soudaines, avec la participation de CCR sur la partie analyse des données de sinistralité) afin d'améliorer la prévision de tels épisodes et l'évolution de leur fréquence en regard du changement climatique.

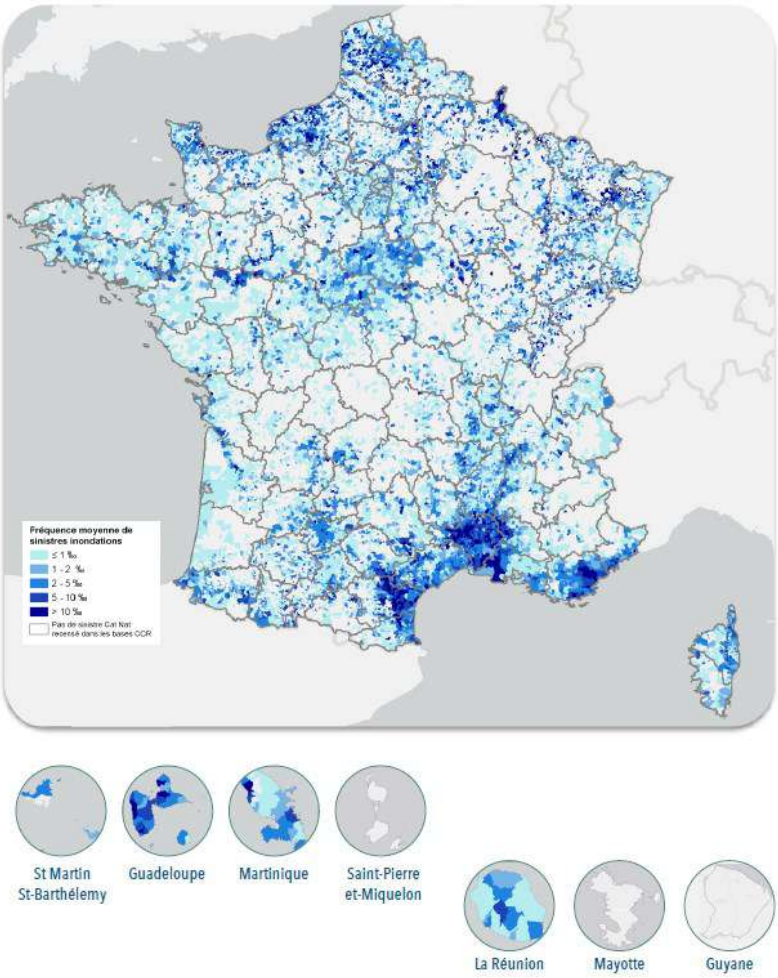


Figure 1 : Fréquence moyenne de sinistres au titre des inondations de 1995 à 2016 par commune

L'analyse des pertes moyennes annuelles par commune est aujourd'hui considérée comme un élément d'éclairage pour la priorisation de la mise en place de Plans de Prévention des Risques (PPR) inondation. En effet, cela permet de cibler les communes n'ayant pas mis en place de PPR et ayant une exposition élevée.

[2] Ces informations proviennent du site public https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/

3.2 ANALYSE D'UNE SINISTRALITE CONSECUTIVE AU RUISSELLEMENT PLUVIAL

Les données de sinistralité agrégées (nombre et coût des sinistres) et croisées avec les données d'aléa sont utiles aux assureurs et aux collectivités lorsque que ceux-ci en font la demande, et peuvent être utilisées dans le cadre de projets de recherche. Ce qui permet de rendre compte de l'exposition des territoires face aux phénomènes de ruissellement.

Dans le cadre du projet de recherche européen H2020 NAIAD (Nature Insurance Value : Assessment and Demonstration, 2016-2020, grant agreement n° 730497), une étude de la sinistralité a été effectuée sur le site d'expérimentation du bassin versant du Lez-Mosson-Etangs Palavasiens à Montpellier (échelle du SAGE, Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) (Graveline et al. 2019). Les résultats démontrent une part plus importante des sinistres consécutifs au ruissellement. Les événements Cévenols de 2014 ont été étudiés dont les coûts ont été estimés à 65 M€ pour le bassin versant (tableau 3).

Tableau 3 : Coûts extrapolés pour l'ensemble des communes du bassin versant du Lez - SAGE

N°	Date de l'événement	Coûts extrapolés à la commune pour le bassin versant du Lez – SAGE (M€)
1	16-20 septembre 2014	1.0
2	28-30 septembre 2014	40.4
3	6-7 octobre 2014	23.0

Les sinistres de 2014 localisés en zone d'aléa inondation (c'est-à-dire situés en zone AZI/PPR) représentent 22 % des dommages, 78 % d'entre eux se situent en dehors de ces zones (figure 2). Ils peuvent donc être considérés comme consécutifs au ruissellement. Les risques les plus exposés sont les particuliers dont les sinistres représentent 88 % des dommages, les maisons individuelles représentant 56 % du total. En ce qui concerne les risques les plus exposés en zone de ruissellement, les propriétaires de maisons individuelles représentent 48 % des sinistres, les professionnels 3 % et les 49 % concernent les locataires de maisons, appartements ou commerces.

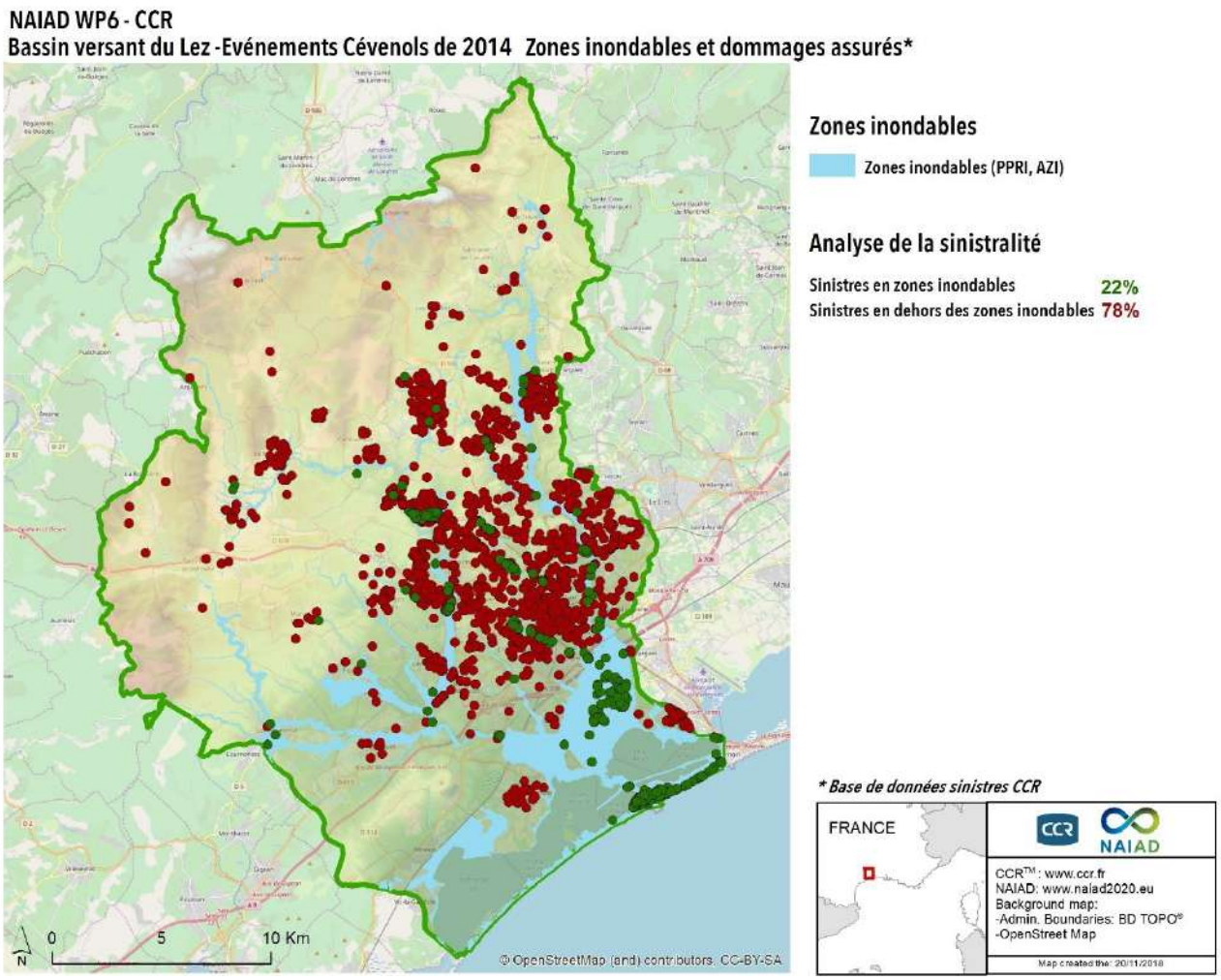


Figure 2 : Répartition des sinistres consécutifs aux événements Cévenols de 2014 à l'intérieur des zones inondables et en dehors de ces zones – Bassin versant du Lez (Montpellier, 34)

En agrégeant ces sinistres à une granularité de 500m, les différents degrés d'exposition et de vulnérabilité du bassin versant sont mis en avant. Les zones les plus exposées en termes de nombre de sinistres ressortent telles que le centre-ville de Montpellier, Grabels et Juvignac (figure 3). Ceci est notamment expliqué par la concentration de la population et par la grande imperméabilisation des sols dans ces secteurs. Les communes de Grabels et Juvignac ont certes été touchées par le débordement du Rieumassel, Soucarède et de la Mosson, néanmoins les sinistres ne sont pas uniquement localisés dans les zones de débordement.

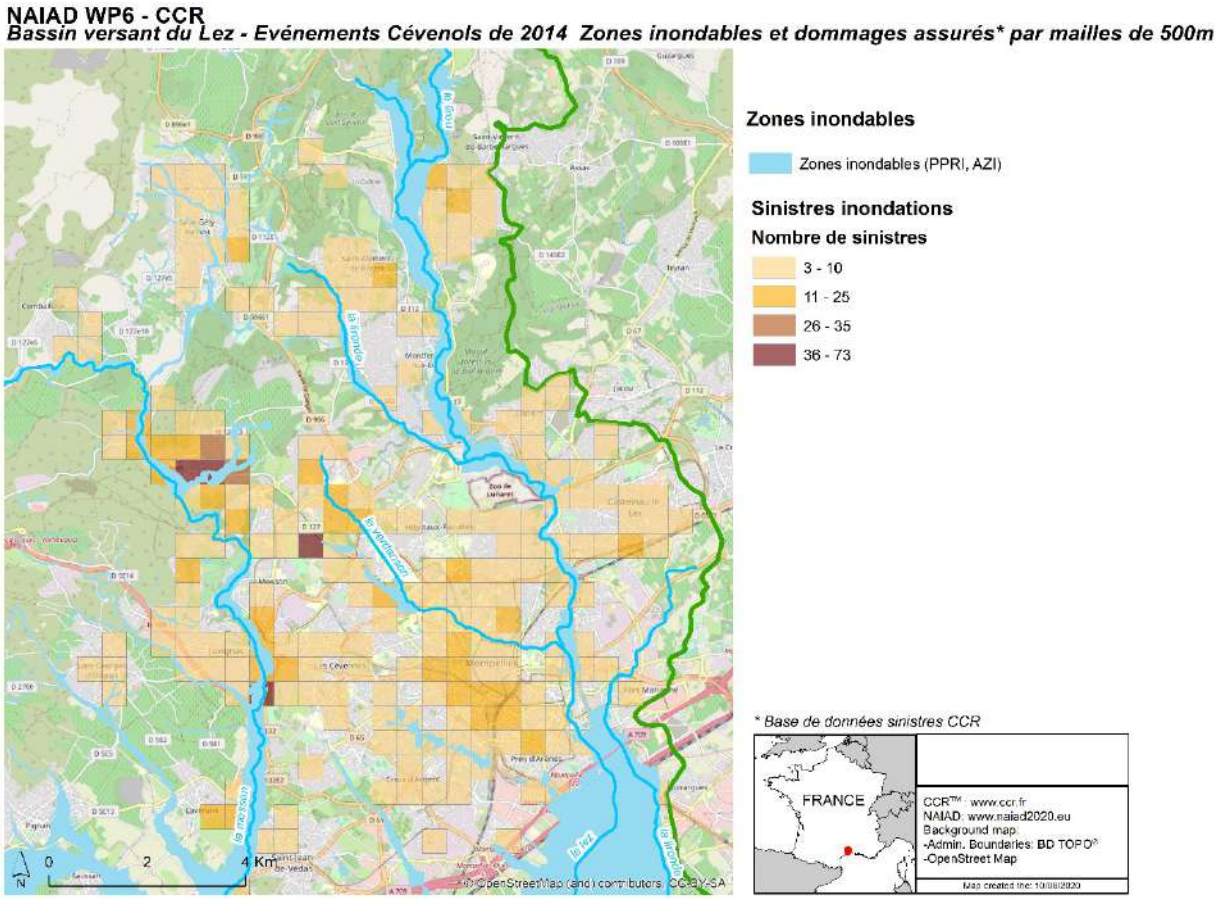


Figure 3 : Sinistres consécutifs aux événements Cévenols de 2014 agrégés à une maille de 500m – Bassin versant du Lez (Montpellier, 34)

A l'intérieur des zones de ruissellement du bassin versant, les sinistres des propriétaires de maisons individuelles représentent 45 % du total, les professionnels 17 % et les locataires de maisons, appartements ou commerce leur part représente 38 %. Les coûts moyens en zone de ruissellement dans le bassin versant sont moins élevés qu'en zone de débordement (tableau 3). La globalité des sinistres enregistre un coût moyen de 13k€ en zone d'aléa contre 6k€ hors zone d'aléa. Le rapport est similaire à ce que l'on retrouve à l'échelle nationale (tableau 4).

Type de risque	Coût moyen en aléa ruissellement	Coût moyen en aléa débordement
Propriétaires de maisons individuelles	6 k€	17k€
Professionnels	40 k€	38k€
Autres risques (locataires de maisons, appartements ou commerces)	5 k€	10k€

Tableau 3 : Coût moyen d'un sinistre par type de risque dans le bassin versant du Lez - SAGE. Comparaison entre le coût moyen en zone d'aléa de ruissellement et de débordement

A l'échelle métropolitaine, le coût moyen d'un sinistre en zone de ruissellement, que ce soit pour les particuliers ou pour les professionnels est moins élevé qu'en zone de débordement, même s'ils restent importants (tableau 4).

Tableau 3 : Coût moyen d'un sinistre par type de risque à l'échelle nationale. Comparaison entre le coût moyen en zone d'aléa de ruissellement et de débordement

Type de risque	Coût moyen en aléa ruissellement	Coût moyen en aléa débordement
Particuliers	7 k€	11 k€
Professionnels	20 k€	35 k€
Total	8 k€	14 k€

Aussi, concernant les courbes de dommages spécifiquement calibrées à l'échelle du bassin versant et pour les propriétaires de maisons individuelles, les taux de destructions moyens pour des ruissellements de 4-5 m^3/s par pixel de 25 m sont de l'ordre de 12 % (Marchal and Moncoulon 2019). Cette forte sinistralité est notamment corrélée à l'intensité du deuxième événement de septembre 2014.

CONCLUSIONS

L'apport des données de sinistralité dans la mesure de l'exposition des biens assurés a été démontré sur la base des études géostatistiques et d'intégration dans le modèle Cat Nat inondation de CCR. Ces données apportent en complément des informations sur les reconnaissances Cat Nat et l'évaluation des politiques de prévention financées par le Fonds Barnier. Les indicateurs et méthodes utilisés au sein de la Direction des Réassurances Publiques permettent de pleinement tirer parti des bases de données assurantielles détenues par CCR. Les conditions d'exploitabilité de ces données peuvent être indiquées dans le cadre de conventions avec les acteurs impliqués dans la gestion du risque (État, sociétés d'assurance, villes, établissements publics territorial de bassin etc.), les échanges avec différents acteurs participant à améliorer la connaissance du risque.

Concernant la mesure de l'exposition au péril inondation, les différentes études menées par CCR ont permis de souligner l'importance de la prise en compte des phénomènes de ruissellement, ces derniers engendrant une forte sinistralité en plus des phénomènes de débordement en cas de survenance d'événements. Les politiques de prévention (Directives Inondations ou la GEMAPI, gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations) commencent à considérer les risques liés au ruissellement depuis peu. En améliorant la connaissance et en analysant les données de sinistralité induites par le ruissellement, il est plus aisé de mesurer les effets de la concentration des biens dans les zones à risques et d'orienter ainsi les décisions relatives à la gestion des territoires.

REFERENCES

Caisse Centrale de Réassurance (2020a) Les catastrophes naturelles en France, bilan 1982 - 2019. Caisse Centrale de Réassurance, Paris, France

Caisse Centrale de Réassurance (2020b) Évaluation des impacts de la prévention des risques d'inondation sur la sinistralité. Caisse Centrale de Réassurance, Paris, France

Graveline N, Marchal R, Le Coent P, et al (2019) Deliverable 6.2 From hazard to risk: models for the DEMO – Lez. NAIAD Project, Grant Agreement n°730497, Paris, France

IPCC (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Le Coent P, Marchal R, Hérivaux C, et al (2019) Deliverable 6.3 DEMO Insurance value assessment report France – Lez. NAIAD Project, Grant Agreement n°730497, Paris, France

Marchal R, Moncoulon D (2019) Modélisation de l'efficacité et analyse coûts/bénéfices des Solutions fondées sur la Nature face aux risques d'inondation et de sécheresse, Projet H2020 NAIAD. In: Des

Solutions fondées sur la Nature pour s'adapter au changement climatique, Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation Française. Paris, France, pp 172–175

Onfroy et al., (2020) La modélisation du ruissellement pluvial : Aléa CCR à 25 mètres de résolution. Colloque SHF, Risque ruissellement : Diagnostic et solutions.

Rongiéras L, Wackernagel H, Chautru E, Farah G (2020) Modéliser les valeurs assurées. In: Rapport scientifique CCR 2019, CCR 2019. Paris, France, pp 56–58

Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J. I., Bates, P. D., Feyen, L., … Ward, P. J. (2012). Comparative flood damage model assessment: Towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *12*(12), 3733–3752.

Merz, B., H. Kreibich, R. Schwarze, & A. Thieken. 2010. "Review article 'Assessment of economic flood damage.'" *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10:1697–1724.

Meyer, V. et al. 2013. "Review article: Assessing the costs of natural hazards-state of the art and knowledge gaps." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13:1351–1373.

Impacts du changement climatique sur les pluies intenses et les crues en méditerranée (Tramblay *et al.*)

Impacts du changement climatique sur les pluies intenses et les crues en méditerranée

Tramblay Yves[1], Ribes Aurélien[2], Somot Samuel[2], Neppel Luc[1], Lucas-Picher Philippe[2], Freddy Vinet[3], Sauquet Eric[4]

[1] HSM (Univ. Montpellier, CNRS, IRD), Montpellier, France, yves.tramblay@ird.fr, luc.neppel@umontpellier.fr

[2] CNRM (Université de Toulouse, Météo-France, CNRS), Toulouse, France, aurelien.ribes@meteo.fr, p.lucas.picher@gmail.com, samuel.somot@meteo.fr

[3] GRED (Univ. Paul Valéry, IRD), Montpellier, France, freddy.vinet@univ-montp3.fr

[4] INRAE, UR RiverLy, Centre de Lyon-Villeurbanne, France, eric.sauquet@inrae.fr

Les crues ont des impacts socio-économiques importants tout particulièrement dans les régions méditerranéennes et il existe une forte interrogation quant à une éventuelle augmentation de leur intensité due au changement climatique. Sur le pourtour Méditerranéen, il est désormais établi que les précipitations extrêmes pourraient augmenter dans les scénarios climatiques futurs, suivant la tendance déjà amorcée dans les données observées. Néanmoins, les tendances observées dans le Sud de la France indiquent une baisse de la fréquence des crues dans la majorité des bassins, malgré l'augmentation des précipitations intenses à l'origine de ces épisodes, du fait de la baisse de l'humidité des sols qui peut fortement moduler la réponse hydrologique des bassins. A l'inverse, une tendance à l'augmentation de l'intensité des crues les plus extrêmes est observée dans certains bassins. Il est en effet impératif de différencier le comportement des différents types de bassins, urbains, naturels ou agricoles, à différentes échelles, face aux modifications du régime des pluies intenses. Si de nombreux travaux ont été effectués pour estimer les conditions climatiques futures, on ne connaît pas bien les modifications possibles des variables hydrologiques et des états de surface, avec des interactions complexes entre précipitations et processus d'infiltration sur les versants, qui peuvent fortement moduler la magnitude des crues. Il est donc nécessaire de mieux comprendre et quantifier la réponse hydrologique des cours d'eau face à ces changements climatiques et anthropiques.

Mots-clefs : Crues, Méditerranée, pluies intenses, changement climatique

Climate change impacts on extreme precipitation and floods in the Mediterranean

Floods have significant socio-economic impacts, particularly in the Mediterranean regions, and there is strong questionning about a possible increase in their intensity due to climate change. In the Mediterranean, it is now established that extreme precipitation could increase in future climate scenarios, following the trend already started in the observed data. Nevertheless, the trends observed in the South of France indicate a decrease in the frequency of floods in the majority of the basins, despite the increase in intense precipitation causing these episodes, due to the decrease in soil moisture which can strongly modulate the hydrological response of the basins. Conversely, a trend towards an increase in the intensity of the most extreme floods is observed in some basins. It is indeed imperative to differentiate the behavior of different types of basins, urban, natural or agricultural, at different scales, in the face of changes in the regime of extreme rainfall. Although a lot of work has been done to estimate future climatic conditions, we are not well aware of the possible modifications of hydrological variables and surface conditions, with complex interactions between precipitation and infiltration processes on hillslopes, which can strongly modulate the magnitude of floods. It is therefore necessary to better understand and quantify the hydrological response in a context of climatic and anthropogenic changes.

Key words: Floods, Mediterranean, extreme rainfall, climate change

INTRODUCTION

Les crues éclairs affectent régulièrement les régions Méditerranéennes surtout pendant l'automne. Llasat et al. [2013] indiquent une augmentation du nombre de crues provoquant des dommages entre 1981 et 2010 dans le sud de la France et le nord de l'Espagne, qu'ils attribuent à une vulnérabilité accrue et à des changements d'utilisation des terres. Les régions méditerranéennes françaises concentrent 66% du coût total des dommages causés par les inondations aux propriétés privées en France [Vinet, 2011] et le total des actifs perdus en raison des inondations augmente comme dans de nombreuses autres régions [Paprotny et al., 2018]. Une question importante est de savoir si cette augmentation est reliée à un changement d'intensité de l'aléa ou bien une vulnérabilité croissante des territoires à ces épisodes. A l'heure actuelle, il existe des différences systématiques entre les projections sur l'évolution du risque d'inondation en Europe du Sud [Italie, Grèce, France, Péninsule ibérique) dans la plupart des études [Kundzewicz et al., 2016]. En effet, certaines études indiquent une augmentation dans le sud de l'Europe [Alfieri et al., 2017] tandis que d'autres suggèrent une diminution [Thober et al., 2018]. Ces différences sont probablement dues à l'utilisation de modèles et scénarios climatiques différents mais aussi causées par l'utilisation de modèles hydrologiques à grande échelle généralement calibrés et validés sur un nombre limité de grands bassins. Or ce type de modèle hydrologique global (LISFLOOD, VIC, HYPE…) n'est généralement pas adapté aux petits bassins fluviaux de moins de 500 km², soit la taille de bassin versant typique de la région méditerranéenne qui peut générer des crues dévastatrices [Merheb et al., 2016]. L'objectif de cette contribution est de faire le bilan des connaissances sur l'évolution des pluies extrêmes et des crues dans les régions Méditerranéennes françaises.

CHANGEMENTS OBSERVÉS ET SIMULÉS SUR LES PLUIES EXTRÊMES

Les épisodes de fortes précipitations observés dans les régions méditerranéennes comptent parmi les phénomènes météorologiques les plus extrêmes en France métropolitaine avec des cumuls sur 24 h qui dépassent fréquemment les 100 mm. Plusieurs travaux ont étudié l'évolution de ces épisodes de pluies intenses dans le Sud de la France et tendent à montrer une augmentation de leur intensité en particulier depuis la décennie 1980 [Blanchet et al., 2018; Soubeyroux et al., 2015]. L'étude la plus complète à ce jour est celle de Ribes et al. [2019] portant sur près de 700 stations sur la période 1958-2015. Les résultats indiquent une intensification significative des précipitations extrêmes (Figure 1), estimée à +22 % entre 1961 et 2015, mais avec une fourchette d'incertitude assez large, entre +7 % et +39 % [Ribes et al., 2019]. Cette fourchette d'incertitude traduit la difficulté à quantifier précisément le changement climatique dans les séries observées, du fait de la variabilité naturelle du climat, particulièrement forte pour les événements de fortes précipitations. L'intensification observée est cohérente, bien que plutôt supérieure, avec celle simulée par les modèles de climat (i.e. de l'ordre de quelques % par degré de réchauffement). L'étude d'autres indicateurs tels que le nombre d'événements, leur superficie, ou le volume d'eau précipitée au-delà d'un seuil, conduisent aux mêmes conclusions quant à l'évolution récente de ces événements. En complément de ce travail basé sur les observations, Luu et al. [2018] ont montré à l'aide d'un ensemble de modèles climatiques régionaux que ces changements d'intensité des pluies intenses étaient également détectables dans les modèles de climat et pouvaient être attribués à l'augmentation des températures dans la région.

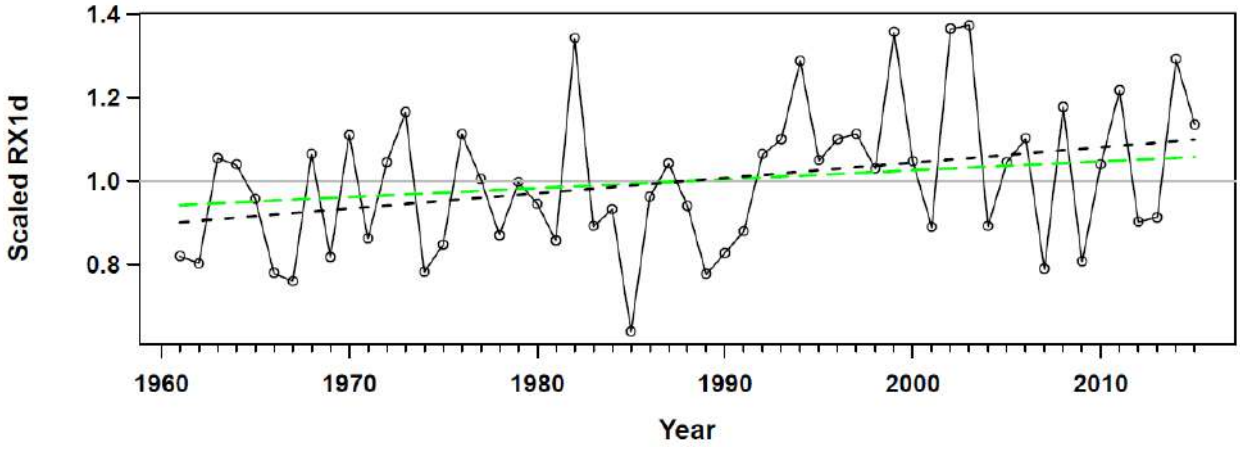


Figure 1 : Série temporelle de l'indicateur régional de l'intensité des épisodes de fortes précipitations, sur la période 1961-2015 sur le pourtour Méditerranéen. L'indicateur est construit à partir des maximums annuels renormalisés, et est donc sans unité (la valeur 1 correspond à l'intensité moyenne). *Pointillés noirs* : tendance linéaire estimée sur cet indicateur. *Pointillés verts* : tendance linéaire attendue en suivant la relation de Clausius-Clapeyron (+6,8 %/K, soit +11,8 % sur la période compte tenu du réchauffement observé de +1.7K). D'après Ribes et al. [2019].

Pour les scénarios futurs, la plupart des études convergent vers une augmentation probable des pluies extrêmes [Rajczak et Schär, 2017]. A l'échelle des bassins versants Méditerranéens, Tramblay et Somot, [2018] ont montré grâce à un ensemble de modèles de climat régionaux une augmentation des pluies intenses dans les bassins du Sud de la France, avec une bonne convergence entre les modèles. L'ordre de grandeur des changements projetés des précipitations extrêmes à la fin du XXIe siècle, avec un changement moyen de l'ordre de +10% mais qui est très variable selon les modèles de climat et les bassins. Ces tendances sont détectées avant l'an 2000 dans la plupart des cas, conformément aux études basées sur les observations dans cette même région. Tous ces travaux ont été menés sur les précipitations extrêmes au pas de temps journalier (total sur 24 h), or il est probable que la hausse des températures induise également des changements importants à des pas de temps infra-journaliers sur les épisodes convectifs. L'étude de ces changements sur l'intensité des précipitations, la durée des épisodes pluvieux intenses et leur étendue spatiale nécessite des bases de données spatialisées sur les pluies à des pas de temps fin, horaires ou moins, ainsi que des modèles de climat à haute résolution spatiale et temporelle, comme les modèles régionaux de climat permettant la convection récemment développés [Prein et al., 2015 ; Coppola et al., 2018].

CHANGEMENTS OBSERVÉS SUR LES CRUES

Une étude récente a montré que malgré l'augmentation des événements de précipitations extrêmes, on ne retrouve pas de hausse généralisée des épisodes de crues dans le sud de la France [Tramblay et al., 2019]. Cette étude, qui se base sur 170 bassins versants situés en zone de climat Méditerranéen, visait à détecter d'éventuelles tendances sur l'occurrence et l'intensité des crues, et attribuer ces changements à différents facteurs, comme les précipitations extrêmes, l'humidité des sols ou l'occupation des terres. Les résultats ont montré que pour quelques bassins seulement, l'intensité des crues montre une tendance à la hausse reliée à l'augmentation des pluies intenses. A l'inverse, une tendance globale à une diminution du nombre de crues annuelles est observée (Figure 2). Dans l'ensemble, il y a beaucoup plus de tendances détectées sur l'occurrence annuelle des crues que sur leur intensité. La diminution de l'humidité du sol semble être un moteur important de ces changements, en effet dans tous les bassins une augmentation de la température et de l'évapotranspiration associée à une diminution des précipitations conduit à une réduction de l'humidité du sol au fil du temps.

Ce travail suggère que la diminution de l'humidité du sol peut compenser l'augmentation des précipitations extrêmes et ainsi entraîner des crues moins fréquentes. Ces changements sont principalement observés pour les grands bassins agricoles, avec une faible urbanisation ou encore dans les zones karstiques. Une conclusion importante est que pour les mêmes facteurs climatiques à grande échelle (en termes de température, d'évapotranspiration et de précipitations), les tendances sur les crues dans différents bassins peuvent être différentes, modulées par des caractéristiques différentes de topographie, de types de sols et de leur occupation. Il importe aussi de noter que des changements dans l'intensité des précipitations se répercutent de manière très différente selon les échelles spatiales, avec une plus forte sensibilité des petits bassins et des zones qui favorisent le ruissellement de surface comme les périmètres urbanisés.

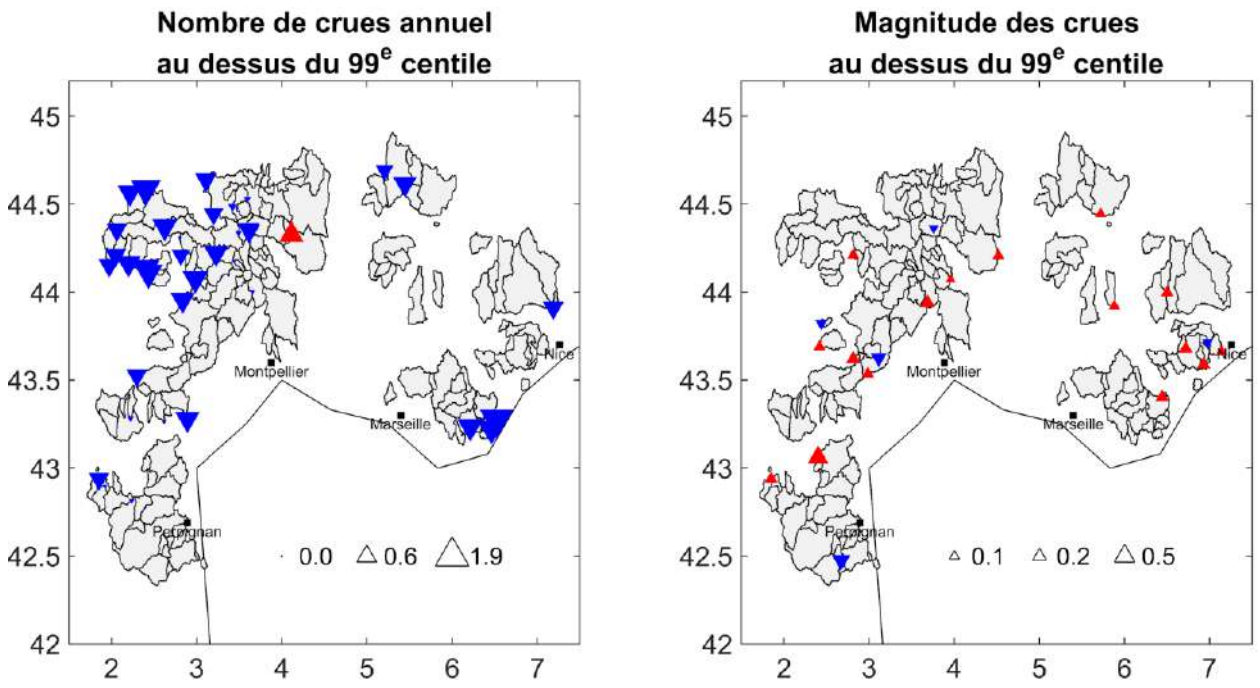


Figure 2 : Tendances observées sur l'occurrence annuelle des débits de crue (gauche) et leur magnitude (droite), en prenant pour seuil le 99ème centile des débits journaliers. Les triangles bleus indiquent une tendance significative à la baisse, les triangles rouges une tendance à la hausse, suivant le test de Mann-Kendall au seuil de significativité de 10%. D'après Tramblay et al., [2019].

CONCLUSIONS

Les études récentes montrent une augmentation de l'intensité et de l'occurrence des précipitations intenses, qui ne se traduit pas par une hausse généralisée des crues. Pour certains bassins méditerranéens, l'augmentation des fortes précipitations associée à un nombre réduit de jours de pluie et une évapotranspiration plus intense pourrait diminuer la teneur en eau du sol, réduisant ainsi le ruissellement. En revanche, des pluies plus intenses dans des zones urbanisées et imperméables, ou encore sur des sols nus soumis à des phénomènes de battance, pourraient augmenter le ruissellement de surface et donc l'ampleur des inondations. Il est donc nécessaire d'utiliser des modèles hydrologiques ou de surface capables de représenter ces processus. Par ailleurs, si beaucoup d'études ont été réalisées pour estimer les conditions climatiques futures, les changements des conditions de surface qui peuvent fortement moduler la génération des crues, ne sont pas bien documentés à l'échelle régionale. Des études à des échelles plus fines s'avèrent donc nécessaires, notamment pour les plus petits bassins soumis aux crues torrentielles.

Enfin, cette absence de tendance à la hausse des crues doit être mise en perspective avec l'augmentation observée de la vulnérabilité à ces épisodes. Les zones proches de la Méditerranée ont connu une augmentation de la population et une extension des zones urbanisées, entraînées en partie par l'augmentation des activités touristiques [Vinet, 2011]. L'analyse des tendances sur l'aléa naturel doit être croisée avec l'exposition (par exemple, la population dans les zones sujettes aux inondations) et les données de vulnérabilité (par exemple, le vieillissement de la population à l'avenir ou les caractéristiques des bâtiments) pour anticiper l'évolution des dommages en relation avec les crues soudaines dans le bassin méditerranéen [Ruin et al., 2008 ; Boudou et al., 2016]. Pour ceci, il est nécessaire de développer des bases de données sur la vulnérabilité et l'exposition à analyser en lien avec les données hydrométéorologiques [Vinet et al., 2019].

Références bibliographiques

Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., et al. (2017). - Global projections of river flood risk in a warmer world. Earth's Future, 5(2), 171–182. https://doi.org/10.1002/2016EF000485

Blanchet, J., Molinié, G., & Touati, J. (2018).- Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. Climate Dynamics, 51(3), 799–812. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3122-7

Boudou, M., Lang, M., Vinet, F., & Cœur, D. (2016).- Comparative hazard analysis of processes leading to remarkable flash floods (France, 1930–1999). Journal of Hydrology, 541, 533–552. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.032

Coppola, E., Sobolowski, S., Pichelli, E., Raffaele, F., Ahrens, B., Anders, I., et al. (2018).- A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. Climate Dynamics. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8

Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Dankers, R., Hirabayashi, Y., Kanae, S., Hattermann, F. F., et al. (2016).- Differences in flood hazard projections in Europe – their causes and consequences for decision making. Hydrological Sciences Journal, 02626667.2016.1241398. https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1241398

Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Petrucci, O., Pasqua, A. A., Rosselló, J., Vinet, F., & Boissier, L. (2013).- Towards a database on societal impact of Mediterranean floods within the framework of the HYMEX project. Natural Hazards and Earth System Sciences, 13(5), 1337–1350. https://doi.org/10.5194/nhess-13-1337-2013

Luu, L. N., Vautard, R., Yiou, P., van Oldenborgh, G. J., & Lenderink, G. (2018). Attribution of Extreme Rainfall Events in the South of France Using EURO-CORDEX Simulations. Geophysical Research Letters. https://doi.org/10.1029/2018GL077807

Merheb, M., Moussa, R., Abdallah, C., Colin, F., Perrin, C., & Baghdadi, N. (2016).- Hydrological response characteristics of Mediterranean catchments at different time scales: a meta-analysis. Hydrological Sciences Journal, 61(14), 2520–2539. https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1140174

Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Nápoles, O., & Jonkman, S. N. (2018).- Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. Nature Communications, 9(1), 1985. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04253-1

Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., et al. (2015).- A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. Reviews of Geophysics, 53(2), 323–361. https://doi.org/10.1002/2014RG000475

Rajczak, J., & Schär, C. (2017).- Projections of Future Precipitation Extremes Over Europe: A Multimodel Assessment of Climate Simulations: Projections of Precipitation Extremes. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122(20), 10,773-10,800. https://doi.org/10.1002/2017JD027176

Ribes, A., Thao, S., Vautard, R., Dubuisson, B., Somot, S., Colin, J., et al. (2019).- Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. Climate Dynamics, 52(1–2), 1095–1114. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2

Ruin, I., Creutin, J.-D., Anquetin, S., & Lutoff, C. (2008).- Human exposure to flash floods – Relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of September 2002 in Southern France. Journal of Hydrology, 361(1–2), 199–213. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.044

Soubeyroux, J.-M., Neppel, L., Veysseire, J.-M., Tramblay, Y., Carreau, J., & Gouget, V. (2015).- Evolution des précipitations extrêmes en France en contexte de changement climatique. La Houille Blanche, (1), 27–33. https://doi.org/10.1051/lhb/2015004

Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Marx, A., Pan, M., Rakovec, O., et al. (2018).- Multi-model ensemble projections of European river floods and high flows at 1.5, 2, and 3 degrees global warming. Environmental Research Letters, 13(1), 014003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9e35

Tramblay, Y., & Somot, S. (2018).- Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. Climatic Change, 151(2), 289–302. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5

Tramblay, Y., Mimeau, L., Neppel, L., Vinet, F., & Sauquet, E. (2019). Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins. Hydrology and Earth System Sciences, 23(11), 4419–4431. https://doi.org/10.5194/hess-23-4419-2019

Vinet, F., Bigot, Petrucci, Papagiannaki, Llasat, Kotroni, et al. (2019).- Mapping Flood-Related Mortality in the Mediterranean Basin. Results from the MEFF v2.0 DB. Water, 11(10), 2196. https://doi.org/10.3390/w11102196

Vinet, F. (2011).- Flood Risk Assessment and Management in France. The Case of Mediterranean Basins, Flood Prevention and Remediation (WIT Press). Southampton, UK.

Quantification des ruissellements sur les petits bassins versants limoneux et karstiques de Normandie (Richet *et al.*))

QUANTIFICATION DES RUISSELLEMENTS SUR LES PETITS BASSINS VERSANTS LIMONEUX ET KARSTIQUES DE NORMANDIE

RICHET Jean-Baptiste[1], OUVRY Jean-François[1] & PAK Lai Ting[2]

[1] AREAS - 2 avenue Foch F-76460 Saint-Valery-en-Caux- jb.richet@areas.asso.fr

[2] CIRAD - Quartier Petit Morne - BP 214 - 97285 Le Lamentin Cedex 2 - lai-ting.pak@cirad.fr

Les plateaux limoneux de Normandie, cultivés en grandes cultures, sont très sensibles à la battance et aux coulées d'eaux boueuses. La vulnérabilité de ces territoires au risque ruissellement-érosion est élevée et diffuse. Les pertes liées au karst sur le chemin de l'eau rendent les références hydrologiques nationales mal adaptées pour répondre aux besoins de dimensionnement des ouvrages de protections nécessaires en têtes de bassins versants. Le suivi hydrométrique de Bourville (BRVL, 10,45 km² sans écoulement permanent, suivi depuis 1995, représentatif du pays de Caux) contribue à combler ce manque. FDTL est un bassin versant de 1,45 km² inclus dans BRVL instrumenté entre 2011 et 2019. BRVL (resp. FDTL) présente un ruissellement annuel moyen de 10,8 mm (resp. 37,9 mm) dont 7,4 mm en hiver (resp. 26,4 mm) et jusqu'à 4 ruissellements de plus de 3 mm par campagne (resp. 7). Le débit instantané décennal est estimé à 5,9 m³/s (resp. 1,2 m³/s), et la lame ruisselée décennale de 24 h à 7,9 mm (resp. 13,9 mm). Le curve number *moyen des plus grosses crues hivernales est de 83,2 (resp. 87,9). L'écart entre les valeurs des deux sites met en évidence les pertes par infiltration ou engouffrement le long des talwegs. L'intensité moyenne des pluies génératrices des plus grosses crues est inférieure à 2 mm/h : une augmentation des capacités d'infiltration des parcelles en hiver réduirait sensiblement les volumes ruisselés.*

Mots-clefs : ruissellement, petit bassin versant, battance, karst, hydrologie.

Runoff quantification on small loamy and karstic catchments of Normandy

The deep loamy soils of the open-field intensive arable crop-farming area known as the Pays de Caux in north-west France are subject to sealing, so runoff and erosion occur every year. The vulnerability of these territories to runoff and erosion damages is high and widespread. National hydrological references are not accurate, as part of the runoff is lost along waterways into karst holes. Yet, the need for dimensioning protecting infrastructures for catchments of a few km² is frequent. Data from the measuring site of Bourville (BRVL, 10.45 km², monitored since 1995, representative for pays de *Caux) contribute to fill this need. FDTL is part of BRVL, 1.45 km² wide, monitored since 2011. BRVL (resp. FDTL) has an average runoff of 10.8 mm (resp. 37.9 mm), of which 7.4 mm occurs in winter (resp. 26.4 mm), and up to 4 runoff events over 3 mm per year (resp. 7). The 10-year return period flow rate in estimated at 5.9 m³/s (resp. 1,2 m³/s), and the 10-year return period depth of runoff in 24 h at 7.9 mm (resp. 13.9 mm). The average curve number of biggest winter floods is 83.2 (resp. 87.9). The gap between the values of the two catchments highlights the runoff lost along the waterway by infiltration or into sinkholes. The average intensity of rainfalls generating the biggest foolds is lower than 2 mm/h: rising field infiltration capabilities in winter would significantly lower runoff volumes.*

Key words : runoff, small catchment, sealing, karst, hydrology.

INTRODUCTION

Sur les plateaux de l'ex-Haute-Normandie, la couverture limoneuse des sols, jointe à leur occupation en grandes cultures, rend ces territoires particulièrement sensibles à la battance. En hiver, la capacité d'infiltration se situe entre 2 et 10 mm/h [Le Bissonnais et al. 2005]. L'aléa ruissellement y est donc à la fois élevé et diffus. Or, dans ces secteurs d'habitat dispersé, les enjeux sont nombreux et disséminés en fond de vallées sèches. Par conséquent, la vulnérabilité au risque ruissellement-érosion est également élevée et diffuse. Par exemple, le territoire du *SAGE des six vallées*, d'une surface de 398 km² à l'ouest de Rouen, a recensé 18958 enjeux vulnérables à l'aléa érosion, dont 425 présentent une vulnérabilité très élevée.

Paradoxalement, à plus petite échelle, une forte proportion des écoulements n'atteint pas le réseau hydrographique peu dense : les points d'engouffrements liés au karst (localement appelés *bétoires*) sont nombreux et actifs en fonds de vallons [David 2009]. Toutefois, à l'échelle de quelques kilomètres carrés, l'importance des pertes karstiques est très variable d'un secteur à l'autre, et variable dans le temps.

Les besoins de protection des enjeux sont donc fréquents, avec des surfaces amont ne faisant parfois que quelques dizaines d'hectares. Ainsi, en Seine-Maritime, 1391 ouvrages hydrauliques ont été construits pour

la lutte contre les ruissellements, dont seulement un quart font 5000 m^3 ou plus [AREAS 2020], témoignant de la taille réduite du bassin versant des ¾ de ces ouvrages. Par conséquent, les références hydrologiques nationales sont mal adaptées à ces besoins de dimensionnement.

Les données du bassin versant de Bourville contribuent à combler ce manque. Il a été choisi pour sa représentativité des bassins érosifs du pays de Caux et des régions limoneuses en grandes cultures. Ses données ont largement été utilisées pour dimensionner les ouvrages de lutte contre les inondations de la région. Le suivi hydrométrique, qui y est réalisé par l'AREAS depuis 1995, a été renforcé sur la période 2008-2018 par un suivi qualitatif des ruissellements et un suivi des itinéraires techniques de chaque parcelle. Le sous-bassin versant FDTL de 145 ha a également été instrumenté et suivi de 2011 à 2019.

LE BASSIN VERSANT DE BOURVILLE

Le bassin versant de Bourville (BRVL) couvre 10,45 km² à l'amont du bassin versant du Dun, petit fleuve côtier du pays de Caux, en Normandie. C'est un plateau calcaire tendre karstifié recouvert de limons éoliens. Le relief y est ondulé, avec des pentes omniprésentes de 2 à 5 % en zone labourée, et des pentes plus fortes lorsque les vallées sèches incisent le plateau. Ce bassin versant (BV) présente une forte proportion (88 %) de surface agricole utile (SAU) (Figure 1). Il ne présente pas d'écoulement permanent. L'hydrométrie y est

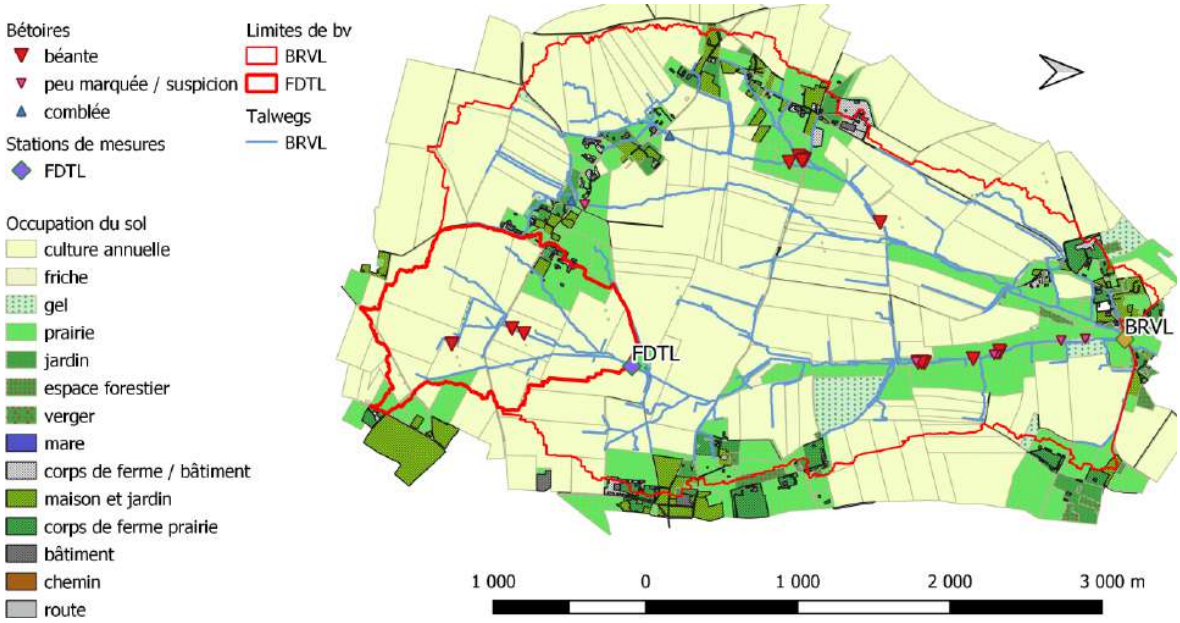


Figure 1 : occupation du sol du bassin versant de Bourville

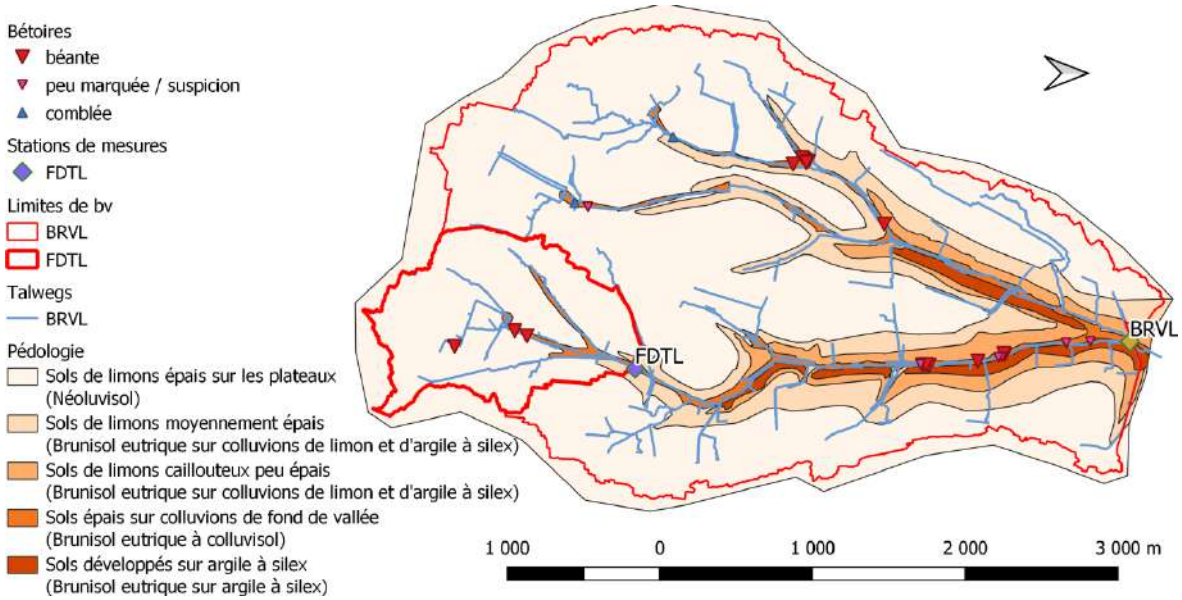


Figure 2 : carte des sols du bassin versant de Bourville et de ses points d'engouffrement karstiques (bétoires)

suivie depuis 1995. Le suivi a été renforcé en 2007 pour la qualité des eaux, et une station hydrométrique a été construite sur un sous-bassin versant appelée FDTL en 2011.

Le sol dominant est le néoluvisol, comme le montre la Figure 2. Cette carte est construite à dire d'expert, sur la base de la carte des sols de Haute-Normandie [CEN Normandie Seine 2018], de la carte géologique du BRGM et du levé topographique LiDaR. Néoluvisol et brunisol eutrique à colluvisol sont les sols les plus sensibles à la battance et à l'érosion hydrique (indice 5/5 pour chacun de ces paramètres dans la méthode MESALES [le Bissonnais et al., 1998]).

Le bassin versant a une vocation agricole marquée, avec une orientation polyculture et secondairement polyculture-élevage. Le Tableau 1 donne l'occupation du sol de BRVL par grandes masses, et la Figure 1 donne leur répartition géographique. Le Tableau 2 donne les proportions des principales cultures au sein des terres labourées (TL).

Tableau 1 : répartition moyenne de l'occupation du sol par BV

(moyenne en ha)	BRVL	FDTL
Surface total	1045	145
Surfaces boisées	37	2
S non agricoles (villages, voiries)	59	4
Surfaces en herbe	186	14
Surfaces cultivées en labour	763	125

Tableau 2 : proportion moyenne des principales cultures par rapport aux surfaces labourées à BRVL

Culture	% des TL
Blé d'hiver	40,3
Colza	12,9
Escourgeon	7,0
Lin	15,5
Betteraves sucrière	7,4
Maïs ensilage	6,3
Pommes de terre	6,5

Ce bassin versant peut être qualifié de « pire cas réaliste » vis-à-vis des ruissellements et de l'érosion pour le nord-ouest de la France. Ses données sont disponibles auprès de l'AREAS sur simple demande.

HYDROLOGIE DU BASSIN VERSANT

Deux stations hydro-météorologiques complètes

Le site de BRVL est équipé d'un déversoir à seuil court de forme triangulaire. Les mesures de hauteur d'eau se font à l'aide d'un piézomètre dans un puits de tranquillisation. La courbe de tarage est issue d'un ensemble de jaugeages au vélocimètre, visibles sur la Figure 3. Le site FDTL est équipé d'un canal trapézoïdal supercritique [Kilpatrick & Schneider 1983]. La mesure de la hauteur d'eau se fait dans un puits de tranquillisation par un piézomètre. Sa courbe de tarage et les jaugeages sur lesquelles elle s'appuie sont sur la Figure 4. Chacun des deux sites est équipé d'un pluviomètre à auget basculeur.

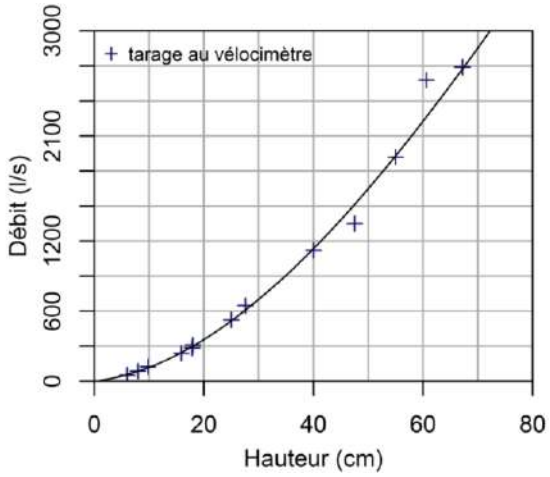


Figure 3 : courbe de tarage de BRVL

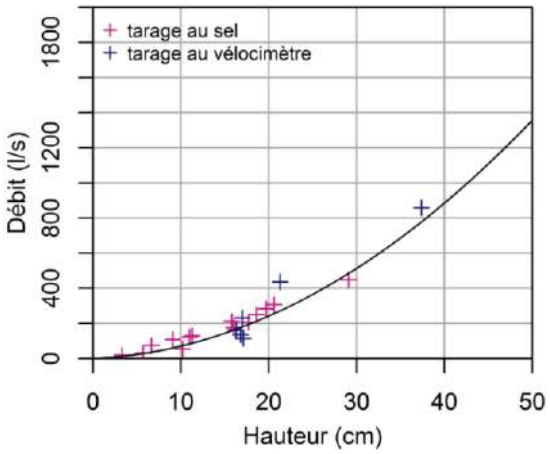


Figure 4 : courbe de tarage de FDTL

Variabilités annuelle et saisonnière de la pluie

La pluie moyenne sur une campagne à BRVL est de 765 mm (calcul 2008-2018 sans les campagnes de 2014 et 2015). Cette valeur varie entre 561 mm (campagne incomplète de 2017) et 940 mm (campagne

incomplète de 2018) (Figure 5). En moyenne sur une campagne, 122 averses sont identifiées (au moins 3 h séparent deux événements consécutifs et cumul de pluie strictement supérieur à 1 mm). Ces averses peuvent être classées selon quatre catégories :

- 1 < lame ≤ 5 mm : celles-ci représentent en moyenne 65 % des averses de la campagne et 27 % de la pluie annuelle ;
- 5 < lame ≤ 15 mm : en moyenne 28 % des événements de l'année et 37 % de la pluie annuelle ;
- 15 < lame ≤ 30 mm : en moyenne 5 % des événements de l'année et 17 % de la pluie annuelle ;
- 30 mm < lame : jusqu'à 4 averses par campagne et en moyenne 11 % de la pluie annuelle.

Les pluies ne sont pas uniformément réparties tout au long de la campagne. À BRVL, les pluies moyennes durant l'automne, l'hiver, le printemps et l'été sont de 253 mm, 235 mm, 134 mm et 142 mm, respectivement.

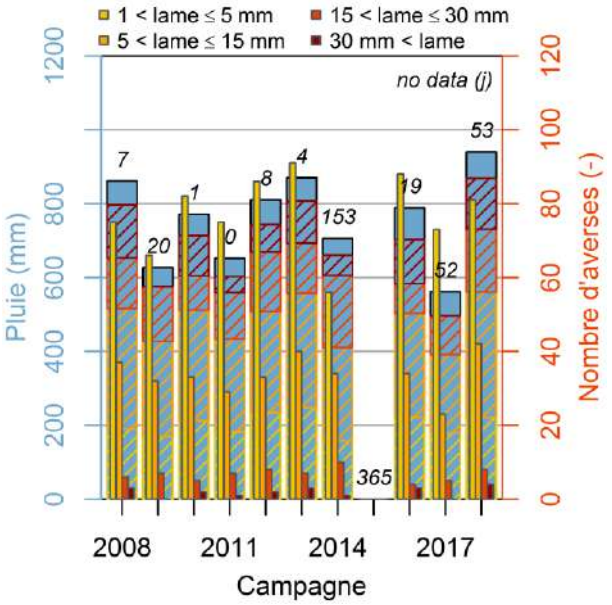


Figure 5. Lame de pluie (histogramme unique) et nombre d'événements (histogrammes groupés) par campagne selon quatre catégories d'averses à BRVL

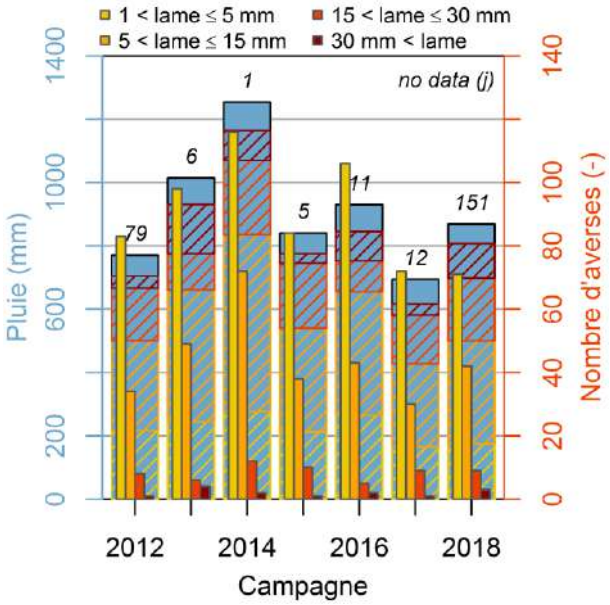


Figure 6. Lame de pluie (histogramme unique) et nombre d'événements (histogrammes groupés) par campagne selon quatre catégories d'averses à FDTL

À FDTL (Figure 6), la pluie moyenne sur une campagne y est de 917 mm (calcul ne comprenant pas la campagne de 2018). Cette valeur varie entre 694 mm (campagne 2017) et 1254 mm (campagne 2014). Il existe donc un gradient de précipitation décroissant d'amont en aval.

Variabilités annuelle et saisonnière du ruissellement à BRVL

Cette analyse a été réalisée sur les campagnes de 2008 à 2018.

En moyenne sur une campagne, le ruissellement est de 112600 m3, équivalant à 10,8 mm ramené à la surface totale du BV (Figure 7), réparti entre 26 crues (une crue est définie par un volume supérieur à 200 m3 et un débit de pointe supérieur à 30 l/s). Ces crues peuvent être classées selon trois catégories :

- 0,02 < lame ≤ 1 mm : celles-ci représentent en moyenne 92 % des crues de la campagne et 25 % du ruissellement annuel ;
- 1 < lame ≤ 3 mm : jusqu'à 4 crues par campagne et en moyenne 17 % du ruissellement annuel ;
- 3 mm < lame : jusqu'à 4 crues par campagne et en moyenne 51 % du ruissellement annuel.

La lame de 3 mm est le seuil d'un *événement majeur générateur de désordres hydrologiques* sur le BV [Richet & Helloco, 2009].

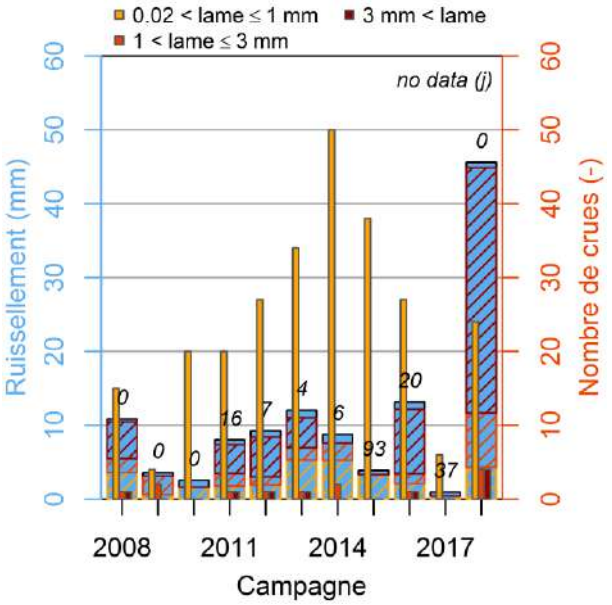


Figure 7. Lame de ruissellement (histogramme unique) et nombre d'événements (histogrammes groupés) par campagne selon quatre catégories de crues à BRVL

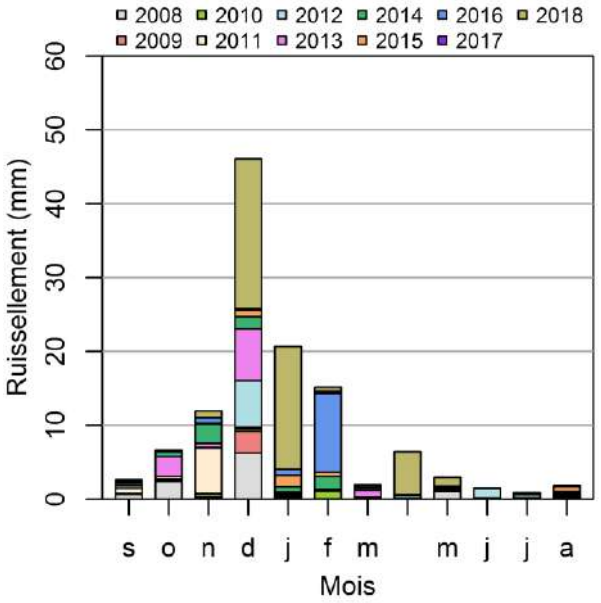


Figure 8. Lame de ruissellement par mois cumulé sur onze campagnes selon la campagne à BRVL

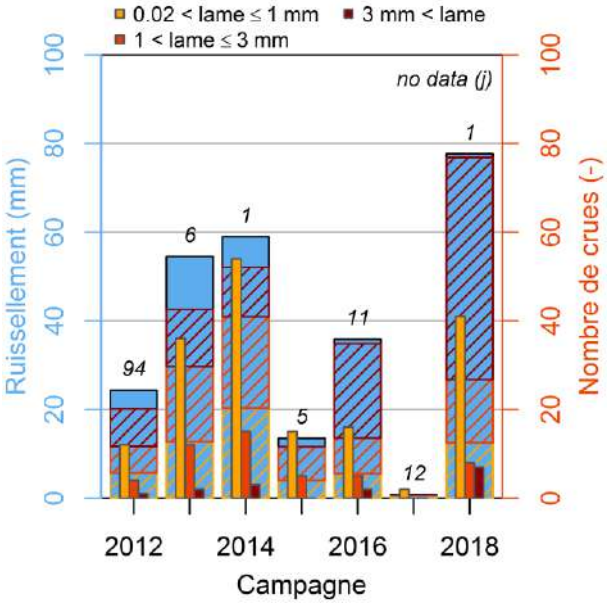


Figure 9. Lame de ruissellement (histogramme unique) et nombre d'événements (histogrammes groupés) par campagne selon quatre catégories de crues à FDTL

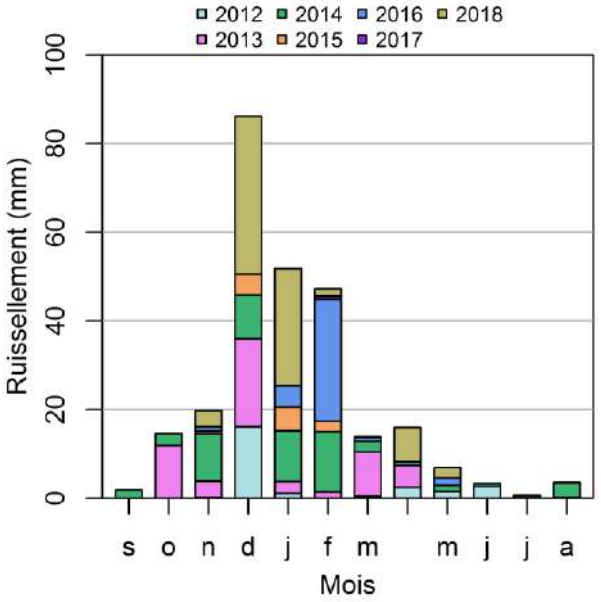


Figure 10. Lame de ruissellement par mois cumulé sur sept campagnes selon la campagne à FDTL

En accord avec les mesures de pluie, les mois d'automne-hiver présentent des lames plus élevées que le reste de la campagne et représentent en moyenne 87 % des ruissellements totaux (Figure 8). Les ruissellements moyens durant l'automne, l'hiver, le printemps et l'été sont de 1,9 mm, 7,4 mm, 1,0 mm et 0,4 mm, respectivement.

Variabilités annuelle et saisonnière du ruissellement à FDTL

Cette analyse a été réalisée sur les campagnes de 2012 à 2018.

En moyenne sur une campagne, le ruissellement est de 55000 m3, équivalant à 37,9 mm ramené à la surface totale du SBV (Figure 9), réparti entre 34 crues (une crue est définie par un volume supérieur à 100 m3 et un débit de pointe supérieur à 8 l/s). Ces crues peuvent être classées selon trois catégories :

- 0,07 < lame ≤ 1 mm : celles-ci représentent en moyenne 73 % des crues de la campagne et 23 % du ruissellement annuel ;
- 1 < lame ≤ 3 mm : en moyenne 20 % des crues de la campagne et 28 % du ruissellement annuel ;

– 3 mm < lame : jusqu'à 7 crues par campagne et en moyenne 39 % du ruissellement annuel.

En accord avec les mesures de pluie, les mois d'automne-hiver présentent des ruissellements plus importants que le reste de la campagne et représentent 83 % des ruissellements totaux (Figure 10). Les ruissellements moyens durant l'automne, l'hiver, le printemps et l'été sont de 5,2 mm, 26,4 mm, 5,2 mm et 1,1 mm, respectivement.

PERIODES DE RETOUR DES DEBITS ET DES LAMES RUISSELEES

Les mesures accumulées depuis 1995 à BRVL et depuis 2011 à FDTL ont permis une description statistique des débits instantanés et des lames ruisselées.

Périodes de retour des débits instantanés

Pour pouvoir établir des statistiques sur les débits instantanés de BRVL, deux types de corrections ont dû être apportés. Jusqu'en 2014, le passage sous voirie servant d'exutoire à BRVL avait un débit limité, et de l'eau s'accumulait en amont de la route départementale dès que le débit dépassait 3 m^3/s. Une correction manuelle à volume constant a été pratiquée. Cette correction a été appliquée à toutes les crues concernées, parmi lesquelles celles retenues pour les campagnes 2000 et 2001. Par ailleurs, en 2011, une digue a été construite sur le talweg ouest, avec une capacité d'environ 18 000 m^3, et un débit de fuite de l'ordre de 0,4 m^3/s. L'enregistrement du remplissage de cette retenue et la mesure des débits à l'amont de la zone inondable ont permis de reconstituer ce qu'aurait été la crue à BRVL en l'absence de la digue. L'influence de cette digue est sensible sur les maximales annuelles de 2012, 2013, 2016 et 2018. Seul l'événement maximal de 2012 (QIX = 1,91 m^3/s) n'a pu être corrigé, faute d'enregistrement. En disqualifiant la campagne 2012, l'effectif est de 23 débits maxima annuels pour cet ajustement. À FDTL, il est de 8. Le résultat des ajustements est donné sur la Figure 11.

Pour comparer les valeurs des deux bassins versants, les débits ont été divisés par la surface de leur bassin versant portée à la puissance 0,8 [Laborde 2009, page 138] (Figure 12).

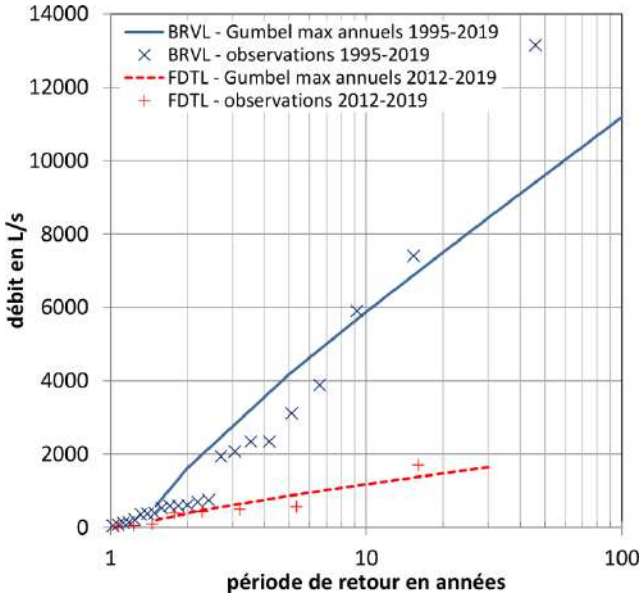


Figure 11 : périodes de retour des débits instantanés à BRVL et FDTL, observations et ajustement à la loi de Gumbel

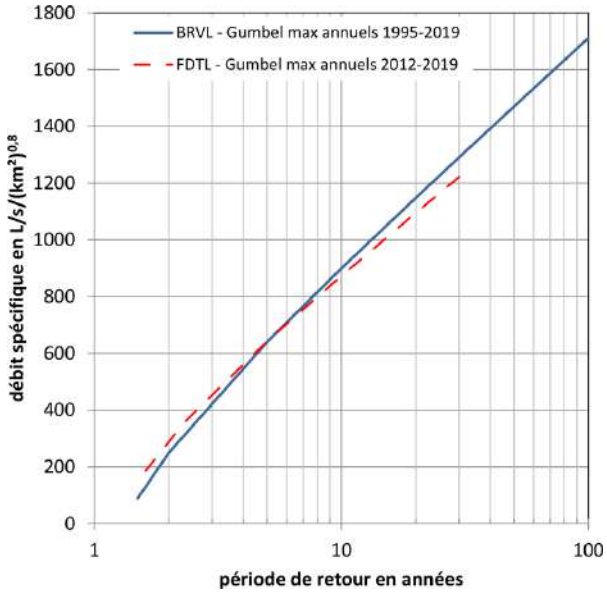


Figure 12 : périodes de retour des débits spécifiques instantanés à BRVL et FDTL (surface à la puissance 0,8)

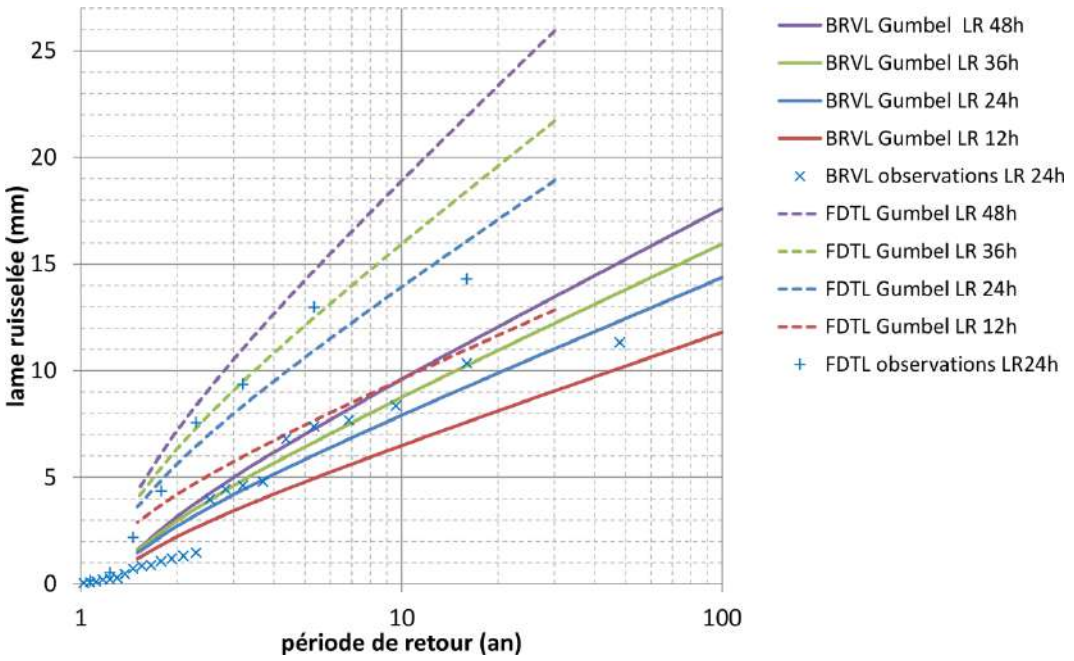


Figure 13 : périodes de retour des lames ruisselées à BRVL et FDTL pour des pas de temps de 12 à 48h (max annuels 1996-2019 à BRVL, 2012-2019 à FDTL, loi Gumbel)

Périodes de retour des lames ruisselées

La sélection des lames ruisselées maximales annuelles a été ajustée selon la loi de Gumbel pour différents pas de temps, de 12 h à 48 h (Figure 13). À BRVL, toutes les campagnes ont été prises en compte depuis 1995-1996 jusqu'à 2018-2019, soit 24 valeurs, car les quelques périodes sans données ne comportaient pas de ruissellements majeurs. À FDTL, toutes les campagnes de 2012 à 2019 sont utilisables. Devant la petite taille de cet échantillon (8 valeurs), l'ajustement n'a pas été représenté au-delà de la période 30 ans.

Les événements sélectionnés sont majoritairement en automne-hiver (83 % à BRVL et 100 % à FDTL pour la LR de 24h par exemple).

LIEN ENTRE PLUIE ET RUISSELLEMENT

Pluies et ruissellements ont été finement associés à BRVL et FDTL. L'ensemble d'une pluie ruisselante et d'un crue indépendante est appelé un *événement pluie-débit*, et noté EPQ. Ces associations ont été effectuées sur les campagnes de 2008 à 2018 à BRVL, et sur les campagnes 2012 à 2018 à FDTL. Les EPQ représentent 84 % (resp. 86 %) des ruissellements écoulés à BRVL (resp. FDTL).

Caractéristiques des événements extrêmes

Pour regrouper les EPQ en classes homogènes, une classification ascendante hiérarchique a été effectuée selon la méthode de Ward, répartissant les EPQ en six classes pour chaque site. L'une de ces classes regroupe les événements extrêmes. Leurs caractéristiques moyennes sont données dans le Tableau 3.

Tableau 3 : variables utilisées dans la CAH et valeurs moyennes pour les classes d'EPQ extrêmes de BRVL et FDTL

	BRVL	FDTL
Nombre d'EPQ dans la classe	9	5
Durée de la pluie (h)	28,5	22,8
Lame de pluie (mm)	32,0	32,2
Intensité de pluie moyenne (mm/h)	1,6	1,8
Intensité de pluie maximale à 6 min (mm/h)	14,0	14,4
Lame de pluie antérieure sur 24 h (mm)	17,4	17,4
Lame de pluie antérieure sur 240 h (mm)	63,0	--
Durée de ruissellement (h)	41,7	25,7
Lame de ruissellement (mm)	6,28	11,25
Débit moyen de ruissellement (l/s)	479,6	191,2
Débit maximal de ruissellement (l/s)	2947,7‡	866,3

‡ *dans cette analyse, les débits réellement enregistrés ont été retenus, pas les débits reconstitués*

À FDTL, les 11,25 mm en 25,7 h sont compris entre la lame ruisselée quinquennale de 24 h (10,6 mm) et celle de période de retour 6 ans (11,5 mm). À BRVL, les 6,3 mm en 42 h sont proches de la lame ruisselée quadriennale de 36 h (5,7 mm). Leurs pluies génératrices peuvent être comparées à une pluie journalière de 32 mm : les statistiques pluviométriques établies à BRVL donnent une période de retour de 1,67 ans. La période de retour de ces crues extrêmes est donc deux à trois fois plus élevée que celles de leurs pluies génératrices.

Valeurs de curve number

Les valeurs de *curve number* (CN) ont été calculées pour tous les EPQ conformément à la note TR-55 de l'USDA [Cronshey et al., 1986]. Les figures suivantes montrent l'évolution de ces CN de septembre à août. Les EPQ dont la LR est supérieure à la LR biennale de 24 h ont été identifiées sur ces graphiques. Elle est de 2,7 mm à BRVL, et 5,6 mm à FDTL.

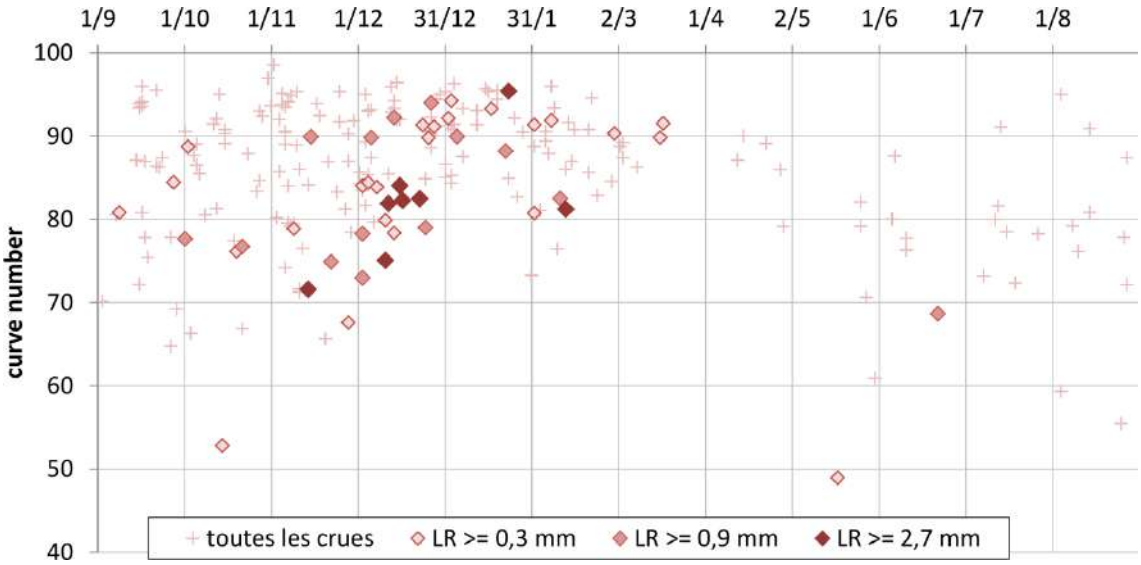


Figure 14 : CN à BRVL, campagnes 2008 à 2018

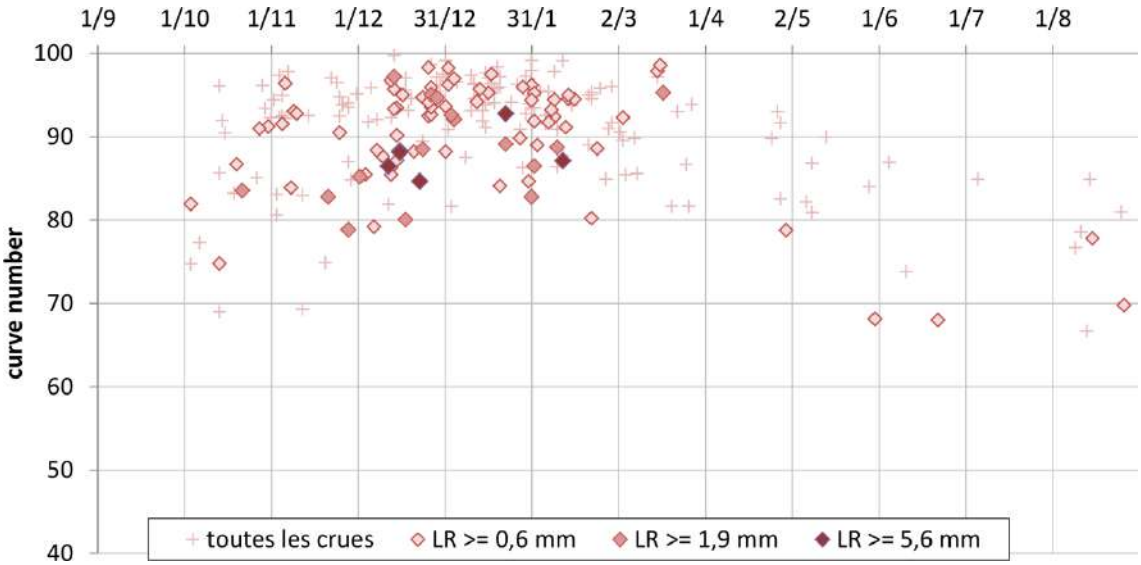


Figure 15 : CN à FDTL, campagnes 2012 à 2018

À BRVL comme à FDTL, les EPQ présentant les plus fortes lames ruisselées sont survenus en hiver, à l'exception d'un événement à BRVL survenu en novembre. À FDTL, leurs CN sont compris entre 84,6 et 92,7, avec une moyenne de 87,9. À BRVL, le CN des EPQ hivernaux est compris entre 75,1 et 95,4, pour une moyenne de 83,2.

ANALYSE ET COMMENTAIRE

Comme le montrent les chiffres de la section *hydrologie du bassin versant,* le secteur d'étude est très ruisselant, avec des ruissellements tous les ans, la saison la plus ruisselante étant l'hiver.

Sur la Figure 12, les périodes de retour des débits spécifiques de FDTL et BRVL sont très proches. Le facteur classique de changement d'échelle constitué par le rapport des surfaces à la puissance 0,8 est vérifié pour ce bassin versant. D'ailleurs, pour la période de mesures communes, les événements sélectionnés comme maxima annuels sont les mêmes à FDTL et BRVL, hormis pour les années sèches que sont 2015, 2017 et 2019.

Cependant, lorsque l'on considère les périodes de retour des lames ruisselées, le comportement des deux bassins versants emboîtés montre une nette différence : une unité de surface produit davantage de ruissellement à FDTL qu'à BRVL. Au cours d'une décennale de 24 h, par exemple, un mètre carré de FDTL produit 13,9 l de ruissellement, tandis qu'un mètre carré de BRVL en produit 7,9. La différence observée sur les CN moyen des événements majeurs entre les deux bassins versants va dans le même sens. Pourtant FDTL est inclus dans BRVL, et est représentatif de toutes les zones amont du bassin versant. La différence de proportion des surfaces potentiellement ruisselantes (terres labourées et surfaces imperméables), ne suffit pas à expliquer cette différence : 73 % à BRVL et 86 % à FDTL.

Les pertes le long du chemin de l'eau expliquent cette différence. Comme visible sur la Figure 1, les deux talwegs principaux sont enherbés sur plusieurs kilomètres avant d'atteindre l'exutoire de BRVL. Leur forme est très évasée, du fait de l'accumulation des sédiments depuis des siècles, ce qui permet une grande surface de contact entre le ruissellement et la prairie. Sa capacité d'infiltration à saturation est comprise entre 20 mm/h et 150 mm/h selon son tassement [Ouvry et al. 2010] [Ouvry 2018]. De plus, de nombreuses pertes karstiques (bétoires) sont présentes sur ces talwegs, notamment sur celui qui relie FDTL à BRVL.

Ces résultats illustrent le potentiel de l'aménagement du territoire à l'aide de zones tampons dans la mitigation de l'aléa ruissellement [Catalogne & Le Hénaff 2016], notamment en utilisant les bandes enherbées de fond de vallons : ces zones tampons offrent les plus grandes capacités d'infiltration (en moyenne supérieure à 50 mm/h [Ouvry et al. 2010]).

La comparaison des périodes de retour des événements ruisselants extrêmes et de leurs pluies génératrices montre que des pluies « banales » (période de retour 1,67 ans) produisent des crues exceptionnelles (période de retour de 4 à 6 ans).

Les caractéristiques des événements extrêmes (Tableau 3) montrent des intensités de pluies moyennes inférieures à 2 mm/h. Cette valeur est à rapprocher de la capacité d'infiltration à saturation d'une céréale d'hiver au mois de décembre, sur laquelle la croûte de battance sédimentaire est généralisée. Selon [Le Bissonnais et al. 2005], elle est de 2 mm/h. À BRVL, cela concerne environ la moitié des terres labourées (Tableau 2). L'occupation du sol du BV, ainsi que les pratiques culturales de ses parcelles, sont donc des paramètres essentiels de la production du ruissellement, même pour des événements rares. Si la capacité d'infiltration à saturation de ces parcelles est augmentée pendant la période hivernale de quelques mm/h (par les pratiques culturales [Ouvry et al. 2012] ou par l'assolement), alors le volume ruisselé s'en trouvera significativement réduit.

CONCLUSION

L'hydrologie des petits bassins versants du pays de Caux et des plateaux limoneux et karstiques de Normandie montre des singularités fortes : des ruissellements nombreux, principalement en hiver, avec des pertes importantes le long des talwegs enherbés ou présentant des points d'engouffrement. Les mesures réalisées par l'AREAS sur le bassin versant de Bourville permettent de le quantifier.

BRVL (resp. FDTL) présente un ruissellement annuel moyen de 10,8 mm (resp. 37,9 mm) dont 7,4 mm en hiver (resp. 26,4 mm) et jusqu'à 4 ruissellements de plus de 3 mm par campagne (resp. 7). Le débit instantané décennal est estimé à 5,9 m3/s (resp. 1,2 m3/s), et la lame ruisselée décennale de 24 h à 7,9 mm (resp. 13,9 mm). Le *curve number* moyen des plus grosses crues hivernales est de 83,2 (resp. 87,9). L'écart entre les valeurs des deux sites met en évidence les pertes par infiltration ou engouffrement le long des talwegs. L'intensité moyenne des pluies génératrices des plus grosses crues est inférieure à 2 mm/h : une augmentation des capacités d'infiltration des parcelles en hiver réduirait sensiblement les volumes ruisselés.

Ces valeurs permettent de répondre aux besoins de dimensionnement des ouvrages de protection contre les ruissellements, qui sont nombreux en tête de bassins versants, mais aussi d'illustrer le potentiel de mitigation de l'aléa ruissellement. D'une part en réduisant les volumes ruisselés par les pratiques culturales moins ruisselantes ou l'assolement, d'autre part en infiltrant le ruissellement le long de son chemin par les zones tampons.

REMERCIEMENTS

L'AREAS remercie de leur soutien ses partenaires financiers, sans qui ce suivi hydrométrique n'aurait pas été possible tout au long de ces années, au premier rang desquels se placent l'Agence de l'eau Seine-Normandie, le Département de Seine-Maritime, le Département de l'Eure.

REFERENCES

AREAS (2020) — *base de données BD CASTOR* [en ligne]. Disponible à l'adresse http://www.bdcastor.fr/, consultée le 13/06/2020

Catalogne C., Le Hénaff G. (2016). — Guide d'aide à l'implantation des zones tampons pour l'atténuation des transferts de contaminants d'origine agricole. Rapport Irstea-ONEMA élaboré dans le cadre du Groupe Technique Zones Tampons.

CONSERVATOIRE D'ESPACES NATURELS NORMANDIE SEINE (2018). — *Référentiel régional pédologique Haute-Normandie, carte des sols au 1/250000* [en ligne]. [carte]. Disponible à l'adresse : https://www.geonormandie.fr/geonetwork/srv/api/records/d703f56f-44ff-4e9e-b346-edd62e0a418b/attachments/A0_RRP_2018.pdf.

Cronchey R., MacCuen R. H., Miller N., Rawl W., Robbins S., Woodward D. (1986). — Urban Hydrology for small Watersheds, TR-55, 164 p.

David P-Y. (2009) — Inventaire régional Haute-Normandie des bétoires, trajets souterrains des eaux (traçages) et des exutoires - Rapport final d'année 4 et synthèse des 4 années. Rap. BRGM/RP-61691-FR, 128 p.

Kilpatrick, F.A., Schneider, V.R. (1983). — *Use of flumes in measuring discharge: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations,* book 3, chap. A14, 46 p.

Laborde J.-P. (2009). — *Éléments d'hydrologie de surface, édition 2009.* Université polytechnique Sofia Antipolis, 192 p.

Le Bissonnais Y., Cerdan O., Lecomte V., Benkhadra H., Souchère V., Martin P. (2005). — Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion, *CATENA,* **62 (2-3)**, 111-124

Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin J., King D., Thorette J., Deblonde J-P, (1998). —Cartographie de l'aléa « Érosion des sols » en France. *Études et travaux*, **18**. ISBN 978-2-911089-17-6.

Ouvry JF (2018) — Innobioma, efficacité des bandes ligno-cellulosiques, érosion et qualité de l'eau, 2 p. Disponible à l'adresse : https://normandie.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Normandie/506_Fichiers-communs/PDF/ENERGIES/innobioma-f3-efficacite-erosion_web.pdf

Ouvry J.-F., Coufourier N., Richet J.-B., Lhériteau M., Pivain Y., Martin P., Lecomte V., Barrier C., Witkowski D., Saint-Omer L., Corruble C., Luce M. (2012). — *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols en Haute-Normandie. Expérimentations sur les pratiques culturales 2001-2010. Synthèse des résultats de ruissellement et d'érosion. Groupe Maîtrise du ruissellement par les pratiques culturales.* 36 p. Disponible à l'adresse : http://www.areas-asso.fr/wp-content/uploads/2020/06/brochure_10ans_essais_pc_ruissellement.pdf

Ouvry JF, Le Bissonnais Y., Martin P., Bricard O., Souchère V. (2010). — Les couverts herbacés comme outils de réduction des pertes en terre par érosion hydrique : Synthèse des connaissances et expérience de la Haute-Normandie. *Fourrages* **202 (202),** pp.103-110.

Richet J-B, Helloco F. (2009). — Anticipation des désordres hydrologiques majeurs en hiver sous pluie peu intense en Seine-Maritime, *la Houille Blanche,* **6**, 52-55

Constitution et analyse d'une base de données historiques d'incidents liés au ruissellement sur les voies ferrées (Lagadec *et al.*))

Constitution et analyse d'une base de données historiques d'incidents liés au ruissellement sur les voies ferrées

Lilly-Rose LAGADEC[1], Loïc MOULIN[2], Isabelle BRAUD[3], Pascal BREIL[3]

[1] SNCF Réseau – Direction Zone Ingénierie Atlantique – Pôle d'ingénierie de Bordeaux – 53bis rue Amédée St-Germain 33000 Bordeaux, France

[2] SNCF Réseau – Direction Générale Industrielle et Ingénierie – Département Voie et Abords - 6, avenue François Mitterrand 93574 La Plaine St Denis Cedex, France

[3] INRAE, RiverLy, 5 Rue de la Doua, CS 20244, 69625, Villeurbanne, France

Le ruissellement pluvial intense est un phénomène difficile à observer. De ce fait, il existe peu de données d'observations du ruissellement ou de ses impacts. Ce travail exploite les données d'incidents de la SNCF pour constituer une BD d'impacts liés au ruissellement. Les voies ferrées sont particulièrement vulnérables au ruissellement (talus meubles, ballast érodable, installations électriques...). Les désordres observés sont donc de bons indicateurs de l'occurrence du ruissellement.

Dans cet article sont présentées (1) la méthode de constitution de la BD d'impacts liés au ruissellement et (2) l'analyse de cette base par comparaison aux différentes configurations de l'infrastructure ferroviaire.

Le résultat est une base de données répertoriant 62 impacts sur le tronçon ferroviaire Rouen – Le Havre (80 km), sur une période d'un siècle. Cette base de données est mise en regard des différentes configurations de voies ferrées afin de voir s'il existe des configurations plus ou moins vulnérables au ruissellement (critères étudiés : type d'ouvrage en terre – délai, remblai – longueur de l'ouvrage en terre et présence d'un ouvrage hydraulique de traversée sous voie).

Ce travail fait ressortir l'importance de capitaliser sur les données d'impacts, qui sont des données essentielles pour caractériser la vulnérabilité des enjeux face au ruissellement, pour évaluer les capacités prédictives des modèles, et in fine, pour améliorer la gestion des risques liés au ruissellement.

Mots-clefs : impacts, ferroviaire, bases de données, vulnérabilité

Creation and analysis of a database of runoff related impacts on railways

Intense pluvial runoff is a difficult phenomenon to observe. As a result, there are few observational data on runoff or about its impacts. This work uses SNCF incident data to constitute a database of runoff related impacts. Railways are particularly vulnerable to runoff (earthworks with loose soil, erodable ballast, electrical installations). Impacts are therefore good indicators of the runoff occurrence.

In this article are presented (1) the creation method of the runoff related impact database and (2) the analysis of this database by comparison with the different configurations of the railway infrastructure.

The result is a database of 62 impacts on the Rouen - Le Havre railway stretch (80 km), over a period of a century. This database is compared with the different configurations of railways in order to see if there are configurations more or less vulnerable to runoff (analyzed criteria: type of earthworks - embankment, excavation -, length of the earthwork and whether or not there is a hydraulic structure crossing under the railway).

This work highlights the importance of capitalizing on impact data, which is essential data to characterize the vulnerability of stakes facing runoff, to assess the predictive capacities of models, and ultimately, to improve the management of runoff related risks.

Keywords: impacts, railway, database, vulnerability

INTRODUCTION

Le ruissellement pluvial est à l'origine de phénomènes violents tels que des coulées de boue, de l'érosion ou des inondations. Le ruissellement pluvial est un phénomène difficile à observer car il est fugace et peut se produire en tout point du territoire. De ce fait, il existe peu de données d'observation du ruissellement [Lagadec, 2017]. Les données disponibles sont souvent des données « approchées », des données de

Diffusable SNCF RESEAU

conséquences notamment : Déclarations Cat-Nat, médias sociaux, gestionnaire de réseaux routier, services de secours, etc [Douvinet, 2006a ; Versini et al., 2010 ; Defrance et al., 2014 ; Saint-Martin, 2018]. Ces données sont alors biaisées : elles ne sont pas exhaustives (il y a des relevés de conséquences seulement là où il y a des enjeux), elles sont subjectives (la description dépend de l'observateur et du but de l'enregistrement), et souvent imprécises dans leur localisation. Ces données sont pourtant essentielles pour bien comprendre le phénomène, pour développer et évaluer les modèles, ainsi que pour communiquer sur les risques induits. L'enjeu est de constituer un jeu de données réduisant ces biais.

Ce travail présente l'opportunité d'utiliser les données enregistrées par la SNCF sur les désordres liés à l'eau sur le réseau ferré. L'opportunité réside dans le fait que (1) les données sont disponibles sur une grande période de temps, depuis la mise en service des lignes, souvent depuis plus d'un siècle ; et que (2) les voies ferrées sont de bons indicateurs du ruissellement. En effet, ces structures linéaires au sol sont en interaction avec les écoulements de surface. Les ouvrages en terre (Figure 1), interceptent et redirigent le ruissellement, et certains éléments d'infrastructure sont particulièrement vulnérables au ruissellement : talus meubles sujets aux érosions et aux glissements, lignes sur versants exposées aux coulées de boue, ballast facilement transportable par les écoulements longitudinaux et transversaux, installations électriques le long des voies vulnérables à l'eau ou encore les réseaux de drainage et ouvrages d'art pouvant se colmater [Chazelle et al., 2014, Amblard et al., 2015, Dehotin et al., 2015b]. De ce fait, l'infrastructure réagit aux sollicitations du ruissellement et les désordres sont enregistrés pour des enjeux de sécurité et de maintenance.

Figure 1 : Les 2 grands types d'ouvrages en terre en fonction de sens de dénivellement, il existe aussi les profils mixtes (remblai d'un côté, déblai de l'autre) et les profils rasants (voie ferrée au niveau du terrain naturel).

L'objectif de cette communication est de présenter la méthode de construction d'une base de données des impacts liées au ruissellement. Cette base de données d'impacts est ensuite analysée au regard de la configuration de l'infrastructure ferroviaire, dans le but de faire ressortir des configurations de voies ferrées plus ou moins vulnérables au ruissellement.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Ce travail a été effectué sur la ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre et plus particulièrement sur le tronçon de Rouen au Havre dont les versants connectés ont été délimités (Figure 2). Ce tronçon inauguré en 1847 est situé en Seine-Maritime et dans sa grande majorité dans la zone géographique du Pays de Caux. Il commence à la fin de l'agglomération de Rouen et se termine à l'entrée de l'agglomération du Havre. La voie ferrée sur ce tronçon est constituée de 182 ouvrages en terre, 4 viaducs et 3 tunnels. Ce territoire est marqué par une forte sensibilité au ruissellement [Cerdan et al., 2002; Martin et al., 2010]. Le réseau hydrographique est constitué de nombreux talwegs secs pouvant se mettre en eaux lors d'épisodes pluvieux intenses. Les plateaux limoneux bien que parmi les plus fertiles de France sont très sensibles aux phénomènes d'érosion et de battance (formation d'une croûte quasiment imperméable avec l'impact des gouttes de pluies, favorisant la génèse de grands volumes de ruissellement) [Douvinet, 2008 ; Hauchard et Laignel, 2008].

Diffusable SNCF RESEAU

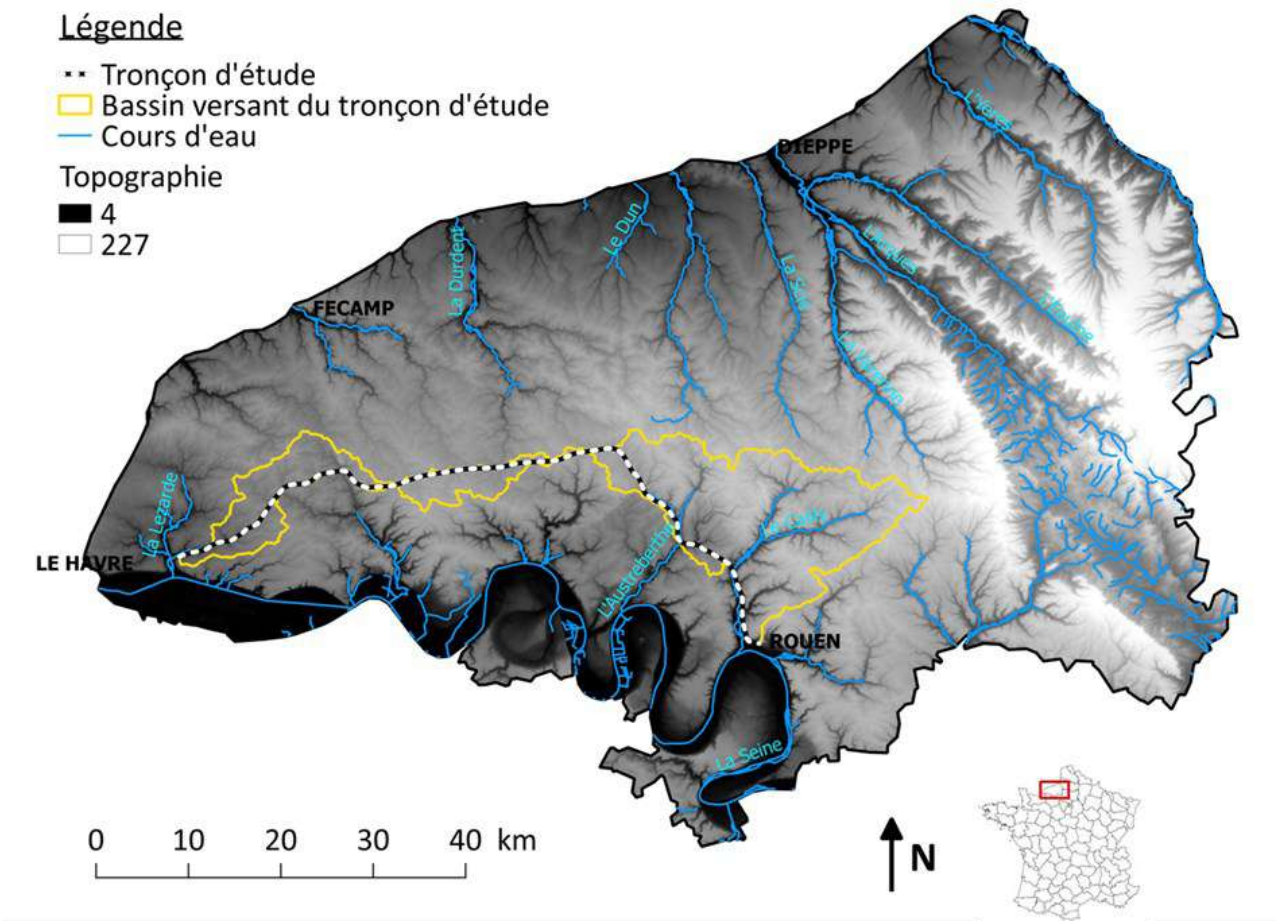


Figure 2 : La zone d'étude, le tronçon ferroviaire Rouen – Le Havre, en Seine Maritime (76). En jaune, les bassins versants interceptés par le tronçon ferroviaire [Lagadec, 2017].

METHODE DE CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES

L'objet final attendu est une liste de tous les impacts liés au ruissellement sur le tronçon d'étude, depuis la création de la ligne à nos jours. Les informations nécessaires à collecter pour chaque impact sont : la localisation, renseignée le long de la ligne ferroviaire sous forme de points kilométriques de début et de fin, et l'origine de l'impact, à savoir, s'il est en lien avec du ruissellement ou non. Ces éléments permettront de constituer une couche SIG des impacts sur le tronçon d'étude. La méthode de travail, élaborée avec l'appui d'une archiviste, se compose de deux étapes principales : la collecte et le traitement.

En raison des méthodes d'archivage de la SNCF, quatre lieux d'archives ont été visités :

- Saint-Denis (93) : ingénierie nationale, où se trouvent les archives courantes. Les plus récentes sont en format numérique, les plus anciennes en format papier.
- Villeneuve (94) : où se trouvent les archives intermédiaires, c'est-à-dire les affaires closes mais qui ont moins de 30 ans. Ces archives sont inventoriées dans un logiciel, puis les boites sont commandées pour être consultées.
- Rouen (76) : au pôle régional d'ingénierie où se trouvent une partie des archives courantes, ainsi que dans la gare de Rouen, où se trouve une partie des archives historiques de la région.
- Le Mans (72) : où se trouve le Centre National des Archives Historiques de la SNCF. Les recherches se font via un logiciel et les consultations sont soumises à autorisation.

L'étape de collecte consiste à sélectionner les documents d'intérêt dans les locaux d'archives et à constituer le fonds documentaire. Les documents d'intérêts sont reproduits (scan ou photo) afin de pouvoir être consultés a posteriori sans avoir à retourner sur place. Pour chaque lieu, le temps de collecte est d'abord estimé en réalisant des sondages : tests de la quantité et de la qualité des informations sur une petite quantité de boites choisies aléatoirement. Le temps de travail pour chaque lieu d'archives est synthétisé dans le Tableau 1 et s'élève en totalité à 4 mois.

Diffusable SNCF RESEAU

Tableau 1 : Temps de travail pour la recherche de données en archives pour chaque lieu.

Lieux d'archives	Temps de travail (en journées)
Saint-Denis	15
Rouen	30
Villeneuve	5
Le Mans	5
Travail au bureau	25
Total	80

Pour chaque document, l'archiviste doit percevoir si le document est pertinent ou non pour l'étude et s'il doit être reproduit et enregistré. Le critère pour sélectionner un document est : un document relatif au tronçon d'étude et faisant mention d'eau ou à des évènements pouvant être induit par l'eau. Pour les lieux d'archives équipés d'un logiciel, la recherche s'effectue par mots clés, sinon, les documents sont regardés un à un. La phase de sensibilisation de l'archiviste au sujet des désordres liés à l'eau sur le réseau ferré ne doit pas être négligée. S'il y a un doute sur le lien avec le ruissellement, le document est quand même reproduit pour être étudié a posteriori.

Le choix dans la structure du fonds documentaire doit permettre de faciliter le travail de remplissage ainsi que le travail de traitement de l'information. Une structure à deux tables a été choisie avec une relation N:N entre les tables (utilisation du logiciel Access). En effet, un document peut faire référence à plusieurs évènements, et un évènement peut être référencé dans plusieurs documents. Ainsi, l'archiviste remplit la table « documents » avec les métadonnées du document et remplit la table « évènements » avec les éléments décrits dans le document. Si un évènement est déjà référencé, il suffit de faire le lien avec le nouveau document. Ainsi, l'étape de traitement se fait presque uniquement en consultant la table « évènement ». La Figure 3 représente les deux tables avec des exemples fictifs.

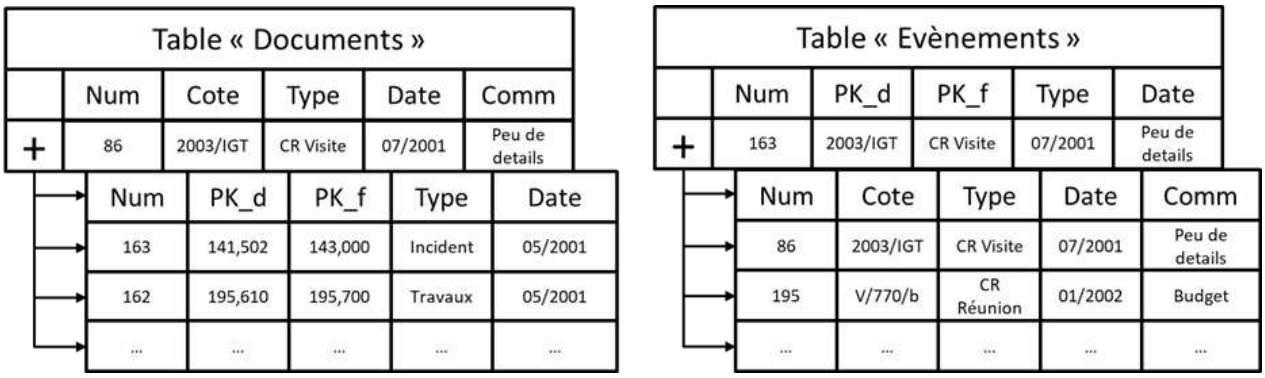


Figure 3 : Les tables « Documents » et « Evènements » liées par une relation N:N (données fictives ; PK_d = point kilométrique de début ; PK_f = point kilométrique de fin) [Lagadec, 2017].

Le fonds documentaire ainsi constitué contient 506 documents datant de 1903 à 2017. La table « évènements » contient 720 évènements potentiels. Les difficultés pour l'étape de collecte sont de gérer la quantité d'informations, la diversité des formats (numérique, papier, photos, rapport, courrier, etc) et les doublons.

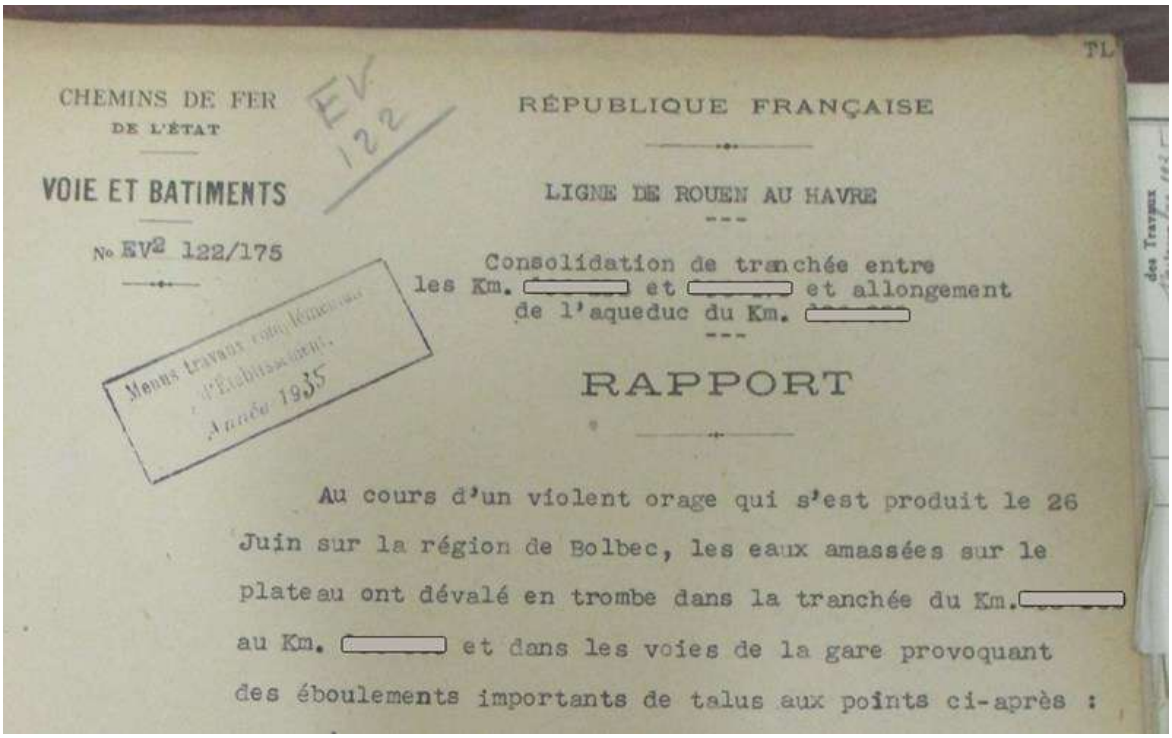
Ensuite, l'étape de traitement permet de statuer sur le lien d'un évènement avec le ruissellement et de reconnaître les doublons. Le travail consiste à analyser en détail les documents pour comprendre les circonstances des désordres et leur lien ou non avec le ruissellement. Il a été choisi de traiter les impacts par zones, car une même zone peut avoir été impactée plusieurs fois. Pour chaque zone impactée, une fiche synthèse est réalisée. Cette fiche retrace l'historique des impacts : les dates des impacts, la localisation des points d'arrivée de l'eau sur la voie, l'étendue de la zone impactée, la configuration de la voie ferrée, les éventuels travaux entre chaque impact.

La principale difficulté est de gérer les imprécisions sur la localisation et sur le lien avec le ruissellement. Par exemple, dans certains rapports de visite, seul un PK est noté alors que l'impact du ruissellement est étendu. Ou encore, il peut être difficile de comprendre l'origine du désordre. Pour cela, une notation de l'incertitude a été utilisée. Cette notation très simple se fait sur 3 niveaux : 0 = pas d'incertitude, 1 = incertitude sur la localisation OU sur le lien avec le ruissellement, 2 = incertitude sur la localisation ET sur le lien avec le ruissellement. Les Figures 4 et 5 donnent deux exemples de documents exploités. Le document de la Figure 4

Diffusable SNCF RESEAU

datant de 1935 donne des informations précises sur la localisation et le lien avec le ruissellement : « les eaux amassées sur le plateau ont dévalé en trombe dans la tranchée du km … au km … ». Ce document est noté avec une incertitude de 0/2. Le document de la Figure 5, datant de 1966, évoque de « l'eau accumulée derrière la culée » mais ne fournit par l'origine de l'eau et donne seulement un PK arrondi. Ce document est noté avec une incertitude de 2/2.

La création d'une base de données de ce type nécessite une importante coordination entre les connaissances en archivistique, en hydrologie et en ferroviaire. Il faut bien déterminer à l'avance l'objectif final et quel sera l'exploitation de la base de données. Pour optimiser le travail d'archive, il faut minimiser les informations à extraire des documents par l'archiviste et bien structurer la base pour pouvoir revenir rapidement sur un document lors de la phase de traitement. Le risque est de devoir revenir dans les locaux d'archives si le document n'a pas été correctement référencé ou reproduit.



TL

CHEMINS DE FER
DE L'ÉTAT

VOIE ET BATIMENTS

N° EV2 122/175

EV 122

Menus travaux complémentaires d'Etablissement. Année 1935

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

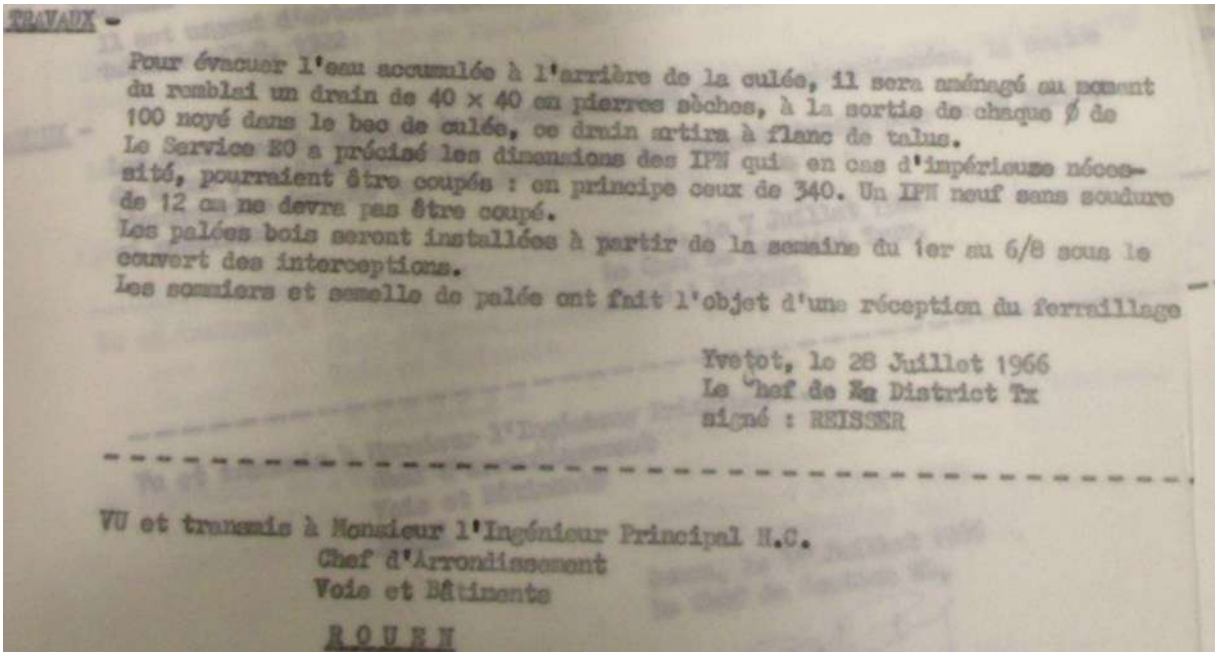
LIGNE DE ROUEN AU HAVRE

Consolidation de tranchée entre les Km. [redacted] et [redacted] et allongement de l'aqueduc du Km. [redacted]

RAPPORT

Au cours d'un violent orage qui s'est produit le 26 Juin sur la région de Bolbec, les eaux amassées sur le plateau ont dévalé en trombe dans la tranchée du Km. [redacted] au Km. [redacted] et dans les voies de la gare provoquant des éboulements importants de talus aux points ci-après :

Figure 4 : Document d'archives datant de 1935 évoquant un épisode de ruissellement intense [Lagadec, 2017].



TRAVAUX -

Pour évacuer l'eau accumulée à l'arrière de la culée, il sera aménagé au moment du remblai un drain de 40 × 40 en pierres sèches, à la sortie de chaque Ø de 100 noyé dans le bec de culée, ce drain sortira à flanc de talus.
Le Service EO a précisé les dimensions des IPN qui en cas d'impérieuse nécessité, pourraient être coupés : en principe ceux de 340. Un IPN neuf sans soudure de 12 cm ne devra pas être coupé.
Les palées bois seront installées à partir de la semaine du 1er au 6/8 sous le couvert des interceptions.
Les sommiers et semelle de palée ont fait l'objet d'une réception du ferraillage

Yvetot, le 28 Juillet 1966
Le Chef de Xx District Tx
signé : REISSER

VU et transmis à Monsieur l'Ingénieur Principal N.C.
Chef d'Arrondissement
Voie et Bâtiments
ROUEN

Diffusable SNCF RESEAU

Figure5 : Document d'archives datant de 1966 évoquant une problématique d'eau pas assez précise pour être exploitée [Lagadec, 2017].

RESULTATS

Finalement, 74 zones ont été impactées au moins une fois par le ruissellement sur le tronçon d'étude de 80 km. La répartition des notes d'incertitude est la suivante : 44 impacts sans incertitude (0/2), 18 avec une incertitude de 1/2 et 12 avec une incertitude de 2/2. Pour la suite de l'étude, les impacts notés 2/2 ne sont pas exploités. La base de données finale compte donc 62 zones impactées. La Figure 6 représente les 62 impacts répartis sur le linéaire d'étude.

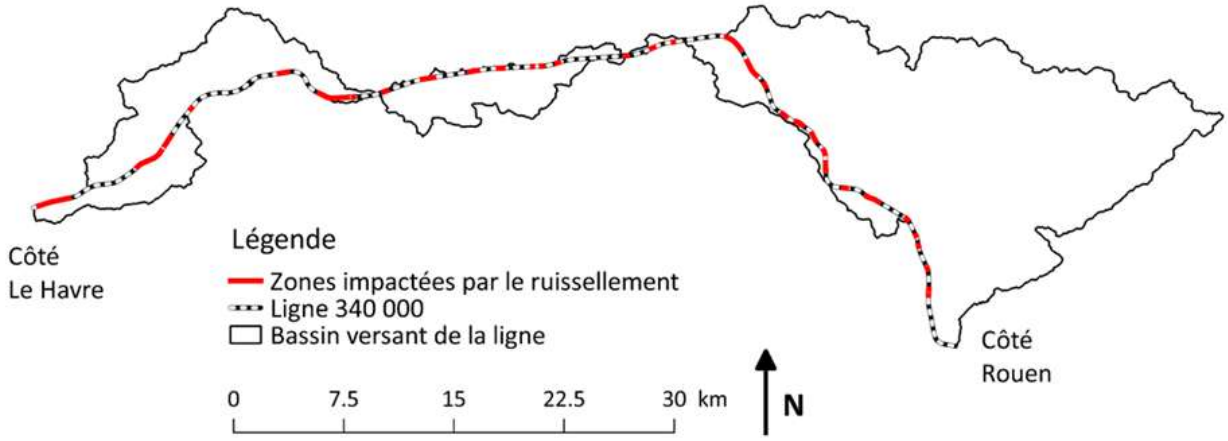


Figure 6 : Représentation des zones impactées au moins une fois par le ruissellement sur le linéaire d'étude, depuis la mise en service de la ligne ferroviaire [Lagadec, 2017].

Le Tableau 2 présente les statistiques de l'étendue des impacts liés au ruissellement sur la voie ferrée. Ces zones impactées ont une étendue qui varie de ponctuelle à 1,3 km, avec une longueur médiane de 71 m. L'étendue cumulée des impacts est de 11.9 km. Le linéaire de voie ferrée qui peut potentiellement être impacté par du ruissellement est de 76 km (80 km moins 4 km qui sont des zones de tunnels ou de grands viaducs). On peut donc noter que 16 % du linéaire d'étude a été impacté au moins une fois par le ruissellement sur environ un siècle. Par ailleurs, les 62 impacts collectés dans la base de données donnent un ratio moyen de 0.8 impacts par kilomètre.

Tableau 2 : Statistique sur l'étendue (en mètre linéaire de voie ferrée) des impacts liés au ruissellement sur le tronçon de voie étudié.

Min	1 (ponctuel)
Q1	5
Médiane	71
Moyenne	192
Q3	220
Max	1 350
Total (en m)	11.932

DISCUSSION ET ANALYSE DE LA BASE DE DONNEES

L'infrastructure ferroviaire en tant qu'infrastructure linéaire au sol est exposée au ruissellement pluvial et, du fait de ses contraintes de conception, y est particulièrement vulnérable. Les incidents recensés reflètent cette exposition et cette vulnérabilité. Dans la thèse [Lagadec, 2017], la base d'incidents a été utilisée comme proxy-data pour évaluer les cartes de susceptibilité au ruissellement, en prenant en compte la vulnérabilité des tronçons exposés. Dans cette présentation, on développera comment l'exploitation de la base de données contribue très nettement à répondre à la question : y a-t-il des configurations de l'infrastructure plus ou moins vulnérables au ruissellement ? Certaines caractéristiques sont connues par expérience des cheminots comme étant plus propices aux impacts du ruissellement. L'analyse de la base de données a pour objectif de vérifier ces critères, de les nuancer, voire identifier d'éventuels nouveaux critères de vulnérabilité.

Diffusable SNCF RESEAU

Les critères de vulnérabilités testés sont :

- Le type d'ouvrage en terre (déblai, remblai, profil mixte, profil rasant)
- La longueur de l'ouvrage en terre (en mètre linéaire)
- La présence d'ouvrage de traversée sous voie (buse, dalot, ponceau, pont-rail, etc)

Le premier critère testé est : y a-t-il un type d'ouvrage en terre plus ou moins vulnérable ? Le Tableau 3 présente le nombre d'impacts par type d'ouvrage en terre. La dernière colonne présente le ratio entre le nombre d'impacts et la longueur cumulée pour chaque type de profil. Ce ratio est comparé au ratio global de 0.8 impact par kilomètre, sur l'ensemble du tronçon. La proportion d'impact est plus importante pour les profils en déblai (1.22 impacts/km). Ce résultat corrobore l'expérience du terrain. Toutefois, les remblais ne semblent pas préservés, contrairement à ce qui est usuellement admis. Seuls les profils rasants semblent moins subir de désordres. Les résultats sur les profils mixtes et rasants doivent être considérés avec réserve au vu de leur longueur cumulée qui n'est pas représentative sur cette ligne par rapport aux autres profils.

Tableau 3 : Nombre d'impacts par type d'ouvrage en terre [Lagadec, 2017].

Type de profil	Nombre d'impacts	Longueur cumulée (km)	Ratio nombre d'impacts et longueur cumulée
Déblai	42	34,5	1,22
Mixte	8	7,6	1,06
Rasant	4	9,5	0,42
Remblai	27	24,5	1,10

Le second critère testé est la longueur de l'ouvrage en terre. La longueur influence-t-elle la vulnérabilité de l'ouvrage ? Le Tableau 4 présente le nombre d'impacts par kilomètre pour chaque type d'ouvrage en terre et selon qu'il soit court ou long. La distinction entre court ou long se fait par la longueur médiane d'un ouvrage en terre. Pour la zone d'étude, les longueurs médianes des ouvrages en terre sont de 420 m pour les déblais, 265 m pour les profils mixtes, 315 m pour les rasants et 370 m pour les remblais. Le Tableau 4 montre que les déblais longs sont sensiblement plus impactés par le ruissellement que les déblais courts. Ceci confirme également l'expérience du terrain. La quantité d'eau susceptible de s'écouler dans un déblai long est plus importante que dans un déblai court. De plus, le risque de dysfonctionnement du réseau de drainage par des éléments transportés par le ruissellement est augmenté. Pour les profils en remblai, on peut noter que les remblais courts sont nettement plus impactés que les longs. Ce résultat, pourtant rarement évoqué par les agents de la SNCF, peut s'expliquer par le fait qu'un remblai court constitue souvent un franchissement par la voie ferrée d'un vallon, et peut donc constituer un verrou hydraulique. Cette configuration est de fait plus susceptible de subir des dommages liés au ruissellement. Un remblai long parait quant à lui peu vulnérable. Ce résultat, qui corrobore l'expérience du terrain, peut s'expliquer par le fait qu'un remblai long est généralement situé en zones de plaines ou de plateaux, moins favorables aux ruissellements intenses.

Tableau 4 : Nombre d'impacts par type d'ouvrage en terre et selon leur longueur [Lagadec, 2017].

Longueur de l'ouvrage en terre		Nombre d'impacts	Longueur cumulée (km)	Ratio nombre d'impacts et longueur cumulée
Déblai	Court	9	9,6	0,94
	Long	33	24,9	1,33
Mixte	Court	2	2,2	0,26
	Long	6	5,4	1,11
Rasant	Court	1	2,4	0,42
	Long	3	7,1	0,42
Remblai	Court	16	6	2,67
	Long	11	18,5	0,59

Enfin, il a été testé l'influence de la présence d'un ouvrage de traversée sous voie sur la vulnérabilité de l'infrastructure au ruissellement (Tableau 5). Sur la zone d'étude, les ouvrages de traversée sous voie sont présents presqu'exclusivement au niveau de remblais. Le résultat montre que, comme pressenti, les remblais sans ouvrage de traversée sous voie sont en proportion plus souvent impactés (1.33 impacts/km). Toutefois, la

Diffusable SNCF RESEAU

proportion de 1.03 impacts/km de remblais équipés d'ouvrage de traversée, ne permet pas de considérer les ouvrages de traversée sous voie comme élément de protection vis-à-vis de l'aléa ruissellement. Ceci est cohérent avec les résultats de Braud et al. (2020) qui ont montré que la présence d'ouvrages de traversée sous voie n'était pas un critère expliquant la plus forte sensibilité au ruissellement des ouvrages. Cette approximation souvent faite pour caractériser la vulnérabilité de l'infrastructure au ruissellement peut être source d'erreur dans un travail d'analyse de risque. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces petits ouvrages sous voies ferrées, dont le but est de faire transiter les écoulements d'amont en aval, sont justement positionnés au niveau des axes de ruissellement. Ils sont particulièrement exposés à l'aléa. De plus, ils peuvent subir des dépôts de sédiments charriés par le ruissellement, réduisant alors leur capacité hydraulique initiale, et augmentant ainsi le risque de mise en charge du remblai ferroviaire.

Tableau 5 : Nombre d'impacts selon la présence ou non d'un ouvrage de traversée sous voie [Lagadec, 2017].

Présence d'un ouvrage hydraulique de traversée		Nombre d'impacts	Longueur cumulée (km)	Ratio nombre d'impacts et longueur cumulée
Mixte	Avec	0	1,0	0,00
	Sans	8	6,5	1,22
Remblai	Avec	19	18,5	1,03
	Sans	8	6,0	1,33

Ce travail de comparaison des données d'impacts et de différents critères liés à l'infrastructure a permis de confirmer certaines hypothèses issues de l'expertise terrain, comme le fait que les ouvrages en terre longs et en déblais sont plus souvent impactés. Cela a également permis de révéler certaines configurations également vulnérables, telles que les remblais courts. Par ailleurs, la présence ou non d'ouvrages de traversée sous voie ne permet pas de considérer la zone comme moins vulnérable. Une application de cette analyse est la proposition d'un arbre de vulnérabilité de la voie ferrée face au ruissellement [Lagadec, 2017 ; Braud et al., 2020]. La caractérisation de la vulnérabilité est une étape indispensable dans l'évaluation des modèles d'aléa par comparaison à des données d'impacts.

Une limite de cette analyse est que les choix de conception de l'infrastructure, et donc sa vulnérabilité, ne sont pas totalement décorrélés de l'aléa ruissellement. La configuration de l'infrastructure, notamment le profil en travers (remblai, déblai), l'emplacement des ouvrages hydrauliques, correspond à la topographie du terrain naturel. Topographie qui est elle-même un paramètre de l'aléa ruissellement.

Ce travail d'analyse réalisé en contexte ferroviaire pourrait être intéressant à réaliser en contexte routier. En tant qu'infrastructure linéaire au sol, les voiries particulièrement exposées au ruissellement pourraient partager certains critères de vulnérabilité avec les voies ferrées. Il est important de préciser toutefois des différences importantes : les routes favorisent le ruissellement et suivent plus ou moins le relief alors que les voies ferrées sont perméables et à pentes limitées. Les bases de données des coupures de route ne sont généralement précises qu'au point kilométrique. Les outils modernes de géolocalisation, comme les photos horodatées et géolocalisées par les smartphones, devraient permettre d'améliorer la bancarisation des incidents liés au ruissellement.

CONCLUSION

Cet article présente un travail de création d'une base de données historique d'impacts sur un tronçon ferroviaire de 80 km. Ce travail réalisé à l'aide de compétences en archivistique a permis de collecter de façon quasiment exhaustive l'ensemble des épisodes de ruissellement intense sur un linéaire défini et sur une période d'un siècle. L'analyse de cette base de données, au regard de la configuration de l'infrastructure, a permis de donner des critères de vulnérabilité de la voie ferrée au ruissellement.

La caractérisation de la vulnérabilité est une étape indispensable dans l'évaluation des modèles d'aléa par comparaison à des données d'impacts, car c'est un paramètre de l'équation aléa * vulnérabilité = Risque. De la même manière, la création d'une base de données exhaustive sur une zone définie et sur une longue période de temps permet une évaluation plus rigoureuse du caractère prédictif des modèles. Ceci donnant la possibilité de justifier un certain nombre de fausses alertes et d'affiner les calculs de probabilités de détection [Lagadec, 2017 ; Braud et al., 2020].

Diffusable SNCF RESEAU

Ce travail contribue à une meilleure connaissance de l'aléa ruissellement et à une meilleure compréhension de la vulnérabilité des voies ferrées face au ruissellement. Progresser dans la caractérisation de la vulnérabilité permet d'améliorer les techniques d'analyse de risque sur le réseau ferré et in fine de mieux cibler les zones à risques pour aller davantage vers une maintenance préventive que curative.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier les archivistes qui ont permis la réalisation de ce travail : Sixtine De Bejarry et Anne Redon. Les remerciements vont également à Stéphane Landormy agent SNCF au pôle d'ingénierie de Rouen qui nous a ouvert les portes de la gare et permis de faire nos recherches parmi les archives historiques. Enfin, les auteurs remercient Blandine Chazelle pour avoir initié le projet IRIP Rail et pour y contribuer encore aujourd'hui.

REFERENCES

Amblard, J., Capoccioni, C.P., Nivon, D., Mellal, L., De Cesare, G., Ghilardi, T., Jafarnejad, M., Battisacco, E. (2015). - Analysis of Ballast Transport in the Event of Overflowing of the Drainage System on High Speed Lines. International Journal of Railway Technology 4, 19–43.

Braud, I., Lagadec, L.R., Moulin, L., Chazelle, B., Breil, P. (2020). A method to use proxy data of runoff-related impacts for the evaluation of a model mapping intense storm runoff hazard: application to the railway context. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 20(4): 947-966. DOI:10.5194/nhess-20-947-2020

Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A., and Le Bissonnais, Y. (2002). Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management, CATENA, 46, 189– 205, https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00166-7.

Chazelle, B., Lambert, L., Capoccioni, C.P. (2014). Railway vulnerability in case of extremes floods. Knowledge and risk management. La Houille Blanche 48–54. doi:10.1051/lhb/2014016

Defrance, D., Javelle, P., Organde, D., Ecrepont, S., Andréassian, V., Arnaud, P. (2014). Using damage reports to assess different versions of a hydrological early warning system. Hydrology and Earth System Sciences Discussions 11, 4365–4401.

Dehotin, J., Chazelle, B., Laverne, G., Hasnaoui, A., Lambert, L., Breil, P., Braud, I. (2015b). Mise en œuvre de la méthode de cartographie du ruissellement IRIP pour l'analyse des risques lies aux écoulements sur l'infrastructure ferroviaire. La Houille Blanche 56–64. doi:10.1051/lhb/20150069

Douvinet, J. (2006a). Intérêts et limites des données « CatNat » pour un inventaire des inondations. L'exemple des « crues rapides » liées à de violents orages (Bassin parisien, Nord de la France). Norois. Environnement, aménagement, société 17–30. doi:10.4000/norois.1733

Douvinet, J. (2008). Les bassins versants sensibles aux « crues rapides » dans le Bassin Parisien – Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes. Thèse de doctorat. Université de Caen/Basse-Normandie.

Hauchard, E., Laignel, B. (2008). Morphotectonic evolution of the north-western margin of the Paris Basin. Zeitschrift für Geomorphologie 52, 463–488. doi:10.1127/0372-8854/2008/0052-0463

Lagadec, LR. (2017). Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire. Université Grenoble-Alpes. Thèse de Doctorat

Martin, P., Joannon, A., and Piskiewicz, N. (2010). Temporal variability of surface runoff due to cropping systems in cultivated catchment areas: Use of the DIAR model for the assessment of environmental public policies in the Pays de Caux (France), J. Environ. Manage., 91, 869–878, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.11.003.

Diffusable SNCF RESEAU

Saint-Martin, C. (2018). Prise en compte des vulnérabilités territoriales dans l'avertissement des crues rapides : vers une amélioration de la méthode AIGA. Université de Montpellier 3 : Thèse de Doctorat

Versini, P.-A., Gaume, E., Andrieu, H. (2010a). Assessment of the susceptibility of roads to flooding based on geographical information - test in a flash flood prone area (the Gard region, France). Natural Hazards and Earth System Sciences 10, 793–803. doi:/10/793/2010/

Diffusable SNCF RESEAU

Posters session 1

Enseignements des inondations exceptionnelles des 21 et 22 mai 2012 à Nancy (Gaume *et al.*)

Enseignements des inondations exceptionnelles des 21 et 22 mai 2012 à Nancy

Eric GAUME [1], Olivier PAYRASTRE [1]
[1] Université Gustave Eiffel, CS 5004 44344 Bouguenais Cedex - France

L'agglomération de Nancy a été touchée par un orage exceptionnel dans la nuit du 21 au 22 mai 2012 ; les cumuls de pluie ont localement dépassé 100 millimètres en 3 heures. Cet orage a provoqué des ruissellements et des inondations remarquables, en particulier dans la partie est de l'agglomération, dans le bassin versant du ruisseau de Grémillon, sur les communes de Saint-Marc, Essey-les-Nancy, Pulnoy et Seichamps. Afin de documenter cette inondation urbaine hors norme, d'en conserver le souvenir et d'en tirer les enseignements sur la gestion du ruissellement et des crues soudaines dans les espaces urbanisés, une analyse détaillée post-crue, coordonnée par le GIP GEMCEA a été conduite. La démarche suivie pour cette analyse, les informations collectées ainsi que leur analyse et les principales conclusions de cette étude sont présentées ci-après.
Cette étude a permis de révéler que les dommages les plus remarquables dans l'agglomération ont été provoqués par le débordement du cours d'eau de Grémillon, de ses affluents et du collecteur pluvial qui remplace le cours d'eau dans sa partie aval. Les débits unitaires des crues des parties rurales amont du bassin versant sont très significatifs : de l'ordre 4 $m^3/s/km^2$, soit l'équivalent de 15 mm/h environ de pluies efficaces. Les résultats de modélisation indiquent que le débit maximum de la crue du ruisseau de Grémillon, pour cette crue remarquable, aurait été assez proche du débit observé, si le bassin versant n'avait pas été urbanisé. Les inondations de 2012 à Nancy rappellent donc que les aménagements urbains doivent prendre en compte les crues naturelles exceptionnelles des petits cours d'eau ou thalweg péri-urbains et permettre l'écoulement des eaux au travers du tissu urbain sans trop de dommages.
Mots-clefs : crue, inondation, ruissellement, retour d'expérience, étude post-événement.

Lessons learned from the extraordinary inundation in the city of Nancy on the 21th and 22nd of May 2012

The urban area of Nancy has been hit by an outstanding rainfall event on the 21th of May 2012 in the evening. The accumulated rainfall amounts have exceeded locally 100 millimeters within 3 hours. This thunderstorm induced outstanding inundations, especially in the eastern part of the area, in the watershed of the Grémillon stream, in the towns of Saint-Marc, Essey-les-Nancy, Pulnoy and Seichamps. A detailed post-event study, coordinated by the GIP-GEMCEA, has been conducted in order to document this extraordinary event and draw some conclusions on the management of runoff and flash floods in dense urbanized areas. The methodology of this study, the collected information as well as the main conclusions are presented hereafter.
It revealed that the major observed damages are related to the overflow of the Grémillon stream, its tributaries and of the main pluvial sewer replacing the stream in its downstream course. The estimated unit peak discharges produced on the rural upstream parts of the Grémillon watershed are very significant: about 4 $m^3/s/km^2$, equivalent to about 15 mm/h effective rainfall, indicating high runoff rates on these rural areas during the peak of the event. Moreover, simulations show that the Grémillon peak discharge for this event would probably have been close to the observed one without the contribution of the impervious areas. These inundations illustrate that urbanization should take into account the possible floods of small urban and peri-urban streams and allow the flood water to flow through the urban network with limited impact. Urbanization should keep space for flood water.
Keywords: flood, inundation, urban runoff, post-event study.

INTRODUCTION

L'agglomération de Nancy a été touchée par un orage exceptionnel dans la nuit du 21 au 22 mai 2012. Les cumuls de pluie ont localement dépassé 100 millimètres en 3 heures. Cet orage a provoqué des ruissellements et des inondations remarquables, en particulier dans la partie est de l'agglomération, dans le bassin versant du ruisseau de Grémillon. Afin de documenter cette inondation urbaine hors norme, d'en conserver le souvenir et d'en tirer les enseignements sur la gestion du ruissellement et des crues soudaines dans les espaces urbanisés, une analyse détaillée post-crue, coordonnée par le GIP GEMCEA a été conduite. Cette analyse complète les études réalisées par ailleurs par la Communauté urbaine du Grand Nancy (Grand Nancy, 2012 et les relevés de désordres et de laisses de crue (fig. 2) et l'étude de renaturation du ruisseau et d'aménagement de plusieurs zones d'expansion des crues.

La démarche présentée ci-après suit un protocole établi pour l'étude des crues soudaines en Europe [Borga et al., 2008 ; Gaume & Borga, 2008]. Elle s'appuie sur la collecte de données de terrains et sur une modélisation hydrologique simplifiée, permettant de relier les informations disponibles sur les pluies et sur les écoulements (débits estimés, informations chronologiques).

LE BASSIN VERSANT DE GREMILLON

Localisation et caractéristiques

Le ruisseau de Grémillon draine la partie nord-est de l'agglomération nancéienne (communes de Seichamps, Pulnoy, Essey-les-Nancy et Saint Max). Le bassin versant, délimité à partir de la confluence avec la Meurthe, couvre une superficie de 12,7 km^2 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les surfaces imperméabilisées couvrent environ 3.8 km^2, soit un taux d'imperméabilisation moyen de 28%, dépassant 50% pour la partie aval du bassin versant [Grangjean, 2008].
Le subsratum du bassin est essentiellement composé de formations sédimentaires marneuses, à l'exception des calcaires à polypiers du Bajocien recouvrant le sommet de la butte Sainte Geneviève au nord-ouest. Ce substratum, peu perméable, peut expliquer la réaction hydrologique importante des parties non urbanisées du bassin aux pluies intenses de mai 2012 (cf. ce qui suit).

Aménagements et réseau hydrométrique

Le ruisseau de Grémillon est découvert sur la plus grande partie de son cours, à l'exception de la traversée de la ZAC de Pulnoy et des deux derniers kilomètres de son cours (figure 1). Le bassin versant est équipé d'un réseau hydrométrique dense, constitué de quatre pluviographes, situés sur le bassin versant ou à proximité immédiate, du radar météorlogique de Nancy, situé au sud du bassin versant, de six limnimètres situés sur le cours busé du ruisseau, dont deux limnimètres équipant le bassin d'orage de la Zac de la porte Verte à Pulnoy. Trois bassins d'orages permettent de contrôler les débits générés par les secteurs récemment urbanisés de Seichamps et Pulnoy (fig. 1) :

- Le bassin de la Masserine à Pulnoy : capacité de stockage de 4000 m^3, débit théorique seuil de remplissage de 2 m^3/s.
- Le bassin de la Zac de la porte Verte à Pulnoy : capacité de stockage de 13000 m^3, débit seuil de remplissage à 10 m^3/s.
- Le bassin de la Trapière à Seichamps : capacité de stockage de 1500 m^3.

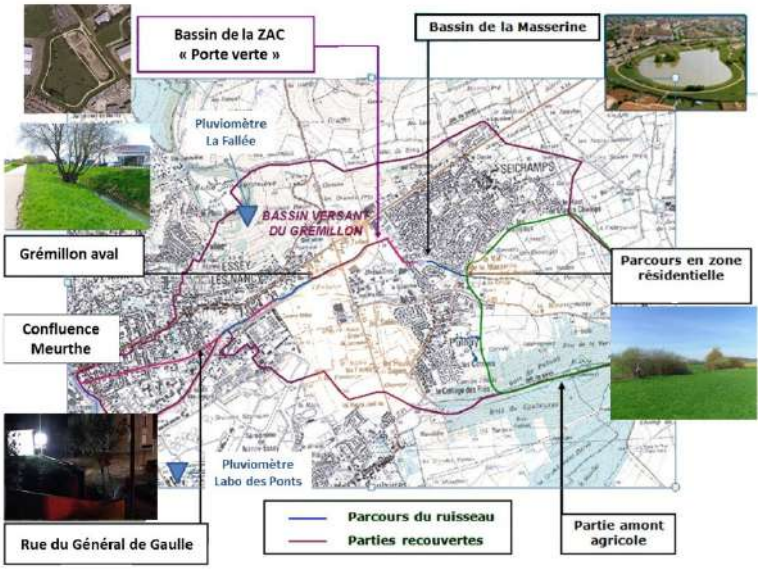


Figure 1 : *Bassin versant du ruisseau de Grémillon et localisation des pluviomètres et des bassins d'orages. Illustration de sections d'écoulement levées (Grémillon aval, Grémillon amont). Les parties du cours du ruisseau busées sont indiquées en rose.*

L'EPISODE ORAGEUX DES 21 ET 22 MAI 2012

Données mesurées disponibles

Les pluies et les écoulements exceptionnellement intenses des 21 et 22 mai 2012 ont provoqué de nombreux désordres et pannes des appareils de mesure. Seuls les pluviomètres de La Fallée (cumul de 112 mm sur l'épisode) et du laboratoire des Ponts (cumul de 102 mm) ont permis un enregistrement complet de l'épisode de pluie. Les intensités mesurées durant cette pluie sont remarquables avec des cumuls de plus de 14 mm en 5 minutes, soit une intensité de près de 170 mm/h sur 5 minutes. La comparaison des mesures disponibles au sol et des estimations radar (fig. 2) indique que les intensités des deux averses intenses sont largement sous-estimées par le radar, du fait probablement de l'atténuation du faisceau radar par la lame d'eau recouvrant le dôme de protection du radar lors des pluies intenses. Les données radar étant inexploitables et ne permettant pas de caractériser l'hétérogénéité spato-temporelle des pluies lors de cet épisode orageux, la pluie mesurée par le pluviographe de la Fallée a été extrapolée à l'ensemble du bassin versant du Grémillon et des autres cours d'eau voisins dans les interprétations qui suivent.

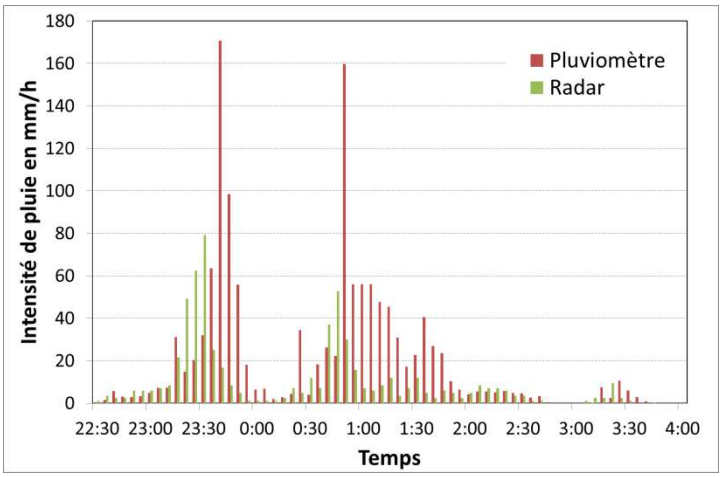


Figure 2 : *Comparaison entre les intensités de pluies mesurées par le pluviographe de la Fallée et les intensités estimées par le radar de Nancy pour le pixel correspondant, les 21 et 22 mai 2012.*

Une panne électrique a affecté tous les limnimètres de la partie aval du cours du Grémillon dès le début de l'événement, peu après 22h30, alors que le débit aval avait à peine atteint 4 m^3/s selon la courbe de tarage de la station. Les seuls relevés limnimétriques continus disponibles sont ceux des deux limnimètres du bassin d'orage de la ZAC de la porte Verte. Ces mesures sont imparfaites (détarage des sondes). Elle permettent cependant de dater le début de remplissage du bassin à 22h30, le début du débordement à 23h40 et la vidange, qui s'amorce à 3h30 du matin, lorsque le débit du ruisseau est à nouveau inférieur à 10 m^3 /s. Selon des témoins oculaires, le bassin de Masserine aurait commencé à déborder aux alentours de 23h00.

Conséquences et dommages

La pluies intenses ont provoqué des débordements généralisés du ruisseau et de ses affluents sur l'ensemble de leurs cours, ainsi que des ruissellements localisés (Fig. 3). Les hauteurs d'eau dans les habitations sont restées limitées à quelques dizaines de centimètres aux rez-de-chaussée en général, mais les écoulements de surface ont causé de nombreux dégâts aux chaussées (affouillements) et au moblier urbain.

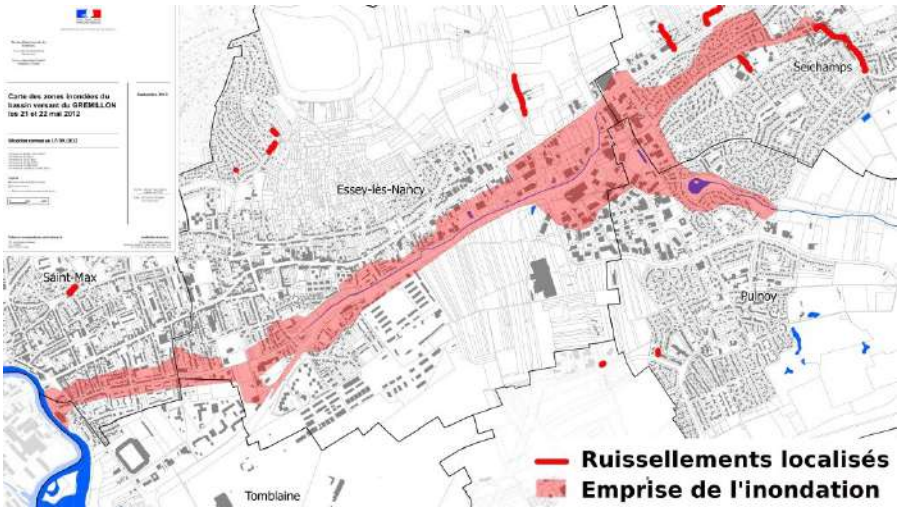


Figure 3 : *Inondations constatées sur le bassin versant du ruisseau de Grémillon suite aux pluies des 21 et 22 mai 2012 (source Grand Nancy).*

METHODOLOGIE DE L'ETUDE HYDROLOGIQUE

Collecte de données complémentaires

Onze sections d'écoulement ont pu être levées sur le bassin versant de Grémillon et les cours d'eau voisins après la crue. Les laisses de crues ont été identifiées et relevées et une estimation de débit a pu être élaborée pour chacune de ces sections, permettant de proposer des ordres de grandeurs des débits maximum de crues pour quatre secteurs touchés par les pluies intenses (fig. 4 et tableau 1). Ces estimations sont basées sur une hypothèse de régime d'écoulement uniforme dans les sections considérées et l'application de la relation de Manning-Strickler – slope-area method [Lumbroso & Gaume, 2012] . La valeur du coefficient de rugosité est une inconnue, variant de 5 à 20, selon l'encombrement du lit du cours d'eau. L'application de cette méthode a conduit à des estimations de vitesses d'écoulement de 0.5 à 2 m/s selon les hypothèses et les sections d'écoulement dans le cas présent.

Ces estimations, dont l'incertitude n'est pas négligée, comme en témoignent les intervalles de confiance proposés [Q_{min}, Q_{max}], sont cohérentes dans l'ensemble. Elles indiquent des valeurs de débits unitaires élevées si on les compare aux intensités des pluies mesurées. La valeur estimée pour le ruisseau des Rouaux se démarque. Elle est très exceptionnelle pour une région sous climat océanique tempéré [Gaume et al., 2009]. On remarque aussi que le débit unitaire du ruisseau de Grémillon estimé à Essey les Nancy, qui tient compte des apports urbains, est probablement inférieur au débit unitaire estimé pour la partie rurale amont du

bassin versant. Nous verrons dans la suite quelles sont les explications de ce phénomène qui peut paraître surprenant.

***Tableau 1 :** Débits estimés sur le bassin versant de Grémillon et sur les bassins versants voisins.*

Bassin versant	$Q_{probable}$ m^3/s	$[Q_{min}, Q_{max}]$ m^3/s	Surface BV km^2	Q unitaire $m^3/s/km^2$	Q unitaire mm/h
Grémillon amont	10	[7 , 15]	2,5	4,0	15,0
Grémillon aval	25	[20 , 35]	8,3	3,0	11,0
Ruisseau des Rouaux	45	[30 , 60]	3	15,0	54,0
Ruisseau de Voirincourt	10	[5 , 15]	4,5	2,2	8.0

Des entretiens ont été conduits auprès des témoins occulaires dans quatre secteurs : commune de Pulnoy en amont et en bordure du bassin de Masserine, rives de la partie découverte du ruisseau de Grémillon à Essey-les-Nancy, village de Laneuvelotte inondé par le ruisseau de Voirincourt, village d'Agincourt inondé par le ruisseau des Rouaux. Ces témoignages donnent une image assez homogène du déroulement de la crue sur l'ensemble du territoire. Des premières inondations sont signalées dès 23h00. Le maximum de la crue a eu lieu entre de 1h00 et 1h30 du matin et la décrue a été progressive.

Modélisation hydrologique

Le modèle hydrologique utilisé est ici très simple et comporte peu de paramètres. L'objectif premier n'est pas de représenter aussi parfaitement que possible les hydrogrammes de crues, mais de mettre en relation les pluies observées et les informations disponibles sur les écoulements. Ce modèle hydrologique, CINECAR [Gaume et al., 2004] a été spécifiquement conçu pour simuler des crues soudaines. C'est un modèle « événementiel » dans la mesure où il n'est pas adapté à la simulation de longues chroniques mais à celle d'événements importants isolés de crue. Il ne représente que les écoulements dits « directs » (ruissellement de surface et écoulements immédiats) et ne modélise pas les écoulements retardés ou les débits de base. C'est un modèle distribué, où un bassin versant est représenté comme un réseau ramifié de biefs de rivière de section transversale rectangulaire, auxquels sont raccordés deux versants supposés rectangulaires par souci de simplicité (Fig 4).

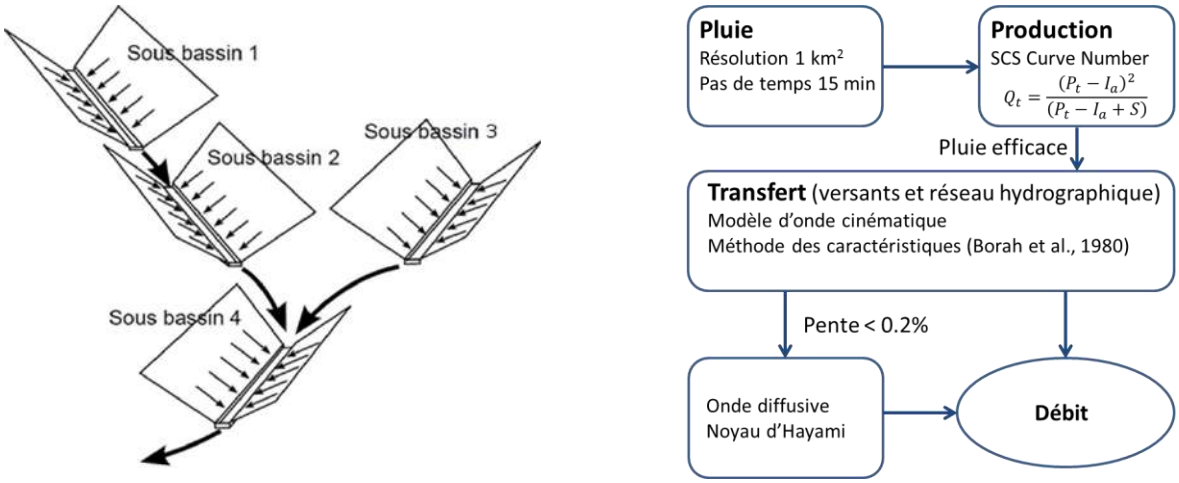


***Figure 4 :** Représentation d'un bassin versant dans le modèle CINECAR et organisation du modèle. Q_t cumul de pluie efficace depuis le début de l'événement (mm), P_t cumul de pluie (mm), S capacité de stockage du sol et du sous-sol (mm), Ia pertes initiales généralement égales à 0.2.S (mm).*

Le modèle hydologique combine de manière assez classique (1) une « fonction de production » qui évalue à chaque pas de temps l'intensité des pluies efficaces – i.e. pluies qui alimentent effectivement l'hydrogramme de crue et (2) une « fonction de transfert » qui gère la propagation des pluies efficaces sur les versants et dans

le réseau hydrographique. Dans le modèle Cinecar, la fonction de production choisie est la fonction classique dite CN-SCS de l'US Soil Conservation Service. Cette fonction prévoit une évolution monotone du rendement d'écoulement – rapport entre l'intensité des pluies efficaces et l'intensité des pluies brutes – de 0 à 1 au cours d'un événement pluvieux au fur et à mesure de l'augmentation du cumul de pluie. Elle possède un paramètre unique : le Curve Number (*CN*) relié à la capacité de stockage *S* (fig. 4).
La fonction de transfert de la pluie efficace est basée sur le modèle dit « d'onde cinématique » – simplification des équations d'hydraulique à surface libre de Barré de Saint Venant,– avec une résolution par la méthode des caractéristiques, qui permet des calculs rapides. Une version plus récente applique le modèle plus élaboré d'onde diffusante pour les biefs à faible pente. Elle n'a pas été utilisée ici.

Les principaux paramètres du modèle sont :

- Pour la fonction de production, le Curve Number (*CN*) des différents versants. Dans le cas présent, les surfaces imperméabilisées ont été dissociées des surfaces naturelles. Une valeur de *CN* de 95 a été affectée aux versants imperméabilisés et deux valeurs de CN ont été testées pour les versants naturels : 70 (capacité de stockage *S*=100 mm) et 50 (*S*=250 mm).
- Pour la fonction de transfert, la largeur des biefs d'écoulements – déterminée à parti des images satellites et des levés de terrain et les coefficients de rugosité de Strickler des biefs et des versants. Une valeur standard de 15 a été retenue pour tous les biefs (valeur un peu faible pour les parties chenalisées et cuvelées) et une valeur de 10 pour les versants.

RESULTATS

Cinq versions du modèle Cinecar ont été testées afin de simuler l'hydrogramme de la crue des 21 et 22 mai 2012 en différentes sections où des estimations de débits ont été réalisées, ainsi qu'à l'exutoire du bassin versant du ruisseau de Grémillon (fig 5). Trois simulations ont été effectuées avec un *CN* homogène pour l'ensemble des surfaces : *CN* de 95, 70 et 50. Dans un deuxième temps, les surfaces imperméabilisées ont été traitées séparément – distinction d'un versant imperméabilisé et d'un versant naturel pour chaque bief dans le modèle – en affectant une valeur de *CN* de 95 aux versants imperméabilisés (simulations CN 70-1 et CN 50-1). La comparaison des simulations CN 70 et CN 70-1 met en évidence la contribution à la crue des surfaces imperméabilisées. La simulation CN 50-1 illustre la réponse des surfaces imperméabilisées seules, les écoulements produits par les surfaces perméables étant très réduits pour un CN de 50.

La comparaison des simulations et des débits estimés sur les bassins versants des ruisseaux de Grémillon amont et de Voirincourt, bassins assez peu urbanisés, indiquent une réponse hydrologique marquée des parties non urbanisées des bassins versants. La simulation réalisée avec une valeur de Curve Number de 70 correspond assez bien aux observations – ordre de grandeur et occurrence du débit de pointe aux alentours de 1h00 du matin selon les témoins occulaires (Fig. 5). Une valeur de CN de 70 indique une forte réactivité de ces bassins versants aux pluies, qui s'explique certainement par la nature du substratum (marnes et grès) et peut-être aussi par la saturation partielle des sols par les pluies qui ont précédé la crue, notamment le 21 mai au matin. La comparaison avec le modèle CN 95 (bassin versant totalement imperméable) indique que les rendements d'écoulement (rapport entre les pluies efficaces et les pluies brutes) ont été proches de 50% au paroxysme de la crue. Le modèle Cinecar ne permet en revanche pas d'expliquer la valeur remarquable du débit estimé sur le ruisseau des Rouaux. Par expérience, une valeur de CN supérieure à 70 pour un bassin peu urbanisé n'est pas réaliste. Plusieurs explications peuvent être avancées : (a) le bassin a été affecté par des pluies bien plus intenses que le secteur, pourtant proche, de la Fallée, (b) le bassin d'alimentation du ruisseau s'étend au-delà du bassin versant topographique – on peut penser en particulier à une alimentation karstique provenant du plateau de Malzeville.

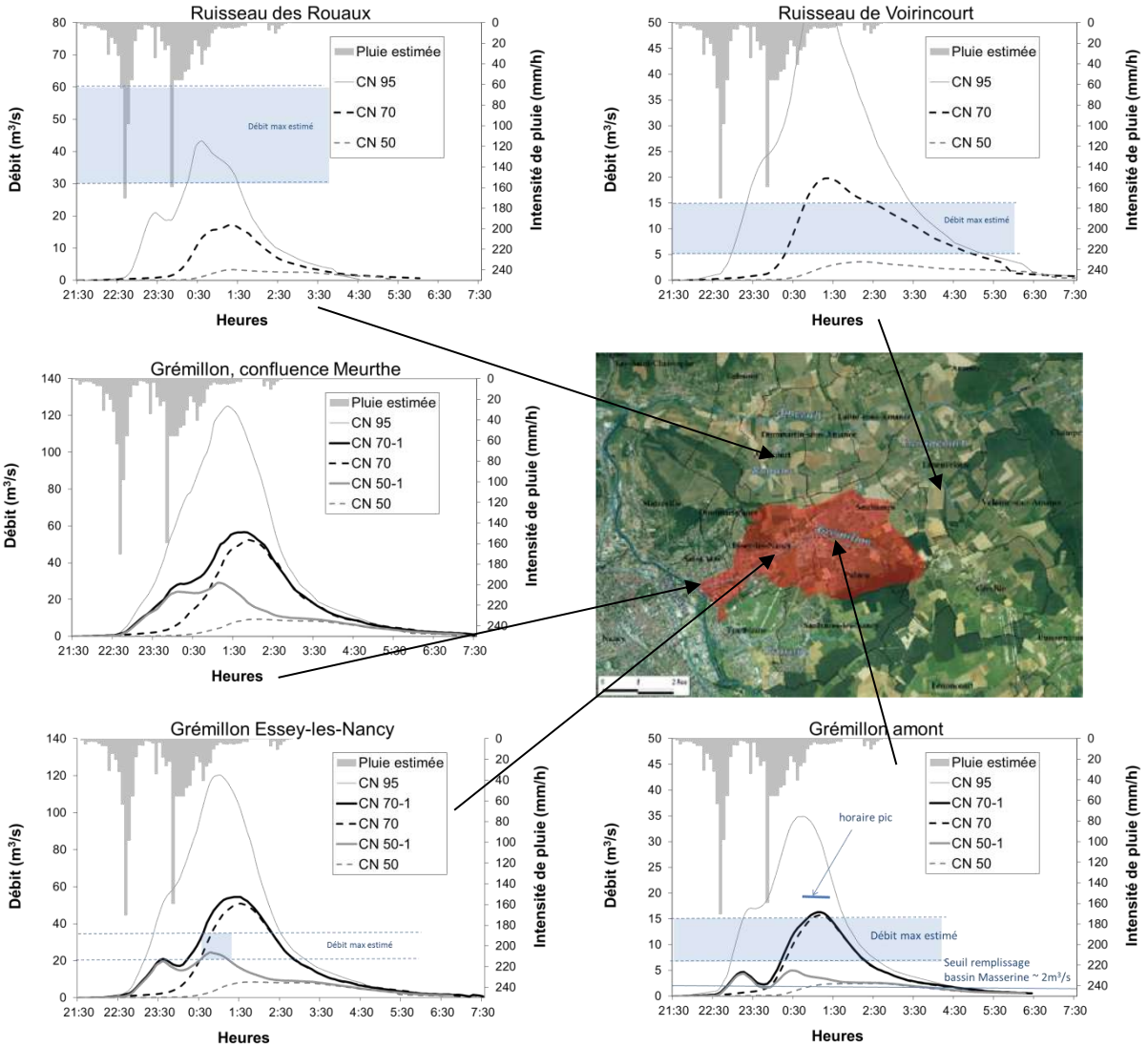


Figure 5: *Résultats de simulations des hydrogrammes de crues en différents points des bassins versants étudiés, avec différentes versions du modèle Cinecar.*

Si l'on extrapole le modèle ajusté dans les secteurs à dominante rurale (modèle CN 70-1) à l'ensemble du bassin du ruisseau de Grémillon – Grémillon à Essey-les-Nancy et Grémillon à la confluence avec la Meurthe (fig. 5) – on est amené à conclure que l'onde de crue, associée à la seconde averse, a été bien plus importante que la première – ce qui a bien été observé – et ce, du fait de la contribution des surfaces perméables. Le modèle surestime cependant le débit de cette seconde onde de crue à Essey-les-Nancy. Ceci peut s'expliquer par le laminage de l'onde de crue du fait des nombreux débordements et inondations qui se sont produits à Pulnoy, Seichamps et Essey-les-Nancy (cf. fig. 3) et dont ne tient pas compte le modèle Cinecar. Les surfaces inondées en amont d'Essey-les-Nancy (Fig. 3), sont compatible à le stockage temporaire estimé d'environ 150 000 m^3 (cf. fig. 6). La zone urbaine amont a, en quelque sorte, joué le rôle d'un très important bassin d'orage qui a partiellement protégé l'aval du bassin versant.

Le remplissage des bassins d'orage de Masserine et de la porte Verte ont été reportés sur les hydrogrammes de crues simulés du Grémillon amont et à Essey-les-Nancy (modèle CN 70-1, fig. 6). La section d'Essey-les-Nancy est située légèrement à l'aval du bassin d'orage de la porte Verte et possède donc un bassin versant légèrement plus important : les débits de crue sont certainement surestimés. Mais il faut aussi considérer que le modèle de production du SCS-CN est un peu simpliste et à tendance à sous-estimer les débits provenant

des surfaces perméables en début d'événement. Les deux erreurs se compensent partiellement et les ordres de grandeur restent certainement valables.

Le résultat de modélisation laisse penser, que le bassin de Masserine a été rempli et a commencé à déborder avant la fin de la première onde de crue et ce, essentiellement du fait des apports des parties urbanisées du bassin versant (fig. 6). Un bilan de volume sur les débits simulés fixe l'heure de début de débordement vers 23h25 et peut-être un peu avant si l'on considère que des écoulements provenant des parties rurales du bassin ont été sous-estimés. Ce résultat est très cohérent avec les témoignages qui situent le débordement de ce bassin vers 23h00.

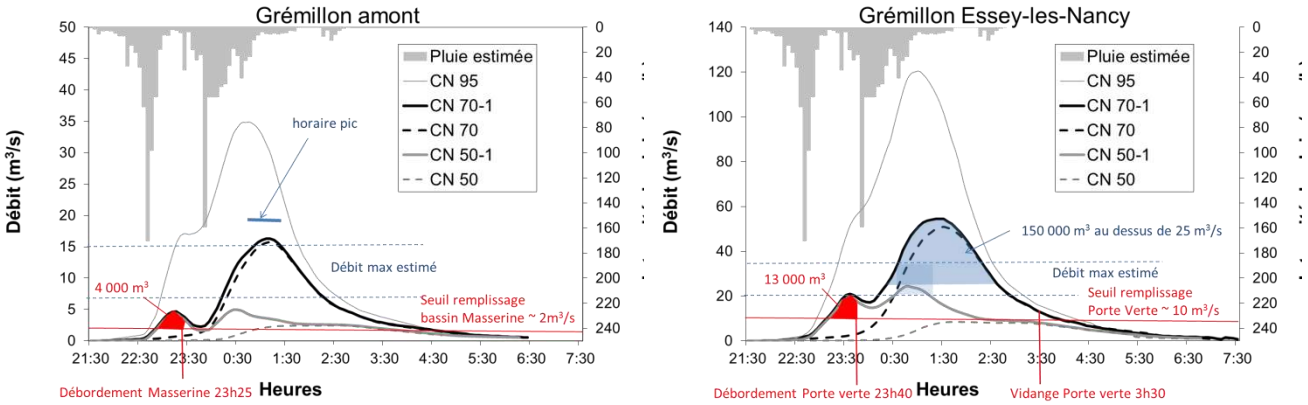


***Figure 6** : Reconstitution du remplissage des bassins d'orages à partir des hydrogrammes simulés à l'aide du modèle CN 70-1*

Le cas du bassin de la porte Verte, pour lequel les données limnimétriques permettent d'être plus précis sur les horaires, est tout aussi convaincant . De nouveau, la première onde de crue, issue esssentiellement des parties imperméabilisées du bassin versant, a suffi à saturer le bassin d'orage. Son débordement aurait débuté vers 23h40 selon le modèle, ce qui est parfaitement concordant avec les observations. Selon l'hydrogramme simulé, la vidange du bassin d'orage aurait pu débuter vers 4h00 du matin, ce qui est aussi en accord avec les observations limnimétriques : début de vidange vers 3h30.

L'ensemble de ces conclusions est cohérent et permet de déduire que ce sont essentiellement les surfaces imperméabilisées qui ont réagi à la première averse du 21 mai au soir. Le débit de la crue provoqué par la seconde averse, pourtant comparable en intensité, a été bien plus important du fait de la contribution des surfaces perméables.

CONCLUSIONS

Les défaillances de nombreux dispositifs de mesure, comme c'est souvent le cas lors d'événements remarquables, n'ont pas facilité l'analyse et l'interprétation de la crue de 2012. Les informations recueillies permettent cependant de tirer des conclusions assez claires sur cet événement :

- Les dommages observés sont diffus, liés à du ruissellement urbain, mais les dommages les plus remarquables ont été provoqués par le débordement du cours d'eau de Grémillon, de ses affluents et du collecteur pluvial qui remplace le cours d'eau dans sa partie aval
- Les débits unitaires des crues des parties rurales amont du bassin versant sont très significatifs : de l'ordre 4 $m^3/s/km^2$, soit l'équivalent de 15 mm/h environ de pluies efficaces, à rapporter aux intensités maximales de pluies horaires de l'ordre de 50 mm/h.
- Le bassin versant de Grémillon est très fortement imperméabilisé (taux d'imperméabilisation estimé à 28%). Il a été touché par deux averses de pluie successives, à peu près équivalentes. Les

écoulements lors de la première averse ont été essentiellement le fait des ruissellements sur les surfaces imperméabilisées. Ils ont provoqués, par leur intensité, des défaillances localisées du réseau de drainage pluvial. L'inondation généralisée observée lors de la seconde averse ne s'explique en revanche que par la contribution importante des surfaces péri-urbaines non imperméabilisées

En conclusion, les simulations indiquent que le débit maximum de la crue du ruisseau de Grémillon, pour cette crue remarquable, aurait été assez proche du débit observé si le bassin versant n'avait pas été urbanisé (cf. comparaison des simulations CN 70 et CN 70-1 sur la figure 5). Les aménagements urbains doivent être conçus pour permettre le libre écoulement des eaux lors des crues naturelles exceptionnelles des petits cours d'eau ou thalweg urbains et péri-urbains.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien financier de la communauté urbaine du Grand Nancy, via le GIP GEMCEA.

REFERENCES

Borga M., E. Gaume, D. Creutin, L. Marchi (2008). *Surveying flash flood response: gauging the ungauged extremes*, Hydrological processes, doi: 10.1002/hyp.7111.

Gaume E., Payrastre O., Vehar, C. (2014). *Etude hydrologique de la crue exceptionnelle du ruisseau de Grémillon à Nancy des 21 et 22 mai 2012.* Rapport d'étude, IFSTTAR, GIP GEMCEA, février 2014. 27 pages.

Gaume E. et al. (2009). *A collation of data on European flash floods*. Journal of Hydrology. 367, 70-78, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.028.

Gaume E. et Borga M. (2008). *Post flood field investigations after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations*. Journal of flood risk management, 1, 175–189. doi:10.1111/j.1753-318X.2008.00023.x

Gaume E. , Livet M., Desbordes M., Villeneuve J-P.(2004). Hydrologic analysis of the Aude, France, flash flood 12 and 13 november 1999, Journal of Hydrology, 286, 135-154.

Grand Nancy (2012). *Rapport sur l'orage du 21 mai 2012*. Note technique, 13 pages.

Grandjean X. (2008) - *Etude hydrologique et hydraulique d'un ruisseau périurbain de l'agglomération de Nancy (54) : le Grémillon*, Mémoire de fin d'études pour l'obtention diplôme d'ingénieur de l'ENGEES, École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement, 121p.

Lumbroso D. et Gaume, E. (2012). *Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges*, Journal of Hydrology, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.08.048.

Quels enseignements tirer des coulées de débris post-incendie survenues le 9 janvier 2018 à Montecito (Californie, USA) ? (Douvinet *et al.*)

Quels enseignements tirer des coulées de débris post-incendie survenues le 9 janvier 2018 à Montecito (Californie, USA) ?

Johnny DOUVINET[1], Anna SERRA-LLOBET[2], John RADKE[3], Matthias KONDOLF[4]

[1] Avignon Université / UMR ESPACE 7300 CNRS, 74 rue Louis Pasteur, Case 19, 84029 AVIGNON Cedex 9, johnny.douvinet@univ-avignon.fr

[2] Institute of International Studies, University of California Berkeley, 94701, USA. annaserrallobet@berkeley.edu

[3] Department of Landscape Architecture & Environmental Planning, City and Regional planning, University of California Berkeley, ratt@berkeley.edu,

[4] Global Metropolitan Studies, University of California Berkeley, kondolf@berkeley.edu

Le 9 janvier 2018, à Montecito (Comté de Santa-Barbara, État de Californie, États-Unis), de violentes coulées de débris sont apparus vers 4h du matin, suite à une intensité pluviométrique de courte durée (13mm en 5 minutes, soit une intensité horaire de 157mm/h). Ces coulées, constituées de blocs, de boue et de branches d'arbres, ont pu atteindre, par endroits, une accumulation maximale de 5 m., et les vitesses d'écoulements ont été estimées à plus de 30 km/h (soit plus de 8m/s). Les dommages ont été remarquables : 21 morts, et 2 personnes disparues ; 167 blessés ; 408 maisons endommagées ; un coût estimé à plus de 167 millions de dollars. Cet événement est surtout apparu après le passage du pire incendie qu'ait connu la Californie au cours du dernier siècle (le Thomas Fire*). Ces phénomènes (i.e. "post-fire debris flows") résultent d'interactions entre les variables de prédisposition (la nature des sols, les zones brûlées, l'humidité, l'hydrophobie, les pentes) et les forçages climatiques (l'intensité des pluies), et la sensibilité des bassins amont de Montecito avait bien été identifiée la veille (avec un risque de crue probable estimé à 68%). Des évacuations avaient aussi été ordonnées (plus de 10 000 personnes). Dès lors, que retenir de cet événement, et comment réduire leurs impacts à l'avenir ?*
Mots-clés : coulées de débris, incendie, Montecito, modèles de prévision.

The 2018 Montecito post-fire mudflows: an (im)foreseeable event?

Early on the morning of 9 January 2018, a rain characterized by a sudden intensity (13 mm in 5 min, e.g. 157mm/h) at 3.45 a.m. (recorded by the Montecito rain gauge) cause flows consisting of mud, boulders and tree branches up to 15 feet (5 m) in height, and moving at estimated speeds of up to 20 miles per hour (30 km/h). Damage was remarkable: 21 dead and 2 missing; 167 injured; 408 houses damaged; estimated cost over $167 million. This event occurred mostly less than 20 days after the worst fire in California in the last century (Thomas Fire). Such phenomena (post-fire debris flows) result of complex interactions between predisposition variables (soil type, burnt areas, humidity, hydrophobicity, slopes…) and climatic forcing (rainfall intensity), and the sensitivity of the Montecito upstream basins had been well identified (with a probable flood risk estimated at 68%). Mass evacuations had also been ordered the day before. So, what can we learn about this phenomena, was it possible to do "better", and is it possible to reduce the number of victims in short term?
Key words : debris flows, post-fire, Montecito, forecasting tools.

INTRODUCTION

Les coulées de débris post-incendie sont des aléas capables de transporter de grands volumes de sédiments et des blocs sur plusieurs centaines de mètres, ce qui les rend destructeurs et dangereux [Coe *et al.,* 2014 ; Takahashi, 2007 ; Cannon *et al.,* 2009]. Ces aléas se produisent lorsque des ruissellements consécutifs à des pluies intenses arrachent aux versants pentus leurs sols, des cailloux et des roches [Coussot et Meunier, 1997; Santi *et al.*, 2008]. Immédiatement après un incendie, le ruissellement joue un rôle plus exacerbé, par la mise à nu des sols et la perte en végétation [Wondzell et King, 2003 ; Parise et Cannon, 2012], mais également par les modifications induites dans les propriétés du sol et par les excès sédimentaires [Meyer et Wells, 1987 ; Nyman *et al.,* 2011 ; Moody et Ebel, 2012]. D'ailleurs, à la fin des années 1990, Meyer et Wells (1997) ont montré que le ruissellement commence dès le début des premières pentes (1%). Il converge et se concentre ensuite le long des drains de rang 2, si on se fonde sur la méthode d'ordination de Strahler (1957). Le ruissellement concentré entraîne une érosion marquée, qui va jusqu'au substratum rocheux, et le transport des matériaux se poursuit vers le bas de pente. Plus récemment, Cannon *et al.* [2001, 2008, 2010] ont démontré que la transition vers la coulée de débris se produit lorsque suffisamment de matériaux ont été entraînés, par rapport au volume du ruissellement, pour conférer aux flux des caractéristiques de coulée (Coussot et Meunier, 1997]. Les dépôts ne présentent pas de granoclassement. Ces coulées, qui débutent souvent par des glissements superficiels, acquièrent en quelques dizaines de mètres des caractéristiques d'écoulement.

Anticiper de tels événements est encore complexe. La prévision se fonde sur plusieurs facteurs, notamment l'intensité des feux, l'ampleur des zones brulées, la nature des pluies arrivant après l'incendie et des paramètres géomorphologiques et hydrologiques inhérentes aux bassins versants touchés par les incendies [Nyman *et al.,* 2011]. Les coulées de débris ou les inondations chargées de sédiments sont souvent produites dans des bassins brûlés de petite taille (< 20km^2), en réponse à des orages convectifs de très courte durée dans les régions montagneuses de l'ouest des États-Unis [Parrett, 1987 ; Meyer et Wells, 1997 ; Cannon et Gartner, 2005], ou suite à des tempêtes hivernales de plus longue durée au sud de la Californie [Booker, 1998]. Mais les seuils ne sont pas si précis : en Californie du Sud, le seuil est défini sur des durées de 20 heures [Cannon *et al.,* 2009], et pourtant, cela englobe une grande diversité de conditions, qui peuvent varier de 25 mm/h pendant 10 min à une pluie moyenne de 4 mm/h pendant 20 h. La reprise de la végétation ou le transport des matériaux accumulés dans les pentes pendant le ruissellement peuvent aussi affecter les réactions hydrologiques. Par conséquent, ces événements ne sont pas si faciles à anticiper. Ils peuvent se produire avec peu, voire sans aucune humidité préalable. Aussi, malgré le danger que ces aléas représentent [Stock & Dietrich, 2003], les efforts doivent se poursuivre, en particulier pour effectuer des mesures empiriques, car ces aléas se produisent peu fréquemment et sont difficiles à quantifier avec précision [Kean et al., 2011 ; Takahashi, 2007].

Il convient donc d'améliorer les connaissances sur ces phénomènes (qui ne sont pas nouveaux), et sur les « seuils critiques », qui peuvent servir de guide pour les systèmes d'alerte et la planification des interventions d'urgence en cas de ruissellement important dans des contextes ayant des caractéristiques similaires. En comparant les prévisions de précipitations et les gammes de mesures effectuées sur les aléas passés, il est possible de prendre des décisions en matière d'alerte et d'évacuation. Quand une combinaison d'intensité et de durée des pluies approche ou dépasse la ligne de seuil, des coulées de débris et des inondations présentant des risques importants pour les personnes et les biens deviennent probables. D'ailleurs, les seuils définis dans le cadre de la Californie du Sud sont utilisés comme guide pour le système d'alerte précoce de démonstration NOAA-USGS sur les crues éclairs et les coulées de débris en Californie du Sud [Cannon, 2008], et ils ont été utilisés dès le début du mois de janvier 2018…

PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

Situé à 8 km à l'est de la ville de Santa Barbara, en Californie (figure 1), Montecito est une communauté où habitent 9 145 habitants en 2018. Cette ville est régulièrement classée par le magazine *Forbes* comme l'une des plus riches des États-Unis (selon le magazine, 21 des 100 personnalités publiques les plus influentes des États-Unis sont connues pour posséder des biens à Montecito en 2017). Le climat se caractérise par des hivers plus chauds et des étés plus frais, par rapport aux endroits situés plus à l'intérieur des terres, en raison de la proximité de l'océan [Cui *et al*., 2018]. La ville de Montecito s'est développée au pied des montagnes de Santa Ynez, de nature sédimentaire, et le pic d'altitude atteint 1161 m. Suivant une direction nord/sud, cinq cours d'eau principaux drainent le massif (figure 1) sur de courtes distances (< 3km), avant de se raccorder à l'Océan Pacifique au sud. Dans ces conditions, le terrain, escarpé, présente des pentes importantes : ~37% du massif dépasse des pentes > 30%, et la pente de la ligne d'eau dépasse en moyenne les ~12% [Kean *et al*., 2019]. Les ruissellements de surface s'écoulent dans un ensemble de ruisseaux présentant des gradients d'environ 5 %, et ils ré-incisent des cônes alluviaux hérités des périodes quaternaires. La plaine urbanisée contient des formes de relief en pente marquée, en particulier au nord de la route nationale 192 et de la route 101, et des formes de relief en pente douce, sur les cônes alluviaux et près de la côte [Kean *et al*., 2019]. Pour protéger la forte densité de routes et les habitations, 4 bassins de rétention des sédiments ont été construits dans le passé : sur les drains amont de Cold Spring et San Ysidro (en 1964), de Romero (1971) et de Montecito (2002).

Avant l'événement de 2018, Montecito avait déjà connu des coulées de débris post-incendie (Kean *et al.,* 2019). Des coulées historiques dommageables (1926, 1934, 1964, 1969, 1971) avaient déjà été enregistrées dans cette zone [Wert, 2018], et ce sont les coulées de 1934 (dramatique à Montrose, 40 personnes tuées) qui d'ailleurs ont abouti aux premières recherches scientifiques dans le domaine [Keller *et al.,* 2019]. Suite au gigantesque incendie *Thomas Fire* fin 2017, le risque de coulée de débris a été pris au sérieux par les agences du comté, de l'état et les agences fédérales, en témoignent : (1) la caractérisation de la gravité des brûlures du sol comme indicateur d'inondation et de potentiel de coulée de débris [BAER, 2018] ; (2) une évaluation des risques de coulée de débris montrant la probabilité et le volume potentiel des coulées de débris de la zone brûlée en réponse à des épisodes intenses [USGS, 2018] ; (3) l'activation du système d'alerte qui prédit un potentiel important à extrême de coulée de débris, qui a été diffusée 4 jours avant le 9 janvier 2018 [Restrepo *et al.,* 2008 ; NWS, 2018]. Une communauté d'urgence proactive a aussi coordonné des ordres d'évacuation à grande échelle, ce qui a probablement réduit le nombre de victimes [Kean *et al.,* 2019]. Toutefois, malgré ces

efforts, il a été difficile d'anticiper cet événement : 1) avant les pluies du 9 janvier 2018, l'U.S. Geological Survey (2018) prévoyait une probabilité de 62 % à 70 % de coulées de débris sur les 5 bassins versants situés en amont du Montecito (tableau 1), pour une intensité horaire supérieure à 24 mm/h [Bessette-Kirton *et al.,* 2019] ; 2) la prévision d'une telle intensité reste difficile en temps réel, d'autant qu'une seule station existe au sein des montagnes de Santa Ynez ; 3) vu l'ampleur de l'incendie et la situation convective en place la veille, un grand nombre de bassins était prêt à réagir sur l'ensemble de la Californie du Sud. Par précaution, la ville a toutefois fait évacuer plus de 10 000 personnes la veille, eu égard à la situation orageuse à venir, ce qui fut aussi le cas lors des épisodes précédemment prévus (ce fut la 3ème évacuation depuis le 20 décembre).

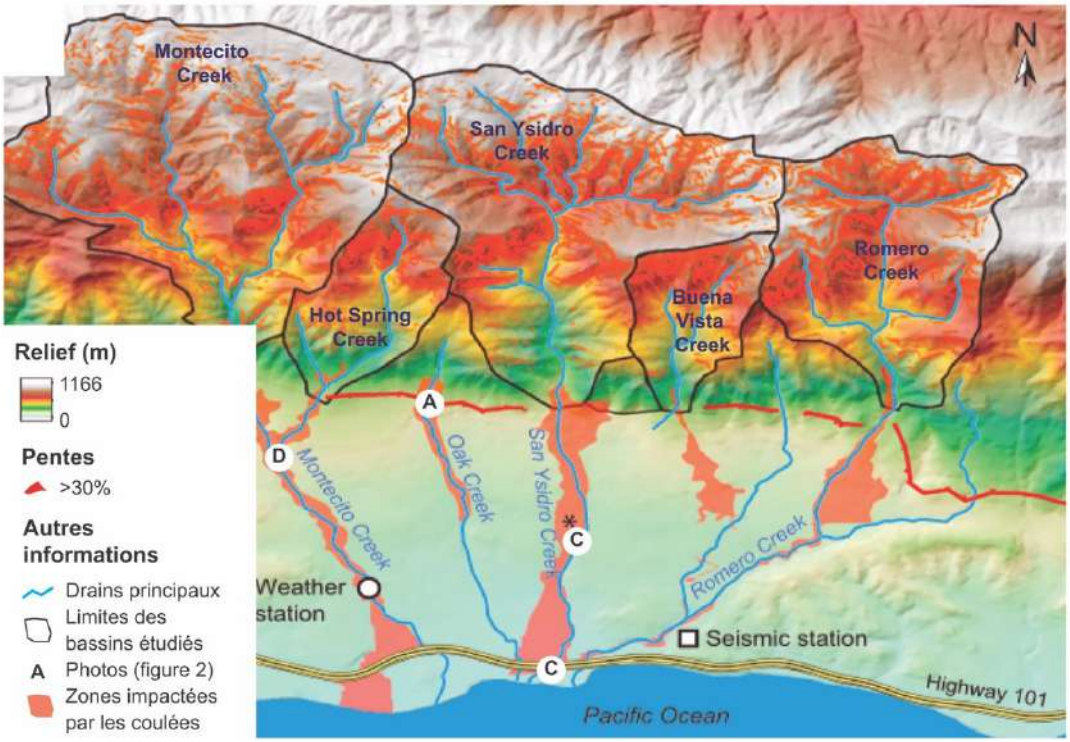


Figure 1 – Carte de localisation des bassins étudiés au nord de Montecito (modifié d'après Ciu *et al.,* 2018)

Nom des bassins versants (numéro)	**Surface des bassins (km²)**	**Pentes moyennes** (percentile 50 et 90)	**Surfaces brulées (indice fort à très fort)** (%)	**Probabilité d'occurrence d'une coulée de débris**
Montecito Creek (1)	9,35	28 / 39	79	65 %
Hot Spring Creek (2)	1,47	28 / 40	49	70 %
San Ysidro Creek (3)	7,60	28 / 40	85	69 %
Buena Vista Creek (4)	1,67	29 / 41	82	63 %
Romero Creek (5)	4,59	30 / 42	78	62 %

Tableau 1 – Caractéristiques des bassins et probabilité d'occurrence d'une coulée (pour $_{Imax}$ = 24mm/h)

CHRONOLOGIE ET IMPACTS DE LA CRUE DU 9 JANVIER 2018

Du 16 au 17 décembre 2017, l'incendie *Thomas Fire* a affecté la quasi-totalité des bassins amont, et le feu a atteint les premières maisons des cônes alluviaux [Kean *et al.,* 2019]. Dans ces conditions, le risque lié à des coulées de débris était redouté et les pluies étaient très surveillées [Bessette-Kirton *et al*., 2019]. Le 4 janvier, plusieurs bulletins météorologiques, relayés dans les médias, ont annoncé un nouvel épisode pluvieux à venir dans la nuit. L'épisode frontal, arrivant par l'ouest et s'étalant sur plus de 200km à 1h du matin, s'est disloqué en plusieurs cellules convectives bloquées par effet orographique [Oakey *et al*., 2018]. En amont de Montecito, un orage, aussi soudain que violent, a entraîné une courte intensité de pluies (13 mm en 5 min, soit une intensité horaire équivalente de 157mm/h), de 3h40 à 3h45 (enregistrée par le pluviomètre du Montecito), et en réaction,

des coulées, constituées de blocs et de branches ont atteint par endroits plus de ~5 m de hauteur d'accumulation à Montecito. Les vitesses d'écoulement maximum ont été estimées à plus de ~8m/s (soit ~30 km/h) au niveau des confluences et à l'exutoire du piémont [Hamilton et al., 2018]. A 3 h 47 du matin, le service d'incendie du Montecito a reçu les premiers appels, indiquant une explosion sur San Ysidro Creek-East Mountain Drive [Kean *et al.,* 2019]. Les réponses hydrologiques ont été très soudaines, puisque la Cold Spring a commencé à réagir à 3h49 du matin (ce qui a été confirmé par les images des caméras de sécurité) et les inondations ont commencé dans les autres secteurs urbanisés à 3 h 50 [Kean *et al.,* 2019]. Les réponses estimées à l'aide des signatures sismologiques varient entre 4 h 06 et 4 h 10 [Lai *et al*., 2019].

Nom des bassins versants (numéro)	**Surface des bassins (km²)**	**Surfaces inondées (km²)**	**Volume sédimentaire (m³)**
Montecito Creek (1)	9,35	0,997	231 000
Hot Spring Creek (2)	1,47	0,102	10 000
San Ysidro Creek (3)	7,60	0,905	297 000
Buena Vista Creek (4)	1,67	0,290	41 000
Romero Creek (5)	4,59	0,312	100 000

Tableau 2 – Caractéristiques des coulées survenues le 9 janvier 2018 (d'après Kean *et al.,* 2019)

Les écoulements, arrivant soudainement, ont piégé plusieurs dizaines de personnes, et 163 personnes se sont présentés dans les hôpitaux pour diverses blessures. Un examen rétroactif effectué sur 24 victimes des coulées de débris se présentant à *Cottage Health* a montré que la plupart des symptômes étaient associés à des blessures légères (100%), à une hypothermie (67%), des blessures cranio-faciales (67%), des abrasions de la cornée (53%), des blessures orthopédiques (47%), ou des impacts psychologiques liés à la perte d'un membre de la famille (73%) [Langdon *et al.,* 2019]. 21 personnes sont décédés, et 2 enfants (de 2 et 17 ans) sont portés disparus. 10 victimes (sur 21) étaient des migrants issus de la classe ouvrière [Keller *et al.*, 2019]. Les services de secours ont toutefois « sauvé d'une mort certaine » plus de 50 personnes (évacuées par avions) et 300 personnes sont restées bloquées pendant plusieurs minutes dans le quartier de Romero Canyon, suite à la coupure de la route 192. Fin 2018, les indemnisations associés à cet événement ont été évalués à 7 millions de dollars, pour les interventions d'urgence, et à 43 millions de dollars pour les opérations de nettoyage [Robert & Niehauss, 2018 ; Magnoli, 2018], pour un coût global qui dépasse les 250 millions de dollars en 2019.

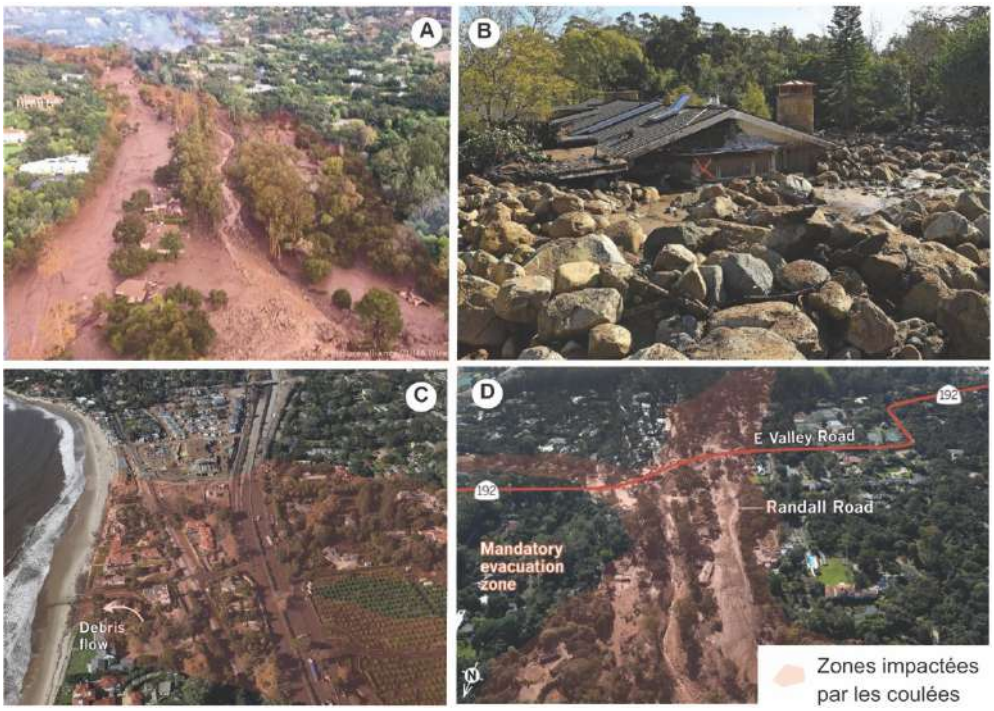


Figure 2 – Photographies illustrant l'ampleur des dégâts recensés à Montecito (localisation sur la figure 1)

UN ALEA « HORS-NORME » ?

La violence des écoulements et la soudaineté des réponses hydrologiques confèrent un caractère particulier à cet aléa. Menées juste après l'événement, plusieurs études en confirment toutefois la singularité. En créant un modèle de probabilité d'occurrence, et en combinant l'indice hypsométrique (HI), les intensités des pluies et la gravité des zones brûlées, Ciu *et al*. (2019) confirment la très forte sensibilité aux coulées de débris des bassins amont, pour des seuils proches à 10mm/h (et non 24mm/h, qui est le seuil utilisé sur l'ensemble de la Californie du Sud). De façon complémentaire, Keller *et al.* (2019) et Kean *et al*. (2019) ont prouvé que les cartes utilisées (et communiquées) par la FEMA sous-estimaient largement la zone inondable, et une nouvelle carte (adoptée fin 2019) devrait permettre de mieux évaluer les dommages aux bâtiments. La prise en compte du risque est par ailleurs spécifique aux Etats-Unis : les individus prennent la responsabilité d'habiter en zone inondable (en lit moyen ou majeur), et c'est à eux de se protéger et de souscrire à une assurance ; autrement dit, ils assument la prise de risque et leur sécurité. De leur côté, Bessette-Kirton *et al.* (2019) confirment que les coulées survenues en 2018 à Montecito sont « classiques » : en utilisant deux modèles différents (à savoir, LAHARZ et FLO-2D), ils arrivent à reproduire 85% des surfaces inondées en 2018, la différence étant liée au phénomène de blocage survenu en amont de la route 192 (qui a augmenté la rétention en amont).

Pour compléter ces travaux, nous avons utilisé un modèle déterministe, RuiCells©, pour évaluer l'influence de l'organisation morphologique interne des bassins versants sur leur dynamique hydrologique, en amont des cônes alluviaux urbanisés. Ce modèle n'a pas vocation à reproduire l'événement : il s'agit ici de confirmer le rôle de la morphométrie dans la genèse des écoulements, et de mesurer le poids des interactions entre l'intensité des pluies, les surfaces brulées et les réponses simulées, en choisissant des conditions initiales identiques (qui tiennent compte de la nature des sols, du relief et de la végétation). Ce modèle peut également être utilisé ici car les montagnes de Santa Ynez sont d'origine sédimentaire, les écoulements de surface ont été prépondérants, et plusieurs travaux ont déjà démontré que les paramètres morphométriques étaient de bons indicateurs pour caractériser les zones exposées aux coulées de débris (Pareschi *et al.,* 2000, Ciu *et al*., 2019 ; Keller *et al.,* 2019). En d'autres termes, nous voulons quantifier le rôle joué par les incendies qui ont, en réduisant la capacité d'infiltration et la porosité des sols à son paroxysme, fortement aggravé les ruissellements de surface.

Dans un premier temps, les simulations 2D ont permis de mettre à jour le comportement spatial théorique des bassins versants. L'indice de concentration (IC) a permis de détecter tous les points en amont desquels "les surfaces et les réseaux sont bien organisés dans une forme donnée"[Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997].

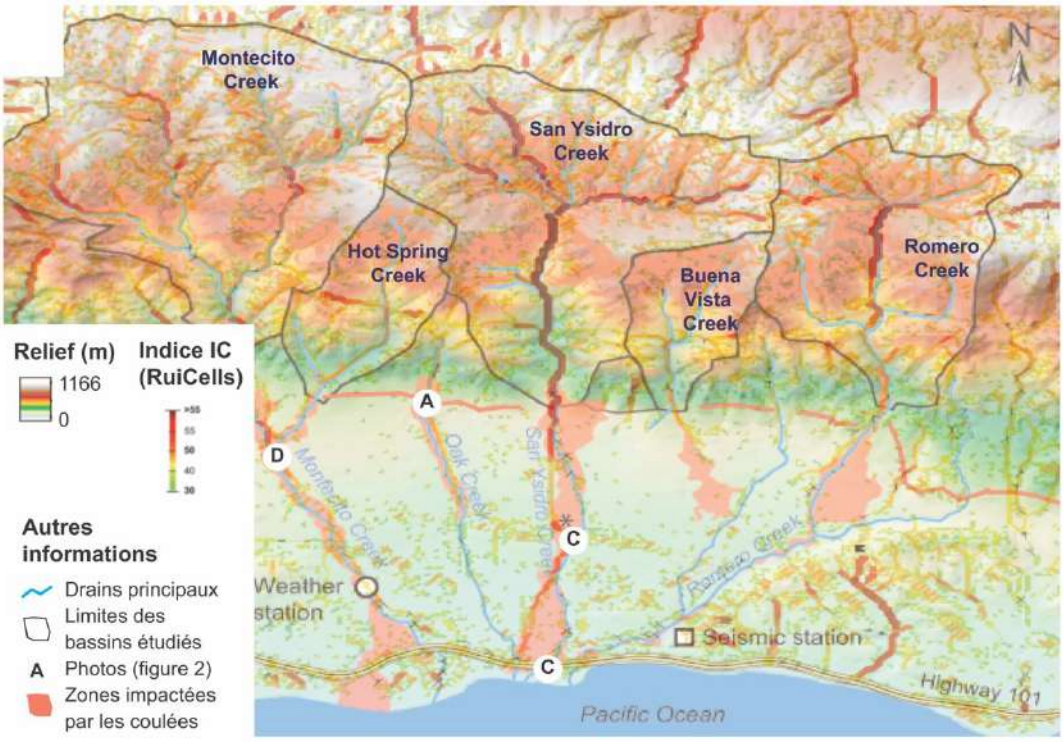


Figure 3 – Cartographie de l'Indice de Concentration des écoulements de surface (potentiel théorique) par rapport à la localisation des zones impactées par les coulées de débris

Des résultats antérieurs [Douvinet et al., 2008, 2014] avaient prouvé les bonnes relations entre des valeurs élevées (supérieures à 55 avec un MNA de 50 m de long) et des impacts géomorphologiques (comme l'érosion et les ravines dans les vallées et les canaux secs) dans des contextes sédimentaires. Ici, un effet « chou-fleur » est à nouveau observé au sein de 4 bassins versants, en particulier au sein de Romero Creek, et surtout au sein des bassin de San Ysidro et Montecito. L'efficacité interne (très marquée au sein de San Ysidro, la valeur simulée étant d'ailleurs la plus forte jamais simulée sur plus de 450 bassins versants…) peut aussi se répéter à travers les échelles spatiales (ce que l'on visualise sur Montecito Creek).

Dans un second temps, nous avons quantifié le rôle joué par les effets d'interactions entre les caractéristiques des pluies et la localisation des surfaces brûlées, en lien avec l'efficacité morphologique préexistante. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons considéré, comme données d'entrées initiales, la nature des sols, l'intensité des pluies du 13 janvier 2017 (avec une intensité pluviométrique maximale de 8mm en 30 minutes), le relief et la présence de la végétation (non brûlée). Des simulations ont ensuite été réalisées, en jouant sur la pluie (en augmentant l'intensité), la localisation des surfaces brûlées (jusqu'à atteindre la situation du 9 janvier 2018), puis en combinant les deux facteurs. Les résultats ont été quantifiés sur les 5 bassins versants, et le poids des interactions est remarquable : l'intensité des pluies a joué un rôle infime dans l'augmentation théorique des débits et des volumes de ruissellement (x1,4 à x1,86).

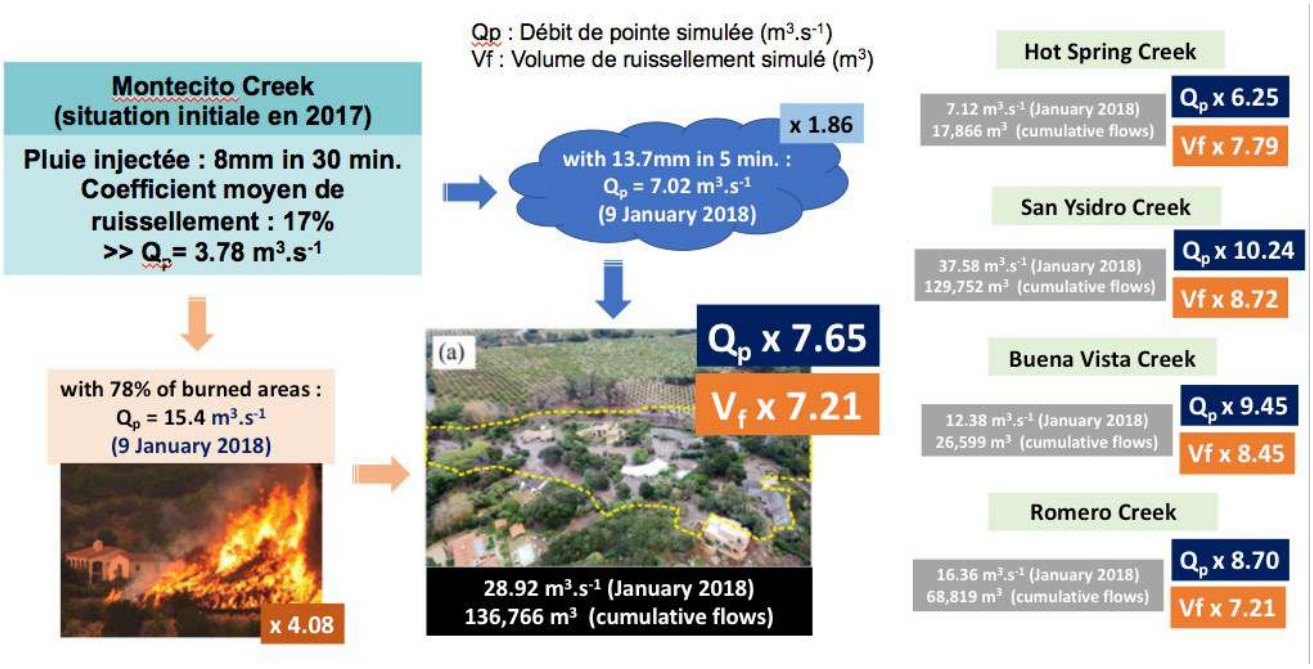


Figure 4 – Rôle joué par les interactions entre l'incendie et les intensités des pluies en 2018 (en considérant la situation initiale de 2017)

En injectant les pluies de 2018, et en jouant sur l'ampleur des zones brûlées (variant de 0% - situation initiale – à 49%, et allant jusqu'à 85%), on estime que l'incendie et les pluies ont, de façon combinée, contribué à augmenter les débits de pointe (figure 4) dans des ordres de grandeur de x6,25 sur Hot Spring Creek, et jusqu'à x10,24 sur San Ysidro Creek. Les volumes ruisselés aurait augmenté dans des ordres de grandeur allant de x7,21 à x8,72. Les volumes simulés sont théoriques, et ils ne peuvent traduire la réalité car la composition en matériaux et en éléments solides rendent bien délicates ces évaluations. En revanche, les ordres de comparaison sont intéressants (tableau 3). Sur 3 bassins (Montecito, San Ysidro et Buena Vista Creek), le ratio Volume Sédimentaire (Vs) /Volumes ruisselés (Vr) simulés indique une valeur qui dépasse les 60% (ce qui confirme l'existence de véritables laves torrentielles aux exutoires, en particulier à la confluence amont du Montecito Creek), tandis que les valeurs sont légèrement plus faibles pour Hot Spring Creek (35%) et Romero Creek (40%). En tous cas, le volume global ruisselé estimé par les simulations (qui atteint 379 202m^3 dans les simulations) est proche des estimations des valeurs avancées peu de temps après l'événement (notamment sur le volume écoulé, estimé à 390 000m^3 par Kean *et al.*, 2019).

Nom des bassins versants (numéro)	**Surface des bassins (km²)**	**Vs : Volume sédimentaire (m³)**	**Vr : Volumes ruisselés simulés (m³)**	**Ratio Vs (Vs+Vr/Vr)**
Montecito Creek (1)	9,35	231 000	136 766	62,8%
Hot Spring Creek (2)	1,47	10 000	17 866	35,8%
San Ysidro Creek (3)	7,60	297 000	129 752	69,5%
Buena Vista Creek (4)	1,67	41 000	26 599	60,1%
Romero Creek (5)	4,59	100 000	68 219	40,4%

Tableau 3 – Comparaison entre le volume sédimentaire et les volumes ruisselés simulés.

QUELS EFFORTS POURSUIVRE POUR AMELIORER LES PREVISIONS ?

Comme indiqué précédemment, les services en charge de la prévision et de la surveillance des coulées de débris (USGS, FEMA) ont mis en vigilance la population face aux coulées de débris. Les médias ont, dès le 4 janvier 2018, fait plusieurs annonces de vigilance dans la presse, et les services de secours ont procédé à de multiples évacuations. Suite à un séminaire réunissant des acteurs opérationnels et des scientifiques (2 février 2020), d'autres constats ont été mis à jour, et plusieurs pistes d'amélioration ont été discutées :

- la capacité des modèles à prévoir le comportement du feu en fonction du type de végétation, de l'humidité de la végétation, des conditions météorologiques, de la topographie, etc,. est robuste, tout comme les modèles de prédiction des coulées de débris (MUDFLOW, LAHARZ ou FLO-2D). L'occurrence des coulées de débris à Montecito en 2018 n'a pas été une surprise, mais l'ampleur et les impacts de l'inondation l'ont été puisque les pluies ont été 3 à 4 fois plus intense que prévues. Le défi est donc d'améliorer les prévisions météorologiques, de mieux anticiper les réactions soudaines d'un grand nombre de bassins ayant brûlé lors d'un incendie aussi gigantesque que celui du *Thomas Fire*, et de mutualiser les savoirs dans un temps aussi court ;

- différentes cartes identifiant le risque existaient auparavant. Toutefois, elles n'ont pas été utilisées de façon « optimale ». De façon surprenante (figure 5), les évacuations ont été organisées en prenant en compte le risque incendie (avec une évacuation obligatoire dans les zones situées au nord de Montecito – figure 2D – tandis que l'évacuation était facultative au sud), alors que les coulées de débris suivent une logique verticale (du nord au sud). Aussi, des riverains situés dans les zones à risque n'ont jamais reçu l'ordre d'évacuer, et ils ont été surpris en pleine nuit par un mur d'eau (à l'image de cette vidéo d'un riverain circulant sur YouTube[1]). Il faudra, par la suite, combiner toutes ces cartographies, et les normaliser à l'aide d'une nomenclature commune ;

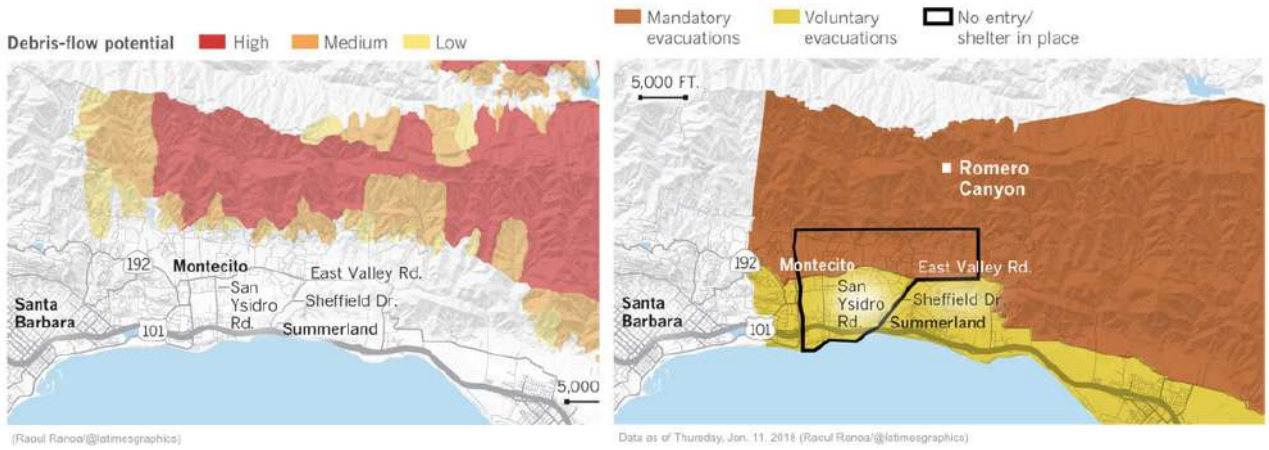


Figure 5 – Cartographie du potentiel d'occurrence d'une coulée de débris en amont de Montecito (à gauche) et planification des évacuations, obligatoires ou facultatives (à droite).

- du côté scientifique, différents modèles sont utilisés à des fins expérimentales, mais ils ne sont pas toujours implémentés dans la planification. Avant le 9 janvier 2018, les moyens de secours ont été pré-positionnés selon

[1] https://www.youtube.com/watch?v=dDSAwM1nf_c

la carte des zones inondables préétablie par la FEMA, mais elle sous-estimait très largement les zones à risque[2]. Si les responsables des opérations ont eu la chance d'avoir l'expérience et les connaissances nécessaires pour envisager le risque et prendre des mesures, le défi consiste alors à transmettre les savoirs experts aux décideurs. Il faut aussi combiner les méthodes et les approches : chaque outil est perfectible, mais ils ont pour avantage d'apporter des informations qui peuvent être complémentaires dans le temps (figure 6) ;

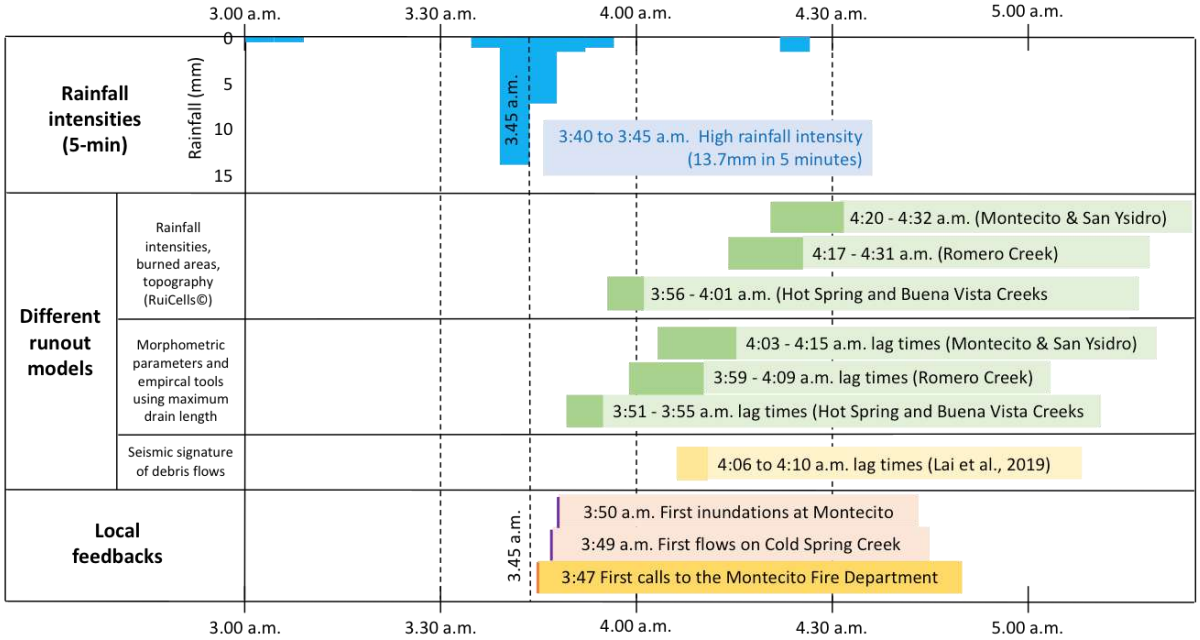


Figure 6 – Vision synoptique des temps d'arrivée des premiers impacts estimés par différentes approches

- le gouverneur consacre des efforts considérables aux ressources de lutte contre les incendies, mais en fin de compte, de nombreuses forêts et paysages dominés par les chapparals sont adaptés au feu. Ils doivent brûler pour promouvoir une écologie saine. Ainsi, les incendies vont continuer, et le gouverneur Newsom a proposé fin 2018 un milliard de dollars pour la lutte contre les incendies. Or, il faut avoir conscience des processus qui font suite aux incendies, et ne pas avoir une vision binaire et mono-risque ;

- d'autres régions pourraient avoir besoin de développer ce travail d'anticipation. L'expérience acquise entre les agences (locales, régionales et fédérales), pour répondre efficacement aux incendies et aux comportements hydrologiques associés, doit être mutualisé pour éviter d'assister à de nouvelles catastrophes.

CONCLUSIONS

Cet événement est intéressant pour deux raisons. Non seulement, il montre l'importance de la mutualisation des savoirs et de leur intégration dans la chaîne opérationnelle, en gardant à l'esprit qu'il faut penser le système territorial en perpétuelle interaction (effets dominos entre les aléas, les risques et les territoires). Mais il montre aussi que les jeux d'échelles et les interactions spatiales peuvent transformer des ruissellements de surface en véritables coulées de débris, dévastatrices et dommageables, en l'espace de quelques minutes. Si l'intensité de la pluie avait été plus faible (en accord avec les prévisions de la veille), ou le cumul plus étalé dans le temps, les réactions hydrologiques auraient sans doute été plus faibles. Si l'incendie n'avait pas été aussi marqué sur les bassins amont, les réactions auraient là aussi été plus modérées (les simulations montrent un seuil dans les pics de pointe et les volumes ruisselés à partir de 35% de surfaces brûlées sur Montecito et San Ysidro Creek). Il faut donc affiner les connaissances sur ces seuils critiques, et considérer l'ensemble des composantes au sein de l'hydrosystème, pour imaginer toute les configurations possibles (quitte à imaginer les pires scénarios). Et il faut également tirer les leçons des événements passés, sans chercher la responsabilité ou les erreurs, ou savoir si le pire a été évité, ou si tout a été mis en œuvre pour gérer au mieux l'événement. C'est en mutualisant tous ces savoirs que la gestion du risque, partagé, intégré, servira à l'ensemble de la société.

[2] https://sbc-gis.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=469ab8e3057a4f56aee5e3f080dc7fb1

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Comité exécutif du Fonds France-Berkeley, pour le financement du projet *"Des feux de forêt épiques aux crues éclair épiques : Repenser la gestion des risques d'inondation à une époque d'extrêmes",* approuvé pour un financement de 11000 dollars sur l'année 2019-2020. Les auteurs tiennent aussi à remercier chaleureusement les participants du séminaire organisé le 5 février 2020, en particulier N. Sitar, S. Lindbergh, Y. He, P. Norton, L. Comfort (Université de Californie), J. Schwartz (Los Padres National Forest Service), R. Lewin (Director Santa Barbara County Office of Emergency Management), D. Winnacker (Fire Chief, Moraga Orinda Fire Distrcit) et J. Lancaster (California Geological Survey), ainsi que N. Leuba (Master I Avignon), qui a réalisé son mémoire universitaire sur ce sujet.

REFERENCES

BAER, U.S. Forest Service Burned Area Emergency Response (2018). Thomas Fire Burn Area Emergency Response (BAER) team reports, https://www.fs.usda.gov/detail/lpnf/home/?cid =fseprd570093

Bessette-Kirton E.K., Kean J.W., Coe J.A., Rengers F.K., Staley D.M. (2019). An evaluation of debris-flow runout model accuracy and complexity in Montecito, California: Towards a framework for regional inundation-hazard forecasting. *Proceedings of the 7th International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation, Association of Environmental & Engineering Geologists*, Special Publication, 28, 257-264.

Booker F.A. (1998). *Landscape and management response to wildfires in California.* MSc thesis, University of California, Berkeley, 486 p.

Cannon S.H. (2001). Debris-flow generation from recently burned watersheds. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7, 321–341.

Cannon S. H., Gartner J.E., Wilson R.C., Bowers J.C., Laber J.L. (2008). Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California, *Geomorphology*, 39, 250-269.

Cannon S.H., Gartner J.E., Rupert M.G., Michael J.A., Rea A.H. et Parrett C. (2010). Predicting the probability and volume of post wildfire debris flows in the intermountain western United States. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 122, 127–144.

Cannon S.H. et Gartner J.E. (2005). Wildfire-related debris flow from a hazards perspective: Chapter 15 in: Jakob, M. and Hungr, O. (Eds)., *Debris flow hazards and related phenomena*, Praxis, Springer, Berlin, Heidelberg, 363–385.

Ciu Y., Cheng D. et Chan D. (2019). Investigation of Post-Fire Debris Flows in Montecito, Internation Journal of Geo-Information, 8 (5), https://www.mdpi.com/2220-9964/8/1/5

Coe J. A., Kean J. W., Godt J. W., Baum R. L., Jones E. S., Gochis D. J. et Anderson G. S. (2014). New insights into debris-flow hazards from an extraordinary event in the Colorado Front Range. *GSA Today,* 24(10), 4–10. https://doi.org/10.1130/GSATG214A.1

Coussot P., Meunier M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth Science Review*, 40, 209-227.

Douvinet J., Delahaye D. et Langlois P. (2008). Modélisation de la dynamique spatiale potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle. Cybergéo, 412. http://www.cybergeo.eu/index16103.html

Douvinet J., Van de Wiel M., Delahaye D., Cossart E. (2014). A flash flood hazard assessment in dry valleys (northern France) by cellular automata modeling. *Natural Hazards*, 75 (3), 2905-2929.

Hamilton, M., Serna, J. (2018). Montecito Braced for Fire, But Mud Was a More Deadly Threat. Los Angeles Times. http://www.latimes.com/local/lanow/la-me-montecito-mudslidemain-20180112-story.html

Kean J.W., Staley D.M. et Cannon S.H. (2011). In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: Comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions, *Journal of Geophysical Research,* 116, https://doi.org/10.1029/2011JF002005

Kean J.W., Staley D.M., Lancaster J.T., Rengers F.K., Swanson B.J., Coe J.A., Hernandez J.L., Sigman A.J., Allstadt K.E. et Lindsay D.N. (2019). Inundation, flow dynamics, and damage in the 9 January 2018 Montecito debris-flow event, California : Opportunities and challenges for post-wildfire risk assessment, *Geosphere*, 15 (4), 1140–1163, https://doi.org/10.1130/GES02048.1

Keller E., Adamaitis C., Alessio P., Anderson S., Goto E., Gray S., Gurrola L., Morell K. (2019), *Applications in geomorphology*, Geomorphology

Kundzewicz, Z. W. , Hegger, D. L. T., Matczak, P. and Driessen, P. P. J. (2018) Flood-risk reduction: Structural measures and diverse strategies. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America. 115 (49) 12321-12325; https://doi.org/10.1073/pnas.1818227115

Lai V.H., Tsai V.C., Lamb M.P., Ulzio T.P et Beer, A.R. (2018). The seismic signature of debris flows: Flow mechanics and early warning at Montecito, California, *Geophysical Research Letters*, 45, 5528–5535, https://doi.org/10.1029/2018GL077683

Langdon S., Johnson A., Sharma R.. (2019). Debris Flow Syndrome: Injuries and Outcomesafter the Montecito Debris Flow, The American Surgeon, https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/000313481908501004

Magnoli, G. (2018). County Estimates $46 Million Cost for Thomas Fire, Montecito Debris Flow Response, https://www.noozhawk.com/article/county_estimates_46m_cost_thomas_fire_montecito_debris_flow_response

Meyer, G.A. et Wells, S.G. (1997). Fire-related sedimentation events on alluvial fans, Yellowstone National Park, USA. *Journal of Sedimentary Research,* 67 (5), 776–791.

Moody, J.A., Ebel, B.A. (2012). Hyper-dry conditions provide new insights into the cause of extreme floods after wildfire. *Catena,* 93, 58–63.

Nyman P., Sheridan G.J., Smith H.G. et Lane P.N. (2011). Evidence of debris flow occurrence after wildfire in upland catchments of south-east Australia, *Geomorphology*, 125, 383–401.

National Weather Service, 2018, Flash Flood & Debris Flow Event Montecito, California January 9, 2018: https://www.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=541c23aa483b48978d1bc9904a6fb14d

Oakley N.S., Cannon F., Munroe R., Lancaster J.T., Gomberg D., et Ralph F.M. (2018). Brief communication: Meteorological and climatological conditions associated with the 9 January 2018 post-fire debris flows in Montecito and Carpinteria, California, USA, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 3037–3043, https://doi.org/10.5194/nhess-18-3037-2018

Pareschi M.T., Favalli M., Giannini F., Sulpizio R., Zanchetta G., Santacroce R. (2000). May 5, 1998, debris flows in circumvesuvian area (southern Italy): insights for hazard assessment. *Geology*, 28, 639–642.

Parrett, C. (1987). Fire-related debris flows in the Beaver Creek drainage, Lewis and Clark County, Montana. U.S. *Geological Survey Water-Supply Paper*, 2330, 57–67.

Parise, M., Cannon, S.H., (2012). Wildfire impacts on the processes that generate debris flows in burned watersheds. *Natural Hazards,* 61, 217–227.

Restrepo P, Jorgensen DP, Cannon SH, Costa J, Laber J, Major J, Martner B, Purpura J, Werner K (2008). Joint NOAA/NWS/USGS prototype debris flow warning system for recently burned areas in southern California. *Bull Am Meteorol Soc,* 89, 1845–1851.

Robert, D.; Niehaus, I (2018), The Economic Impacts of the Montecito Mudslides a Preliminary Assessment; http://www.rdniehaus.com/rdn/wp-content/uploads/2018/03/RDN_ Montecito_Mudslides_Impacts-1.pdf

Rodriguez-Iturbe I, Rinaldo A. (1997). *Fractal River Basins, chance and self-organization.* Cambridge University Press, Cambridge, 547 p.

Santi, P.M., deWolfe, V.G., Higgins, J.D., Cannon, S.H., Gartner, J.E. (2008). Sources of debris flow material in burned areas, *Geomorphology,* 96, 310–321

Stock J., Dietrich W.E. (2006). Erosion of steepland valleys by debris flows. *GSA Bulletin,* 118, 1125–1148.

Takahashi T. (2007). Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures (p. 448). London, UK: Taylor and Francis. https://doi.org/10.1201/

United State Geological Survey, USGS (2018). Emergency assessment of post-fire debris-flow hazards 2017 Thomas Fire, https://landslides.usgs.gov/hazards/postfire_debrisflow/detail.php?objectid=178

WERT, Watershed Emergency Response Team (2018). Thomas Fire—Watershed Emergency Response Team final report, http://cdfdata.fire.ca.gov/incidents/incidents_details_info?incident_id=1922

Wondzell S.M., King J.G. (2003). Postfire erosional processes in the Pacific Northwest and Rocky Mountain regions. *Forest Ecology and Management,* 178, 75–87.

Les observatoires du ruissellement : comprendre les processus pour améliorer les modélisations (Grangeon *et al.*)

Les observatoires du ruissellement : comprendre les processus pour améliorer les modélisations

Thomas GRANGEON[1*], Olivier CERDAN[1], Valentin LANDEMAINE[1], Rosalie VANDROMME[1], Jean-François DESPRATS[1], Sébastien SALVADOR-BLANES[2], Pierre VANHOOYDONCK[2], Arthur GAILLOT[2], Louis MANIERE[2], Isabelle PENE-GALLAND[2], Olivier EVRARD[3], Anthony FOUCHER[3], Lauriane LEDIEU[4], Anaëlle SIMONNEAU[4], Jean-François OUVRY[5], Lai Ting PAK[5,6]

[1] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Département Risques et Prévention, 3 Avenue Claude Guillemin, Orléans, France
[2] EA 6293 Géo-Hydrosystèmes COtinentaux (GéHCO) - Université de Tours, Faculté des Sciences et Techniques, Tours, France
[3] Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE-IPSL), UMR 8212 (CEA/CNRS/UVSQ), Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France
[4] Univ. Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France
[5] Association de recherche sur le Ruissellement, l'Erosion et l'Aménagement du Sol (AREAS), 2 Avenue Foch, 76460 Saint-Valéry-en-Caux
[6] UPR HortSys, Cirad, F-97285 Le Lamentin, Martinique, France
* Auteur correspondant : t.grangeon@brgm.fr

Le ruissellement est un phénomène épisodique et localisé, donc difficile à mesurer. Il résulte de l'interaction de nombreux facteurs, dont les caractéristiques intrinsèques et de surface du sol, la morphologie du bassin versant, mais également les caractéristiques pluviométriques. Afin d'améliorer la compréhension de la genèse et de la propagation du ruissellement au sein de bassins versants de tête, cinq observatoires du ruissellement sont présentés, incluant 11 bassins versants. Pour chacun d'entre eux, la pluie et le ruissellement sont mesurés sur le terrain à haute fréquence (≤ 15 minutes) pendant des durées longues (1.5 à 11 ans). 1640 évènements pluvio-ruisselants sont extraits de ces chroniques en continu et statistiquement analysés afin de cerner les facteurs influant significativement le ruissellement.
La réponse ruisselante de chaque bassin versant est extrêmement complexe mais permet d'identifier des comportements communs. L'importance d'une considération des caractéristiques des sols est montrée, ainsi que celle de leur occupation, état de surface et hydrique. La dispersion de la relation pluie-débit observée au sein de chacun des observatoires permet par ailleurs de montrer et de quantifier l'impact des caractéristiques pluviométriques sur la lame d'eau ruisselée. Les leçons apprises sur chacun des observatoires et leurs conséquences sur la compréhension et la modélisation du ruissellement dans différents contextes sont discutées.
Mots-clefs : Ruissellement hortonien, ruissellement par saturation, propriété des sols, pluviométrie

Runoff observatories: from processes analysis to improved modelling

Runoff events are usually very concentrated in both space and time, and are therefore challenging to monitor. They result from the interactions of rainfall characteristics with both soil surface and intrinsic characteristics and catchment morphology.
To improve our understanding of this complex process, five observatories were installed to monitor the runoff response of eleven catchments to natural rainfall events Measurements were performed with a high frequency (≤15 minutes-time step) and over long time periods (1.5 to 11 years). 1640 rainfall-runoff events were extracted from rainfall and discharge time series. Statistical analyses were performed in order to analyze the processes to account for when studying runoff events.
The rainfall-runoff response of each catchment is highly variable, but some common features were identified across contrasted catchments. Under highly variable soil types, the catchment runoff exhibited contrasted patterns. Soil surface state, and land use were demonstrated to highly affect runoff. The scattering in the rainfall-runoff relationship demonstrated the key role of the initial soil state and rainfall characteristics. Lessons learnt from previous studies in these various environments, as well as their consequences on runoff understanding and modelling are discussed.
Keywords: Infiltration-excess runoff, saturation-excess runoff, soil properties, rainfall

INTRODUCTION

Le ruissellement est un phénomène complexe qui résulte de l'interaction de nombreux facteurs, notamment des précipitations avec le sol (Beven, 1983). Les précipitations, comme les propriétés du sol, étant extrêmement hétérogènes à la fois dans l'espace et dans le temps, le ruissellement présente une variabilité forte à toutes les échelles, allant du mètre à l'échelle du bassin versant et de la seconde à la journée. Au sein de cette complexité,

on distingue en général le ruissellement hortonien, ou ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration (Horton, 1933), du ruissellement par saturation du sol (Dunne, 1978), bien que les deux processus puissent se produire de manière concomitante sur un bassin versant (Saffarpour et al., 2016).

Les enjeux liés à la compréhension de la formation et de la propagation du ruissellement sont nombreux. Ils sont tout d'abord sociétaux, les crues correspondantes étant en général rapides comparées à celles de cours d'eau ou de nappe (Blöschl & Sivapalan, 1995), ce qui implique un temps de réaction moindre pour réagir face à une éventuelle alerte. Par ailleurs, le ruissellement peut éroder les sols et servir de vecteur de transport aux particules ainsi mises en mouvement. Celles-ci peuvent également contenir ou adsorber à leur surface diverses substances biogènes ou polluantes (e.g. Eléments Traces Métalliques, ETM – Garneau et al., 2014 ; pesticides – Gascuel-Odoux et al., 2009 ; carbone – Gomes et al., 2019). Le ruissellement participe ainsi au cycle des éléments et au transfert de contaminants vers des milieux réceptacles au sein desquels les conditions physico-chimiques peuvent permettre leur remobilisation dans l'environnement. Enfin, lorsque les conditions d'écoulement s'y prêtent, par exemple lors de la décrue, ces matériaux peuvent se déposer et engendrer des dégâts ainsi que des coûts de réhabilitation supplémentaires, notamment dans le cas de zones d'habitations (Evrard et al., 2007).

Les enjeux liés à la compréhension du ruissellement sont par ailleurs scientifiques. Il peut se produire dans des conditions extrêmement variées : par exemple, les évènements méditerranéens dont les durées sont brèves et les cumuls de l'ordre de quelques centaines de millimètres sont souvent associés à du ruissellement hortonien. Ce type de ruissellement, gouverné par les caractéristiques des pluies, peut néanmoins se produire pour des cumuls moindres, de l'ordre de la dizaine de millimètres, par exemple lorsqu'un sol battant s'encroûte sous l'effet des averses successives (Valentin & Bresson, 1992). Inversement, le ruissellement produit par saturation implique l'enchainement d'évènements au cours de la saison hydrologique et peut générer des évènements ruisselants pour des évènements pluvieux de cumuls inférieurs à dix millimètres (e.g. Grangeon et al., 2017).

Face aux conséquences possibles du ruissellement, il apparait nécessaire de mettre en place des stratégies d'aménagement du territoire afin d'en limiter les conséquences. Cependant, les connaissances manquent pour produire des modèles et outils permettant d'aboutir à de tels plans d'aménagement. Les principales limites à l'atteinte de cet objectif sont aujourd'hui liées à la quantification des volumes d'eau et des vitesses impliquées au cours des évènements ruisselants, mais également à l'identification des sources du ruissellement et aux chemins de l'eau au sein des bassins versants.

Afin de progresser dans la compréhension et la conceptualisation du ruissellement, et permettre d'aboutir à la création d'outils pertinents de gestion du risque associé, la mise en place d'observatoires de mesures constitue l'une des solutions pertinentes. Ils permettent en effet d'analyser les processus gouvernant la dynamique du ruissellement, mais offrent également des terrains sur lesquels des données de qualité et acquises en continu sont disponibles, permettant de conceptualiser, tester, conforter ou corriger voire réfuter des hypothèses de modélisation. De manière générale, de nombreux observatoires ont été et sont en train d'être déployés dans le monde (e.g. Critical Zone Observatories – CZO ou encore Observatoires de la Zone Critique : Application et Recherche – OZCAR), dans le but d'acquérir sur le long terme des informations à haute fréquence spatiale et temporelle, par exemple pour analyser la réponse hydro-sédimentaire de bassins versants (e.g. Nord et al., 2017). Ce travail s'insère dans ce contexte global d'acquisition et d'analyse de données. Cinq observatoires sont retenus, représentant onze sous-bassins versants, dont le fonctionnement détaillé a été analysé par ailleurs (Grangeon et al., 2017 ; Desprats et al., 2018 ; Grangeon et al., en révision ; Ledieu et al., accepté). L'approche retenue dans la présente étude se centre sur les bassins versants de tête. Elle consiste à privilégier la diversité des terrains d'étude afin de disposer d'une grande variété de conditions hydrologiques et donc d'améliorer la représentativité des résultats. Au vu des échelles temporelles impliquées dans l'étude du ruissellement, le critère de sélection a été la disponibilité de mesures à haute fréquence (de l'ordre de dix minutes) sur des périodes de temps représentatives de la variabilité des conditions pouvant générer du ruissellement (au minimum une année hydrologique).

MATERIEL ET METHODES

Les cinq observatoires déployés sont localisés en France métropolitaine. Ils se situent en région Centre Val de Loire : Louroux (quatre bassins versants), Bonnée (un bassin versant), Egoutier (un bassin versant) ; en Normandie : Bourville (deux bassins versants) ; mais également sur l'île de Mayotte (trois bassins versants) (Figure 1).

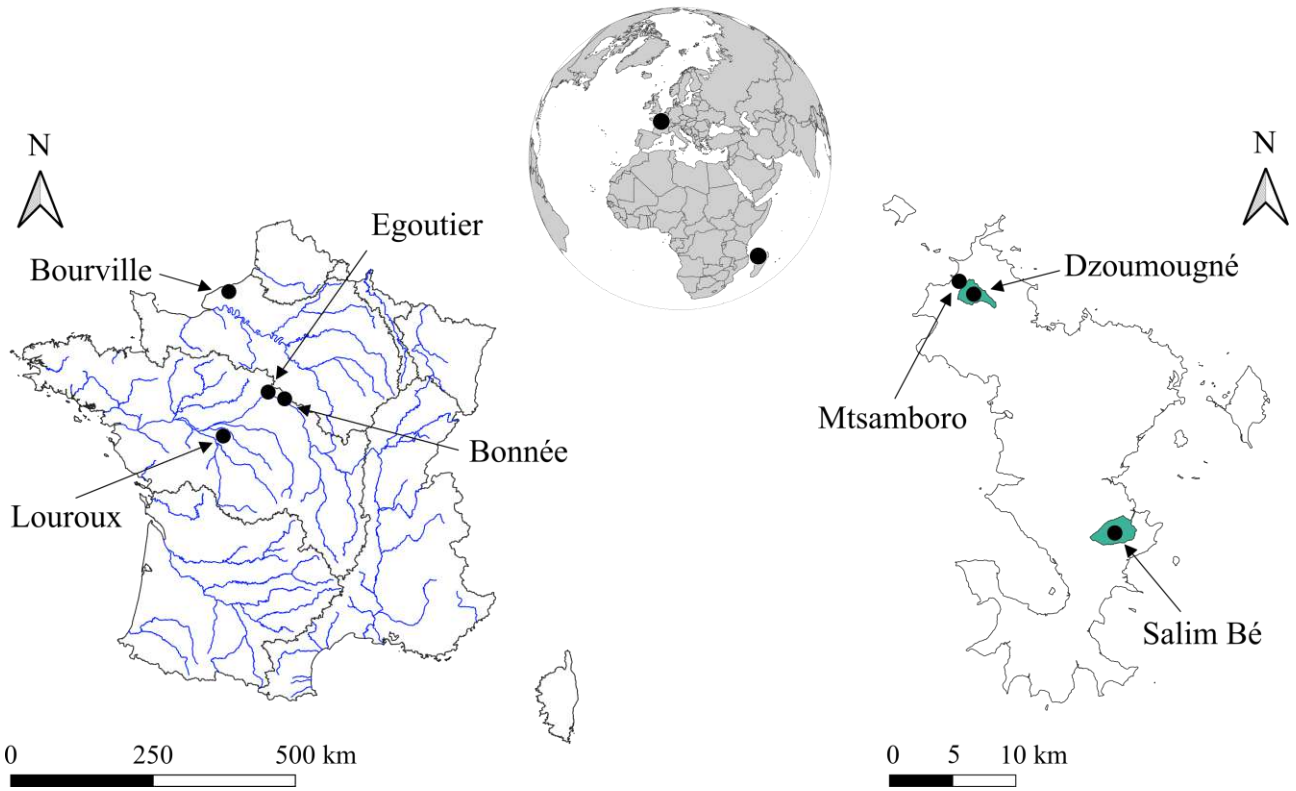


Figure 1: Localisation des cinq observatoires, regroupant un total de 11 bassins versants

Leurs principales caractéristiques, les variables suivies ainsi que leurs fréquences d'acquisition sont indiquées dans le Tableau 1.

Sites		Sols		Climat	Mesures		
Observatoires	**Surfaces (km^2) - Durée d'acquisition (années) – Nombre d'évènements ruisselants analysés (-)**	**Occupation du sol dominante**	**Texture dominante**	**Classification de Köppen-Geiger – Pluie moyenne annuelle (mm)**	**Mesures communes aux observatoires (fréquence)**	**Mesures supplémentaires et remarques**	**Processus dominant la genèse du ruissellement**
Louroux – Masniers (Masn.)	1.96 – 7 ans * - 39	Agriculture	Limons	Tempéré – 684 mm	Q (15 min.), P (5 min.), MES (15 min.)	Q et MES sur parcelles et drain agricole, phosphore	Saturation (+ hortonien)
Louroux – Grand Bray (GB)	5.04 - 7 ans * - 39	Agriculture	Limons	Tempéré – 684 mm	Q (15 min.), P (5 min.), MES (15 min.)	Inclut le bassin de Masniers, phosphore	Saturation (+ hortonien)
Louroux – Beaulieu (Beau.)	5.91 - 7 ans * - 39	Agriculture	Limons	Tempéré – 684 mm	Q (15 min.), P (5 min.), MES (15 min.)	Phosphore	Saturation (+ hortonien)
Louroux – Conteraye (Cont.)	2.03 - 7 ans * - 39	Forêts et prairies	Limons	Tempéré – 684 mm	Q (15 min.), P (5 minutes), MES (15 min.)en suspension (15 min.)	Phosphore	Saturation (+ hortonien)
Bonnée (Bonn.)	120 – 2 ans – 35	Agriculture et forêts	Sables et argiles	Tempéré – 637 mm	Q (10 min.), P (10 minutes), MES (10 min.)	Q et MES à l'exutoire de 34 ha de parcelles drainées	Saturation et hortonien
Mayotte - Mtsamboro (Mtsa.)	0.19 - 4 ans * - 287	Urbain et péri-urbain (30%), agricole et naturel (70%)	Argile et limon	Tropical – 1441 mm	Q (1 min.), P (1 min.), MES (1 min.)	Q et MES sur parcelles par simulation de pluie	Ruissellement de subsurface et concentration en bas de versant

Mayotte – Dzoumougné (Dzou.)	3.43 - 4 ans * - 401	Agriculture (80%) et Naturel (85.8%) badlands (14.2%)	Argile et limon	Tropical – 1756 mm	Q (1 min.), P (1 min.), MES (1 min.)	Q et MES sur parcelles par simulation de pluie	Ruissellement de subsurface et concentration en bas de versant
Mayotte - Salim Bé (Salim.)	5.34 – 4 ans * - 273	Mixte - Agriculture et Forêt (97.1%), urbain (1.4% à l'exutoire), badlands (0.7%)	Argile et limon	Tropical – 1441 mm	Q (1 min.), P (1 min.), MES (1 min.)	Q et MES sur parcelles par simulation de pluie	Ruissellement de subsurface et concentration en bas de versant
Egoutier (Egout.)	3.8 – 2 ans * - 24	Forêt et péri-urbain	Argilo-sableux	Tempéré – 637 mm	Q (3 min.), P (6 min.), MES (6 min.)	Mesures contaminants (ETM, Pharmaceutiques et HAP) + géochimie organique et minérale	Saturation (+ hortonien)
Bourville (BRVL)	10.45 – 11 ans * - 227	Agriculture	Limons	Tempéré – 765 mm	Q (1 à 15 min.), P (1 à 15 min.), MES (Evénementielle)	Mesures de pesticides	Hortonien (+saturation)
Bourville – Fond du tilleul (FDTL)	1.45 – 7 ans * - 237	Agriculture	Limons	Tempéré - 765 mm	Q (1 à 15 min.), P (1 à 15 min.), MES (Evénementielle)	Emboîté dans BRVL, mesures de pesticides	Hortonien (+saturation)

Tableau 1: Principales caractéristiques des observatoires. Q indique le débit ($m^3.s^{-1}$), P le cumul de pluie (mm) et MES la concentration en Matières En Suspension ($mg.l^{-1}$). HAP indique les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques. Les pluies moyennes annuelles sont issues des archives climatologiques de Météo France sur la période 1981-2010. La classification climatique est issue de Beck et al. (2018). Les astérisques * indiquent des observatoires dont les mesures sont encore en cours d'acquisition actuellement. A noter que l'Egoutier dispose de trois stations, mais qu'une seule d'entre elles a été utilisée dans l'analyse. Les processus indiqués entre parenthèses dans la colonne « Processus dominant la genèse du ruissellement » indiquent un processus soupçonné d'intervenir dans la dynamique du bassin versant, mais dans un faible nombre de cas.

Il s'agit globalement de bassins versants anthropisés, que ce soit du fait d'activités agricoles (Louroux, Bonnée, Bourville, Mayotte) ou d'activités industrielles/occupations urbaines (Egoutier). Ces bassins versants présentent des pentes variées, qui peuvent être importantes (Mayotte : 15% à Salim Be, 16% à Dzoumougné, 22% à Mtsamboro) faibles (Bourville et Bonnée : médiane inférieure à 2%) à très faibles (Louroux et Egoutier : médiane de l'ordre de 0.5 %).

L'acquisition de données se base sur une mesure en continu de la hauteur d'eau et de la turbidité, l'utilisation d'un pluviomètre à auget, ainsi que d'un préleveur séquentiel permettant d'extraire, en crue et hors crue, des échantillons d'eau et de matières en suspension. La chronique de hauteur d'eau est convertie en chronique de débit par utilisation d'une courbe de tarage expérimentale, exception faite de la station de Mtsamboro dont le temps de réponse très court (inférieur à 15 min) a imposé l'utilisation d'une loi hydraulique sur section contrôlée. Puis la part du ruissellement est extraite par utilisation d'un filtre numérique de type Chapman (1991), en supposant qu'il est représenté par la partie rapide de l'écoulement. Si le choix d'un filtre numérique pour extraire la part du ruissellement depuis un signal de débit total porte souvent à débat (Pelletier et Andréassin, 2020), il est à noter que la même méthodologie a été strictement appliquée sur chacun des bassins versants analysés, permettant une comparaison relative des résultats. La chronique de turbidité est convertie en chronique de concentration en matières en suspension par tarage à l'aide d'échantillons d'eaux brutes acquis par des préleveurs automatiques puis traités en laboratoire (filtration à 0.45 µm et séchage à 105° pendant au moins 24 heures). Seuls des prélèvements de MES intégrés à l'échelle de l'évènement ont été effectués au sein du bassin versant de Bourville.

Les évènements pluvieux sont extraits sur des critères de quantité de pluie et de durée entre chaque événement. Ils sont ensuite couplés aux évènements de crues identifiés sur la base d'un rapport entre écoulements rapides et écoulements lents. Ces critères et seuils sont propres à chaque bassin versant et déduits d'une procédure d'essais-erreurs basée sur le temps de réponse mesuré sur les chroniques. Ainsi, pour chaque observatoire, des chroniques haute fréquence sont disponibles, auxquelles est couplée une identification des évènements pluvio-ruisselants. Les variables décrivant ces évènements, calculées sur la base de cette identification, sont les suivantes : volume de ruissellement et lame d'eau ruisselée (m^3 et mm), débit de pointe et débit de pointe spécifique ($m^3.s^{-1}$ et $m^3.s^{-1}.km^{-2}$), durée de l'évènement ruisselant (h), cumul de pluie (mm), durée de la pluie (min.), intensité de pluie maximale et moyenne ($mm.h^{-1}$), précipitations sur 48 heures antécédentes (mm), coefficient de ruissellement (%). La pluie antécédente a été sommée sur 48h sur la base d'une étude antérieure ayant démontré son utilité pour l'analyse de la dynamique ruisselante de versants (Cerdan et al., 2001). Cette valeur est une indication de l'humectation de l'horizon supérieur du sol, favorisant la genèse de ruissellement hortonien. Il est par ailleurs à noter que cette méthodologie implique que les cumuls de pluie analysés dans le texte sont ceux ayant généré des évènements de crue.

Par ailleurs, la dynamique érosive des bassins versants du Louroux et de la Bonnée a été étudiée en détail, ainsi que celle d'éléments chimiques associés à l'érosion au sein du bassin versant de l'Egoutier. Les lecteurs intéressés par ces thématiques sont renvoyés aux publications correspondantes (Grangeon et al., 2017 ; Grangeon et al., en révision ; Ledieu et al., 2020, respectivement).

RESULTATS ET DISCUSSION

Réponse ruisselante générale et processus impliqués

Les observatoires sont déployés sur des échelles de temps, d'espace et dans des conditions climatiques et pédologiques variées. Ils présentent des coefficients de ruissellement variant de plusieurs ordres de grandeur (Figure 2), de moins de 10^{-3}% à près de 70%, reflétant la diversité des facteurs morphologiques, pédologiques ou encore climatiques des bassins versants.

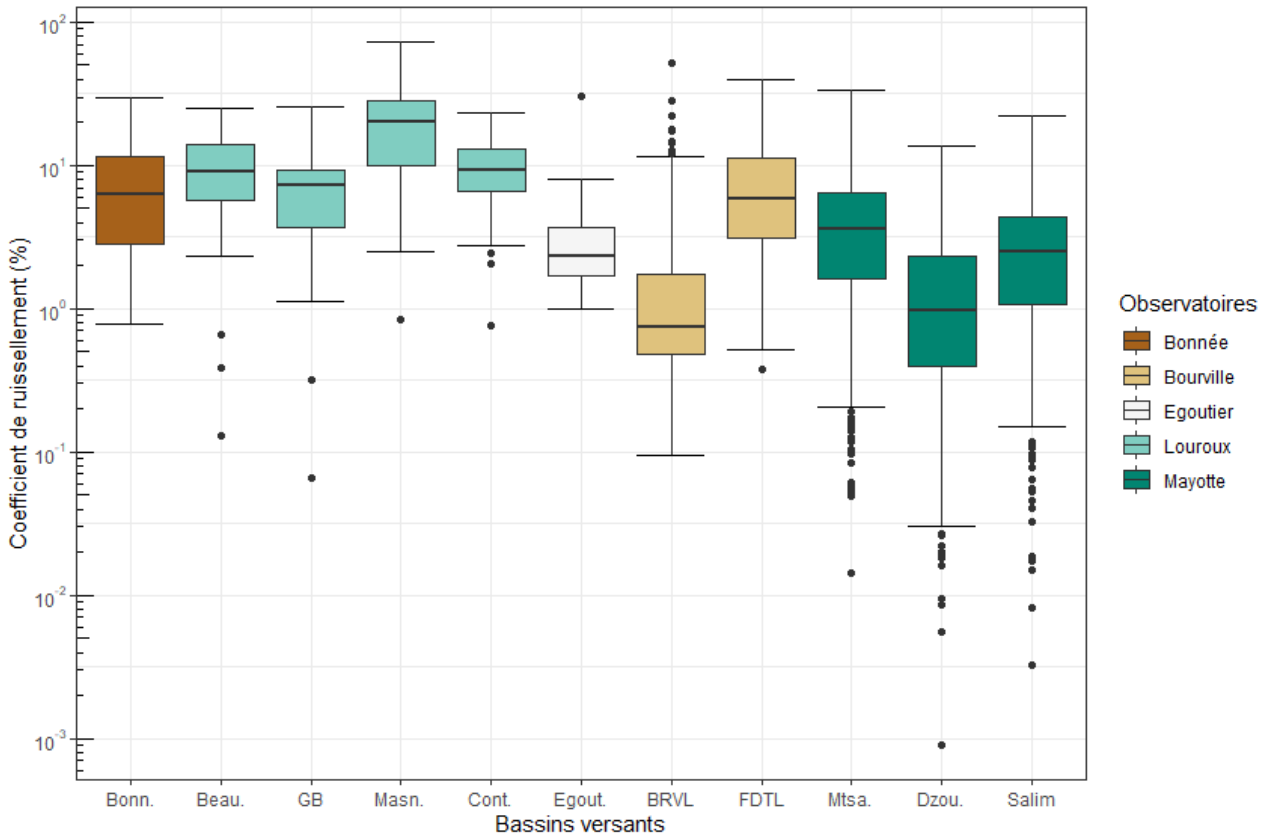


Figure 2 : Coefficients de ruissellements calculés sur chaque bassin versant. Les acronymes des bassins versants sont définis dans le Tableau 1. L'axe *y* est logarithmique.

On observe qu'une forte variabilité subsiste en restreignant l'analyse aux quatre bassins versants du Louroux. Ils présentent des morphologies et pluviométries similaires, mais des occupations et des natures de sols variables : trois sont occupés par des cultures de plaines tandis qu'un sous bassin versant (celui de la Conteraye) est majoritairement forestier. Les superficies de ces bassins s'étendent de 2 à 6 km^2 et les pentes y sont globalement faibles, inférieures au pourcent. Même si le bassin versant plutôt forestier présente un coefficient de ruissellement plus faible (sa médiane est de 8% contre 10% à 14% pour les bassins versants cultivés), en lien avec une infiltration plus élevée favorisée par la végétation, les coefficients de ruissellement présentent des gammes semblables, allant de 0.1% à 30%, avec six observations allant même au-delà. Les différences entre médianes ne sont pas significatives (test de Mood), suggérant que les variations de caractéristiques de ces petits bassins versants induisent des différences de réponse ruisselantes limitées. Par ailleurs, l'ampleur de ces coefficients de ruissellement est également à mettre au regard de faibles intensités de pluie maximales, de médiane 5 mm.h^{-1}. Il a été montré que ces coefficients de ruissellement s'expliquent par une combinaison de saturation des sols en hiver contribuant à une forte restitution de l'eau précipitée, mais également à une connectivité augmentée par l'utilisation massive de réseau de drainage au sein des parcelles cultivées de ce bassin versant et, enfin, à des orages de printemps (Grangeon et al., 2017). L'état des sols, ainsi que les caractéristiques des précipitations sont donc des caractéristiques primordiales à prendre en compte dans la compréhension du fonctionnement du ruissellement.

Le bassin versant de la Bonnée, également drainé et de superficie environ dix fois supérieure, a enregistré des cumuls de pluie médians supérieurs de 30% à ceux enregistrés sur le Louroux, mais ne présente pas de différence significative de coefficient de ruissellement avec ce dernier. Il est en revanche intéressant de noter que le même test conduit sur le bassin versant de l'Egoutier, localisé dans un contexte climatique semblable, majoritairement couvert de forêts (à 74%), de taille et de topographie similaires présente des coefficients de ruissellement significativement différents de ceux mesurés sur les bassins-versants du Louroux : également compris entre 1% et 30%, mais de médiane 2%. Cette différence peut s'expliquer par l'absence de réseau de drainage sur ce terrain, mais également à des cumuls de pluies enregistrés sur les périodes d'étude deux fois plus faibles que ceux observés sur le Louroux en termes de cumul médian, suggérant l'importance du forçage pluviométrique sur la réponse ruisselante des bassins versants.

Dans un autre contexte, on note par ailleurs une différence nette entre le sous bassin versant de Fond Du Tilleul et celui de Bourville au sein duquel il se situe. La médiane du coefficient de ruissellement chute ainsi de 6%, à environ 1%. En revanche, les gammes de variations restent semblables entre les deux échelles d'observations, comprises entre 0.1% et 50%. Ces coefficients de ruissellement, très importants pour des climats sous lesquels l'intensité de pluie médiane ne dépasse pas 10 $mm.h^{-1}$ sur la période d'étude, sont attribués à la combinaison de deux facteurs : la saturation de l'horizon de surface, mais également l'encroûtement des sols. Ce dernier est en effet courant sur les sols limoneux et résulte en une capacité d'infiltration qui peut être réduite de plusieurs dizaines à quelques millimètres par heure (Evrard et al., 2008). L'importance de l'état de surface du sol dans ce type de contexte, représenté dans ce cas par l'encroûtement, la rugosité et le couvert végétal, est telle qu'il s'agit d'une variable utilisée directement en entrée de modélisations (Cerdan et al., 2001 ; Evrard et al., 2009), illustrant l'importance d'une caractérisation de la surface des sols. Ces paramètres sont par ailleurs aisés à relever de manière robuste et avec une haute fréquence temporelle, facilitant une description temporelle précise des états de surface au sien des modèles.

Finalement, il est intéressant de noter que l'unique bassin versant situé en zone tropicale et soumis aux intensités de pluie maximales les plus importantes, avec une médiane de 48 $mm.h^{-1}$, est paradoxalement celui qui produit les coefficients de ruissellement parmi les plus faibles, de médiane 2% et de maximum 33%. Si les valeurs extrêmes les plus faibles s'expliquent par une configuration du site plus favorable à l'enregistrement des événements de très faible amplitude, ces coefficients maximums d'amplitude faible s'expliquent par des sols volcaniques très infiltrants en surface, du fait d'une forte structuration du sol dans l'horizon superficiel du sol, notamment sous l'effet de la macrofaune, qui limite le ruissellement hortonien, bien qu'il puisse être observé sur certaines occupation de sols, typiquement les jardins urbains et les padzas. Cette variabilité spatiale des occupations du sol, couplée à la présence d'une couche peu perméable sous la couche filtrante induit une dynamique complexe du ruissellement sur ce type de terrain. Il a par ailleurs été montré que des coefficients plus importants peuvent être mesurés sur des sols volcaniques dans d'autres contextes (Gratiot et al., 2011), ce qui montre que les valeurs mesurées sur ce bassin versant impliquent d'autres processus de transfert de l'eau. Ainsi, l'effet du type de sol est important à prendre en compte lorsque ses caractéristiques diffèrent radicalement d'un bassin versant à l'autre. Il convient néanmoins de souligner que, pour ces bassins versants sur sol volcanique, une forte variabilité des coefficients de ruissellement est observée, à la fois intra- et inter-bassins. Les cumuls de pluie enregistrés sur ces différents bassins versants ne diffèrent pas significativement. Une part non-négligeable de la variabilité de la réponse ruisselante est donc attribuable aux propriétés du sol, à la couverture du sol et à son état hydrique.

Variabilité temporelle et influence de la saisonnalité

La variabilité du ruissellement induite par les caractéristiques du sol et de la pluie est retranscrite par la relation pluie-débit de chaque bassin versant, qui est extrêmement dispersée (Figure 3).

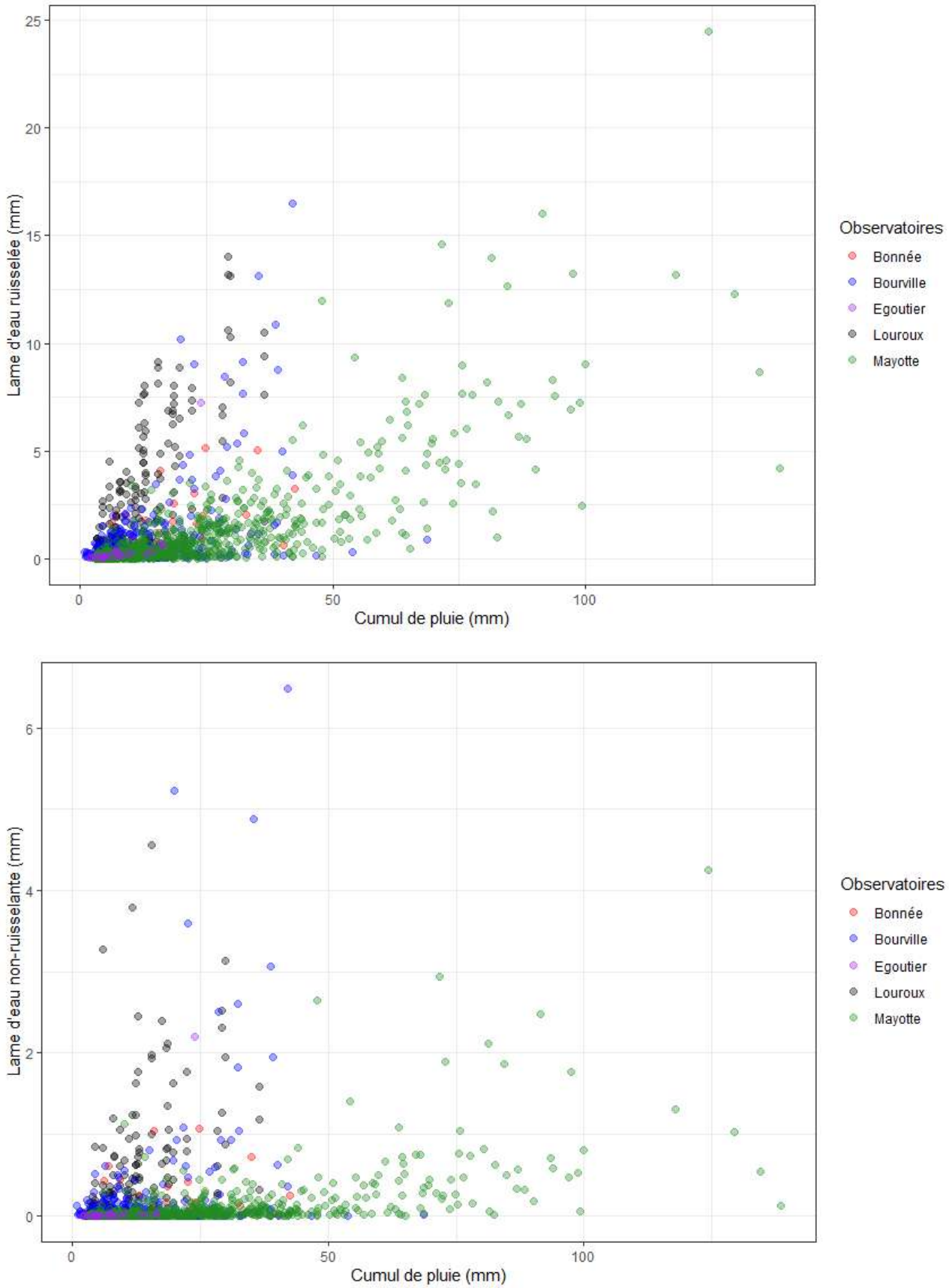


Figure 3 : Relation entre la lame d'eau précipitée et la lame d'eau a) ruisselante et b) correspondant à la partie non-ruisselante (au sens de la séparation d'hydrogramme), par observatoire. Chaque point représente un évènement pluvio-ruisselant.

Ainsi, chaque bassin versant peut répondre à un cumul de pluie donné par une lame d'eau ruisselée qui peut varier de zéro à plus de 10 mm. On observe par ailleurs une dispersion relative plus importante entre évènements pluvieux qu'entre bassins versants. Ainsi, pour des pluies comprises entre 3.4 et 36.4 mm, les lames d'eaux ruisselées sur le bassin versant du Louroux sont comprises entre 10^{-2} et 14 mm. Pour un cumul de pluie comparable, les lames d'eaux ruisselées sont comprises entre 0.1 et 5.1 mm pour le bassin versant de la Bonnée, 10^{-2} à 13.1 mm pour le bassin versant de Bourville et 10^{-3} à 7 mm pour les bassins versants de Mayotte. A une gamme de pluie donnée, la lame d'eau ruisselée est répartie sur une plage pouvant couvrir jusqu'à trois ordres de grandeur. Ceci souligne à nouveau l'importance de l'état du sol, à savoir sa composition, son état hydrique mais également son état de surface.

Les bassins versants de Mayotte montrent des ruissellements plus faibles que les autres bassins versants pour un cumul de pluie donné. Inversement, les bassins versants du Louroux et de Bourville peuvent présenter des réponses ruisselantes pour de très faibles averses : le premier décile des cumuls de pluie provoquant un ruissellement supérieur à 1 mm est respectivement de 7 mm et 13 mm pour ces deux bassins versants, tandis qu'il est près de deux fois plus élevé pour les bassins versants de Mayotte : 24 mm. Ceci souligne les différences que peuvent engendrer les caractéristiques des sols sur la genèse et l'amplitude du ruissellement, ici au travers des phénomènes d'encroûtement et de saturation des sols, d'une part, et par les fortes capacités infiltrantes des sols volcaniques, d'autre part.

L'analyse de l'influence de l'état hydrique du sol peut être réalisée en comparant les variations saisonnières du coefficient de ruissellement (Figure 4).

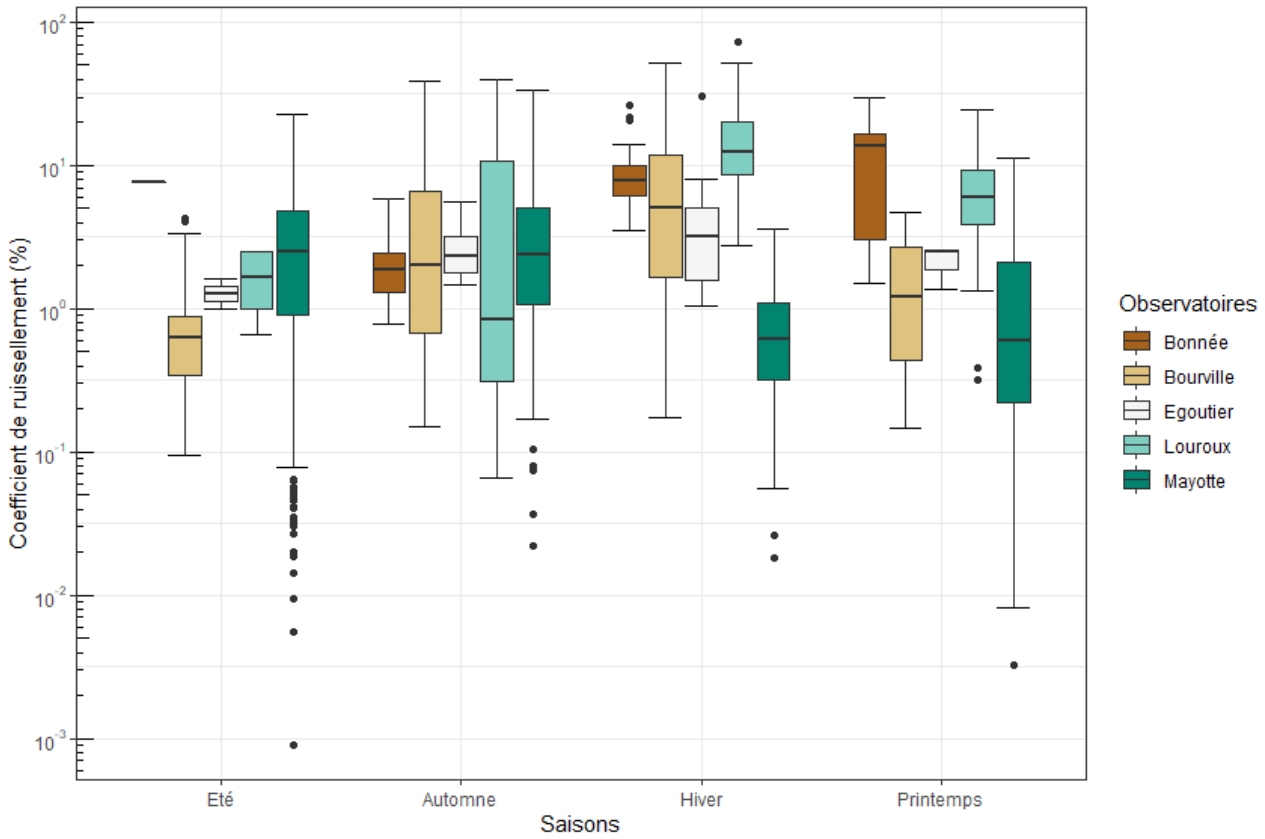


Figure 4 : Saisonnalité des coefficients de ruissellement mesurés sur chaque bassin versant. Les saisons indiquées pour les observatoires de Mayotte correspondent aux saisons australes (la saison des pluies s'y étends de novembre à avril), les autres aux saisons boréales.

La saison hivernale se distingue particulièrement pour les bassins versants situés en métropole. Dans ces environnements, elle est propice à l'enchainement d'évènements pluvieux, à de faibles valeurs d'évapotranspiration et donc à la saturation des sols. Elle correspond aussi à la période de battance, et donc à de faibles infiltrabilités des sols. Il s'agit donc naturellement d'une période privilégiée d'occurrence du ruissellement. Ainsi, le coefficient de ruissellement pour le bassin versant de la Bonnée passe, en médiane, de

près de 2% en automne à plus de 8% en hiver et au printemps. Sur le bassin versant de Bourville, l'hiver enregistre un coefficient de ruissellement médian de 8%, qui chute à 1% au printemps, notamment suite aux récoltes et au travail du sol, qui le rend beaucoup plus infiltrant. La même évolution saisonnière est constatée pour le bassin versant du Louroux, également situé dans un contexte agricole. Le bassin versant de l'Egoutier, moins soumis à l'activité agricole (vergers, 7%), présente des variations saisonnières de plus faible amplitude, entre 2% et 3% en médiane en automne et en hiver, contre 1% à 2% en médiane pour l'été et le printemps.

Les coefficients de ruissellement des observatoires situés à Mayotte sont plus importants lors de l'automne et de l'été austral, du fait notamment de l'importance de la période de la mousson propice aux évènements de forts cumuls et de forte intensité ; le coefficient de ruissellement médian passe ainsi en hiver et au printemps (saisons australes) de 0.6% à 2.6% lors de l'automne et de l'été austraux.

CONCLUSIONS ET IMPLICATIONS POUR LA MODELISATION

L'instrumentation de différents observatoires, localisés dans des contextes environnementaux et climatiques variés, montre une variabilité très importante du coefficient de ruissellement qui peut s'étendre, selon les processus impliqués dans la genèse du ruissellement, de 0 à plus de 70%, notamment lorsque les précipitations se produisent sur un sol saturé, tel qu'observé dans des contextes de plaine agricoles du centre de la France. A l'inverse, les observatoires localisés à Mayotte, ayant enregistré les précipitations les plus intenses mais dont les caractéristiques des sols sont extrêmement contrastées, présentent des coefficients de ruissellement globalement moins importants. Cette comparaison entre terrains d'études montre la variabilité de la réponse ruisselante des bassins versants, et notamment l'importance d'une prise en compte adaptée du type de sol dans une démarche de modélisation du ruissellement.

Les coefficients de ruissellement significativement plus élevés mesurés sur les observatoires soumis au phénomène de saturation des sols suggèrent par ailleurs l'importance de ce processus de ruissellement dans l'amplitude de la réponse ruisselante des bassins versants. Cette hypothèse est soutenue par l'évolution saisonnière des coefficients de ruissellement, globalement plus importants en hiver et notamment sur les bassins versants agricoles de plaine. La prise en compte du stock hydrique au début de l'évènement et son évolution est donc primordiale à considérer dans les modélisations du ruissellement.

Les mesures obtenues au sein de l'observatoire de Bourville, localisé sur des sols lœssiques et dont la topographie est peu marquée, montrent des coefficients de ruissellements importants. Les études menées sur ce type de terrains ont abouti à la création de modélisations basées sur les types de cultures couvrant les sols ainsi que sur l'évolution des états de surface associés. L'installation d'observatoires a donc souligné la nécessité de considérer l'occupation des sols ainsi que son état de surface, tout en ayant contribué à son incorporation dans des modèles par le biais de variables aisément dérivées de relevés de terrain.

La variabilité observée au sein même de bassins versants relativement homogènes en terme de type de sol, de culture et de précipitation (par exemple ceux de l'observatoire du Louroux) montre néanmoins que les caractéristiques des précipitations et d'état hydrique du sol sont importantes à considérer à l'échelle de l'évènement. Cette importance est confirmée par l'étude de la relation entre lame d'eau précipitée et lame d'eau ruisselée entre observatoires, qui montre une variabilité supérieure pour un même bassin versant pour différents évènements pluvieux, plutôt qu'entre bassins versants.

La diversité des réponses observées tant entre observatoires qu'à l'échelle de la saison et même de l'évènement pluvieux souligne l'importance de réaliser des mesures continues et à long terme, dans une optique de compréhension et de quantification des processus dominant la dynamique ruisselante des bassins versants. De telles mesures permettent de développer des modélisations appropriées aux domaines étudiés, en y incluant les processus les plus pertinents.

Finalement, en complément de l'analyse de données, des modélisations ont été ou sont en cours de réalisation sur les différents bassins versants présentés dans cet article. Elles visent à quantifier les processus dominant la dynamique ruisselante et érosive de ceux-ci ainsi que leurs évolutions temporelles, mais également à analyser la dynamique spatiale des flux hydro-sédimentaires au sein des bassins versants. De telles approches, complétées par des réseaux de mesures plus denses qu'un unique point situé à l'exutoire, tel que celui mis en place sur le bassin versant du Louroux, mais également dans d'autres études (Dehotin et al. 2015), permettent

en effet de cartographier les zones de production, de transfert et d'infiltration au sein des bassins versants, offrant des clés pour la gestion de l'aléa ruissellement au sein des bassins versants.

REFERENCES

Beck H.E., Zimmermann N.E., McVicar T.R., Vergopolan N., Berg A., Wood E.F., 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data,* **5**:180214.

Beven K. (1983) Surface water hydrology - runoff generation and basin structure. *Reviews of geophysics and space physics* **21(3)**: 721–730.

Blöschl G., Sivapalan M. (1995) Scale issues in hydrological modelling - a review. *Hydrological Processes*, **9**:251–290

Cerdan O., Souchère V., Lecomte V., Couturier A., Le Bissonnais Y. (2001) Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfers by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. *Catena*, **46**:189-205

Chapman T.G., 1991. Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses". *Water Resources Research*, **27**:1483-1484

Dehotin J., Breil P., Braud I., de Lavenne A., Lagouy M., Sarrazin B. (2015) Detecting surface runoff location in a small catchment using distributed and simple observation method. *Journal of Hydrology*, **525**:113-129.

Desprats J.F., Chowanski E., Landemaine V., Colas B., Dectot G., Rinaudo J.D., Said K., Vignerot B., Vitter M., Bailby E. (2018) - Projet LESELAM 2 (Lutte contre l'Erosion des Sols et l'Envasement du LAgon à Mayotte) Rapport Avancement n°1 – Décembre 2018 BRGM/RP- 68559-FR, 71 pages, 48 illustrations

Dunne T. (1978) *Field studies of hillslope flow processes* (Wiley éd.)., pp. 227–293. M.J. Kirkby.

Evrard O., Bielders C.L., Vandaele K., van Wesemael B. (2007) Spatial and temporal variation of muddy floods in central Belgium, off-site impacts and potential control measures. *Catena*, **70:**443-454.

Evrard O., Vandaele K., Bielders C., van Wesemael B. (2008) Seasonal evolution of runoff generation on agricultural land in the Belgian loess belt and implications for muddy flood triggering. *Earth Surface Processes and Landforms* **33**:1285-1301.

Evrard O., Cerdan O., van Wesemael B., Chauvet M., Le Bissonnais Y., Raclot D., Vandaele K., Andrieux P., Bielders C. (2009) Reliability of an expert-based runoff and erosion model: Application of STREAM to different environments. *Catena*, **78(2)**:129-141

Garneau C., Sauvage S., Probst A., Sanchez-Perez J.M. (2014) Modelling of trace metal transfer in a large river under different hydrological conditions (the Garonne River in southwest France). *Ecological Modelling*, **306**:195-204.

Gascuel-Odoux C., Aurousseau P., Cordier M.O., Durand P., Garcia F., Masson V., Salmon-Monviola J., Tortrat F., Trespos R. (2009) A decision-oriented model to evaluate the effect of land use and agricultural management on herbicide contamination in stream water. *Environmental Modelling and Software*, **24**:1433-1446

Gomes T.F., van de Broek M., Govers G., Silva R.W.C., Moraes J.M., Camargo P.B., Mazzi E.A., Martinelli L.A. (2019) Runoff, soil loss and sources of particulate organic carbon delivered to streams by sugarcane and riparian areas: An isotopic approach. *Catena*, **181**, https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104083.

Grangeon T., Manière L., Foucher A., Vandromme R., Cerdan O., Evrard O., Pene-Galland I., Salvador-Blanes S., 2017. Hydro-sedimentary dynamics of a drained agricultural catchment: A nested monitoring approach. *Vadose Zone Journal*, **16(12)**. https://doi.org/10.2136/vzj2017.05.0113

Grangeon T., Ceriani V., Evrard O., Grison A., Vandromme R., Gaillot A., Cerdan O., Salvador-Blanes S. (révisions modérées) Quantifying hydro-sedimentary transfers in a lowland drained agricultural catchment. *Catena*.

Gratiot N., Duvert C., Collet L., Vinson D., Némery J., Saenz-Romero C. (2011) Increase in surface runoff in the central mountains of Mexico: lessons from the past and predictive scenario for the next century. *Hydrology and Earth System Science*, **14**:291-300.

Horton R. (1933) The role of infiltration in the hydrologic cycle. *American Geophysical Union Transactions* **14**:446–460.

Ledieu L., Simonneau A., Cerdan O., Négrel P., Laperche V., Grosbois C., Laggoun-Défarge F. (2020) Geochemical insights into spatial and temporal evolution of sediment at catchment scale (Egoutier stream, France). *Applied Geochemistry*, **122**:104743.

Nord G., Boudevillain B., Berne A., Branger F., Braud I., Dramals G., Gérard S., Le Coz J., Legout C., Molinié G., van Balen J., Vandervaere J.P., Andrieu J., Aubert C., Calianno M., Delrieu G., Grazioli J., Hachani S., Horner I., Huza J., Le Boursicaud R., Raupach T.H., Teuling A.J., Uber M., Vincendon B., Wijbrans A. (2017) A high space-time resolution dataset linking meteorological forcing and hydro-sedimentary response in a mesoscale Mediterranean catchment (Auzon) of the Ardèche region, France. *Earth Systems Sciences Data*, **9**:221-249

Pelletier A., Andréassian V. (2020). Hydrograph separation: an impartial parametrization for an imperfect method. *Hydrology and Earth System Sciences*, **24**:1171-1187.

Saffarpour S., Western A.W., Adams R., McDonnell J.J., (2016) Multiple runoff processes and multiple thresholds control agricultural runoff generation. *Hydrology and Earth System Sciences*, **20**:4525-4545.

Valentin C., Bresson L. (1992) Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma* **55(3-4)**:225–245.

Apport d'une représentation plus fine de l'occupation et de la texture des sols pour la simulation des débits des cours d'eau méditerranéens et du ruissellement (Lovat *et al.*)

Apport d'une représentation plus fine de l'occupation et de la texture des sols pour la simulation des débits des cours d'eau méditerranéens et du ruissellement

Alexane LOVAT[1], Béatrice VINCENDON[2], Véronique DUCROCQ[3]

[1] Météo France (Direction des Systèmes d'Observation), 42 avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse cedex 1, France – alexane.lovat@meteo.fr

[2] Météo France (Direction de la Climatologie et des Services Climatiques), 42 avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse cedex 1, France – beatrice.vincendon@meteo.fr

[3] Météo France (Direction des Opérations pour la Prévision), 42 avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse cedex 1, France – veronique.ducrocq@meteo.fr

Des épisodes fortement précipitants affectent régulièrement les régions méditerranéennes. Ils entraînent du ruissellement intense et des crues rapides dévastatrices. Pour mieux anticiper leurs impacts, il est crucial d'améliorer la modélisation de ces réponses hydrologiques. Des avancées ont été faites en termes d'observation et de prévision des précipitations à fine échelle et dans la prise en compte des sources d'incertitudes qui peuvent entacher la modélisation hydrologique, mais d'autres pistes d'amélioration restent encore à être étudiées. En particulier, la sensibilité des modèles hydrologiques dédiés à la simulation des crues rapides aux données de sol (texture et occupation) et à la résolution spatiale n'a encore été que peu explorée. C'est l'objet des travaux présentés. L'étude de sensibilité a été réalisée avec le système couplé ISBA-TOP développé au CNRM qui est dédié à la simulation des débits de cours d'eau méditerranéens et aux zones de ruissellement. ISBA-TOP a été utilisé à 1km et à 300m pour étudier l'impact d'un changement de résolution spatiale. La sensibilité aux descripteurs physiographiques a été étudiée à partir de différentes sources de données pour décrire la texture et l'occupation du sol. Douze cas de crues passées entre 2014 et 2016 ayant affecté des bassins versants méditerranéens ruraux et urbanisés ont été sélectionnés, incluant les inondations meurtrières dans les Alpes-Maritimes le 3 octobre 2015. L'évaluation des réponses hydrologiques simulées s'est faite à partir de données observées et estimées ainsi qu'avec des données exogènes, comme la localisation de victimes ou de dégâts pour évaluer le ruissellement qui ne possède pas de mesure directe. La résolution spatiale du modèle s'est montrée avoir le plus d'impact, suivie de la description de la texture du sol et enfin de la description de l'occupation du sol.

Mots-clefs : simulation hydrologique, ruissellement, Méditerranée, résolution spatiale, occupation du sol, texture du sol, données proxy, impacts, HyMeX.

Effect of a finer representation of land use and soil texture on simulations of Mediterranean river discharges and runoff.

Heavy rainfall events regularly affect Mediterranean regions. They can lead to intense runoff and devastating flash floods. To better anticipate their impacts it is crucial to improve the modelling of river flows and runoff. Progress has been made in terms of observing and forecasting precipitation on a fine scale and in taking into account the sources of uncertainty that can affect hydrological modelling, but other possible ways for improvement still need to be explored. In particular, the sensitivity of hydrological models dedicated to flash-flood modelling to soil data (texture and land cover) and to spatial resolution remains poorly explored. This is the subject of the present work. The sensivity study was carried out with the coupled ISBA-TOP system developed at CNRM which is dedicated to the simulation of Mediterranean river discharges and runoff areas. ISBA-TOP was used at 1km and 300m to study the impact of a change in spatial resolution. Sensitivity to physiographic descriptors was studied using different data sources to

describe texture and land use. Twelve cases of past floods between 2014 and 2016 affecting rural and urbanized Mediterranean catchments were selected, including the deadly floods in the Alpes-Maritimes on 3 October 2015. Hydrological simulations were evaluated with observed and estimated data as well as exogenous data, such as the location of victims or damage to assess simulated runoff, which has no direct measurement. The results reveal that the spatial resolution has the largest impact on the hydrological simulations, larger than soil texture and land cover.
Key words: Hydrological simulation, runoff, Mediterranean, spatial resolution, land use, soil texture, proxy data, impacts, HyMeX.

I - INTRODUCTION

Les départements de l'arc méditerranéen sont particulièrement exposés aux événements fortement précipitants. Ces fortes pluies entraînent du ruissellement intense et peuvent provoquer des crues rapides dévastatrices en seulement quelques minutes ou quelques heures. Pour assurer la protection des personnes et des biens, et mieux connaître l'exposition des territoires au risque de ruissellement, la modélisation des réponses hydrologiques aux précipitations intenses est cruciale.

Des avancées ont été faites en termes d'observation et de prévision des précipitations à fine échelle et dans la prise en compte des sources d'incertitudes qui peuvent entacher la modélisation hydrologique, mais d'autres pistes d'amélioration restent encore à être étudiées. En particulier, la sensibilité des modèles hydrologiques dédiés à la simulation des crues rapides, comme le modèle ISBA-TOP développé au CNRM, aux données de sol (texture et occupation) et à la résolution spatiale n'a encore été que peu explorée. Pourtant, on pourrait s'attendre à un fort impact sur la simulation du ruissellement, notamment, avec certainement des contrastes entre zones rurales et zones urbanisées, où les sols sont davantage imperméabilisés. C'est l'objet des travaux présentés. Une étude de sensibilité est menée sur l'impact des descripteurs de sol et d'un changement de résolution spatiale dans ISBA-TOP sur la simulation des débits et du ruissellement pour des cas de crues passées dans le Sud-Est de la France.

L'évaluation des réponses hydrologiques simulées s'est appuyée sur des données observées (débits aux stations conventionnelles surveillées par le SCHAPI), estimées (issues de campagnes de terrain post-crue menées dans le cadre du programme international HyMeX, Ducrocq et al., 2019) et sur des données exogènes, comme la localisation de victimes ou de dégâts, car il n'existe pas de mesures spatialisées du ruissellement pour les épisodes de crue.

L'article est organisé comme suit : la section II présente les cas d'étude et les bassins d'intérêt, le modèle hydrométéorologique et les données physiographiques utilisés ainsi que les simulations effectuées pour étudier la sensibilité du modèle à une représentation plus fine du sol. Les résultats sont présentés en section III avant la conclusion en section IV.

II - METHODOLOGIE

II – 1. Cas d'étude et zone d'intérêt

La présente étude a porté sur douze événements de crues rapides survenus sur des bassins versants méditerranéens ruraux et urbanisés du Sud-Est de la France entre 2014 et 2016. Onze événements ayant affecté les Cévennes aux automnes 2014, 2015 et 2016 et au printemps 2016 ont été sélectionnés ainsi que l'événement meurtrier qui a touché les Alpes-Maritimes en octobre 2015. Ces événements sont caractérisés par des phénomènes de pluie intense et de ruissellement avec des dynamiques différentes, représentatives de la variété des intensités et des durées des précipitations et des réponses hydrologiques des rivières rencontrées dans les régions méditerranéennes. Une brève description hydrométéorologique de ces événements est présentée dans le tableau 1.

Les bassins versants cévenols considérés dans cette étude sont la Lergue à Lodève (181 km²), l'Hérault à Laroque (918 km²), le Gardon à Ners (1092 km²) et le Vidourle à Sommières (621 km²). Les bassins versants azuréens sélectionnés sont la Siagne à Pégomas (515 km²), la Brague à Biot (41 km²), le Loup à Villeneuve-Loubet (278 km²) et la Cagne à Cagnes-sur-mer (109 km²). Quelques-uns de leurs sous bassins versants ainsi que de petits bassins versants côtiers ont également été considérés. Leur localisation est donnée figure 1.

Date de début de l'événement	Cumul de précipitations le plus fort relevé	Débit de pointe spécifique maximum relevé
17 septembre 2014	416 mm en 72 h	1.42 $m^3s^{-1}km^{-2}$
11 octobre 2014	106 mm en 73 h	1.15 $m^3s^{-1}km^{-2}$
28 novembre 2014	229 mm en 49 h	1.04 $m^3s^{-1}km^{-2}$
12 septembre 2015	390 mm en 73 h	1.99 $m^3s^{-1}km^{-2}$
28 octobre 2015	179 mm en 73 h	1.24 $m^3s^{-1}km^{-2}$
3 novembre 2015	158 mm en 73 h	0.41 $m^3s^{-1}km^{-2}$
5 avril 2016	111 mm en 49 h	0.42 $m^3s^{-1}km^{-2}$
10 mai 2016	87 mm en 73 h	0.34 $m^3s^{-1}km^{-2}$
14 octobre 2016	70 mm en 49 h	0.36 $m^3s^{-1}km^{-2}$
21 novembre 2016	288 mm en 73 h	0.69 $m^3s^{-1}km^{-2}$
24 novembre 2016	143 mm en 73 h	0.26 $m^3s^{-1}km^{-2}$
3 octobre 2015 (Alpes-Maritimes)	277 mm en 72 h	3.26 $m^3s^{-1}km^{-2}$

Tableau 1 : Caractéristiques hydrométéorologiques des événements étudiés (onze événements ayant affecté les Cévennes et un les Alpes-Maritimes). La troisième colonne contient les débits de pointe spécifiques maximaux relevés ou estimés sur les principaux bassins versants étudiés.

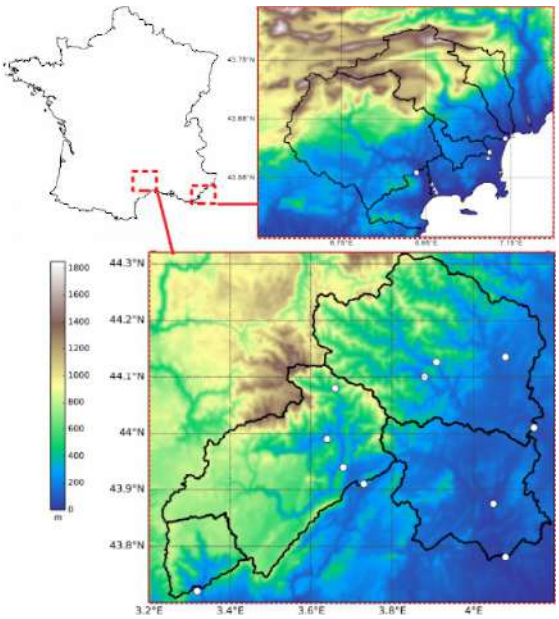


Figure 1 : Localisation des bassins versants d'intérêt. Les exutoires considérés dans cette étude sont marqués d'un point blanc.

II – 2. Le système couplé ISBA-TOP

Le système couplé ISBA-TOP [Bouilloud et al, 2010, Vincendon et al., 2016], dédié à la modélisation de l'évolution des débits de cours d'eau méditerranéens mais aussi des zones de ruissellement intense a été utilisé. Il résulte du couplage entre le schéma de surface ISBA (Interaction Surface Biosphere Atmosphere) [Noilhan et Planton, 1989] et une version du modèle hydrologique distribué TOPMODEL [Kirkby et Beven, 1979]. ISBA modélise les interactions sol-végétation-atmosphère. Il découpe le domaine en mailles carrées selon une certaine résolution spatiale et calcule les transferts d'eau et d'énergie dans le sol pour chacune des mailles. La redistribution latérale de l'eau dans le bassin versant est faite selon une approche TOPMODEL en tenant compte de la topographie, mais aussi en tenant compte de la répartition spatiale de la pluie. Ce

couplage permet ainsi d'expliciter la position des zones saturées en eau et la production de ruissellement superficiel et de drainage profond. Un module dédié permet le transfert des écoulements à l'exutoire des bassins versants.

ISBA-TOP a été mis en oeuvre en temps réel dans le cadre d'HyMex pour la prévision de débits sur quatre bassins cévenols et trois bassins varois. Des études de cas ont été réalisées sur des bassins versants espagnols et italiens. Le service hydrométéorologique bulgare, NIMH, l'utilise également pour la prévision opérationnelle des débits de la rivière Arda [Artinyan et al., 2016]. Outre la simulation de débits, Vincendon et al. [2016] ont simulé à partir d'ISBA-TOP des phénomènes de ruissellement intense tels que ceux qui provoquent la coupure des réseaux routiers.

Dans cette étude, les débits et champs de ruissellement sont simulés par ISBA-TOP forcé par les lames d'eau spatialisées ANTILOPE [Laurantin, 2008], qui sont obtenues par fusion des données des radars et des pluviomètres. Les résolutions spatiale de 1km² et temporelle de 1h de ces estimations de pluies sont particulièrement adaptées à la nature convective des précipitations et à la faible taille des bassins versants. Les conditions initiales d'humidité et de température des sols sont fournies par la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou, opérationnelle à Météo-France [Habets et al., 2008].

II – 3. Les données physiographiques

Dans ISBA-TOP, la description de la texture du sol a un impact direct sur les écoulements à travers la caractérisation des paramètres hydrodynamiques. Les teneurs en argile et en sable du sol impactent le stockage de l'eau dans le sol et la facilité avec laquelle l'eau s'écoule. La description de l'occupation du sol influence le stockage de l'eau après interception de la pluie (à travers la surface foliaire, la longueur de rugosité et la hauteur de la végétation) et la capacité d'infiltration (avec la profondeur racinaire) avec des conséquences sur la quantité d'eau ruisselée modélisée. L'occupation et la texture des sols sont décrites à partir de bases de données spatialisées à des résolutions variables mais en général kilométriques. Selon la résolution spatiale du modèle, ces bases de données sont interpolées ou aggrégées. La résolution a d'ailleurs aussi une influence sur la représentation des processus physiques et sur la façon de considérer les champs de pluies (qui ici sont kilométriques).

Pour examiner l'influence des paramètres physiographiques, plusieurs sources de données ont été choisies pour décrire la texture et l'occupation des sols. Pour la texture des sols, les bases de données HWSD version 1.2 [Nachtergaele et al., 2012] à 1km de résolution et LUCAS topsoil (Land Use and Cover Area frame Statistical) [Ballabio et al., 2016] à 500m de résolution ont été utilisées. Pour l'occupation des sols, ont été utilisées des bases de données numériques mondiales développées au CNRM : ECOCLIMAP-II [Masson et al., 2003 ; Faroux et al., 2013] de résolution 1km et la dernière version d'ECOCLIMAP : ECOCLIMAP Seconde Génération (ECOCLIMAP-SG, https://opensource.umr-cnrm.fr/projects/ecoclimap-sg/wiki), à 300m de résolution. Dans cette étude, les zones urbaines dans ECOCLIMAP-II sont considérées comme de la roche nue pour simuler l'imperméabilisation des villes. Pour ECOCLIMAP-SG, deux cas sont distingués en décrivant les villes soit comme des mélanges de sol nu, roche nue, feuillus et zones humides, soit comme de la roche nue seule.

II – 4. Simulations et données d'évaluation

Afin d'étudier l'influence de la description du sol et de la résolution du modèle hydrologique sur la modélisation des débits et du ruissellement, nous avons réalisé des expériences de sensibilité. Cinq types d'expérience ont été réalisés (Tableau 2). L'impact de la résolution spatiale a été étudié en utilisant ISBA-TOP à 1km et à 300m. Pour examiner l'influence des paramètres physiographiques, plusieurs sources de données ont été choisies pour décrire la texture (HWSD et LUCAS) et l'occupation (ECOCLIMAP-II et ECOCLIMAP-SG). La première expérience (E1) correspond à l'utilisation d'ISBA-TOP à une résolution de 1km avec les bases de données HWSD et ECOCLIMAP-II. Pour la seconde expérience (E2), la résolution spatiale n'est plus de 1km mais de 300m. Trois autres expériences sont menées à la résolution de 300m. La troisième expérience (E3) permet d'étudier l'impact de la description du sol en remplaçant HWSD par LUCAS. Puis la sensibilité à la description de l'occupation du sol est évaluée en remplaçant ECOCLIMAP-II par ECOCLIMAP-SG dans une quatrième expérience (E4). La dernière expérience teste l'impact de la représentation des zones urbaines en décrivant dans ECOCLIMAP-SG les villes comme étant uniquement de la roche nue (E5).

Trois types de données ont été utilisés pour évaluer les débits et ruissellement simulés par ISBA-TOP. Les débits mesurés des cours d'eau surveillés par le réseau d'état ont été utilisés pour les bassins versants étudiés qui étaient jaugés. Ces données, bien qu'indispensables, ne suffisent pas à évaluer les réponses hydrologiques simulées sur la fine échelle. Pour cela, des débits estimés lors d'enquêtes de terrain post-crue réalisées dans le cadre d'HyMeX ont été utilisés. En effet, des campagnes de terrain (relevés hydrologiques et entretiens avec les habitants) après des événements majeurs, comme ceux de Cannes en octobre 2015 et des crues de l'automne 2014 dans les Cévennes, ont été menées dans le cadre de la période d'observation longue. Elles ont permis de cartographier des débits maximums estimés à partir de levés de section d'écoulement fermés par des laisses de crues qui indiquent la hauteur d'eau et de récolter des informations sur la chronologie des pics de crue auprès de témoins riverains. Enfin, des données d'impact pour évaluer le ruissellement qui ne possède pas de mesure directe ont été utilisées. Parmi elles, la localisation de victimes, de dégâts et de repères de crues.

	RÉSOLUTION de ISBA		TEXTURE		OCCUPATION DES SOLS			
	1000 m	300 m	HWSD	LUCAS	Ecoclimap II	Ecoclimap SG	Ecoclimap SG (villes = roches)	
E1	X		X		X			
E2		X	X		X			résolution
E3		X		X	X			texture
E4		X		X		X		occupation
E5		X		X			X	occupation

Tableau 2 : Les cinq expériences (E#) réalisées lors de l'étude de sensibilité avec ISBA-TOP, avec successivement un changement de la résolution spatiale, de la description de la texture et de l'occupation du sol.

III - RESULTATS

III – 1. Evaluation des débits horaires simulés

Le débit des rivières est la somme des contributions de plusieurs processus physiques à l'œuvre dans un bassin versant : le drainage profond qui correspond à l'infiltration de l'eau en profondeur, le ruissellement de sub-surface qui correspond à une infiltration dans une couche superficielle du sol, le ruissellement de surface provoqué par excès de saturation ou par dépassement de la capacité d'infiltration et d'autres contributions souterraines. L'évaluation des débits simulés permet donc d'évaluer les écoulements simulés en général, dont le ruissellement fait partie. Afin de quantifier l'influence de chacune des expériences sur les réponses hydrologiques simulées, plusieurs scores ont été calculés. La figure 2 présente notamment la fonction de coût LNP [Roux et al., 2011], qui est un score particulièrement bien adapté à l'évaluation des pics de crue simulés. Elle consiste en une combinaison linéaire du critère de Nash et des erreurs sur la valeur et l'instant du débit de pointe (voir formule ci-après). Ce score a été calculé sur l'ensemble de l'échantillon de données disponibles pour la zone cévenole en utilisant les 11 cas pour tous les exutoires des bassins et sous-bassins versants, pris séparément et ensemble. Les débits mesurés sont ceux issus de la banque HYDRO.

La qualité des débits simulés avec les différentes configurations dépend des bassins versants, mais certaines tendances générales peuvent être dégagées (Figure 2). Les scores obtenus à une résolution de 300m sont généralement meilleurs que ceux obtenus avec une résolution de 1000 m. Le changement de la description de la texture du sol (de E2 à E3) améliore les résultats. E4 et E5 qui correspondent à des représentations différentes de l'occupation du sol donnent des résultats très similaires. En général, les meilleurs résultats sont obtenus avec l'expérience E3.

$$LNP = \frac{1}{3}\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_i^f - Q_i^o)^2}{\sum_{i=1}^{N}(Q_i^o - \bar{Q}^o)^2}\right) + \frac{1}{3}\left(1 - \frac{|Q_p^f - Q_p^o|}{Q_p^o}\right) + \frac{1}{3}\left(1 - \frac{|T_p^f - T_p^o|}{T_c^o}\right)$$

Formule du LNP. N correspond au nombre de pas de temps, Qfi est la valeur du débit simulé à l'instant i, Qoi l'observation correspondante et Q¯o est le débit observé moyen sur toute la simulation. Qfp et Qop sont respectivement les valeurs des pics de débits simulé et observé, Tfp et Top sont les échéances des pics de crue simulé et observé, et Toc est le temps de concentration du bassin versant considéré.

Les différences entre les bases de données sur la texture des sols, qui ont une incidence sur la capacité de stockage de l'eau et la facilité de déplacement de l'eau dans un sol saturé, ont entraîné les changements les plus visibles et les plus bénéfiques dans les débits simulés. Les scores montrent que la réponse hydrologique est moins sensible aux données sur l'occupation du sol (comparer E3 et E4) qu'aux données sur la texture du sol (comparer E2 et E3), même si ce résultat pourrait être faussé par le fait que les sols de la zone cévenole étudiée sont plutôt homogènes (une grande quantité de forêts et seulement quelques villes).

Comme dans la zone cévenole, pour la plupart des exutoires provençaux, l'augmentation de la résolution spatiale conduit à des valeurs de débit de pointe plus proches des observations. En revanche, les valeurs de pics de crue simulées par E4 et E5 étaient sensiblement différentes pour plusieurs bassins versants de la zone provençale. Pour ces bassins versants, le remplacement sur les zones urbaines du mélange de sol nu, de roche nue, de feuillus et de zones humides par uniquement de la roche nue a eu un réel impact (non montré ici).

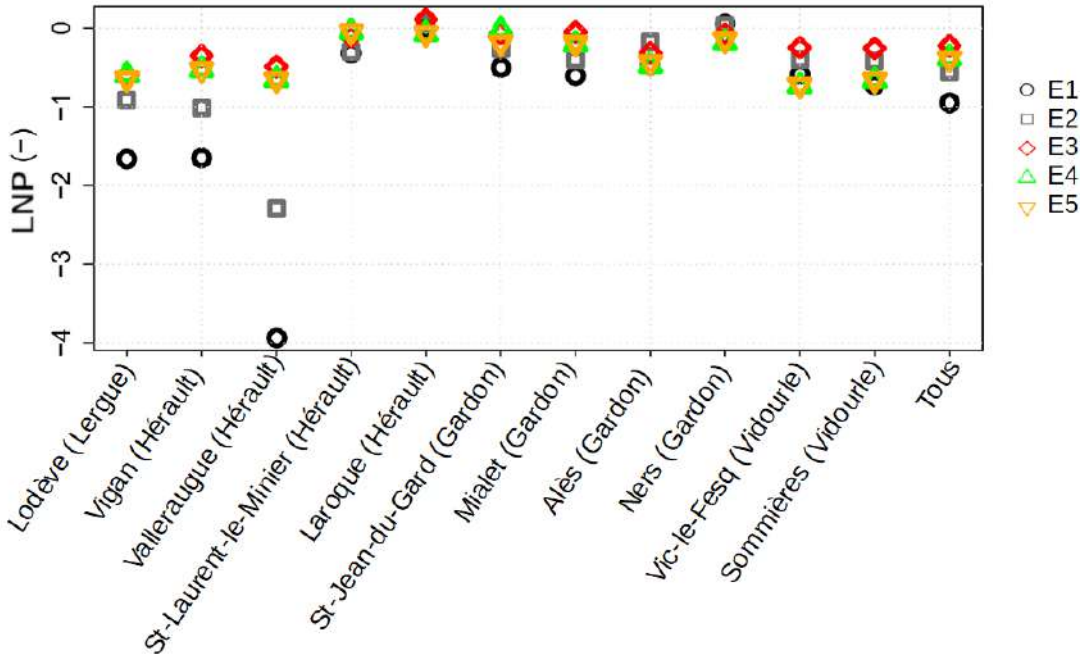


Figure 2 : LNP obtenus pour tous les bassins et sous-bassins versants cévenols selon les différents types d'expérience (d'après [Lovat et al., 2019]).

III – 2. Evaluation du ruissellement simulé

Pour étudier l'impact de la résolution spatiale et de la description de l'occupation et de la texture du sol sur le ruissellement simulé, les quantités de ruissellement simulé divisées par les quantités de pluie correspondantes pour chaque événement ont été comparées simulation par simulation pour les 11 cas d'étude sur les Cévennes (Figure 3). Les principaux résultats de cette analyse détaillée [Lovat et al., 2019] sont les suivants. L'utilisation d'une résolution spatiale plus fine se traduit par une augmentation de la production de

ruissellement presque partout sur les bassins versants cévenols. La modification de la représentation de la texture du sol entraîne de fortes disparités dans la spatialisation du ruissellement simulé. En général, E2 produit plus de ruissellement que E3, en particulier sur la Lergue, l'Hérault et la Vidourle où la fraction argileuse est plus élevée avec HWSD qu'avec LUCAS. Cet excès de ruissellement est cohérent avec une capacité d'infiltration et de drainage plus faible associée aux sols riches en argile. Les simulations basées sur ECOCLIMAP-II montrent des quantités de ruissellement plus élevées qu'avec ECOCLIMAP-SG, sauf au sud de l'axe urbanisé St-Jean-du-Gard/Alès. Ces quantités de ruissellement produites avec E4 dans ce bassin versant semblent être corrélées à la quantité de zones de plus forte densité de population et de zones imperméables dans le bassin versant. Les différences entre E4 et E5 sont moins prononcées que celles entre E3 et E4. Une analyse détaillée à l'échelle locale a également été réalisée pour l'événement du 12 septembre 2015, marqué entre autres par plus de 220mm tombés en 3h localement au nord-est de Lodève et par le débordement de la Lergue. Les cumuls de ruissellement sur l'épisode, ainsi que les chroniques de ruissellement simulés en quatre points de grille dans la ville de Lodève ont été utilisés pour étudier les différences entre les expériences menées avec ISBA-TOP. Cette analyse à très fine échelle a notamment permis de mettre en évidence l'influence très locale d'une description de l'occupation du sol différente sur la spatialisation et l'intensité du ruissellement simulé dans moins d'1 km².

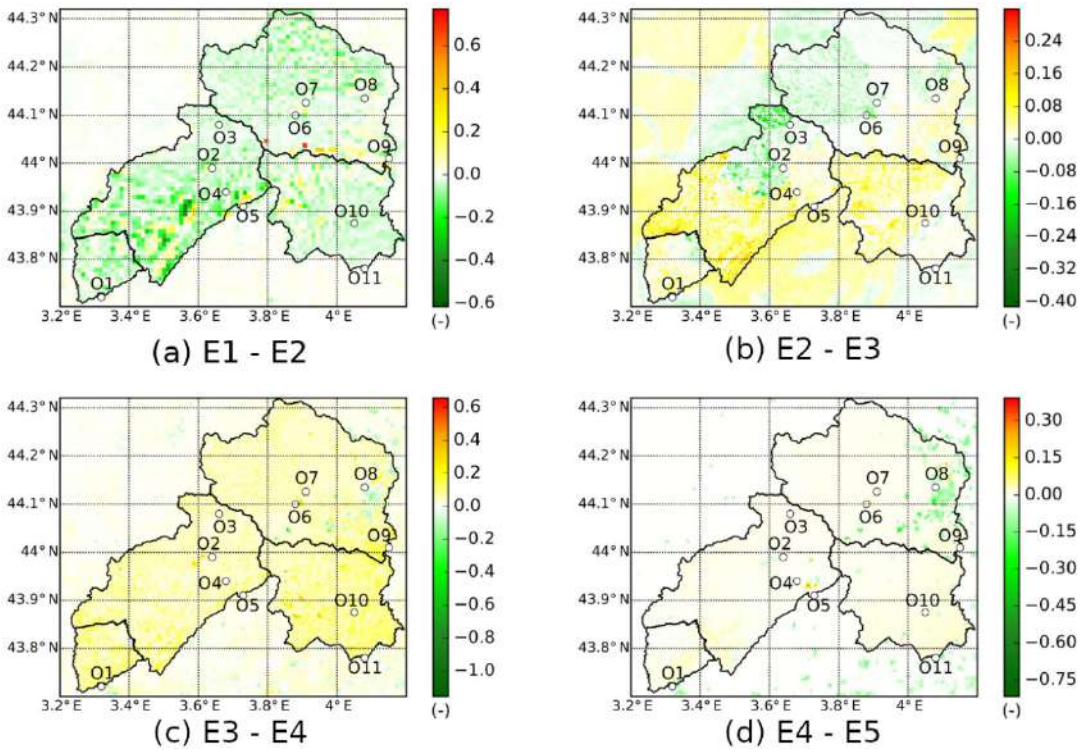


Figure 3 : Différences moyennes entre les rapports de quantité de ruissellement sur quantité de pluie (sans unité) (a) entre E1 et E2, (b) entre E2 et E3, (c) entre E3 et E4 et (d) entre E4 et E5. D'après [Lovat et al., 2019].

Pour confirmer les principaux résultats obtenus sur les Cévennes, l'impact de la résolution spatiale et des descripteurs de sol sur les simulations de ruissellement a aussi été évalué sur les bassins versants plus urbanisés autour de Cannes. La pluie cumulée sur l'événement, ainsi que le ruissellement simulé pour les expériences E1 et E3 sont présentés figure 4. Le ruissellement simulé par les différentes expériences est localisé sous les précipitations, ce qui est cohérent. Les différences entre les expériences apparaissent principalement à l'est et au nord de Biot (O15 sur la figure 4) ainsi qu'à la limite entre les deux zones côtières, à l'ouest de E18. Les zones de fort ruissellement simulé correspondent aux zones d'agrégats d'impacts (victimes, dégâts et plus hautes eaux). Outre une vérification visuelle, une méthode quantitative a été proposée pour comparer objectivement les cartes de ruissellement simulées et les données d'impact pour cet événement. Elle consiste à balayer le domaine d'étude, contenant le ruissellement simulé et les données d'impact ponctuelles, sur tous ses points de grille par une fenêtre circulaire glissante (rayon de 1 km). A chaque déplacement sont calculés le nombre d'impact et le ruissellement moyen "contenus" dans la fenêtre.

Le ruissellement moyen simulé est ensuite présenté en fonction du nombre d'impacts. Le graphique montre ainsi qu'une résolution spatiale du modèle plus fine permet des simulations de ruissellement mieux corrélées avec ces données [Lovat et al., 2019]

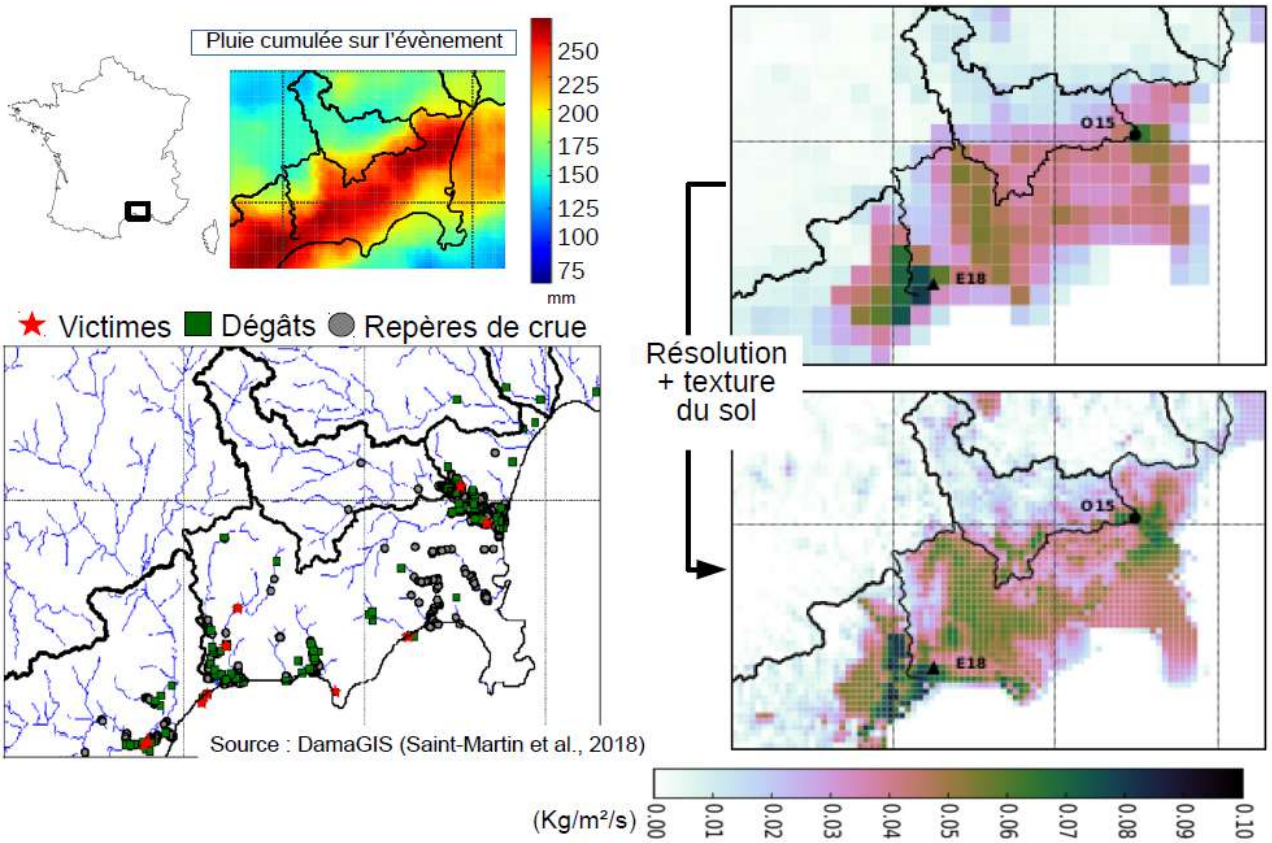


Figure 4 : Le cas de Cannes du 30/09/15 au 05/10/15 : pluie cumulée estimée avec ANTILOPE, localisation des victimes et des dégâts d'après la base de données DamaGIS [Saint-Martin et al., 2018] et ruissellement simulé pour deux types d'expérience (E1 et E3) d'après [Lovat et al., 2019].

CONCLUSIONS

L'apport d'une représentation plus fine du type de surface et de la texture des sols pour la modélisation des réponses hydrologiques a été étudié. Une étude de sensibilité a été menée sur l'impact des descripteurs de sol et d'un changement de résolution spatiale du modèle hydrologique sur la simulation des pics de crue et du ruissellement. Différentes sources de données sur la texture du sol et l'occupation des sols ont été évaluées pour une zone rurale et une zone urbanisée du Sud-Est de la France en utilisant le système ISBA-TOP avec deux résolutions (300 et 1000 m). Les débits et ruissellements simulés ont été évalués sur 12 cas de crues passés, avec des données observées, estimées et des données d'impact, comme la localisation des victimes ou des dégâts. Les résultats montrent que, par ordre d'influence décroissante, le changement de résolution spatiale, la description de la texture du sol et enfin la représentation de l'occupation du sol impactent les réponses hydrologiques simulées. Le changement de résolution spatiale dans ISBA-TOP entraîne des différences en termes de débit simulé et de spatialisation du ruissellement, et une plus haute résolution (300 m) améliore les résultats. Les valeurs de débit simulées sont souvent plus affectées par les différences dans les bases de données sur la texture du sol que par les différences dans les bases de données sur l'occupation des sols, en particulier dans les zones rurales. L'utilisation des données d'impact s'est avérée être indispensable pour la vérification quantitative des simulations de ruissellement, faute de mesure directe de cette variable. D'autres données, comme les données d'objets connectés ou les données géo-référencées des réseaux sociaux ou d'applications (comme par exemple la localisation des observations participatives "pluie

et inondation" relevées sur l'application mobile de Météo-France) pourraient à l'avenir être également utilisées pour évaluer les champs de ruissellement simulé.

La configuration d'ISBA-TOP qui obtient les meilleurs résultats dans cette étude est celle correspondant à une résolution de 300 m, avec des données LUCAS pour la texture du sol et des données ECOCLIMAP-II pour l'occupation du sol.

REFERENCES

Artinyan E., Vincendon B., Kroumova K, Nedkov N, Tsarev P., Balabanova S., Koshinchanov G (2016) : Flood forecasting and alert system for Arda River basin, Journal of Hydrology, . 541, A, 457-470.

Ballabio C., Panagos P., Montanarella L. (2016) Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database Geoderma, 261 , pp. 110-123.

Bouilloud, L., Chancibault, K., Vincendon, B., Ducrocq, V., Habets, F., Saulnier, G.-M., Anquetin, S., Martin, E. and Noilhan, J., (2010): Coupling the ISBA Land Surface Model and the TOPMODEL Hydrological Model for Mediterranean Flash-Flood Forecasting: Description, Calibration, and Validation Journal of Hydrometeorology, 11, 315-333.

Ducrocq, V., Boudevillain, B., Bouvier, C., Braud, I., Fourrie, N., Lebeaupin-Brossier, C., ... & Ruin, I. (2019). Le programme HYMEX–Connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région méditerranéenne. La Houille Blanche, (3-4), 5-12.

Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A. T., Roujean, J.-L., Masson, V., Martin, E. and Le Moigne, P.(2013):ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models, Geosci. Model Dev.,6, 563-582, doi:10.5194/gmd-6-563-2013.

Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.-L., Etchevers, P., Franchisteguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., et al. (2008). The safran-isba-modcou hydrometeorological model applied over france. Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 113(D6).

Kirkby, M. and Beven, K. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Journal, 24(1) :43–69

Laurantin, O. (2008). Antilope : Hourly rainfall analysis merging radar and rain gauge data. In Proceedings of the International Symposium on Weather Radar and Hydrology, Grenoble, pages 2–8. France, 10–12 March 2008.

Lovat, A., Vincendon, B., Ducrocq, V. (2019). Assessing the impact of resolution and soil datasets on flash-flood modelling. Hydrology and Earth System Sciences, 23(3), 1801-1818.

Masson, V., Champeaux, J. L., Chauvin, F., Meriguet, C., & Lacaze, R. (2003). A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. Journal of climate, 16(9), 1261-1282.

Nachtergaele, F., van Velthuizen, H., Verelst, L.,Wiberg, D., Batjes, N., Dijkshoorn, K., van Engelen, V., Fischer, G., Jones, A., and Montanarela, L (2012).: The harmonized world soil database. Version 1.2, in: Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.

Noilhan, J. and Planton, S. (1989). A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. Monthly Weather Review, 117(3) :536–549.

Roux, H., Labat, D., Garambois, P.-A., Maubourguet, M.-M., Chorda, J., and Dartus, D (2011).: A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2567–2582, https://doi.org/10.5194/nhess-11-2567-2011.

Saint-Martin, C., Javelle, P., and Vinet, F. (2018) : DamaGIS: a multisource geodatabase for collection of flood-related damage data, Earth Syst. Sci. Data, 10, 1019–1029, https://doi.org/10.5194/essd-10-1019-2018.

Vincendon, B., Édouard, S., Dewaele, H., Ducrocq, V., Lespinas, F., Delrieu, G., & Anquetin, S. (2016). Modeling flash floods in southern France for road management purposes. Journal of Hydrology, 541, 190-205.

Atlas des ruissellement et crues soudaines exceptionnels en Europe et autour de la Méditerranée (Gaume *et al.*)

L'article correspondant a été publié dans l'ouvrage "The Mediterranean region under climate change : a scientific update", publié aux éditions IRD, pages 113 à 144. Il est accessible via le lien suivant : lien

Tendances récentes de la variabilité climatique à partir de 40 ans d'observations : le cas de la région parisienne (Habets *et al.*)

L'article correspondant a été publié dans le journal Atmospheric Chemistry and Physics en 2019 et est accessible via le lien suivant : lien

SESSION 2 : CARTOGRAPHIE ET EVALUATION DE L'ALEA RUISSELLEMENT ET DES RISQUES ASSOCIES

Programme oral session 2

Carte de l'aléa ruissellement Suisse – un outil de réduction des risques (Magnollay *et al.*)

Carte de l'aléa ruissellement Suisse – un outil de réduction des risques

Antoine MAGNOLLAY[1] & Roberto LOAT[2]

[1]Office fédéral de l'environnement OFEV, 3003 Bern, Suisse, e-mail: antoine.magnollay@bafu.admin.ch
[2]Office fédéral de l'environnement OFEV, 3003 Bern, Suisse, e-mail: roberto.loat@bafu.admin.ch

L'utilisation de la carte de l'aléa ruissellement permet de se protéger contre les inondations liées aux écoulements de surface et ainsi de réduire les dommages.
En Suisse, entre 30 % et 50 % des dégâts d'inondation ne sont pas dus à des débordements de cours d'eau ou des lacs mais à des écoulements de surface suite à des pluies intenses. La carte de l'aléa ruissellement réalisée en 2018 pour tout le territoire Suisse met en évidence les zones potentiellement menacées par le ruissellement. Elle a été élaborée conjointement par l'Office fédéral de l'environnement, l'Association Suisse d'Assurances et l'Association des établissements cantonaux d'assurance dans le cadre d'un partenariat public-privé (PPP). Elle est accessible gratuitement en ligne sur www.bafu.admin.ch/ruissellement et couvre tant les espaces urbanisés que les zones non bâties de l'ensemble du pays.
La carte de l'aléa ruissellement est modélisée à l'aide d'une méthode uniformisée à l'échelle nationale en utilisant des données relatives à la couverture du sol (bâtiments, voies de communication, zones vertes, etc.), aux sols et la géologie, le modèle numérique de terrain et le réseau hydrographique. Le volume de précipitations est adapté par bassin versant en fonction de statistiques locales. Elle n'a pas fait l'objet d'un contrôle de plausibilité sur le terrain. Elle montre, au moyen de différentes couleurs, les hauteurs d'eau qui peuvent être atteintes par des événements pluvieux de périodicité supérieure à 100 ans.
En Suisse, près de deux tiers des bâtiments sont susceptibles d'être touchés par le ruissellement, raison pour laquelle cette carte présente un intérêt élevé.
Mots-clefs : ruissellement de surface ; carte du ruissellement de surface ; fortes précipitations ; cartographie des risques ; modélisation ; prévention des dangers.

Swiss surface runoff risk map - a risk reduction tool

The use of the runoff hazard map helps to protect against flooding due to runoff and thus reduce damage.
In Switzerland, between 30% and 50% of flood damage is not caused by river or lake overflow but by surface runoff following heavy rainfall. The new runoff hazard map for whole Switzerland produced in 2018 shows the areas potentially threatened by runoff. The Federal Office for the Environment has elaborated this map jointly with the Swiss Insurance Association and the Association of Public Insurance Companies for Real Estate within the framework of a Public-Private Partnership (PPP). It is available free of charge online at www.bafu.admin.ch/surface-runoff and covers both urbanized and non-built up areas throughout the country.
The runoff hazard map is modelled using a nationally standardized method using data on land cover (buildings, traffic networks, green areas, etc.), soils and geology, the digital terrain model and the river network. The volume of precipitation is adapted per catchment area based on local observations. It has not been subject to a plausibility check in the field. It shows, by means of different colors, the water heights that can be reached for rainfall events with a return period exceeding 100 years.
In Switzerland, almost two thirds of the buildings are likely to be affected by runoff, which is why this map is of high interest. It is of great help to specialists such as architects, building owners, planners, authorities and emergency services. They can quickly get an idea of possible risks and take appropriate protective measures. It also aims to raise awareness among the general public, assess the situation and plan possible protective measures. It therefore helps to reduce the damage caused by flooding. As the map also covers areas with low urbanization, it is useful for farmers who wish to take protective measures against soil erosion.
Key words : surface runoff; surface runoff map; heavy precipitation; risk mapping; modelling; hazard prevention

PLUS JAMAIS ÇA !

Le 2 mai 2013, un violent orage s'abat sur le canton de Schaffhouse et déverse des trombes d'eau. Le bilan est très lourd. S'il n'y a pas de victime humaine à déplorer, une quarantaine d'animaux sont noyés dans un refuge et 530 bâtiments sont détériorés ; le montant des dommages se situe entre 20 et 25 millions de francs

Suisse. Un constat a surpris les spécialistes : les ruisseaux sortis de leur lit étaient loin d'être les premiers en cause. Plus de 90 % des sinistres sont occasionnés par l'écoulement de surface, également appelé ruissellement.

Figure 1 : événement du 2 mai 2013 à Schaffouse

En 2013, le phénomène n'était pas encore cartographié. L'utilisation de la carte de l'aléa ruissellement permet de se protéger contre les inondations liées aux écoulements de surface et ainsi de réduire les dommages.

Le ruissellement provoque jusqu'à la moitié des dommages occasionnés par les inondations. L'intérêt de ce nouvel outil est donc évident. Ce phénomène tend par ailleurs à se multiplier ces dernières années, comme le montrent les récents événements survenus à Zofingue en juillet 2017 ou encore à Lausanne ou Sion en juin 2018. Avec la hausse des températures due au réchauffement climatique, les précipitations intenses devraient se faire plus abondantes et plus fréquentes, ce qui devrait conduire à une recrudescence des épisodes de ruissellement. La nouvelle carte permettra ainsi à la Suisse de mieux se parer contre les effets des changements climatiques.

COMBLER UNE LACUNE

Si le rôle du ruissellement avait déjà été identifié autour de l'an 2000 ou dans le cadre de l'analyse des événements de 2005, les cartes qui répertorient le ruissellement font cependant encore largement défaut en Suisse. Quelques cantons localisent ponctuellement les sites à risque à titre indicatif ou en spécifiant le sens de l'écoulement à l'aide de flèches. Mais, jusqu'en 2018, ce danger n'a pas fait l'objet d'un recensement systématique à l'échelle de la Suisse. Afin de combler cette lacune, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a entrepris de dresser une carte des dangers liés au ruissellement qui couvre tout le pays. Il collabore à cet effet avec l'Association suisse des assurances (ASA) et l'Association des établissements cantonaux d'assurance AECA. Le projet est mené sous forme de partenariat public-privé (PPP). La cartographie est effectuée au moyen de modélisations avec le logiciel FloodAreaHPC. La figure 2 ci-dessous présente la méthodologie employée. Elle consiste à superposer sur un modèle numérique de terrain à haute résolution avec une taille des cellules de 1 m, une carte des caractéristiques du sol, lesquelles déterminent le comportement de l'eau. Un troisième élément est la pluviométrie d'un événement météorologique rare d'une durée d'une heure. La quantité de précipitation a été adaptée par bassin versant sur la base d'analyses statistiques des observations. La forme du hyétogramme est quant à elle la même pour tous les bassins versant. La carte qui en résulte présente les voies d'écoulement des eaux superficielles, les surfaces concernées et les profondeurs d'eau prévisibles.

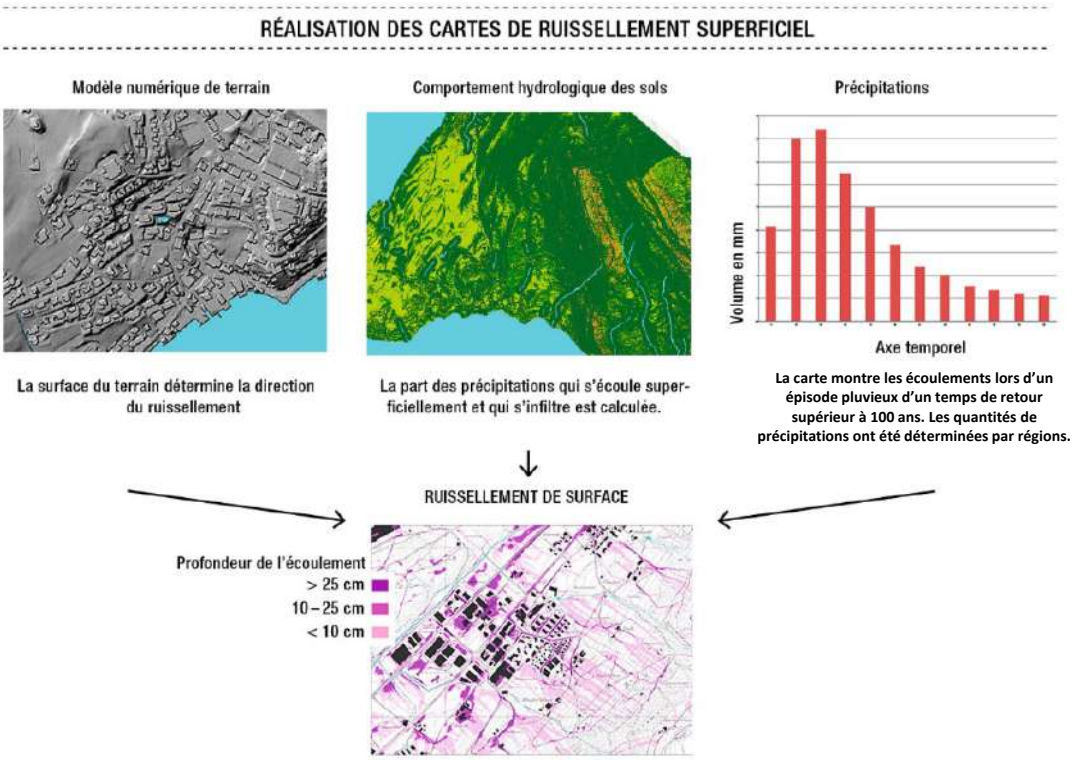


Figure 2 : méthodologie

Bien que le résultat de modélisation n'ait pas fait l'objet de vérifications de terrain systématiques, cette carte est, selon les utilisateurs, d'une bonne précision. L'appréciation des utilisateurs n'a pas fait l'objet d'un sondage exhaustif, mais se base sur les retours des services spécialisés des cantons lors du séminaire du 31 janvier 2020. Les figures 3 et 4 montrent, par exemple, la comparaison qualitative entre un événement et la carte. La comparaison des sinistres enregistrés par les assureurs ou des zones inondées lors d'événements récents avec la carte de l'aléa ruissellement montre que cette dernière représente bien la réalité. L'analyse des événements permet d'affirmer que les résultats sont bon non seulement en dehors des zones bâties mais également très satisfaisants dans les centres urbains.

Figure 3 Comparaison entre un événement et la carte de l'aléa ruissellement, la maison sur l'image de gauche est entourée en vert sur la carte de droite

Figure 4 : comparaison entre un événement et la carte de l'aléa ruissellement, la maison sur les images à droite est entourée en vert sur la carte de droite

REDUIRE LES RISQUES

La carte présente les régions suisses potentiellement menacées par le risque de ruissellement et indique les différentes hauteurs d'eau qui peuvent être atteintes. En Suisse, près de deux tiers des bâtiments sont susceptibles d'être touchés par le ruissellement, selon la carte de l'aléa ruissellement. Les architectes, les maîtres d'ouvrage, les urbanistes, les autorités ou les forces d'intervention trouvent en cette carte un outil les aidant à planifier des mesures de protection. En effet, certaines mesures relativement simples (voir figure 5 ci-dessous) peuvent empêcher l'eau de pénétrer dans les bâtiments et prévenir ainsi d'éventuels dommages. Il peut s'agir, par exemple, de rehausser les puits de lumière ou d'installer des barrages et des seuils surélevés à l'entrée des parkings souterrains. Étant donné que la carte traite également les zones non bâties, elle est utile aux agriculteurs qui souhaitent prendre des mesures de protection contre l'érosion du sol. Le canton de Lucerne (qui a établi la carte dans le cadre d'un projet pilote en 2015) utilise cet instrument depuis début 2016 et se félicite des résultats obtenus. Si les mesures de protection contre le ruissellement sont prises en compte dès la phase de planification d'un projet de construction, elles n'induisent que peu voire aucun coûts supplémentaires.

Figure 5 : Exemples de mesures de protection, de gauche à droite : batardeau amovible à l'entrée d'un garage souterrain, rehaussement de saut de loup et muret de protection à l'amont d'une habitation

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans les prochaines années, les acteurs doivent non seulement mettre en œuvre la carte, mais également poursuivre le développement d'outils méthodologiques qui permettront d'affiner la cartographie des dangers et d'inclure le ruissellement dans les cartes de danger « standards ».

En conclusion, la carte de l'aléa ruissellement permet de connaitre les zones potentiellement exposées aux écoulements de surface. Sur cette base, chacun et chacune est responsable de déterminer les mesures de protection adéquation afin de réduire les risques. En particulier lors de nouvelles constructions ou de l'ouverture de nouvelles zones à bâtir. Dans ces situations il est impératif de prendre en considération la carte et de vérifier sa pertinence sur le terrain. Cet outil permet une détection préliminaire du risque et donc de concevoir et de réaliser des constructions en tenant compte des risques. Sur cette base, il est possible d'élaborer des mesures de protection.

INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES

Le site Internet de l'OFEV fournit des informations complémentaires :

www.bafu.admin.ch/ruissellement

La carte est publiée sur Internet et les données peuvent être téléchargées gratuitement

www.map.geo.admin.ch (taper *ruissellement* dans la barre de recherche, puis cliquer sur *Carte de l'aléa ruissellement*)

NOMENCLATURE

Le ruissellement est la part des eaux de pluie qui, notamment en cas de très fortes précipitations, s'écoule à la surface du sol avant d'arriver à un exutoire (lac, ruisseau, rivière, cuvette). Il est caractérisé par un temps de préalerte souvent très court, par une faible hauteur d'eau, de quelques centimètres, et souvent par un écoulement le long des routes.

Le ruissellement est distinct des inondations qui sont causées par les débordements des ruisseaux, des rivières et des lacs. Un résumé de la nomenclature utilisée peut être placé ici, si les indications n'ont pas été données au cours du texte.

Cartographie de l'aléa de ruissellement : la modélisation va-t-elle remplacer l'expertise de terrain ? (Newinger *et al.*)

Cartographie de l'aléa de ruissellement : la modélisation va-t-elle remplacer l'expertise de terrain ?

Olivier NEWINGER[1], Yannick ROBERT[1]

[1] Service RTM de l'Isère, Pôle Expertise et Affichage des Risques, 9 quai Créqui, 38000 Grenoble - olivier.newinger@onf.fr – yannick.robert@onf.fr

La modélisation des phénomènes naturels prend une place croissante dans le zonage des aléas et des risques en France. Elle constitue désormais un outil incontournable pour valoriser et mieux appréhender les aléas hydrauliques des cours d'eau, mais également les aléas plus complexes et spatialement plus diffus comme les ruissellements. A partir de situations locales et de retours d'expériences sur le département de l'Isère, l'article montre que si l'on doit poursuivre le développement des outils de modélisation, l'expertise de terrain et les regards croisés d'experts demeurent essentiels à la bonne compréhension des phénomènes. Il est proposé en conclusion des recommandations de bonnes pratiques et des perspectives d'améliorations pour la mise en œuvre des documents d'affichage des risques.

Mots-clefs : modélisation hydraulique, analyse experte, modèles topographiques haute densité.

Runoff hazard mapping: will modeling replace field expertise?

Natural phenomena modeling is taking an increasing place in the zoning of hazards and risks in France. It is now an essential tool for enhancing and better understanding of river hydraulic hazards, but also more complex and spatially more diffuse hazards such as runoff. Based on local situations and feedback from the Isère department, the article shows that if we have to continue the development of modeling tools, the field expertise and the cross-views of experts remain essential for a good understanding of the phenomena. It concludes with recommendations for good practice and prospects for improvement in the implementation of risk mapping documents.

Key words : hydraulic modelling, expert analysis, High density Data elevation models

INTRODUCTION

Disponibilité croissante de modèles numériques de terrain à haute résolution, explosion des capacités de calculs et développement de logiciels de plus en plus performant et rapides à prendre en main, attentes de la société civile de plus de précisions et de justifications techniques via des outils modernes : est-ce que le zonage « géomorphologique » de terrain, encore appelé « à dire d'expert » serait à reléguer aux techniques du passé devant la modélisation numérique de l'aléa de ruissellement ?

Afin d'apporter quelques éléments de réflexion sur cette thématique nous proposons de partir :

- d'une part de la réalité des événements, au travers de quelques exemples emblématiques du département de l'Isère de ces dernières années, et ce afin d'appréhender la diversité des phénomènes devant être intégrés au zonage de l'aléa ;
- de la finalité du zonage de l'aléa de ruissellement pour la gestion du risque et les stratégies de maîtrise du développement urbain. En effet c'est de cette finalité que va dépendre les caractéristiques attendues du zonage, et donc les objectifs assignés aux méthodologies de zonage.

Ces éléments d'objectif permettront alors, dans un second temps, de dresser un panorama des méthodologies de définition de l'aléa, et de retenir les forces et faiblesses de ces dernières. Tout ceci étant amené à continuer à évoluer, un certain nombre de perspectives pressenties seront évoquées en conclusion.

Le champ, les limites et les origines de ces réflexions

Le champ couvert par ces réflexions concerne les zonages réalisés dans la cadre de la prise en compte des risques au sein des documents d'urbanisme (carte des aléas intégrées au sein d'un PLU ou Plan de Prévention des Risques Naturels), au regard de l'expérience du service RTM de l'Isère acquise dans le cadre des missions d'assistance aux Collectivités et à l'Etat. Bien évidemment ces éléments de réflexions ont été largement nourris

des échanges réalisés avec les bureaux d'études intervenant régulièrement en cartographie dans le département de l'Isère, à savoir Alp'Géorisques, Alpes Géo Conseil et Progéo Environnement, et des discussions avec les collectivités locales et l'Etat (DDT 38).

Services RTM et politiques publiques des risques

Les services RTM portent un appui et une expertise publique dans le cadre de leurs missions d'intérêt général, auprès des services de l'Etat et des collectivités. Un partenariat étroit s'est mis en place depuis plus de 20 ans dans le département de l'Isère au sein des acteurs publics des risques sous la forme d'une mission interservices (MIRNat), qui favorise les échanges, les retours d'expériences et permet l'élaboration de guides et documents-types locaux pour la prise en compte des risques dans l'aménagement. Ces quatre dernières années ont été consacrées à une refonte totale des méthodologies de zonage des aléas et de des traductions réglementaires, avec un effort notable apporté aux phénomènes de ruissellements et de ravinements.

RUISSELLEMENT : QUELS PHENOMENES ?

Le ruissellement est usuellement défini [Coque R., 1993] comme un écoulement d'eaux de pluie ou de fusion, nivales ou glaciaires, plus ou moins durable et rapide, à la surface des versants. On le qualifie souvent « d'élémentaire » en raison, à la fois, de son développement sur des espaces restreints et du caractère intermittent de son activité.

On comprendra alors que le phénomène se décline en une multitude de typologies dynamiques et qu'il touche à peu près toutes les zones géographiques d'un pays à partir du moment ou les pentes sont suffisantes pour entrainer l'eau vers un exutoire.

Le département de l'Isère est intégralement concerné par ce phénomène, qui revêt des aspects différents selon les zones topo-climatiques et la géologie.

La moitié nord du département est très favorable au ruissellement, et par la même à au ravinement : les molasses alpines du Miocène et les moraines argileuses du Quaternaire constituent l'essentiel des terrains affleurant, avec des épaisseurs métriques à décamétriques de formations altérées et de désagrégations mécaniques du substrat. L'agressivité du climat, soumis à des remontées ponctuelles de flux méditerranéens de Sud-Ouest, combinée à la nature argilo-limoneuse des sols, entraîne régulièrement des phénomènes intenses de ruissellements, qui dans les cas extrêmes, par relais de processus, engendrent des coulées de boue et des ravinements (St Geoire en Valdaine, juin 2002, Vienne, juin 2007, Chambarans, octobre 2013, …). La présence de grandes surfaces agricoles labourées et d'unités urbaines de petites tailles mais densément rapprochées, amplifie notablement le phénomène.

La moitié sud du département est montagneuse, individualisée en massifs distincts (Vercors, Chartreuse, Belledonne, Oisans) entrecoupes de vallées profondes (Grésivaudan) ou de bassins sédimentaires (Trièves, Beaumont). Dans les zones naturelles et rurales, les phénomènes de ruissellements sont très présents, mais d'autres processus hydrologiques (torrents) ou gravitaires (glissements de terrains) prennent rapidement le relais. La plus forte sensibilité aux ruissellement se matérialise aujourd'hui surtout dans l'agglomération grenobloise, avec une urbanisation de coteau qui favorise ce phénomène à l'occasion de forçages climatiques intenses (orages, comme celui de juin 2010, et pluies sur sols enneigés ou gelés, comme en décembre 1991).

Citons ici quelques exemples concrets de sites d'événements du département :

Le 6 juin 2002, un orage stationnaire et rétrograde sur la vallée de l'Ainan (la Valdaine) amène en trois heures entre 150 et 200mm de pluie et de grêle, entrainant des phénomènes de ruissellements spectaculaires : en nappe sur les versants à faible pentes, concentrés dans les petits talwegs. Toutes les occupations du sol ont été concernées (forêt, prairies, cultures, zones urbanisées) avec des relais de processus rapides tels ravinements, coulées de boues, glissements boueux dès que la pente augmentait fortement et lorsque la couverture végétale était insuffisante. De tels cumuls de pluie entraînent un dépassement systématique de la capacité d'infiltration des sols. [Photographies : IRMA et RTM]

En octobre 2013, Une extension pluvio-orageuse typique des remontées cévenoles extensives vient déverser 250 à 100mm de pluies du Nord de la Drôme au sud-ouest de l'Isère. Le petit massif montagneux des Chambarans est affecté de multiples phénomènes hydro-morphologiques, notamment des ruissellements et des ravinements dans les têtes de bassins versants. Moins intense que l'épisode du 6 juin 2002 en Valdaine, le rôle défavorable de l'occupation du sol y est plus fortement souligné : les zones imperméabilisées et de cultures labourées contribuent aux plus forts ruissellements. [photographies : RTM]

En juin 2010, un orage intense et stationnaire déverse plus de 80mm de pluies sur le Nord Est de l'agglomération grenobloise, touchant en particulier les communes de Meylan, Biviers et Montbonnot St Martin. Le ruissellement urbain est spectaculaire : les voiries se transforment en cours d'eau, le réseau pluvial est très vite saturé. La partie basse, située dans la vallée de l'Isère, s'ennoie sous1 à 3 m d'eau, par manque de capacité d'évacuation et du fait de topographiques en cuvettes.[photographies : Dauphiné Libéré]

A l'occasion de tels phénomènes, le ruissellement « d'eau claire » est très peu rencontré : la nature argilo-limoneuse des sols entraine rapidement des matières solides (MES, charriage) et des phénomènes de dépôts et d'érosion, sans cesse renouvelés au gré des microtopographies (routes, cuvettes, fossés, inflexions topographiques locales…). En zone urbanisée et en zones boisées, s'ajoutent, parfois avec un effet dramatique, l'emport de flottants (branches, troncs, mobilier urbain, véhicules…)

DE LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA DE RUISSELLEMENT : POURQUOI ?

Comme évoqué précédemment, la géographie et le climat de l'Isère, en particulier la moitié nord du département, est propice à des phénomènes de ruissellements nombreux et fréquents. Les années 80 et 90 ont vues ces phénomènes se répéter (1983, 1988, 1993, 1999) et s'intensifier avec le double constat d'une aggravation des pluies intenses et des pratiques anthropiques (agriculture intensive labourée et imperméabilisation des sols en zones urbaines), constat qui n'est d'ailleurs pas spécifique au département mais

se retrouve au niveau national. Si les effets du ruissellement ne sont pas, fort heureusement, les plus dommageables pour les vies humaines, ils représentent par contre la majorité des dégâts recensés.

Avec la mise en place des PPR en 1995, il est vite apparu nécessaire pour les services de l'Etat, et avec l'appui du service RTM, de mettre en place un zonage spécifique du ruissellement et du ravinement, au travers de grilles de caractérisation des phénomènes, assorties de règles particulières pour la gestion du risque.

Ce travail s'est poursuivi jusqu'à ce jour, avec une nouvelle déclinaison de grilles et de méthodologies en 2016 et 2017, basée sur les retours d'expériences locaux des 20 années précédentes d'une part, et la volonté de prendre en compte les réflexions des groupes de travails nationaux sur les PPRN d'autre part.

La mise en chantier des PLU intercommunaux, notamment ceux de la Métropole Grenobloise et de communautés de communes plus rurales (Bièvre Est, Cœur de Chartreuse) a permis une mise en application de la méthodologie, et sa validation au fur et à mesure de la réalisation des documents d'affichage des risques.

LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA DE RUISSELLEMENT, QUELLE MISE EN ŒUVRE OPERATIONNELLE EN ISERE ?

Entre 2016 et 2018, les productions cadencées des cartographies d'aléas pour les PLUi a amené le service RTM, en mutualisant les retours d'expériences des bureaux d'études, à proposer des améliorations de la méthodologie et des grilles de caractérisations. Présentées en MIRNat, ces évolutions sont aujourd'hui la nouvelle référence méthodologique de la cartographie ruissellement/ravinement pour le département.

Il est proposé d'avoir une double approche, selon le niveau de détail souhaité par le maître d'ouvrage (Etat, Collectivité), par une analyse à dire d'expert et par la mise en place d'une modélisation hydraulique. L'approche experte est systématique et obligatoire, alors que la modélisation reste une option qui sera mise en œuvre pour de situations complexes à forts enjeux, par exemple dans un contexte urbain et péri-urbain ou le ruissellement à une place prépondérante, ou à l'occasion de projets urbains structurants (Opérations d'Aménagements Programmées- OAP).

Exemple de grille utilisable pour la modélisation de l'aléa ruissellement en Isère depuis 2016 :

		Vitesse d'écoulement en m/s			
		0 à 0,2	0,2 à 0,5	0,5 à 1	> 1
Hauteur de submersion en mètres	0 à 0,2	Faible V1	Faible V1	Moyen V2	Fort V3
	0,2 à 0,5	Faible V1	Moyen V2	Fort V3	Très fort V4
	0,5 à 1	Moyen V2	Moyen V2	Fort V3	Très fort V4
	> à 1	Fort V3	Fort V3	Très fort V4	Très fort V4

Lorsqu'il est retenu, le choix du modèle est laissé libre pour permettre, en fonction des enjeux et du territoire concerné, de l'adapter au mieux aux objectifs recherchés dans la cartographie de l'aléa. La finalité reste bien la gestion du risque, afin de produire des mesures adaptées et cohérentes pour l'urbanisme (adaptations/résilience), et des prescriptions efficientes pour la gestion à la source du ruissellement et du ravinement dans les zones de productions (zones agricoles notamment).

Les atouts et les difficultés rencontrées avec cette double approche sont décrits, en les replaçant dans un contexte plus général, dans la suite de l'article.

LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA DE RUISSELLEMENT, COMMENT ?

Historique des événements

Parfois élément déclencheur de la cartographie, l'historique des événements est incontournable comme étape préalable des études, quelle que soit la méthodologie de zonage mise en œuvre derrière. D'abord avec un objectif technique, l'historique permet de mieux cerner les caractéristiques des événements qui peuvent être attendus en termes d'aléa (fréquence, intensité, conditions de déclenchement, phénomènes associés) ou

d'enjeux (conséquences actuelles d'événements passés).

L'historique a également une importance fondamentale dans la justification du zonage et son acceptation sociale. Le zonage final sera d'autant plus facilement mis en œuvre, qu'il s'appuie sur des éléments observés et parlant pour la population locale.

Il faut souligner ici le rôle majeur de la base de données RTM (BDRTM) qui, depuis la fin des années 80, bancarise les évènements historiques de chaque département RTM. L'outil, qui a fait l'objet de mises à jour récentes, est accessible en ligne dans une version grand public (https://rtm-onf.ign.fr/). Il est financé par les ministères de l'Environnent et de l'Agriculture, et les agents des services le renseigne régulièrement, tant pour les évènements nouveaux que pour les évènements anciens (avant 1990), à l'occasion d'études et d'expertises, via les retours des Collectivités, des bureaux d'études et de l'Etat. On notera aussi l'attention particulière portée aujourd'hui par l'Etat à ces recensements et inventaires d'évènements historiques dans les plans de gestions des risques (PPR, PAPI)

Le recueil d'informations historiques peut être chronophage... et l'effort d'investigation sera donc plus ou moins important. Si parfois l'on peut avoir la chance de tomber sur un habitant passionné d'histoire et intarissable sur les événements ayant affecté son territoire, l'on peut aussi dans certain cas rencontrer des territoires sur lesquels un oubli semble avoir été organisé plus ou moins tacitement... Mais généralement, si les événements des dernières années sont encore au moins partiellement connus, passé la décennie les événements ont disparu de la mémoire collective.

Les sources d'informations peuvent être des archives, pour les événements majeurs ayant affectés des zones à enjeux, mais dans le cadre du ruissellement, l'on ne peut pas faire l'impasse du recueil de témoignages oraux locaux, s'agissant de phénomènes géographiquement et temporellement limités.

Avec une approche « à dire d'experts », l'historique sera plus implicitement au cœur du travail, que ce soit en terme de justification du zonage, où de par l'importance de la phase de terrain qui sera nécessairement plus intensive et donc propice au recueil d'informations. Dans tous les cas, une approche historique régionale, par analogie avec d'autres contextes et configurations similaires, est indispensable. Cette approche s'intègre alors au territoire étudié, par l'expérience du modélisateur ou du géomorphologue.

Modélisation hydrauliques

Différents types d'outils

Nous ne rentrerons pas ici dans la multiplicité des modèles hydrologiques, hydrauliques ou géomorphologiques, avec leur classement traditionnel en modèles statistiques, conceptuels, à base physique, global, distribués... On peut néanmoins noter que si le nombre d'outils de recherche est pléthorique, sur le terrain il reste peu varié à ce jour.

Nous retiendrons néanmoins une typologie simplifiée, de « terrain », en fonction de l'utilisation opérationnelle constatée des modèles ces dernières années :

- Les outils de prédétermination des débits, bien que ces derniers ne soient pas en tant que tel des outils de zonage, mais ils sont parfois utilisés pour donner des ordres de grandeur de débit en sortie de combes (*Crupédix*, méthode rationnelle).
- Les modèles « topographiques » : les phénomènes étant souvent complexes et impossibles à reproduire (infiltration, écoulements en lame, effets de l'érosion, etc.), il est parfois fait recours au seul paramètre prépondérant, la topographie. Cela permet d'identifier les directions privilégiées d'écoulement. Les outils dédiés des Systèmes d'Information Géographique permettent un rendu rapide, si l'on dispose d'un modèle numérique de terrain haute densité (voir *infra*),
- Les modèles hydrauliques qui, en fonction d'injections de débits plus ou moins distribués, assurent une estimation de la hauteur d'eau et de la vitesse en chaque point du calcul.
- Les modèles « complexes », qui ambitionnent d'intégrer d'autres valeurs quantitatives que les seuls paramètres hydrauliques : localisation et intensité de l'érosion et des dépôts, bilans en terme de transport solide.

La prédétermination d'un certain nombre de débits caractéristiques est assez souvent rencontrée, y compris dans le cadre de cartographies dites « à dire d'expert ». Basée sur des méthodes simplifiées, elles apportent des ordres de grandeur de débit. L'utilisation de modèles topographiques est rare à ce jour à l'échelle communale. La raison vient essentiellement du fait qu'avec les capacités de calculs actuelles, il est quasiment tout aussi facile de mettre directement en œuvre une modélisation hydraulique complète. Les modèles hydrauliques bi-

dimensionnels sont les outils qui se développent le plus à ce jour, pour les raisons qui seront explicités ci-après. Quant aux approches plus complexes, elles ne sont que très marginalement utilisées pour le zonage des risques, au regard de la complexité des phénomènes en jeux, et donc du manque de robustesse des résultats. Elles peuvent néanmoins avoir un intérêt dans le cadre d'une approche semi-qualitative s'appuyant sur des comparaisons de scénarios entre eux (dimensionnement d'ouvrages, évolutions des couvertures du sol et des pratiques agricoles).

Le recours à la modélisation

Si les équations de Barré de Saint Venant sont connues depuis plus 150 ans, le recours commun à la modélisation hydraulique est plus récente. Dans le domaine des risques naturels, elle a d'abord été cantonnée à l'hydraulique en chenaux avec une approche monodimensionnelle, pour des questions de temps de calcul et de disponibilité des données topographiques.

Pour le zonage de l'aléa de ruissellement, c'est surtout l'avènement de la modélisation bidimensionnelle qui a entraîné son développement. Ce développement très rapide ces dernières années a été rendu possible par :

- L'augmentation exponentielle des capacités de calcul, et la réduction du coût de ces dernières. Pour des problématiques locales (échelle communale), une convergence en moins de quelques heures peut être généralement envisagée, et ce avec des équipements informatiques aujourd'hui communs.
- Le développement des moyens d'acquisition de données topographiques hautes densités à large échelle, notamment par l'introduction des technologie LIDAR et photogrammétriques (drones). Il est ainsi aujourd'hui possible de disposer de modèles numériques de terrain fins (échelle métrique voir moins) et ce à des coûts acceptables dans le cadre d'une étude (de l'ordre de 10 K€ pour une commune de 15 km²).
- L'apparition de logiciels pour praticiens de terrain, ne réservant plus l'utilisation de la modélisation 2D aux équipes d'informaticiens spécialisés. L'ensemble de la résolution numérique est géré par le code de calcul lui-même, et des outils de pré/post-traitement des données sont nativement intégrés. Seuls quelques paramètres, ayant une signification hydraulique, ne sont alors qu'à renseigner avant d'obtenir un résultat.

L'intérêt de la modélisation

La modélisation hydraulique présente de nombreuses caractéristiques qui poussent à l'utiliser de plus en plus, et qui sont des opportunités importantes pour l'avenir.

D'un point de vue technique, elle permet de raffiner un certain nombre de résultats, notamment dans le cas de topographies complexes, en particulier urbaines et péri-urbaines. Pour du zonage de risques, on qualifiera de complexe :

- Les secteurs anthropisés, avec notamment l'impact majeur que peut avoir sur le routage des écoulements la voirie et plus globalement tous les axes de communications.
- Les zones présentant une topographie monotone et peu marquée. C'est ainsi le cas des cônes de déjections, parfois imbriqués (glacis, glacis-cônes, pédiments), et au sein desquels peuvent parfois exister des zones de circulation préférentielle difficilement décelable à l'œil sur le terrain. C'est également le cas des topographies correspondant à des anciens remplissages glaciaires ou fluvio-glaciaires, pour lesquels la topographie actuelle n'est que très partiellement résultante des écoulements. Il est alors parfois difficile de lire sur le terrain, à dire d'Expert, le devenir des écoulements de quelques décimètres de hauteur et de déceler d'éventuelles zones d'accumulation qui peuvent avoir des impacts conséquents pour les biens et les personnes.

Des éléments quantitatifs (hauteur et vitesse) peuvent ainsi être obtenus, et ce en n'importe quel point du domaine de calcul.

D'un point de vue sociologique, la modélisation trouve également tout son intérêt ! En effet, le caractère « mathématique » des résultats donne une certaine caution à ces derniers, bien plus que le dire d'Expert, intrinsèquement dépendant de l'Expert lui-même. Le rendu des cartes est également plus apprécié par le néophyte, en donnant un sentiment de précision des résultats, les rendus ayant souvent la précision du maillage, souvent proche du mètre grace à l'utilisation de MNT haute densité. Or ce niveau de précision ne peut généralement pas être obtenu à dire d'Expert.

Les limites et les risques

Comme pour n'importe quel outil, il existe un certain nombre de limites. Ces limites sont d'abord techniques.

En effet, la diversité des phénomènes entrant en jeu, et leur caractère aléatoire, ne permettent pas une reproduction des caractéristiques réelles des écoulements. Les écoulements réellement constatés peuvent donc avoir des caractéristiques très lointaines des écoulements modélisés. On notera ainsi que :

- Les codes de calculs actuellement utilisés ne prennent en compte que de l'eau liquide seule, or cette hypothèse est très rarement vérifiée (charge solide, embâcles).
- Les phénomènes de transport solide, avec de l'érosion en amont et des dépôts à l'aval ne sont pas ou très mal appréhendés. Il en est de même des embâcles, naturelles (bois) ou anthropiques (flottants divers notamment urbains). Or ils peuvent fondamentalement modifier les caractéristiques des écoulements
- En-dehors des vallons encaissés (pour lesquels la modélisation n'a que peu d'intérêt), la microtopographie (légère inclinaison des terrains, présence d'éléments fixes plus ou moins imperméables tels que murets/haies/clôtures ou mobiles tels qu'embâcles, portails, véhicules) a une importance prépondérante. Or cette microtopographie n'est que très partiellement représentée, même avec des modèles numériques de terrain à haute densité (pas métrique ou infra-métrique).

Différentes approches ont été testées au sein du service RTM, en collaboration avec les bureaux d'études de cartographie des risques, et mise ponctuellement en œuvre pour contourner les limites précédemment listées. On notera ainsi la multiplication des scénarios, pour prendre en compte la variabilité de certains phénomènes, comme les dépôts massifs, l'incision ou les embâcles. Des tests de modification aléatoire de la topographie, notamment le long du parcellaire (à partir des données cadastrales, pour représenter des effets locaux dû aux murets, haies et clôtures) ou de la voirie ont été mis en œuvre pour tester la robustesse du zonage final obtenu. Dans le même ordre d'idée, le choix de conserver ou de supprimer les bâtiments, dans un contexte de zonage urbain, est une question récurrente qu'il faut analyse par une approche multi-scénarios.

Un autre volet des risques associés est lié à la précision des résultats. Si c'est ce qui fait la force de l'approche, c'est également une forte limite. En effet, les résultats ont, en terme de rendu, la précision du maillage et de l'arrondi, précision parfois bien lointaine de la réalité des incertitudes ! Un citoyen quelque peu averti, aura vite tendance à rejeter l'ensemble du travail, s'il ne retrouve pas ses souvenirs d'événements retranscrits.

Cette précision peut également amener à la mise en œuvre de mesures constructives ou d'ouvrages locaux de protection qui n'intégreraient pas les incertitudes de la démarche de modélisation. On notera ainsi que les effets cinétiques (terme $V^2/2g$ se rajoutant à la hauteur des écoulements), ont localement des magnitudes supérieures à la hauteur des écoulements. Les fortes vitesses associées aux ruissellements urbains en particulier sont souvent mal appréhendées par les modèles au droit des singularités topographiques (courbes et angles droits des voieries).

Nous ne pourrons pas conclure sur ces risques sans évoquer le risque de l'approche « presse-bouton ». En effet, les logiciels de calculs devenant de plus en plus simples à utiliser, voir dans certains cas gratuits, la tentation peut être parfois forte de les mettre en œuvre sans avoir les compétences et a minima le recul nécessaire. Un résultats (des cartes colorées) est systématiquement obtenus, mais la pertinence des mesures d'encadrement réglementaire qui peuvent en découler peuvent être souvent très discutables. Cela poise aussi le problème des grilles utilisées pour le zonage : elles sont discutables pour le ruissellement lorsque le facteur Vitesse l'emporte sur le facteur Hauteur. Si cette approche trouve tout son sens pour des crues de grands cours d'eau ou de rivières torrentielles, elle est souvent pénalisante pour des ruissellements de moins d'une heure et ne dépassant pas 50cm de hauteur. La traduction automatique de l'aléa modélisé en zone de risque entraîne une sur-précaution et uniformise le risque, masquant les secteurs et « points noirs » réellement problématiques.

Approche à dire d'Expert

Approche traditionnelle de zonage des aléas, recommandée par les guides PPRN nationaux, cette approche s'appuie principalement sur la lecture du terrain et l'analyse des scénarios possibles. L'analyse historique, tant locale (événements ayant intéressés la zone d'étude), que régionale (référence à des phénomènes dans des contextes équivalents) a également une place de choix dans la démarche.

Le principal atout de la démarche experte est son caractère intégrateur. En effet, seule cette approche experte est susceptible de prendre en compte, et de quantifier, la multiplicité des phénomènes pouvant entrer en jeu. Elle s'adapte ainsi bien à la description et à l'estimation des phénomènes d'incision, de dépôts ou d'embâcles.

L'approche experte présente également de nombreuses limites. Tout d'abord elle est intrinsèquement dépendante de l'Expert lui-même. On peut imaginer des configurations où deux Experts sur le même site n'aient pas d'avis convergent. La précision du zonage va dépendre du temps passé sur le terrain, mais dans certaines

conditions il devient rapidement utopique de vouloir raffiner de façon très fine sur le terrain. La modélisation hydraulique et les données topographiques haute définition ont alors toute leur place.

La qualité du zonage final va dépendre de nombreuses caractéristiques. On notera celles qui nous semblent les plus importantes :

- L'expérience du zoneur, et notamment le fait qu'il ait pu voir ou vivre des événements comparables à ceux qu'il aura à cartographier,
- Le temps passé sur le terrain, et l'exhaustivité des reconnaissances menées *in situ*,
- Le caractère collégial du zonage, notamment au travers d'un double regard,
- La qualité des données historiques et des témoignages qui auront pu être recueillis.

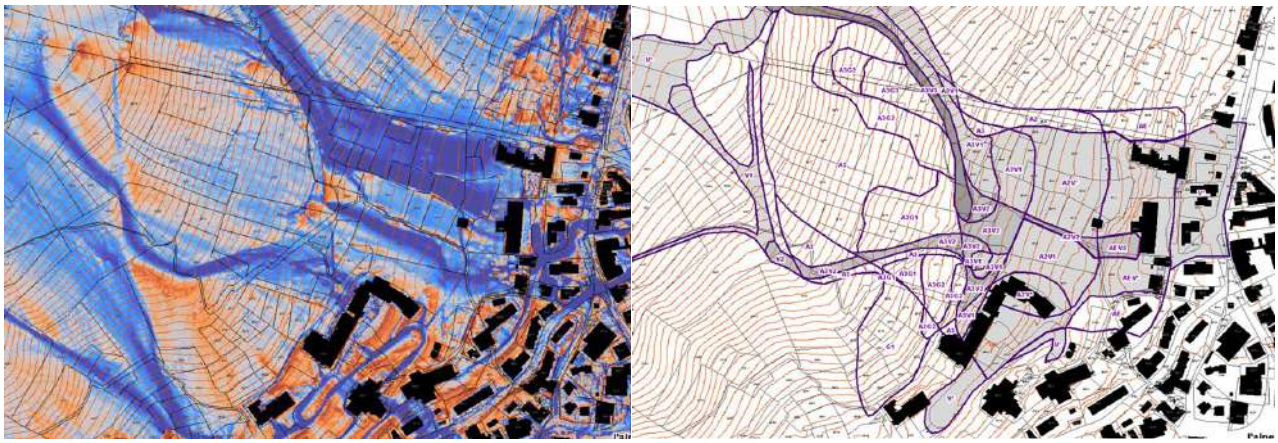
D'un point de vue sociologique, le zonage est plus facilement remis en question par la population. Néanmoins, la démarche a fortement évolué ces dernières années. La production ne se limite plus à une carte accompagnée d'une rapide notice explicative : le rapport de présentation de la carte des aléas est prépondérant, détaillant à l'envie secteur par secteur les reconnaissances de terrain, les phénomènes historiques (documents iconographiques à l'appui), les choix opérés entre degrés d'aléas, etc. C'est ce dernier qui a vocation à justifier le zonage retenu.

L'apport des données topographiques haute-densité

Les MNT issus de vols LIDAR et/ou photogrammétriques HD, avec une exploitation possible de façon qualitative et quantitative, est devenu un lien précieux entre modélisation et géomorphologie. En effet, il offre une aide pour l'approche experte (cartes de pentes, d'ombrages, utilisation de modèles topographiques d'écoulements…) et permet d'avoir des données d'entrées fiables pour la modélisation 2D (qui reste essentielles pour l'aléa ruissellement).

Sa réalisation préalable au zonage des aléas, qui devient un standard en Isère pour les cartographies PPRN et des Collectivités, va certainement se généraliser à l'échelon national dans les années qui viennent.

Exemples de modélisations topographiques sur la station des Deux Alpes avec sa retranscription en carte des aléas, après validation par une expertise de terrain :



RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Recommandations

Pour les différentes raisons présentées précédemment, les recommandations suivantes sont réalisées :

- Mettre en œuvre des outils de modélisation le plus largement possible, mais de ne garder les résultats que comme des aides à la décision, pas comme finalité,
- Ne jamais passer directement d'un zonage modélisé à un zonage réglementaire par l'application de « matrices de transcriptions réglementaires », mais de toujours passer par un travail manuel de construction du zonage, avec une validation terrain,
- De systématiquement assurer un double regard sur le zonage, avec un passage sur le terrain pour toutes les zones présentant des enjeux, et un partage avec le maître d'ouvrage de l'étude,
- De faire appel le plus massivement possible à l'utilisation de modèles numériques de terrain haute-

densité, tant pour l'analyse experte de terrain que pour la modélisation.

Perspectives

En guise de conclusion, nous proposons de partager un certain nombre de perspectives pour l'avenir. Tout d'abord en terme de rendu, la carte bi-dimensionnelle actuelle sera certainement amenée à évoluer. C'est déjà le cas aujourd'hui, où le rapport de présentation prend progressivement une place de plus en plus prépondérante. Demain, avec des outils de réalité augmentée, il est très probable que le citoyen néophyte soit progressivement amené à pouvoir se plonger dans les justifications de choix réalisées par le zoneur, en ayant accès visuellement aux logiques mises en œuvre par l'Expert (éléments historiques, provenance et importance des écoulements, facteurs aggravants).

La restitution et visualisation 3D, encore balbutiante en risque inondation, sera nécessairement incontournable dans le rendu, notamment pour les phénomènes de ruissellements pour lesquels la pente à une importance fondamentale.

En terme de mesures d'encadrement réglementaire, on assiste de plus en plus à des prescriptions d'objectifs plutôt que de moyens, renvoyant au maître d'ouvrage et à ses conseils (RTM, bureaux d'études) le choix des principes d'adaptation du projet aux réalités du terrain. On notera que depuis quelques années les concepts de résilience et d'adaptations constructives se développent massivement dans les PPRN. Dans ce contexte, on devrait très certainement voir émerger des cartographies à « plusieurs dimensions », et non plus uniquement planes, avec la prescription d'un principe d'axe d'écoulement. Sur certaines zones, l'inconstructibilité par polygone serait alors remplacée par des flèches. Charge ensuite aux aménageurs de préciser les mesures permettant le passage et la temporisation des écoulements tout en assurant la réalisation de leur projet.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les spécialistes des bureaux d'études (Alpes Géo Conseils, Alp'Géorisques, Progeo Environnement), les collègues de la DDT de l'Isère (Service des Risques) et la Mission Risques de Grenoble Alpes Métropole pour les échanges fournis et fructueux sur cette thématique.

REFERENCES

CEPRI (2012) – *Gérer les inondations par ruissellement pluvial. Guide de sensibilisation*. https://www.cepri.net/tl_files/Guides%20CEPRI/guide%20ruissellement.pdf

Coque R. (1993) – *Géomorphologie*. Armand Colin.

Neboit R. (1991) – *l'Homme et l'érosion. L'érosion des sols dans le monde*. Université Blaise Pascal Clermont Ferrand.

GABER J | MONFORT M | BALADES JD | MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE MEDD DIRECTION DE LA PREVENTION DES POLLUTIONS ET DES RISQUES DPPR SDPRM (1999) - *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) : Les risques d'inondation. Le ruissellement péri-urbain*. Edité par DPPR - SDPRM. PARIS

Grenoble Alpes Métropole (2020) – *Plan Local d'Urbanisme intercommunal*. https://www.grenoblealpesmetropole.fr/646-les-documents-du-plui.htm

PREFET de l'Isère (2018) – *Evolution de la prise en compte des risques naturels en Isère dans le cadre de l'élaboration des PLU et PLUi et de l'instruction des demandes d'urbanisme*. Porter A Connaissance + 5 annexes.

Une analyse des « données proxy » pour l'évaluation des cartographies des aléas liés au ruissellement intense pluvial (Breil *et al.*)

Une analyse des « données proxy » pour l'évaluation des cartographies des aléas liés au ruissellement intense pluvial

Pascal BREIL [1], Isabelle BRAUD [1], Jérôme PINTA [1], Christine POULARD [1], Loic MOULIN [2], Lilly-Rose LAGADEC [2], Blandine CHAZELLE [2]

[1] INRAE, UR RIVERLY, 5 rue de la Doua 69625, France, nom.prenom@inrae.fr

[2] SNCF, DG Industrielle & Ingénierie, Dép. Voies & Abords / Dir. Zone d'Ingénierie Atlantique, PRI Bordeaux / Ingénierie et projets régionaux -PRI CF EG

Si l'on convient de définir le ruissellement intense comme un ensemble de processus d'érosion, de transport et dépôts qui se réalisent au gré de la topographie, de la pédologie et des usages du sol, il est compliqué d'en avoir une ou des métriques directes pendant un événement. Cela est d'autant moins faisable que les zones de passage du ruissellement intense ne sont pas connues, comme cela peut être le cas pour le débordement d'un cours d'eau, et ne sont à l'évidence pas continus d'amont en aval dans les versants. L'évaluation des modèles de ruissellement intense souffre alors du manque de données d'observation et il est nécessaire de recourir à des informations approchées, post événement, qui sont des résultantes finales de ce qui s'est passée. Le terme de « proxy » est utilisé pour décrire ce type d'information. Nous nous intéressons dans ce travail à décrire plusieurs types de proxy, proposons une manière de les utiliser pour évaluer les cartographies prédictives des processus du ruissellement intense. Les proxy de natures ponctuelle, linéaire et surfacique sont présentés au travers de plusieurs cas d'étude. Les limites de ces données sont discutées et le recours à des informations complémentaires pour mieux évaluer le caractère prédictif des cartographies est abordé.

Mots-clefs : ruissellement intense, proxy, évaluation

Proxy data" analysis for the evaluation of heavy rainfall runoff hazard maps

While intense runoff should be defined as a set of erosion, transport and deposition processes that occur according to topography, soil and land use, it is complicated to have a direct metric or metrics during an event. This is all the more impractical as the areas of intense runoff are not known, as may be the case for river overflow, and are obviously not continuous from upstream to downstream on the slopes. The evaluation of intense runoff patterns then suffers from the lack of observational data and it is necessary to use approximate, post-event information, that is a final result of what has happened. The term "proxy" is used to describe this type of information. We are interested in this work to describe several types of proxies, propose a way to use them to evaluate predictive mapping of intense runoff processes. Proxies of a point, linear and surface nature are presented through several case studies. The limitations of these data are discussed and the use of additional information to better assess the predictive nature of the maps is discussed.
Keywords: intense runoff, proxy, evaluation

INTRODUCTION

Les variables au sol qui favorisent l'expression des aléas liés au ruissellement intense sont bien cernées comme la topographie, la pédologie et l'usage du sol [Cantón *et al.,* 2011]. Cependant les cartographies prédictives bâties sur ces connaissances souffrent d'un manque de données pour les évaluer. En particulier un principe de « continuité liquide amont-aval » propre aux cartographies des débordements de cours d'eau est discutable comme le souligne les concepts de connectivité hydrologique et de surfaces contributives qui sont sources de débat dans l'amélioration de la modélisation hydrologique [Ali et Roy, 2010 ; Sivapalan, 2003]. Cette simplification conduit à négliger les effets induits par des éléments transportés par le ruissellement qui contribuent dans bien des cas, et sous faible tirant d'eau, à une réorientation locale des chemins hydrauliques naturels et artificiels de « temps normal ». Les chemins de « temps exceptionnel » pourraient alors être contraints non par une topographie fine mais supra. Ce qui amène la discussion sur le terrain de la résolution spatiale requise. Une vision simplifiée du processus de ruissellement conduit aussi à décréter de larges surfaces en aléas forts, ce qui perd tout intérêt opérationnel quand on souhaite mettre en place des actions de prévention ou de protection. A titre d'exemple, les dispositions constructives visant à réduire le ruissellement à la source, à le temporiser ou à l'infiltrer selon les possibilités locales, à interdire les constructions dans les axes de transfert naturels et à adapter le niveau du bâti dans les zones d'accumulation, vont dans le bon sens. De telles

dispositions ont été intégrées aux PLU des métropoles de Lyon et Nantes mais à partir de cartographies supports plus théoriques que validées et qui, par conséquent, maximisent les surfaces en aléas. On peut se demander si les surfaces traversées et les configurations topographiques rencontrées sont à même, ou pas, de fournir des matériaux, des mises en vitesse et ralentissement propices à l'apparition d'une gamme de désordres ou même capables d'en atténuer les effets par dispersion. Cela peut contribuer à créer des discontinuités spatiales dans la distribution des aléas transfert-érosion et inondation-dépôt lors du parcours dans les versants.

Ces remarques sont des hypothèses à tester à l'aide des désordres observés sur le terrain. Ces désordres, au moins pour une partie, restent visibles les jours et parfois les mois qui suivent un événement pluvieux exceptionnel. On qualifie ces stigmates de « données proxy» des aléas du ruissellement intense. En effet, ils témoignent des conséquences sans être des mesures directes des processus d'érosion et de dépôt. L'usage de ces données limitées doit cependant faire l'objet d'une critique et d'une méthodologie d'utilisation bien décrite; en effet les cartographies prédictives du ruissellement intense, que ces données servent à valider, ont vocation d'aide à la décision. Le bon usage des données proxy conditionne la pertinence des cartographies produites et la bonne localisation la plus en amont possible des aménagements de prévention dans les versants.

Le travail mené depuis 2013 autour de l'évaluation des cartographies produites par le modèle géomatique IRIP [Lagadec et al., 2018] a permis d'évaluer l'intérêt de différentes sources de données proxy. En particulier, selon leur nature, ponctuelle, linéaire ou surfacique, comment peut-on les utiliser?

Cette étude, illustrée par trois jeux de données proxy, présente les hypothèses de travail faite et les résultats obtenus.

Dans ce travail nous définissons :

- Le ruissellement intense comme le résultat de pluies intenses, de période de retour 30 ans, à même d'occasionner au sol des mouvements de matières qui affectent les versants et non seulement les axes d'écoulement dessinés dans la topographie ;
- Les aléas liés au ruissellement intense comme les processus transfert - érosion, de transport et de dépôt - accumulation, dont la survenue est associée à une période de retour 30 ans;
- Dans une moindre mesure, comme aléa, les zones de production du ruissellement où l'érosion hydrique est un premier facteur d'aléa.
- La vulnérabilité comme une métrique des éléments ou activités anthropiques qui sont impactés par le ruissellement intense ;
- Le risque lié au ruissellement intense, comme le croisement d'une métrique de vulnérabilité et d'une métrique de l'aléa [Kelman, 2003]

MATERIEL ET METHODE

La cartographie des aléas liés au ruissellement intense est approchée ici par une méthode de score : plus le nombre de facteurs favorables au ruissellement intense est présent dans une maille raster de l'espace d'un bassin versant et plus l'aléa de ruissellement est grand. La méthode IRIP distingue trois étapes dans le ruissellement intense : la production, le transfert et l'accumulation. Les deux dernières sont considérés comme les manifestations physiques du processus de ruissellement qui sont capables de créer des dégâts aux éléments vulnérables. Il est considéré que 3, 4 ou 5 facteurs favorables sur 5 calculés dans chaque étape suffit à caractériser un aléa fort. L'entité spatiale de base est la « maille » raster qui permet de discrétiser l'espace du bassin versant. Dans les exemples traités, une maille carrée de 25m par 25m a été retenue, qui est celle du modèle numérique de terrain utilisé dans chaque cas d'étude.

L'évaluation des cartographies est basée ici sur l'hypothèse qu'un dégât géolocalisé est détecté si la zone d'intérêt qui contient le dégât comporte une indication d'un ou plusieurs aléas forts en ruissellement. Afin d'intégrer tous les cas de figure qui se présentent dans l'espace rastérisé d'un bassin versant, il est utilisé une table de contingence (**Tab.1**).

Dans l'hypothèse où le modèle de prédiction serait exact, et que toutes les données de dégâts possibles soient répertoriées au travers d'une infinité d'événements pluvieux, la totalité des mailles du bassin versant seraient réparties dans les cases « 1 » et « 4 « de la table.

- La case « 1 » prédit que toutes les mailles raster avec un aléa faible, en transfert et en accumulation, n'ont jamais été le lieu de dégâts.

- La case « 4 » prédit que toutes les mailles raster avec un aléa fort, en transfert et (ou) en accumulation, ont été au moins une fois le lieu de dégâts.

Tableau 1 : Structure de la table de contingence appliquée à l'évaluation des cartographies du ruissellement intense.

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	1	2
	Oui	3	4

Dans la pratique, les conditions d'exhaustivité des données de dégât et d'infinité d'événement ne sont pas remplies. Il peut y avoir au mieux plusieurs événements responsables des dégâts répertoriés au sol sans que l'ensemble du bassin versant n'ait été concerné ou que les dégâts n'aient été tous répertoriés. Par conséquent, les cases « 2 » et « 3 » ne sont pas à effectifs nuls.

- La case « 2 » indique la présence de dégâts non prévus par le modèle. Elle donne une mesure de la non adéquation du modèle à la réalité de terrain.
- La case « 3 » indique un aléa fort sans présence de dégât. Il peut y avoir trois raisons à cela : (I) le modèle n'est pas en adéquation avec la réalité de terrain ; (II) le dégât n'est pas répertorié, en particulier car hors enjeux assurantiel ; (III) il n'a pas plu ou pas suffisamment à cet endroit du bassin versant pendant l'événement ou les événements.

La case « 3 » est le plus délicate à interpréter. La raison (II) peut être en partie précisée à l'aide des données de la télédétection qui devraient permettre une cartographie quasi exhaustive des dégâts dans l'avenir (cf. Breil et al., Poster 46). La raison (III) peut aussi être précisée via l'usage des données de lame d'eau radar pour savoir où il a « suffisamment plu » durant un événement dans certaines zones d'un bassin versant. Il est aussi possible de réduire l'espace d'étude aux seuls zones vulnérables au ruissellement intense.

La méthode d'évaluation des cartographies des aléas de ruissellement intense est basée sur l'hypothèse nulle qu'il n'y a pas de lien spatial entre aléas forts ou faibles et zones avec ou sans dégâts. L'espace étant représenté par un maillage carré, dit « raster », le test d'hypothèse porte sur les effectifs des mailles comptabilisées dans chacune des cases de la table de contingence. Pour réaliser le test il est construit une autre table de même dimensions mais dont les effectifs sont répartis pour représenter l'indépendance entre les aléas et les dégâts. Elle peut être qualifié de matrice du hasard. Cette autre table est obtenue par les produits des effectifs marginaux de la table de contingence. Cela revient à appliquer le principe que la probabilité de deux événement indépendants se produisent (ici en un même lieu) est égale au produit des probabilités de chaque événement. La métrique de distance utilisée entre les deux tables est celle du Khi-2 dont la distribution de probabilité est connue. Une faible probabilité du Khi-2 correspond à des écarts relatifs importants entre les deux tables, ce qui signifie que la table de contingence observée s'écarte de l'indépendance entre valeurs des aléas et absence ou présence de dégâts. Si c'est le cas il faut vérifier que les cases « 1 » et « 4 », qui attestent de la capacité de prédiction du modèle, présentent des effectifs supérieurs à ceux du hasard (et inférieurs pour les cases « 2 » et « 3 »). Les écarts relatifs entre la table de contingence et la table d'indépendance (dans cet ordre) sont les sous-métriques du Khi-2. Le bon comportement du modèle est indiqué par des valeurs positives dans les cases « 1 » et « 4 » (respectivement négatives dans les cases « 2 » et « 3 »).

Pour comptabiliser les effectifs des différentes cases de la table de contingence il est fait appel au traitement « statistique de zone » sous QGIS ©. Par défaut ce traitement calcule le nombre de mailles situées à l'intérieur d'une zone (polygone), le cumul des valeurs de ces mailles dans la zone et la moyenne des valeurs de ces mailles dans la zone. La partition entre aléas forts (valeur 1) et faible (valeur 0) d'une carte IRIP est réalisée via la calculatrice raster de QGIS © en imposant une condition de valeur seuil. Cette carte binaire est ensuite traitée par « statistique de zone » pour évaluer dans les polygones qui délimitent les zones avec dégâts, mais aussi les zones sans dégâts, le nombre de mailles, la somme des valeurs des mailles, qui représente alors le nombre de maille avec aléas forts, et la moyenne qui est alors le pourcentage d'aléas forts dans la zone de calcul. La construction de la matrice de contingence implique de considérer les zones avec dégâts et les zones

sans dégâts. La notion de zone est un élément important de la démarche d'évaluation du caractère prédictif des cartographies. Ainsi, quelle emprise considérer autour d'une zone de dégât pour prendre en compte les sources d'aléas forts adjacents? Quels sont les critères pour définir les zones de non dégâts ?

RESULTATS

Cas des données ponctuelles

Il s'agit ici pour l'essentiel des déclarations individuelles réalisées par les propriétaires dans le cadre des catastrophes naturelles. Elles s'avèrent précieuses du fait qu'elles comportent une description, par le déclarant, des circonstances locales qui ont causé les dégâts. Les mentions de date et heure ainsi que des photos juste post événement sont jointes à la déclaration. Ces données sont transmises à la mairie qui synthétise l'information au niveau communal en nombre, type de bâtiments impactés et code de dégâts subis, avant de les transmettre, dans cette forme résumée, à la Préfecture pour instruction et indemnisation complémentaire par la Caisse Centrale de Réassurance.

L'exemple traité ici est celui des déclarations individuelles fournies par la Grand Chalon (71) dans le cadre de son étude sur les aménagements de prévention des effets du ruissellement intense. Le Grand Chalon a subi en mai puis juin 2016 de forts orages qui ont généré des inondations et en particulier des coulées de boue dans les zones urbanisées situées à proximité des coteaux agricoles. Nous disposons des adresses des déclarants, des circonstances qui ont généré les dégâts déclarés, leur nature et l'heure de survenue. Afin de n'étudier que les phénomènes liés au ruissellement intense et non au débordement d'un cours d'eau ou d'un talweg, l'analyse des circonstances et la localisation des dégâts ont été considérées. Cela permet de réduire le nombre de données ponctuelles de 88 à 56. Un deuxième filtre peut être appliqué qui consiste à exclure tous les dégâts compris dans l'Enveloppe Approchée d'inondations Potentielles des Cours d'Eau (EAIP-CE)[1]. Cette enveloppe a été réalisée au niveau national par le Cerema dans le cadre de la Directive Inondation. L'enveloppe intègre les limites les plus externes des inondations connues ou des modèles pour des crues de référence quand l'information existe. Pour les petits cours d'eau, la méthode Execo du Cerema fournit une valeur approchée sur la base de la topographie et d'une hauteur d'eau forfaitaire dans les talwegs (1m en moyenne). Dans notre cas d'étude Cette enveloppe intègre 36 points de dégâts déclarés, et donc 20 sont hors de cette enveloppe. On peut ici faire remarquer que le ruissellement intense peut tout à fait impacter des éléments vulnérables de cette zone EAIP avant que le débordement ne prenne la suite. On retrouve ainsi dans les déclarations des personnes sinistrées le fait d'avoir été inondé « par le haut » puis « par le bas » où le cours d'eau peut exister. Le phénomène de « vague ou d'arrivée soudaine » est aussi évoqué dans certains témoignages. Ce qui est en adéquation avec la formation et la rupture d'embâcles ou encore d'obstacles (muret) à l'écoulement de versant. L'évaluation des cartographies qui nous intéresse ici ne peut donc exclure les données intra EAIP mais nécessite d'être distinguée.

Prise en compte d'une zone tampon

La **figure 1** illustre quelques données ponctuelles. Il est à noter que les points qui correspondent à des adresses sont localisés « au centre » des habitations.

Certains points ne relèvent pas de déclarations privées comme le point en bord de route qui dans le détail est situé hors limite de parcelle privée. C'est un dégât déclaré par les services techniques de la Mairie du lieu.

Afin de considérer le caractère ponctuel de l'information, le biais de géolocalisation qui est ici le centre de la maison pour l'adresse associée, et le fait que les dégâts sont la conséquence d'un environnement à aléas forts de ruissellement qui peut impacter légèrement en aval, un tampon circulaire de rayon 25m autour du point « adresse » est réalisé.

C'est dans ce tampon qu'est comptabilisée la présence d'un ou plusieurs aléas forts. La **figure 1** illustre la position des aléas calculés ici à partir d'un modèle numérique de terrain à maille de 25m (source IGN). Nous trouvons ainsi 8 tampons sur 9 qui touchent ou contiennent au moins un aléa fort de ruissellement intense. Une autre approche consiste à considérer que les impacts peuvent se trouver n'importe où dans la parcelle d'un propriétaire qui a déclaré un dégât. C'est alors la limite de la parcelle qui correspond à l'adresse qui sert de

[1] https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/enveloppes-approchees-dinondations-potentielles-des-cours-deau-de-auvergne-rhone-alpes/

zone tampon. Dans cette hypothèse, les trois dégâts ponctuels situés les plus au Nord ne sont pas validés par la cartographie des aléas.

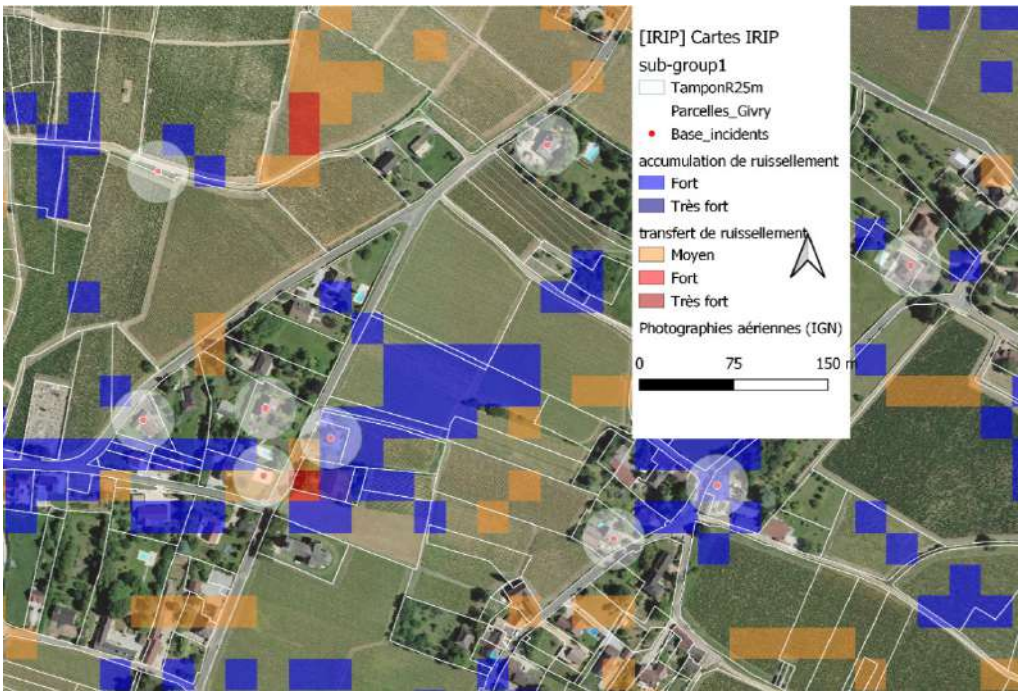


Figure 1 : Visualisation de points incidents avec leurs tampons circulaires de 25m, du parcellaire cadastral, et des aléas forts en Transfert (>=3) et Accumulation (>=4). (Fond satellite IGN ©)

Le point Nord-Ouest reste un cas particulier car il s'agit d'une emprise hors parcelle privée et qui constitue à l'évidence un terre-plein ou une zone de stockage. La question posée est de savoir si la proximité de mailles à aléas forts suffit à expliquer les dégâts. On peut discuter de la distance mais sous condition que l'aléa soit situé en amont ou au même niveau topographique. La résolution en verticale du modèle numérique de terrain doit alors être testée.

Les points visualisés dans la **figure 1** sont hors zone de l'EAIP-CE, ce qui signifie qu'ils ne sont *a priori* pas liés à un débordement de talweg ou de cours d'eau. Une statistique réalisée sur plusieurs sous bassins versants connexes du Grand Chalon (71) avec la méthode du tampon de 25m donne le **tableau 2**. Les calculs sont réalisés aussi dans et hors de l'EAIP-CE pour évaluer la différence.

Tableau 2 : Quelques valeurs caractéristiques de l'évaluation des cartes de ruissellement à l'aide de proxy

	Hors EAIP-CE	Dans EAIP-CE	Total BV
Nombre dégâts ruiss. Intense	20	36	56
Taux détection	85%	83%	82%
% surface en aléa fort IRIP	15%	23%	16%
Efficacité de détection	5.54	3.68	5.06

On note ici que le pourcentage de maille avec aléas forts est plus important dans l'EAIP-CE, ce qui fait sens car les aléas forts en accumulation tendent à se retrouver par construction du modèle dans les talwegs et en proximité des ruptures de pente convexes formées par les berges. Les taux de détections sont évalués en considérant qu'il faut au moins 1 maille en aléa fort sur 12 (qui sont interceptées par le tampon de 25m) pour valider la détection d'un dégât. Dans le cas d'étude, la moyenne de mailles à forts aléas dans les tampons est de 48%. Un rapport d'efficacité de la détection peut aussi être calculé : il correspond au rapport du taux de détection à celui du pourcentage de surface en aléas forts. Cela revêt un caractère opérationnel qui consiste à minimiser la surface où développer des mesures de prévention tout en ayant maximisé le taux de détection qui

rend compte de la capacité prédictive de la cartographie des aléas liés au ruissellement intense. La dernière ligne du **tableau 2** montre ainsi que le modèle IRIP est plus performant hors de l'EAIP.

La construction de la matrice de contingence est réalisée en comptabilisant le nombre de mailles en aléas forts (et non forts) qui sont situées dans les tampons des dégâts et hors des tampons. La matrice de contingence et la matrice du hasard associée sont présentées dans le **tableau 3**. La matrice des écarts relatifs, qui sert au calcul du KHI-2, a été ajoutée pour l'interprétation du test du KHI-2. Cela permet de voir quelles sont les cases les plus porteuse de la différence à une distribution spatiale indépendante (ou au hasard) des dégâts par rapport à celle des aléas forts.

Tableau 3 : matrice réalisée, matrice du hasard, matrice écarts relatifs

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	221112	89
	Oui	42755	88

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	221053	148.28
	Oui	42814	28.719

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	0.0003	-0.40
	Oui	-0.0014	2.06

Le test du KHI-2 donne une probabilité d'indépendance très faible (<< 0.001) entre présence ou absence de dégât et présence ou absence d'aléas forts. La matrice des écarts montre que la case « 4 » qui indique la détection d'un dégât est celle qui s'écarte le plus de l'indépendance puisque que le nombre de mailles est multiplié par 2. La contribution de la case « 1 » est très faible ainsi que pour la case « 3 ». La case « 2 » qui atteste de la non détection d'un dégât contribue sensiblement à la valeur du KHI-2, mais dans une proportion bien moindre en affichant ici – 40% du nombre de maille attendues en cas d'indépendance entre l'absence d'aléas forts et la présence d'un dégât. Le nombre de mailles sans dégâts est 1500 fois supérieur à celui des mailles avec dégâts.

Cas des données linéaires

Les dégâts issus du ruissellement intense concernent souvent les réseaux de transports, qu'ils soient ferrés ou routiers. Cela tient au fait qu'ils coupent bien souvent les versants. Les contraintes de pente ne sont pas les mêmes pour les voies ferrées et les routes, ce qui occasionne des déblais et remblais plus importants pour le fer. Ce cas est traité en détail [Braud *et al*., 2020] et nous n'aborderons ici que le cas des routes départementales, moins bien protégées contre le ruissellement que les autoroutes, mais dont le linéaire est de loin le plus important.

Le type de proxy associé aux données linéaires, voies ferrées et routes, est souvent un tronçon défini par la notion de points kilométriques. Ainsi le dégât n'est pas localisé en X et Y mais situé quelque part dans un linéaire. Un autre élément d'intérêt est la configuration de la voie de circulation : est-elle en remblai, déblai, profil mixte ou profil plat ? cela joue à l'évidence sur l'exposition aux aléas de ruissellement intense (communication 55, Moulin *et al*). Ces informations conditionnent la manière d'évaluer les cartographies.

On peut d'emblée se demander s'il ne faut pas considérer uniquement que les versants situés à l'amont proche des routes ou voies ferrées. En fait l'expérience montre que des processus d'érosion régressive se manifestent sur les talus ou accotements aval, ce qui conduit à l'effondrement partiel des chaussées par exemple. Ce processus est associé aux aléas forts de transfert et il convient donc de considérer les deux cotés d'une voie d'une circulation dans l'évaluation des cartographies des aléas de ruissellement intense. De même, la mise en pression de la couche de forme via les fossés, souvent amont, ou encore par les conduites d'assainissement provoque aussi le décollement du bitume et le départ des matériaux supports de la chaussée. L'aléa accumulation est donc aussi facteur de dégâts potentiels.

Des données de coupures de routes entre 2010 et 2018 nous ont été fournies sous la forme de fichiers tableurs par la DDTM66 qui couvre le territoire des Pyrénées Orientales.

La première étape était d'identifier les fermetures de route imputables au ruissellement et non à une inondation par débordement. En effet la confusion est parfois aisée mais il est important de différencier les deux situations. Pour cela il a été considéré les fermetures de route où le type d'impact qui était décrit était supposé provenir d'un ruissellement intense (éboulement, coulée de boue, atterrissement…). Ensuite il a été

regardé les cas d'inondation où la route ne se situait pas à proximité d'un cours d'eau ou d'un talweg ou dans ce cas si la différence d'altitude avec le talweg permettait d'écarter le débordement comme cause de la coupure. Difficile cependant d'écarter l'effet de sape d'une berge par un talweg en crue. Enfin l'utilisation des données streetview© a permis dans certains cas de déterminer le type d'impact même si sans photographie ou visite terrain il est difficile d'en avoir une idée très claire. Il est ressorti de ce traitement de donnée 48 tronçons de route, de longueur cumulée égale à 404 km, ayant été impactées par du ruissellement entre 2010 et 2018 sur le département des Pyrénées Orientales. Le reste du réseau représente 3401 km de route, soit presque 10 fois plus.

Méthode pour évaluation le caractère prédictif des cartes IRIP pour des routes

Il est établi une zone tampon de 25 m de part et d'autre du centre de la route. La proportion en aléas forts IRIP (Transfert >=3 et Accumulation >=4) est comptabilisée par le nombre de mailles raster qui répondent à ce critère et sont comprises dans la zone tampon. Les valeurs de 30% et 35% sont respectivement obtenues pour les routes non coupées et coupées. La différence peut paraitre faible. En fait les tronçons de route fermées encadrent d'une manière générale une ou plusieurs coupures de route. Ces tronçons sont délimités au niveau des nœuds routiers où des itinéraires alternatifs sont proposés. Parfois les tronçons sont délimités de manière à conserver l'accès aux dernières habitations non concernées par la coupure. De fait, les tronçons coupés peuvent contenir beaucoup de zones non forcément exposées aux aléas forts. L'évaluation du niveau d'aléas ne peut donc se concevoir globalement à l'échelle d'un tronçon fermé à la circulation.

Une solution est de segmenter le réseau routier de manière régulière afin d'identifier si des sous portions sont plus exposées aux aléas. Cette méthode a été appliquée en considérant une segmentation de 100m pour les routes coupées et non coupées. Les résultats sont reportés dans les tables de contingence du **tableau 4**, selon la même logique que pour le **tableau 3**. Le test du Khi-2 est là aussi très significatif et indique une liaison statistique entre les aléas forts et les tronçons des routes coupées.

La matrice des écarts relatifs montre à nouveau les contributions positives des cases 1 et 4 qui confirment le caractère prédictif du modèle IRIP dans ce cas d'étude.

Tableau 3 : matrice réalisée, matrice du hasard, matrice écarts relatifs

		Dégât				Dégât				Dégât	
		Non	Oui			Non	Oui			Non	Oui
Aléa fort	Non	181802	15992	Aléa fort	Non	180680	17114	Aléa fort	Non	0.006	-0.066
	Oui	76349	8461		Oui	77471	7338		Oui	-0.014	0.153

Une autre méthode consiste à calculer le nombre de segments qui dépassent un certain pourcentage en aléas forts. La **figure 2** résume cette information pour une gamme de pourcentage allant de 0.1 à 0.9. Plus le pourcentage est élevé et plus la quantité d'aléas forts dans le segment est importante. Il est notable que les tronçons de routes coupées sont constituées de plus de segments avec un pourcentage d'aléas forts élevé que ne les sont les segments des routes non coupées. Le rapport de ces proportions illustre bien cette dichotomie qui est difficile à déceler sur un fond cartographique. Le rapport de proportions ne fait qu'évoluer 1 à 2.25 pour la gamme des seuils de pourcentage testés. Le seuil de 70% de mailles en aléas forts correspond à 14% des segments dans les tronçons de route coupés contre 8% pour les tronçons de route non coupés. Dans le cas des routes, la possibilité de restreindre l'espace d'évaluation à la zone tampon permet de réduire considérablement le nombre de mailles dans la table de contingence. Le rapport entre le nombre de maille sans dégâts et avec dégâts est de 10.

Une visualisation cartographique de ce résultat est fournie dans la **figure 3**. Les mailles jaunes représentent les mailles du raster à 25m qui répondent aux critères des aléas forts. Les routes coupées sont marquées en rouge quand le % d'aléas forts (en jaune) est supérieur à 50% dans le segment de route de 100m dans lequel il est calculé ici, sinon en rose. Même principe pour les routes non coupées mais en bleu et bleu clair.

La question de la contiguïté des segments en aléas forts a aussi été regardé. On peut effectivement se demander si les coupures de routes sont liées à des concentrations d'aléas forts sur plusieurs centaines de

mètres. Le nombre de segments contiguës avec plus de 50% de forts aléas varie de 2 à 9 pour les routes coupées et de 2 à 15 pour les routes non coupées. Les différences de fréquences relatives de ces nombres de contiguïté entre routes coupées et non coupées sont faibles, comprises entre – 3.8% et 5.4%, sans aspect tendancielles. Ce n'est donc pas une caractéristique de différenciation dans ce cas d'étude.

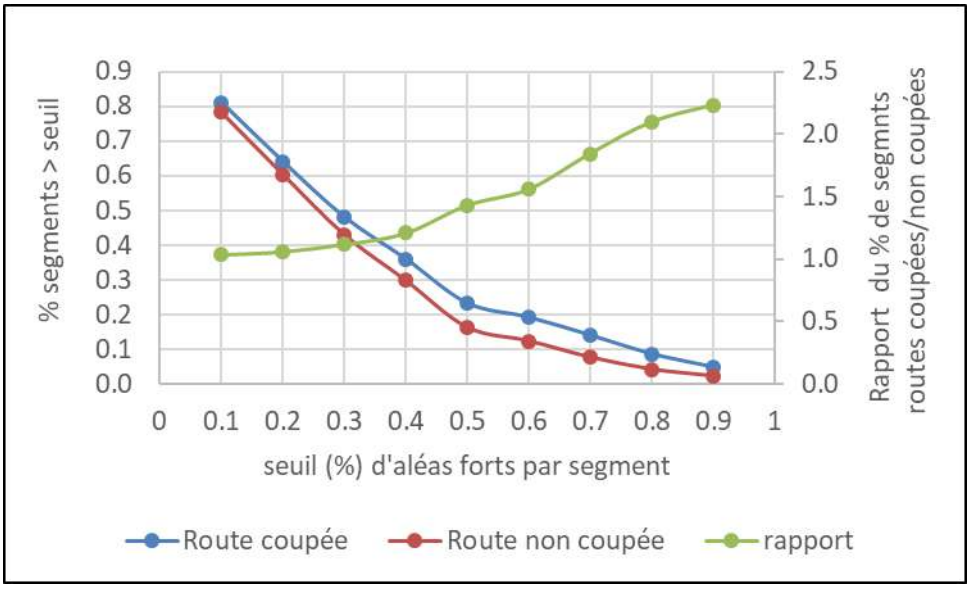


Figure 2 : Evolution comparée du pourcentage de segments en aléas forts et rapport du pourcentage entre routes coupées et non coupées.

Ce résultat illustre bien le fait que des statistiques globales ne sont ici pas adaptées pour évaluer la pertinence de cartographie prédictive du ruissellement intense.

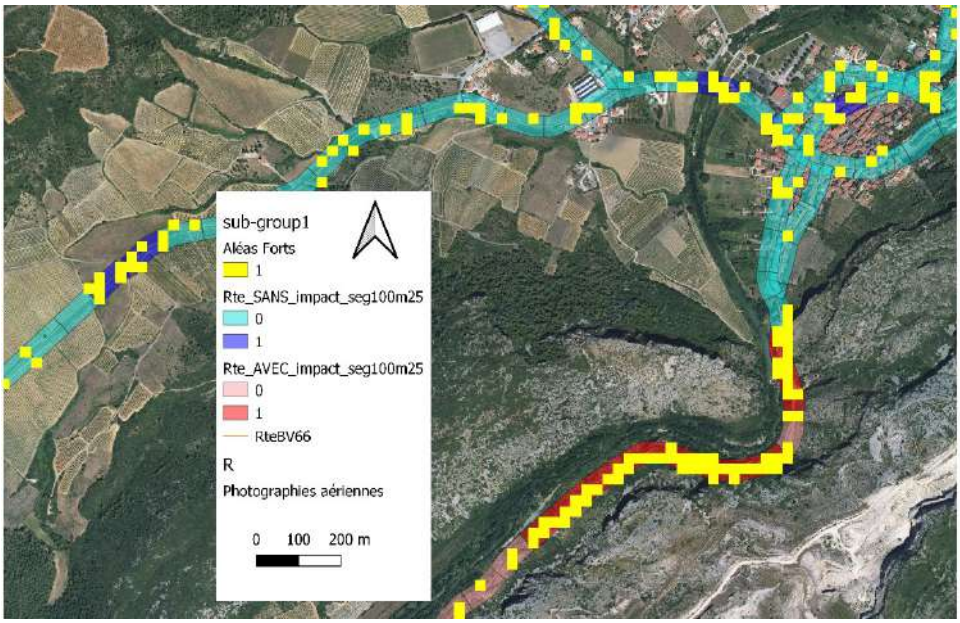


Figure 3 : Prise en compte des aléas forts en Transfert (>=3) et Accumulation (>=4) dans les tampons de route coupées et non coupées.

Cas des données surfaciques

Les données surfaciques sont constituées pour cette étude par les parcelles agricoles qui ont subi des dégâts lors de l'évènement de pluies intense d'octobre 2018 dans le département de l'Aude. La donnée a été collectée auprès de la DDTM11 qui détient les déclarations individuelles en Calamités Agricoles, consignées par les propriétaires et vérifiées sur le terrain par les services de l'Etat. L'intérêt de cette donnée est de distinguer des types de pertes, aux sols (type 1), aux vignes (type 2) avec 5 degrés de dégradation (1 à 5) et des dommages annexes aux chemins, ouvrages et engins agricoles (type 3). Le bassin de l'Orbiel, d'une surface de 252 km2, a été retenu car il concentre 294 parcelles agricoles impactées pour un total de 41676 parcelles. Comme une même parcelle pouvaient être déclarée avec plusieurs types de dégradation, il a été retenu à chaque fois celui de plus fort degré. En l'absence d'une notion de degré de dégradation comme pour les sols et les vignes, le degré 0 a été affecté par convention pour le type 3.

Test de la distribution spatiale des aléas forts

Pour évaluer la capacité de discrimination du modèle nous faisons ici l'hypothèse que l'ensemble des parcelles sans dégâts présente un signal moyen plus faible que celui des parcelles avec dégâts. L'aléa fort d'intérêt dans cet exemple est le seuil de valeur supérieur ou égal à 3 en accumulation uniquement. Dans ce cas, 23% de la surface du bassin sont concernés et 80% des parcelles avec dégâts sont détectées avec au moins 22% de mailles en aléas forts. Sous cette condition, 47% des parcelles sans dégâts peuvent être confondues avec les parcelles avec dégâts. Il faut bien noter que le territoire concerné est l'ensemble du bassin versant qui n'a pas forcément été exposé en tout lieu à des pluies suffisamment intenses pour déclencher du ruissellement. Le test du KHI-2 confirme à nouveau la dépendance entre les mailles avec aléas forts et les parcelles avec dégâts, comme l'indique la table des écarts relatifs dans le tableau 4.

Tableau 4 : matrice réalisée, matrice du hasard, matrice écarts relatifs

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	288889	4249
	Oui	82937	3797

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	286929	6209
	Oui	84897	1837

		Dégât	
		Non	Oui
Aléa fort	Non	0.007	-0.316
	Oui	-0.023	1.067

Pour réduire la confusion entre parcelles avec et sans dégâts, il est intéressant de tester l'hypothèse que le degré de dégradation d'une parcelle est corrélé à la quantité d'aléas forts qu'elle contient. De même il est possible de tester la différence entre la quantité d'aléas forts entre les parcelles non impactées et les types de dégâts. Le nombre de parcelles sans dégâts est de 41384. Celui des parcelles impactées varie de 44 à 57 selon le degré de dégâts. La figure 6 illustre les distributions des quantiles 0.05 ; 0.25 ; 0.5 ; 0.75 et 0.95.

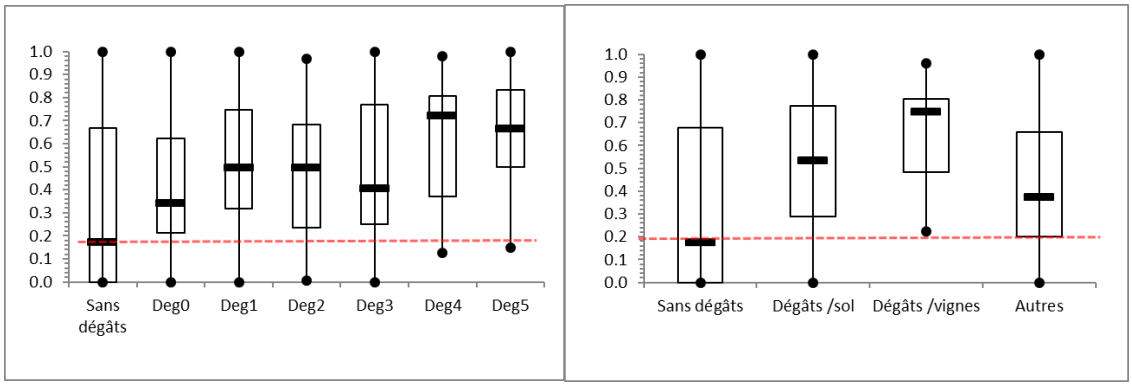


Figure 7 : Pourcentage d'aléas par degré de dégradation des parcelles (gauche) et par type de dommage (droite).

Nous voyons ainsi une tendance à l'augmentation de la quantité d'aléas forts avec le degré de dégradation. Les parcelles les plus dégradées ont une valeur médiane de 70% d'aléas forts par comparaison aux parcelles sans dégâts déclarés dont la médiane est à 20%. En ce qui concerne les types de dommage, la différence est

aussi significative avec les parcelles sans dégâts. Les vignes présentent le plus forts pourcentage d'aléas forts, puis suivent les sols et enfin les autres dommages. Ce type d'information permet de cibler les zones à prédire. Ainsi, il est possible de détecter 80% des parcelles déclarées en calamités agricoles avec un degré 5 et au minimum 40% d'aléas forts. Sous cette condition 38% des parcelles sans dégât répondent à ce critère.

CONCLUSION - DISCUSSION

L'évaluation des cartographies prédictives du ruissellement intense et de ses aléas associés a été abordée au travers de trois types de proxy données, ponctuelle, linéaire et surfacique. La question de l'évaluation est soumise pour chaque type à des hypothèses de travail qu'il faut argumenter puis tester selon une méthode bien décrite.

Que pouvons-nous retirer de tout cela ? Prenons l'exemple des parcelles : si l'on tient compte du nombre de parcelles avec et sans dégâts, il y a bien plus de parcelles sans dégâts qui sont exposées d'après leurs quantités d'aléas que de parcelles avec dégâts détectées. Cela tient au fait que le nombre de proxy qui sont disponibles sur un bassin versant ou un linéaire est très faible par rapport à la surface considérée. Les voies d'amélioration sont :

- Une plus grande exhaustivité des dégâts, par exemple via les données satellites très hautes résolution et fréquence d'acquisition ;
- Limitation des zones d'études à l'emprise des lames d'eau radar suffisantes pour déclencher le ruissellement intense; Limitation des zones d'études aux enjeux ;
- Amélioration du pouvoir discriminant de la méthode de calcul des aléas de ruissellement en utilisant des données de résolution cartographique plus fine pour l'occupation du sol (la carte du CES-BIO à 10m est une avancée mais peut se révéler encore imprécise dans le détail) et surtout la pédologie. La base LUCAS de l'ESDAC est un pas vers l'homogénéisation des données sol à l'échelle européenne mais c'est encore insuffisant. Les données radar des satellites pourraient être une solution avec le suivi à haute fréquence de l'humidité des sols qui permettra d'en caractériser l'hydrodynamique via les contrastes saisonniers.
- Prise en compte des dispositifs ou aménagements hydrauliques de protection qui sont une réponse à des dégâts répétitifs.

REMERCIEMENTS

Les données de cette étude ont été collectées auprès du Grand Chalon, de la DDTM des Pyrénées Orientales et de la DDTM de l'Aude. Ce travail a bénéficié du soutien financier de la DGPR (subvention n°21367400) au sein du programme SRNH - INRAE 2020 sur la connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques.

REFERENCES

Ali G.A., Roy A.D. (2010). Shopping for hydrologically representative connectivity metrics in a humid temperate forested catchment. *WATER RESOURCES RESEARCH,* VOL. 46, W12544, doi:10.1029/2010WR009442

Braud I., Lagadec L.R., Moulin L., Chazelle B., Breil P. (2020). Evaluation of a model for mapping intense pluvial runoff hazard using proxy data of runoff-related impacts. Application to the railway context. Special Issue: Natural hazard impacts on technological systems and infrastructures; *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 20, 947–966, 2020; https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/20/947/2020/nhess-20-947-2020.pdf

Cantón Y., Solé-Benet A., de Ventec J., Boix-Fayos C., Calvo-Cases A., Asensio C., Puigdefábregas J. (2011). A review of runoff generation and soil erosion across scales in semiarid south-eastern Spain. *Journal of Arid Environments*. **Volume** 75, Issue 12, December 2011, Pages 1254-1261. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.03.004

Kelman I. (2003) Defining Risk. *FloodRiskNet Newsletter*, Issue 2, Winter 2003. http://www.ilankelman.org/abstracts/kelman2003frn.pdf

Lagadec L.R., Moulin L., Braud I., Chazelle B., Breil P. (2018) A surface runoff mapping method for optimizing risk analysis on railways. *Safety Science - Special issue: Railway Safety*. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01549762/document - 10.1016/j.ssci.2018.05.014

Sivapalan M. (2003). Process Complexity at Hillslope Scale, Process Simplicity at the Watershed Scale: Is There a Connection?', Hydrological Processes 17(5): 1037-1041. https://doi.org/10.1002/hyp.5109

Premiers tests de la méthode Cartino2D sur le territoire de Toulon Provence Méditerranée (Pons *et al.*)

Premiers tests de la méthode Cartino2D sur le territoire de Toulon Provence Méditerranée

Frédéric PONS[1], Mathieu ALQUIER[1], Elodie PAYA[1], Christophe MOULIN[1], Nina PANIER[2], Anne-Evelyne CHOLLET[3]

[1] Cerema, Pôle d'activités Les Milles CS 70499 13593 Aix en Provence Cedex 3, France, frederic.pons@cerema.fr

[2] SDIS du Var, 87 Boulevard Colonel Michel Lafourcade, CS 30255 - 83007 Draguignan Cedex, France

[3] Métropole Toulon Provence Méditerranée, Hôtel de la Métropole, 107 Boulevard Henri Fabre, CS 30536 83041 Toulon Cedex 9, France

Pour établir un diagnostic homogène sur ses petits bassins côtiers en vue d'un PAPI, la Métropole Toulon Provence Méditerranée s'est appuyée sur le Cerema qui souhaitait tester ses méthodes de cartographie Exzeco et Cartino1D sur l'ensemble du territoire et de les comparer avec les connaissances locales. Le travail de cartographie allant de scénarios de faible période de retour à des fortes périodes de retour a conduit le Cerema à proposer une approche de modélisation hydraulique 2D, basée sur le logiciel Telemac 2D avec uniquement la pluie comme forçage. La méthode Cartino1D a été jugée insuffisante dans ce milieu topographique et urbain complexe. L'utilisation de Telemac sur l'ensemble du territoire a pu être conduite grâce à la réalisation d'une nouvelle méthode Cartino2D permettant de réaliser le maillage du logiciel Telemac2D, d'intégrer de nombreux scénarios de pluie et de fournir des résultats cartographiques automatisés sous forme SIG. Les résultats des diverses méthodes mises en œuvre par le Cerema ont ensuite été comparés avec des résultats d'études locales et aussi et surtout avec des éléments historiques disponibles (intervention des pompiers, photographies, vidéos et repères de crue). L'approche 2D automatisée proposée apparait comme attirante en termes de résultats cartographiques et cohérentes avec les études locales et données historiques. Cependant la validation technique est limitée par des données insuffisantes en qualité et en quantité et un effort doit être conduit pour capitaliser de la connaissance et mieux fiabiliser tous les types de modélisations. Pour finir, un croisement avec les enjeux a permis d'établir un diagnostic sur le territoire.

Mots-clefs : Crues soudaines – Ruissellement - Cartino2D – Telemac 2D – Exzeco - Toulon

First tests of cartino2D method on Toulon French metropolis

To establish a flood risk assessment on its small coastal catchments for a PAPI project (flood prevention program), Toulon French metropolis and Cerema have been working together to test Exzeco and Cartino1D mapping methods and compare them with local knowledge on flood occurences. The mapping work is based on flood scenarios with a high probability to low probability. Cartino1D results were not adapted to well represent all the scenarios particularly with a high probability in this topographic and urban specific context. This led Cerema to propose a 2D hydraulic modeling approach, based on Telemac 2D software. Telemac2D with the rainfall-runoff module was used on three sectors covering about 180 km².A new Cartino2D method enables us to use Telemac software on the whole territory. 66 sectors were created covering also about 180km². Cartino2D can create the mesh for Telemac automatically and integrate many rain scenarios. At the end, post processing provides automated maps under GIS form of the 69 sectors and 8 rainfalls. Results of the various methods implemented by Cerema were compared with local studies. Historical data (interventions of firefighters, photos, videos, flood marks) has been compared with 2D results.
The proposed 2D automated approach appears attractive in terms of mapping results and consistent with local studies and historical data. However, technical validation is limited by insufficient data in terms of quality and quantity. An effort must be made to capitalize on knowledge and make the models or the use of the models more reliable. At the end, a hazard and vulnerability mapping has been established to provide a homogeneous diagnosis of the territory.

Key words : Flash flood mapping – Run-off -Cartino2D – Telemac 2D – Exzeco - Toulon

INTRODUCTION

La cartographie des zones inondables par ruissellement est un enjeu de la cartographie des zones inondables [Kosuth et al, 2020]. La Fédération Française des Assureurs (FFA) indique par exemple que ce type d'inondation est une réalité tangible des sinistres, insuffisamment pris en compte dans les cartes actuelles au niveau français (ordre de grandeur de 50 % des sinistres « inondation »). Cette problématique est bien sûr au cœur des sujets de territoires, en particulier sur l'Arc méditerranéen.

Pour répondre à ces demandes de cartographie des zones inondables par ruissellement sur de grands territoires, diverses méthodes au niveau français ou mondial peuvent être conduites, méthodes à score, méthodes topographiques ou naturalistes, méthodes simplifiant les équations de l'hydraulique...

Le Cerema cherche aussi une autre voie pour s'approcher autant que possible des résultats d'une étude locale. Il s'agit non pas de simplifier les équations des modèles hydrauliques mais de simplifier et d'automatiser

l'utilisation des modèles hydrauliques 1D et 2D classiques pour la cartographie. Cela passe par une autonomisation du processus de pré-traitement et de post-traitement des calculs, ce qui permet le lancement de ces process sur de grand secteur en s'appuyant en particulier sur la couverture Lidar du territoire français.

Conscient en particulier de ces enjeux de cartographie de ruissellement, la Métropole Toulon Provence Méditerranée (MTPM) et le Cerema ont développé un partenariat pour établir un diagnostic territorial homogène de la vulnérabilité aux différents risques d'inondations sur le territoire du PAPI des Petits Côtiers Toulonnais (Figure 1).

Parmi de multiples risques traités, l'objectif était de fournir des cartographies d'inondations de la goutte d'eau jusqu'à la mer pour de nombreux scénarios de période de retour. Le Cerema a proposé de réaliser ce travail à partir des données de la méthode Exzeco [Pons et al., 2010], et de calculs hydrauliques à partir de la méthode Cartino1D [Pons et al.,2014]. Pour traiter ces phénomènes dits de ruissellement, le réseau hydrographique utilisé dans Cartino1D commençait à une superficie drainée de 0.1 km². La méthode Cartino1D donnait des résultats performants sur des territoires encaissés mais avait des limites dans des secteurs urbains très denses ou aux morphologies complexes. Devant cette impasse sur certains secteurs, le choix a été d'utiliser le modèle Telemac2D [Hervouet, 2007] sur l'ensemble des bassins versants avec le module de pluie. Trois secteurs ont été traités de manière classique couvrant environ 180 km².

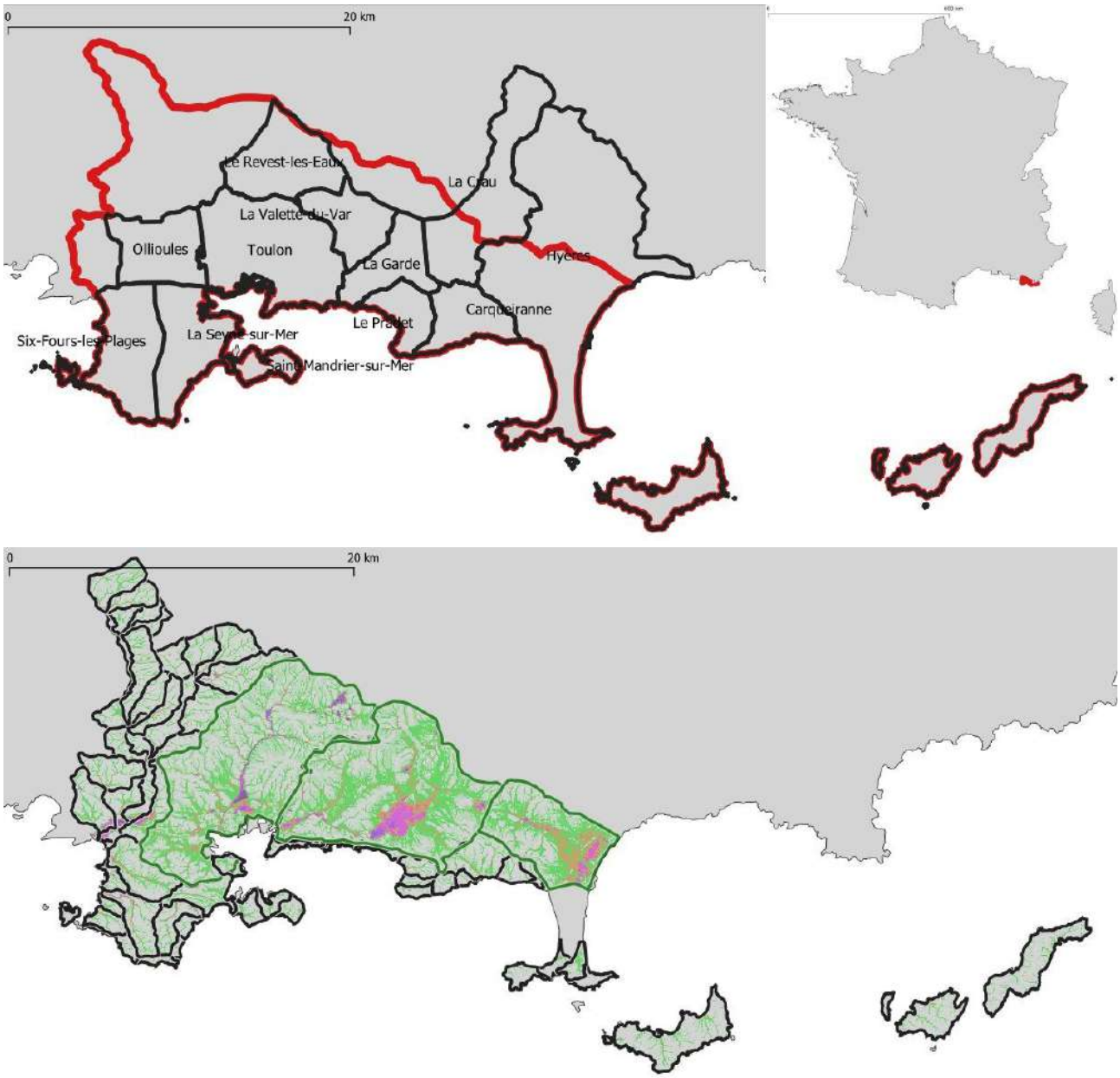


Figure 1 : Carte de localisation, périmètre de calcul Cerema en rouge et communes MTPM en noir (haut), secteurs de calcul 2D (en bas) vert secteurs Telemac2D classique, noir secteurs Cartino2D, fond exe de cartographie des hauteurs d'eau.

La mise en place de modèles 2D étant fastidieuse, la méthode Cartino2D a en parallèle été développée pour automatiser la mise en place de modèles Telemac2D. Le reste du territoire de TPM a donc été découpé en bassins versants allant de quelques hectares jusqu'à des territoires de 12km². Au final, 66 secteurs couvrant 180 km² ont été réalisés automatiquement et ont fait l'objet de calcul Telemac2D intégrant 8 scénarios de pluie.

Sur ce territoire, les résultats cartographiques des approches « automatisées » ou « semi-automatisées » (Exzeco, Cartino1D, Cartino2D) ont été confrontés les uns avec les autres. Ils ont aussi été comparés avec des études locales et les interventions du SDIS 83 pour confronter les diverses connaissances.

Enfin, des indicateurs de vulnérabilité sont fournis à MTPM en intégrant l'ensemble des scénarios pour avoir une vision complètement homogène sur le secteur de TPM du risque de ruissellement et d'inondation.

EXZECO

Dans le cadre de la mission interrégionale pour la coordination de la prévention des risques d'inondation sur l'arc méditerranéen, la méthode Exzeco a dernièrement été améliorée et appliquée sur l'équivalent de 8 départements dont le département du Var et le secteur de MTPM.

Les données et de nombreuses informations sont disponibles et diffusées par l'intermédiaire de ces liens, en particulier une fiche de prise en main de quatre pages :

- https://www.cerema.fr/fr/actualites/modelisation-du-ruissellement-bassins-versants-methode
- http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/ruissellement-sur-l-arc-mediterraneen-application-a11973.html.

Un serveur cartographique accessible sur internet permet d'accéder à ces données au lien suivant : https://carto.cdata.cerema.fr/1/EXZECO_PACA_DPTS.map

La méthode a été appliquée sur les données du RGE Alti IGN 1m rééchantillonnées au pas de 5m. Sur le secteur de MTPM, l'ensemble du territoire est couvert par du Lidar1m.

Ces données permettent d'accéder aux diverses couches suivantes (Figure 2) :

- **Cuvette** (avec les classes de hauteurs) : Le calcul des dépressions, nécessaire à la méthode, permet de fournir ces cuvettes comme un résultat d'Exzeco;
- **Endoréisme :** L'endoréisme d'un bassin versant est le fait qu'il ne se déverse pas dans un cours d'eau ou une mer, mais est au contraire clos, retenant ses eaux dans une cuvette fermée. Il peut s'agir de cuvettes naturelles karstiques (Présentes dans les Monts Toulonnais…), de cuvettes anthropiques (carrières, bassins de rétention) mais aussi et parfois de défauts liés au MNT. Exzeco permet de les identifier en comparant le volume des cuvettes avec le volume théoriquement ruisselé (lame d'eau forfaitaire x surface drainée);
- **Exzeco** 100 cm, produit principal pour les services mais également 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm (avec les classes de superficies drainés 0,01 / 0,05 / 0,1 /0,5 / 1 / 5 / 10 / 50 km²) pour des usages plus spécifiques. Les résultats sont représentés par des aplats de bleu, plus le bleu étant foncé, plus la superficie drainée associée étant importante. Il n'y a pas de relation directe avec un niveau d'aléa.

Deux résultats Exzeco (020 et 100) sont présentés Figure 2. Sur ce secteur avec un relief marqué, les emprises sont assez proches, le « bruitage » à 100 entrainant bien sûr un élargissement des emprises en bleu.

CARTINO1D

La méthode Cartino1D cherche à réaliser de manière automatique des modèles hydrauliques 1D sur de très grands territoires [Le Bihan et al., 2017].

En s'appuyant sur un réseau hydrographique, un modèle numérique de terrain et des débits sur ce réseau hydrographique, la méthode Cartino1D a pour vocation de créer de manière semi-automatique des profils en travers sur des biefs de calculs. Un modèle hydraulique 1D (Hec-Ras, Flutor ou Mascaret) est ensuite lancé en mode stationnaire avec un seul coefficient de Strickler (représentant la rugosité du terrain) sur les nombreux biefs de calculs. Le modèle numérique de terrain utilisé est le Lidar IGN 1m disponible dans le RGE Alti de l'IGN. La zone est couverte entièrement en Lidar 1m.

Exzeco 020

Endoréismes
- 020
- 040
- 060
- 080
- 100

Exzeco (km² de Bv)
- 0.01
- 0.05
- 0.1
- 0.5
- 1
- 5
- 10
- 50
- 100
- 500
- 1000

Dépression (m)
- 0
- 0.2
- 0.5
- 1
- 2
- 5
- 10

Exzeco 100

Cartino 2d Pluie 2 ans

HAUTEUR EAU (m)
- <= 0.05
- 0.05 - 0.1
- 0.1 - 0.5
- 0.5 - 1
- 1 - 2
- 2 - 3
- 3 - 5
- 5 - 10
- 10 - 1000

Cartino 2d Pluie TPM2006

Figure 2: Comparaison des emprises Exzeco et hauteur Cartino2D sur Port-Cros

Cette méthode a été mise en œuvre sur l'ensemble des réseaux hydrographiques à partir d'une surface drainée de l'ordre de 0,1 km² de bassin versant (thalwegs secs ou secteurs soumis au ruissellement) car le secteur de MTPM a un relief marqué (dans le cas de reliefs plus doux, le réseau de thalwegs doit être calculé à partir d'une surface drainée supérieure).

Pour réaliser le premier calcul (qui permet de créer la topologie des modèles 1D), un débit pseudo-spécifique extrême a été mis en œuvre. Le débit sur tout le réseau hydrographique était calculé avec la formule Q=35 * S0.8 avec S la surface drainée en km² (Figure 6).

Cette méthode a permis de réaliser des calculs sur l'ensemble du territoire (continent et îles). Pour réaliser ces calculs sur de multiples périodes de retour (périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et plus), nous avons fait des tests avec des valeurs de débits pseudo-spécifiques plus faibles allant jusqu'à 1m3/s.

Les résultats étaient visuellement pertinents sur 2/3 du territoire de calcul, en particulier sur les secteurs amont avec un fort relief. Cependant, la qualité des résultats est plutôt recherchée pour ce partenariat dans les parties avals urbaines. Les zones péri-urbaines et dans le centre de Toulon par exemple étaient trop complexes à traiter en modélisation 1D. Les résultats d'Exzeco pressentaient ce type d'analyse (Figure 6).

Il a été décidé de proposer des cartographies 2D des zones inondables sur la plupart des secteurs. Seule la Reppe avec une morphologie de vallée marquée a pu être calculée en modélisation 1D. Elle ne sera pas traitée dans l'article.

TELEMAC2D ET CARTINO2D

Au vu des résultats insuffisants de Cartino1D, 3 secteurs de grande superficie ont dans un premier temps été choisis pour être étudiés avec un modèle 2D utilisant un calcul hydraulique « classique » à savoir l'Eygoutier, le Roubaud et les bassins versants de la rade de Toulon intitulés Las par la suite (Figure 1).

L'ensemble de ces calculs est effectué sur des écoulements à surface libre, aucun réseau enterré, buses (…) n'a été pris en compte dans un premier temps. Au vu des 1ers résultats et après accord avec MTPM, trois réseaux enterrés majeurs de l'Eygoutier et du Las ont été pris en compte.

Le modèle hydraulique 2D aux éléments finis utilisé est Telemac2D (http://www.opentelemac.org/) version v7p3, code opensource avec le module pluie [Ligier P.L., 2016]. Ce module nécessite le paramètre CN (Curve Number) du modèle SCS. La valeur est fixée à 80 sur tous les secteurs, moyenne estimée suivant le guide USDA [Cronshey, 1986]. Le coefficient de Strickler retenu est aussi unique et fixé à 15.

Les étapes de maillage des modèles aux éléments finis sont des étapes souvent longues pour intégrer finement dans des études locales, des lignes de contraintes, des éléments urbains (murets), le réseau…

Dans les calculs sur les secteurs de l'Eygoutier, du Las et du Roubaud, il n'y a pas eu de travail fin d'intégration de l'ensemble des objets ayant un rôle hydraulique, comme toute la micro-topographie.

Les contraintes du maillage intégrées dans le mailleur Bluekenue sont des triangles de côté 5m dans une zone tampon de 20m autour du réseau hydrographique et 20m ailleurs pour le secteur Las et Eygoutier. Le Lidar a dû être repris sur l'Eygoutier (remblais non « percés »). Trois ouvrages majeurs de capacité supérieure à 50m3/s ont été intégrés avec le module buses de Telemac comme indiqué précédemment.

Sur le secteur du Roubaud, en lieu et place du tampon arbitraire autour du réseau hydrographique, nous avons utilisé les contours d'Exzeco. Le lit du Roubaud a aussi dû être repris dans le Lidar.

Ces secteurs ont été traités avec le modèle Telemac 2D. Au vu de la bonne qualité des résultats et des méthodes employées (en particulier sur le Roubaud), une méthode automatisée a été développée, aboutissant à la naissance de Cartino2D.

CARTINO2D

Le principe de Cartino2D est de mettre en place de manière automatique des modèles Telemac2D sur des secteurs avec uniquement de la pluie comme forçage des écoulements.

Avant d'expliquer la méthode de maillage, il est important de bien définir ces secteurs qui doivent éviter toutes connexions hydrauliques sur leurs limites.

Pour réaliser ce travail, nous avons effectué un calcul de bassin versant classique avec des superficies drainées de 2km². Les contours des très petits bassins versants littoraux non couverts par ces calculs ont été récupérés par différence avec des contours administratifs. L'ensemble de ces divers secteurs a ensuite été parfois :

- Agrégé, Exzeco montrait parfois des connexions hydrauliques possibles entre deux bassins versants. Dans ce cas, les deux bassins ont été fusionnés ;
- Découpé
    - en s'appuyant sur les outils de détection de remblais en s'appuyant sur les crêtes apparentes en particulier pour ne pas avoir des zones littorales très longues et sans lien hydrologique et hydraulique ;
    - sur le secteur de la Reppe, des bassins versants sont des regroupements de bassins versants en rive gauche ou droite du réseau. Un découpage avec le réseau hydrographique a été nécessaire.
- Pour les 66 secteurs, le maillage a été réalisé à partir d'une procédure nouvelle que l'on a nommée Cartino2D (Figure 1).

La procédure Cartino2D s'appuie sur la bibliothèque PPUtils [Prodanovic, 2017] utilisant le mailleur GMSH [Geuzaine, 2009] les deux outils étant utilisables en ligne de commande. Le traitement des données vecteurs et raster est effectué avec les logiciels R [R Development Core Team, 2005] et GRASS [GRASS Development Team, 2017]. Le principe est le suivant :

- Tampon autour des secteurs définis avec quelques modifications du MNT sur les frontières
- Maillage de 3m dans les zones définies par la couche Exzeco100
- Maillage se relâchant par effet tampon autour de ces zones (Figure 3)
- Création du maillage
- Création des conditions limites et des fichiers de pluie
- Calculs Telemac
- Post-traitement automatisé sur la partie topographique non modifiée
- Graphique synthétique de résultats par bassin versant
- Fusion des données Raster des résultats hauteur, vitesse et temps du maximum de la côte d'eau.

Finalement, les maillages utilisés vont de 3000 nœuds à plus de 1 000 000 de nœuds sur les 66 secteurs. Le raffinement du maillage est plus important dans les parties identifiées préalablement par Exzeco (Figure 3).

Un exemple de résultat est fourni pour deux scénarios sur l'île de Port-Cros en comparaison avec Exzeco (Figure 2).

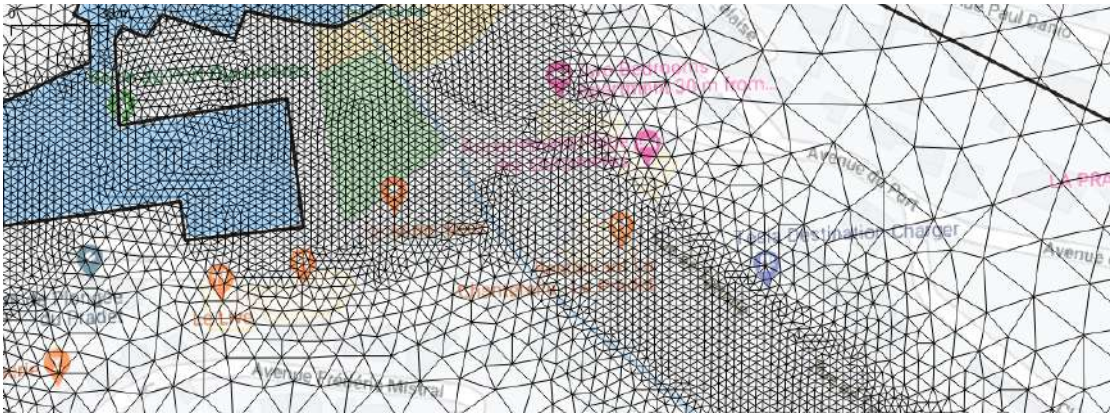


Figure 3: Zoom sur un maillage automatique avec Cartino2D

PLUIE DANS CARTINO2D

La procédure Cartino2D repose sur la réalisation automatisée du maillage, mais aussi sur le pilotage des calculs Telemac2D de manière simplifiée. Pour les calculs sur les trois gros secteurs (Eygoutier, Las, Roubaud) ou ceux réalisés avec le maillage Cartino2D, les fichiers d'entrée de la pluie ont été intégrés automatiquement. Les calculs ont été réalisés avec des pluies statistiques monofréquences non abattues et identiques en tout point du domaine provenant de la base de données SHYREG Pluie [Arnaud, 2008] et d'une pluie s'approchant de la pluie « DDTM83 » nommée Typ3_2006 correspondant à la pluie du Cap-Sicié (supérieure à la centennale SHYREG). Nous pouvons appliquer le modèle SCS soit dans Telemac directement (cas des trois gros secteurs),

soit, pour optimiser les temps de calcul, injecter dans Telemac une pluie déjà abattue (le CN de Telemac est alors à 100).

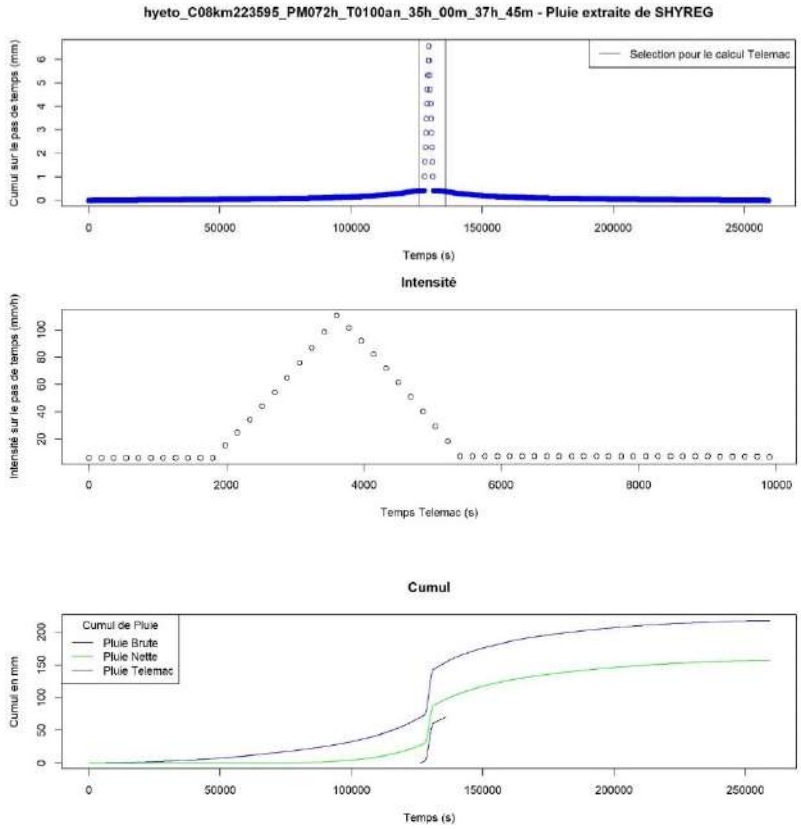


Figure 4: Récupération des données SHYREG Pluie par bassin versant (hyétogramme monofréquence centennal sur le bassin en haut, Intensité sur la période sélectionnée du graphique précédent au milieu, Cumul de pluie brute, nette et réellement injecté dans Telemac avec un CN de 80)

En abattant la pluie avant intégration dans Telemac (Figure 4), cela nous permet de cibler la pluie entre 1h avant le pic et de 1 à 3h après le pic, l'ensemble des secteurs avec un maillage Cartino2D ayant des réponses extrêmement rapides.

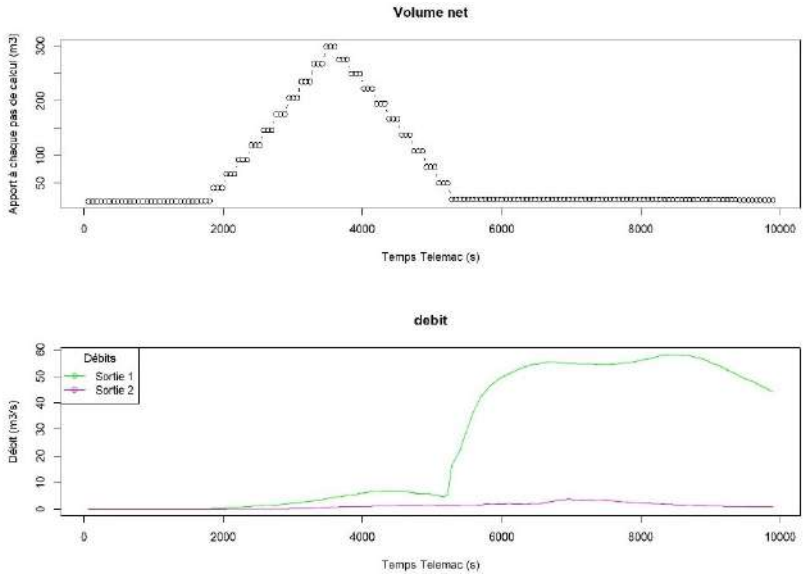
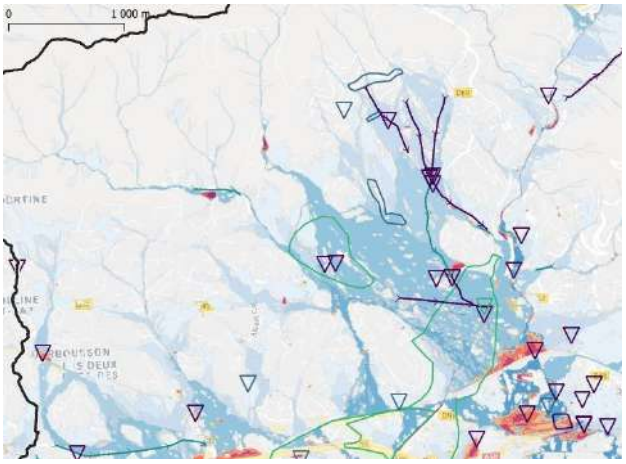
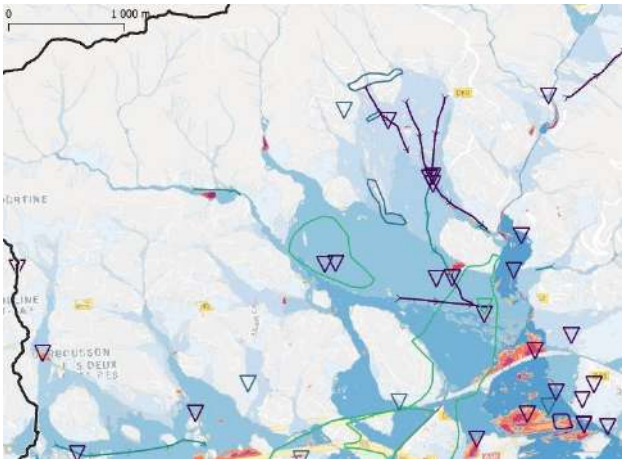


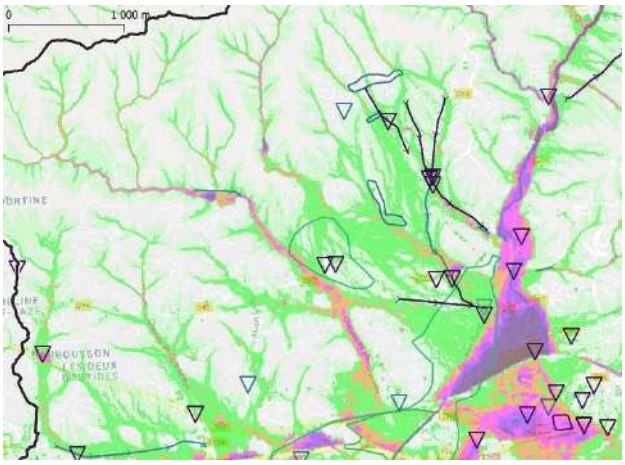
Figure 5: Résultat Pluie-débit sur le secteur C08km223595_PM072h_T0100an_35h_00m_37h_45m

Pour chaque modèle 2D mis en œuvre et chaque scénario, le débit est analysé pour voir si le pic de crue est passé avant la fin des calculs (Figure 5). Le volume net correspond à la pluie nette injectée multipliée par la surface. Sur le graphique, de multiples lignes de 3 points consécutifs sont visibles car le pas d'entrée de la pluie a été choisi à 3 minutes et le pas d'analyse des résultats à 1 minute. Le cas de la Figure 5 correspond à un secteur de la commune de Six-Fours qui comprend un cours d'eau nommé le Pontillot. La réaction sur ce

secteur est rapide et montre un laminage. Des hydrogrammes de crue plus pointus sont plus souvent la norme sur ce territoire avec le type de modélisations mises en œuvre.







Haut : Exzeco 020 et 100

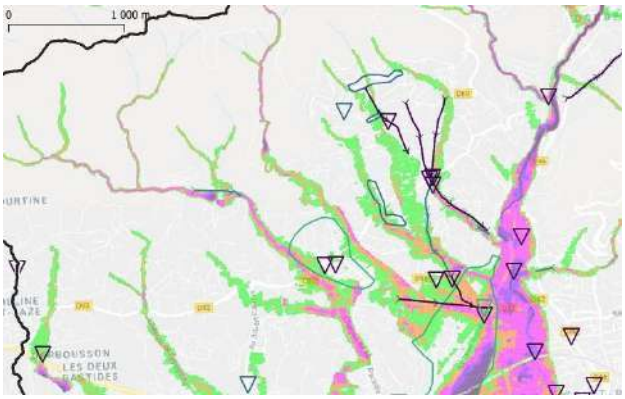
Milieu : Telemac 2D Pluie 2ans et TPM 2006 Hauteur et Débit

Droite : Cartino1d Qps35

Eléments historiques ponctuels (triangles), linéaires et surfaciques (+ foncé + de confiance)

Les classes de couleurs sont identiques à la Figure 2

Figure 6: Comparaison des emprises Exzeco, Cartino2D et Cartino1D sur un secteur du Las



COMPARAISON

Nous avons effectué des comparaisons entre les éléments produits par le Cerema et diverses données locales, provenant d'études ou de données historiques à savoir :

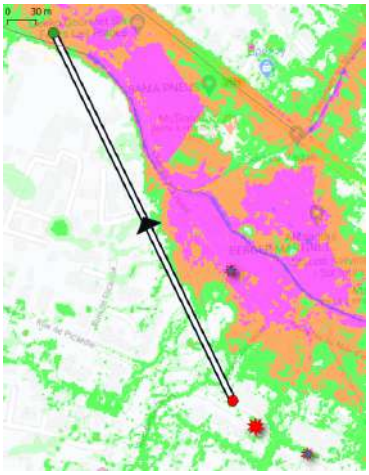
- des résultats provisoires de l'étude intitulée « Etudes hydrauliques et hydrogéomorphologiques sur le bassin versant du fleuve Gapeau et du Roubaud en vue de la réalisation de PPRI et d'un PAPI du Gapeau » menée par EGIS, secteur Roubaud indiqué dans l'article
- des résultats provisoires de l'« Étude du fonctionnement de l'Eygoutier et de ses affluents, approche hydraulique et morphologique en lien avec le milieu » menée par le consortium INGEROP GEORIVES et HYDRETUDES, secteur Eygoutier cité dans l'article

- les premiers éléments historiques des études stratégiques des bassins versants du Las et du Faveyrolles : fonctionnement hydraulique des bassins versants, approche hydraulique et morphologique en lien avec le milieu (actions 1.1 et 4.4 du PAPI PCT) volet 1 mission 1 études préalables mené par le consortium EGIS-SEPIA-GEORIVES
- le Schéma Directeur d'Assainissement Pluvial de la Commune de la Seyne sur Mer établi de 2011 à 2015
- les données d'interventions du SDIS de 2014 et 2019 sur le secteur
- quelques données photographiques locales et de recherche web (YouTube)

des repères de crue dont la base de données nationales de repères de crue.

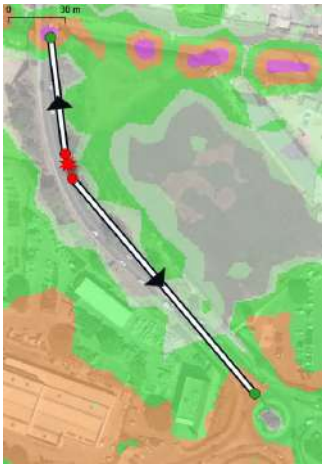
Il n'est pas possible de présenter l'ensemble des comparaisons. Des figures seront focalisées sur des secteurs avec de faibles superficies de bassins versants en lien avec le colloque, la distinction entre ruissellement et débordement de petits thalwegs étant parfois complexe. Quelques éléments sont tout de même fournis sur les études analysées.

Sur le secteur de l'Eygoutier, la démarche hydraulique locale est liée aux principaux cours d'eau donc l'aspect ruissellement est assez limité. Les débits des modèles hydrologiques amont sont injectés dans un point d'entrée du modèle « cours d'eau ». Avec une approche 2D complète, les écoulements ne sont pas forcément concentrés juste sur ce point d'injection et montrent des débordements ou défluences possibles.

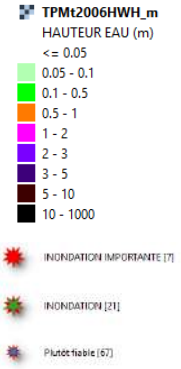


Personnes bloquées dans un véhicule, Position SDIS complètement modifiée de 500m (bonne rue, mais l'information de la proximité d'un restaurant a permis une meilleure localisation par le Cerema). Cohérence avec résultats 2D.

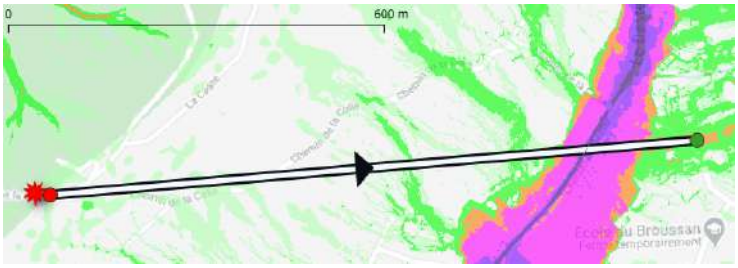
20 cm dans la maison, eau continue de monter. Position SDIS cohérente résultats 2D. Adresse saisie erronée Martinenque/ Dr Martinenq Ville saisie Six-Fours, Position acceptée.



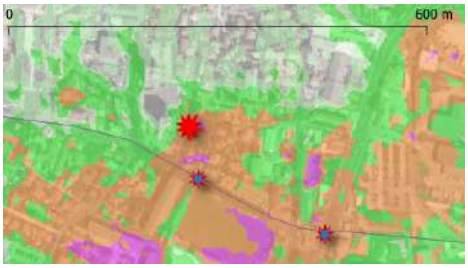
Eau qui rentre dans une voiture qui flotte dans environ 40 cm d'eau. Localisation SDIS uniquement liée à un boulevard, possible décalage vers le nord ou le sud pour être en cohérence avec résultats 2D.



Flèches indiquant les décalages à effectuer sur la géolocalisation SDIS



1.6m d'eau dans la maison, localisation erronée de 1km (n° dans la rue utilisée => cohérence avec résultats 2D.



Véhicule rue du stade, eau jusqu'à la portière, 50m avant le stade, cohérent avec résultats 2D.

Figure 7:Comparaison de sinistres SDIS avec les résultats 2D Cerema

Sur les deux premiers secteurs (Roubaud et Eygoutier), les études locales tiennent compte des bâtiments, contrairement aux calculs Cerema. Il n'y a pas de bon état de l'art, chaque option ayant parfois des conséquences particulières, jusqu'à quand un bâtiment est transparent, quelle est la vraie perte de charge

associée, comment réintégrer de l'aléa dans les bâtiments… Sur le Roubaud, où les méthodes « locale » et Cerema consistent en un calcul hydraulique 2D Pluie-Débit avec la même pluie, les résultats sont extrêmement proches exceptés sur les bâtiments.

Les autres données analysées sont plus liées à des connaissances historiques et vont être décrites avec des exemples visuels.

Sur le secteur du Las, la *Figure 6* présente une comparaison visuelle entre les produits Exzeco 020, 100, Cartino2D pour une pluie de période de retour de 2ans et une pluie majeure TPM2006, et Cartino1D avec un scénario de débit extrême. Des désordres historiques ponctuels, linéaires ou surfaciques provenant de l'étude en cours sur le secteur sont ajoutés.

Entre les trois approches Exzeco, Cartino1D et 2D, il est à noter la grande ressemblance des emprises entre Exzeco et Cartino1D/2D pour un évènement fort. La différence entre les deux calculs Exzeco est bien moindre qu'entre les 2 scénarios de pluie. Cartino1D est performant (résultats et temps de calcul) sur du réseau hydrographique serré mais il ne couvre pas autant de surface. Cartino1D montre aussi des limites sur les formes de résultats où les écoulements ne sont pas 1D comme sur le secteur sud-ouest où malgré des efforts de reprises des profils en travers, il surestime énormément les niveaux d'eau. La comparaison avec les désordres locaux est intéressante. Il y a de nombreux endroits avec une bonne adéquation de Cartino2D mais certains désordres linéaires sur des rues très pentues sont mal représentés, la modélisation 2D focalisant sur le fond des thalwegs. Exzeco, malgré son approche extrêmement plus simple couvre des zones de ce type. Il est à noter que sur des désordres, certaines rues ne sont captées par aucune approche (Nord-Est). Un manque d'Exzeco lié à la méthode est aussi de sous-estimer les emprises et la surface drainée dans les « gros » cours d'eau comme le Las où le bleu fort est concentré dans le lit (cours d'eau principal à Nord-Sud situé à l'Est de la *Figure 6*). Exzeco et Cartino2D répondent globalement bien visuellement en emprise, Exzeco est cependant délicat à convertir en « aléa ». Le dégradé de bleu montre la surface drainée connectée à l'amont mais parfois une zone très large en bleu très foncé correspond à un aléa bien inférieur qu'une zone étroite bleu clair.

Le SDIS a partagé sa base de données des interventions sur les évènements de 2014 et 2019 (Figure 7). Cette base de données se décompose en ICM (interventions à caractères multiples) et les autres. Pour les ICM, il y a des références comme « B101 Sauvetage » qui est considérée comme plutôt fiable par le SDIS et d'autres comme « B202 PR objet menaçant de tomber » qui dépend du commentaire qui peut lui être associé selon la grille d'analyse du SDIS. Nous avons réalisé un travail sur ces ICM et autres interventions pour établir les interventions probablement liées aux inondations et les autres. Nous avons aussi analysé les commentaires. Seulement 7 interventions ont été jugées en lien sûr avec des inondations, 21 avec de fortes probabilités (ces 2 types sont liées aux commentaires), ensuite 67 comme fiables et 262 sans informations claires. Le travail sur les commentaires est complexe. Dans la même base, il y a un commentaire avec « eau qui rentre dans la cuisine » ce qui semble supposer une inondation des eaux extérieures, mais un autre commentaire sur une autre intervention indique « 2ème étage, appartement, eau qui entre par la cuisine ». Ce travail attributaire a été ensuite regardé en SIG avec les localisations fournis par le SDIS. Parmi les 7 interventions très sûres, 5 étaient réellement sur le secteur. La Figure 7 montre les localisations. 2 des localisations étaient mal géoréférencées. Au final, les sinistres sont bien dans la zone simulée en 2D mais le nombre d'interventions avec une qualité attributaire et localisée à comparer reste relativement faible. Le positionnement à l'adresse limite parfois l'utilisation, certaines adresses étant des entrées de chemins privés de centaines de mètres.

MTPM a aussi fourni des éléments photographiques en lien avec les inondations sur le secteur de la métropole. La Figure 8 montre des résultats relativement cohérents entre des résultats d'une pluie de période de retour 10 ans et les photographies prises en 2019 sur le secteur du Rigoumel. La représentation des résultats 2D se fait sous la forme d'un débit unitaire correspondant à la hauteur multipliée par le volume. Cette représentation permet de mieux discerner les flux, relativement importants. Une représentation en hauteur conduirait à avoir des classes faibles et en vitesse des classes très fortes.

Sur le secteur de Six-Fours, une vidéo YouTube (https://www.youtube.com/watch?v=Oj0hAMsv7F8) montre les écoulements pendant quelques minutes, écoulements toujours complexes pilotés à la fois par la topographie générale mais aussi les murs, grillages et micro-mobilier urbain (Figure 9). Les résultats sont cohérents mais ne peuvent pas représenter la forte complexité des écoulements pilotés en partie par des murets.

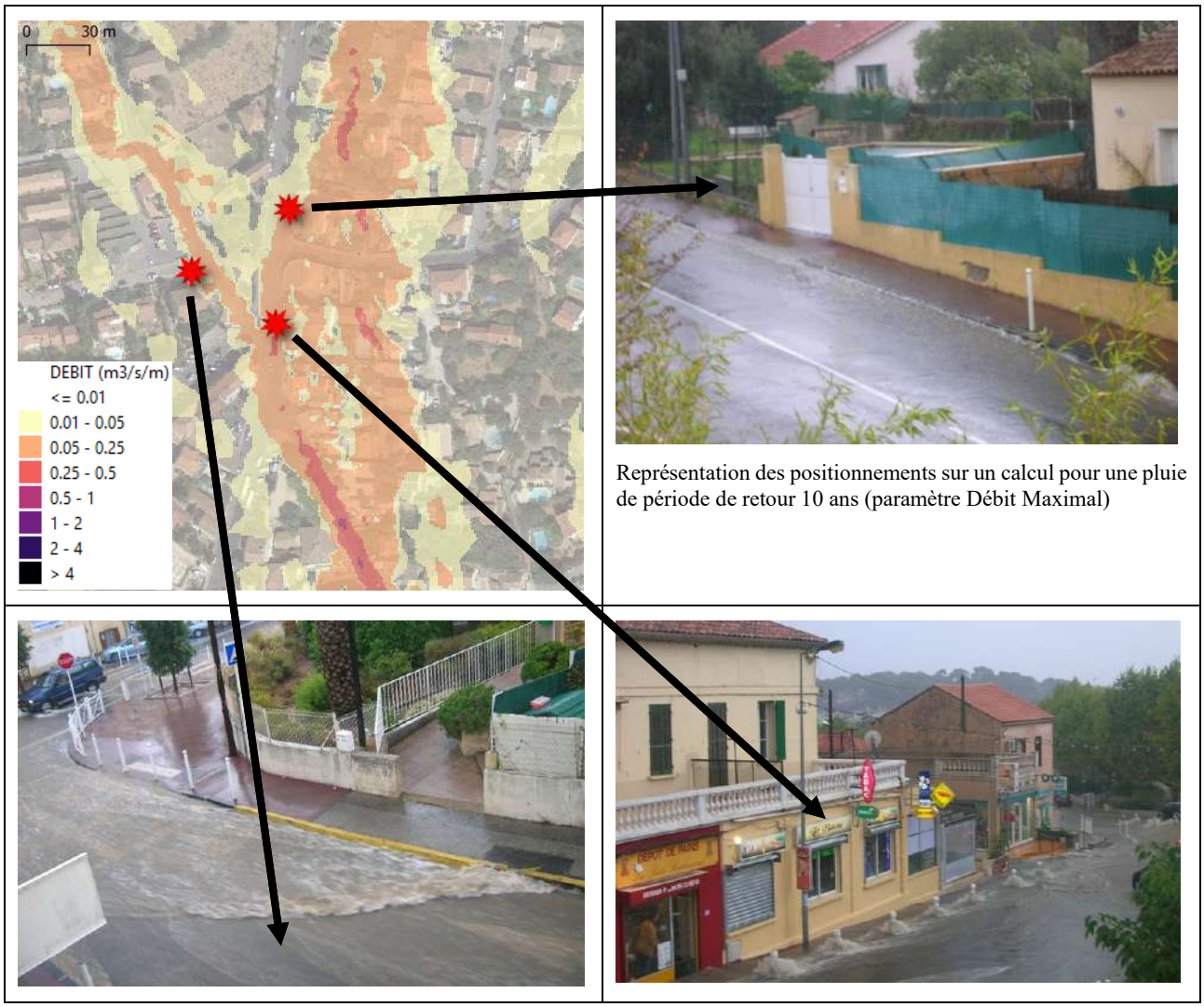


Figure 8: Photos et résultats sur le secteur du Rigoumel

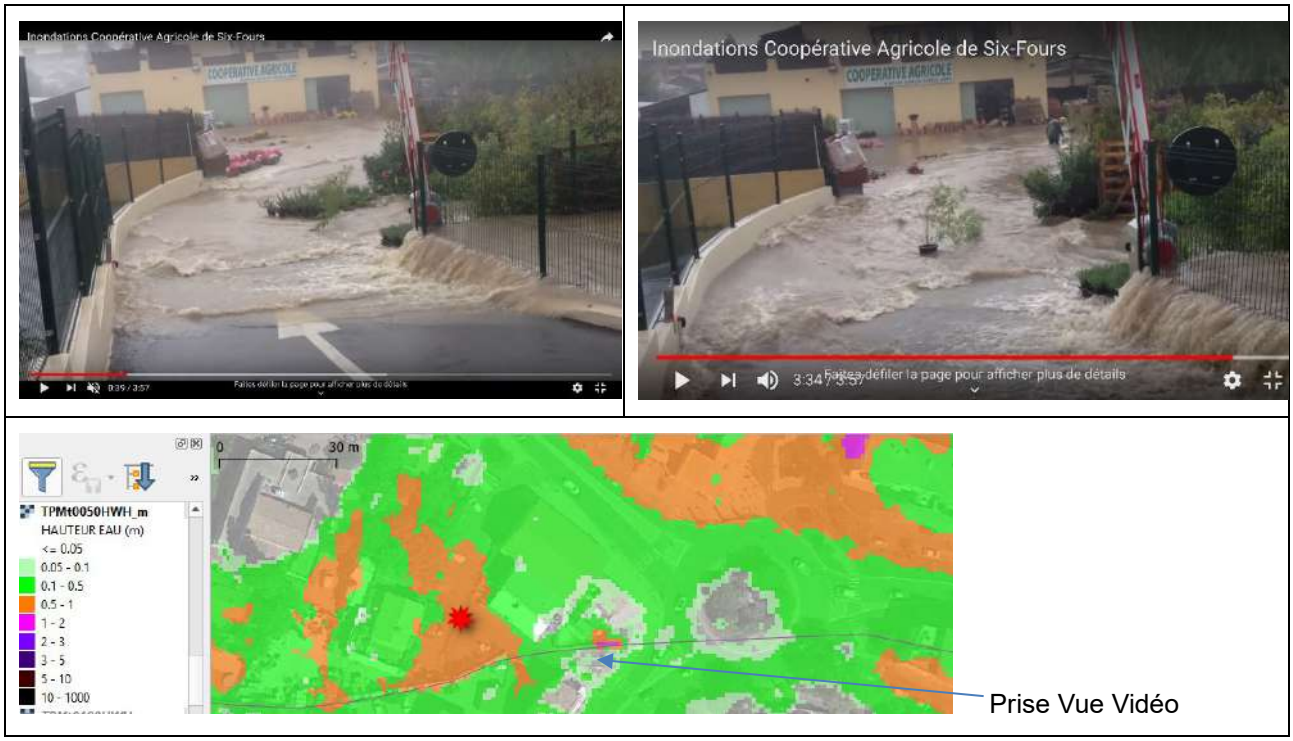


Figure 9: Secteur Cave Coopérative Agricole Six-Fours

La comparaison avec des marques de hauteurs d'eau (environ une trentaine sur le secteur) n'est pas présentée car elle ne concerne que des zones avec des superficies de bassins versants associées importantes.

INDICATEURS DE VULNERABILITE

L'objectif du partenariat entre la métropole et le Cerema était de pouvoir identifier, pour les petits bassins versants côtiers, les secteurs vulnérables en établissant un diagnostic homogène de tous les types d'inondations.

La méthode de cartographie de l'aléa proposée croisée avec des calculs liés aux enjeux a permis d'établir un atlas de vulnérabilité aux inondations. Ces calculs ont principalement consisté à établir la présence de populations (habitants, employés, occupants d'établissement sensibles) dans différentes zones d'aléa, en mettant en exergue celles particulièrement exposées (par exemple en rez-de-chaussée inondable par plus de 1,5 m d'eau).

Des calculs de dommages attendus ont aussi été réalisés, tel que le dommage moyen annuel présenté en Figure 10, qui permet de montrer des secteurs plus ou moins touchés en termes d'enjeux. L'intérêt ici est d'essayer de visualiser les secteurs prioritaires pour mener des diagnostics complémentaires à l'avenir, que ce soit sur les cours d'eau principaux connus, ou sur des zones de cours d'eau secondaires et de ruissellement.

CONCLUSIONS

Les approches de cartographie des inondations complètement automatiques (Exzeco, Cartino2D) ou semi-automatiques (Cartino1D) sont testées, comparées entre elles et avec des éléments locaux (études ou historiques) sur les têtes de bassins versants.

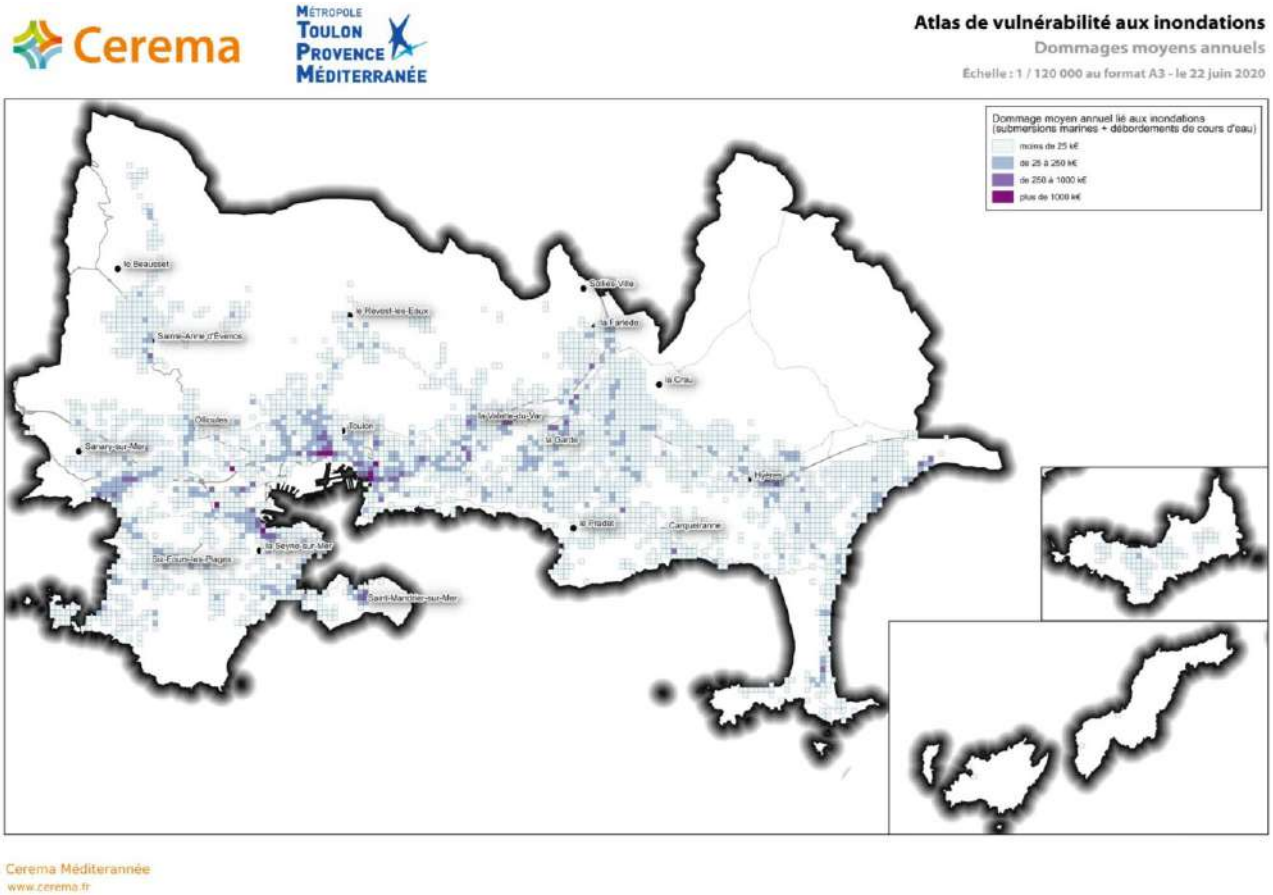


Figure 10: Dommages moyens annuels liés aux inondations

Pour la cartographie des zones inondables par ruissellement, la méthode Cartino1D « oblige » à ne travailler que dans des fonds de thalwegs relativement marqués et montre des faiblesses de représentation sur des milieux très urbains ou à morphologies complexes. Elle peut cependant s'avérer performante en temps de calcul.

Les méthodes Cartino2D et Exzeco montrent toutes les deux des atouts majeurs dans la représentation de ce type de phénomène mais aussi des points de vigilance. Exzeco utilise une symbologie avec des surfaces

drainées et ne permet pas forcément d'appréhender l'aléa physique et fréquentiel du phénomène. Cartino2D s'appuyant sur l'outil reconnu Telemac2D fournit des résultats très attrayants, mais qui peuvent être mis en défaut par l'absence de fond de lit mineur, mais également par du micro-mobilier urbain difficilement intégrable dans des chaines automatiques et chronophage même dans des études locales. L'utilisation du module Pluie-Débit doit être utilisée avec précaution pour définir la période de retour de l'évènement produit. Pour des évènements de faibles périodes de retour, le travail en écoulement superficiel sans prise en compte du réseau enterré et à ce stade avec une forte simplification de l'aspect hydrologique amène à la prudence. Pour des scénarios majeurs, la comparaison avec des études locales ou des PHE (sur des bassins versants déjà importants) est plus performante.

Le principal challenge est de savoir comment valider le plus en amont possible le résultat des diverses approches. Les seules informations historiques de qualité montrées sur le secteur (photos, vidéos) concernent déjà des bassins versants de l'ordre de 0.5 à 2 km² avec un nom de cours d'eau qui peut y être associé.

La progression sur cette connaissance ne peut passer que par la récupération de données d'inondations en masse. Conscients de ces problématiques, d'ici fin 2021, les SDIS disposeront d'un nouveau système de gestion de l'alerte et des opérations nationale appelé « NEXSIS ». Celui-ci permettra d'avoir des données géolocalisées concernant les requérants et donc des données bien plus fiables sur les interventions (https://www.pompiers.fr/actualites/nexsis-un-logiciel-national-pour-les-centres-dappels-durgence). Il serait utile de réaliser le même type d'approche numérique pour les expertises effectuées lors de remboursement de sinistres CATNAT, chaque expert étant à même de relever une PHE sur le lieu du sinistre qui serait intégrée dans la base de données de repère de crue.

L'approche Cartino2D a l'objectif d'être déployée au-delà du secteur de Toulon de manière systématique. La validation est un point qui va être particulièrement étudié dans le cadre de l'ANR PICS sur divers évènements et secteurs. L'objectif est d'intégrer les pluies réelles Radar Antilope15 minutes J+1 de Météo France et de comparer les résultats avec des éléments tangibles et chronologiques. Par exemple, un travail sur Montpellier de récupération de vidéo YouTube horodaté est en cours. Des améliorations dans l'utilisation de Telemac2D de manière automatisée devront spatialiser la pluie, adapter les formules de ruissellement pour les faibles lames d'eau [Broich et al, 2019], ces deux éléments étant majeurs pour la dynamique de la crue et les temps de réponse.

Malgré la qualité déjà atteinte et les améliorations prévues avec l'approche Cartino2D, la validation sur des phénomènes de ruissellement peut s'avérer délicate. La taille des mailles a des limites pour des temps de calcul raisonnables (3m pour les plus petites mailles sur le secteur de Toulon). Le maillage ne peut pas tenir compte des microtopographies complexes, structurelles et évolutives (murs de clôture, trottoirs, devers de routes, mobilier urbain…) ou simplement liés au comportement pendant la crue (embâcles). La connaissance du réseau enterré (sous forme de base de données structurés et numérique) et de son comportement lors de forts évènements sont un challenge pour une meilleure représentation des inondations par ruissellement.

Les résultats de ces cartographies de zones inondables du ruissellement jusqu'à des petits cours d'eau fournissent la base d'un outil d'aide à la décision. Malgré les incertitudes associées aux diverses méthodes de cartographie et de calcul d'enjeux, des cartographies de synthèses sur les dommages permettent de mieux identifier les secteurs à enjeux qui peuvent autant concerner des très petits côtiers et du ruissellement que des cours d'eau majeurs plus connus.

REMERCIEMENTS

Le travail de diagnostic territorial a été réalisé dans un partenariat entre la Métropole Toulon Provence Méditerranée et le Cerema. Le travail sur Cartino2D s'inscrit dans le cadre du projet de recherche PICS (http://pics.ifsttar.fr), financé par l'ANR (convention n°ANR-17-CE03-0011), d'études pour le compte de la DDTM34 et de la mission interrégionale pour la coordination de la prévention des risques d'inondation sur l'arc méditerranéen créée par le Préfet de Zone de Défense et de Sécurité Sud depuis le 1er juin 2017.

Les données pluviométriques ont été fournies par Météo France et INRAE, les données MNT ont été fournies par l'IGN. Les données de sinistres ont été fournies par le SDIS83.

Les données de calcul d'enjeux utilisent principalement le fichier foncier, la BD Topo et un ensemble de données libres (SIRENE, registre parcellaire graphique, open data des ministères de l'éducation et de la santé…).

REFERENCES

Arnaud P., Lavabre J., Sol B., Desouches Ch. (2008) *Regionalization of an hourly rainfall generating model over metropolitan France for flood hazard estimation*. Hydrological Sciences Journal, 53 (1) 34-47

Broich K., Pfligbeil T., Disse M., 2019, Using TELEMAC-2D for Hydrodynamic Modeling of Rainfall-Runoff, XXVIth Telemac & Mascaret User Club

Cronshey R., 1986, Urban hydrology for small watersheds. 2nd edition, USDA, http://hdl.handle.net/1969.3/24438

Geuzaine C., Remacle J.-F. (2009) *Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities*. International Journal for Numerical Methods in Engineering 79(11), pp. 1309-1331

GRASS Development Team, (2017). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.2. Open Source Geospatial Foundation*. Electronic document:. http://grass.osgeo.org

Hervouet J-M (2007). *Hydrodynamics of free surface flows, modelling with the finite element method*. Wiley 2007. 341 pp

Kosuth P., Landel J-F., 2020, Pour un meilleur accès du public aux cartes de zones inondables, Stratégie de mise à disposition en ligne et améliorations de Géorisques, Rapport n° 012890-01, CGEDD, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire

Le Bihan, G., Payrastre, O., Gaume, E., Moncoulon, D., Pons, F., 2017. *The challenge of forecasting impacts of flash floods: test of a simplified hydraulic approach and validation based on insurance claim data.* Hydrology and Earth System Sciences 21, 5911–5928. https://doi.org/10.5194/hess-21-5911-2017

Ligier P.L., 2016. Implementation of a rainfall-runoff model in TELEMAC-2D. Proceedings of the XXIIIrd TELEMAC_MASCARET User Conference, Paris, France

Pons F., Delgado J-L., Guero P., Berthier E. (2010), *Exzeco: a GIS and DEM based method for pre-determination of flood risk related to direct runoff and flash floods*, 9th International Conference on Hydroinformatics HIC 2010 Tianjin.

Pons, F., Laroche, C., Fourmigue, P., Alquier, M., (2014). *Cartographie des surfaces inondables extrêmes pour la directive inondation : cas de la Nartuby*. La Houille Blanche 34–41. https://doi.org/10.1051/lhb/2014014

Prodanovic P. (2017), PPUTILS a practical toolkit for terrain, free surface flow and wave modeling by pat, ph.d., p.eng. London, Ontario, Canada web: https://github.com/pprodano/pputils

R Development Core Team (2005). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL: http://www.R-project.org

Modélisation du ruissellement : Enjeux et Réponses des modèles numériques (Piveteau *et al.*)

Modélisation du ruissellement : Enjeux et Réponses des modèles numériques

Anne PIVETEAU[1], Bénédicte FREY[1],
Bastien SOLERA[1]

[1] ARTELIA Villes et Territoires, Le Condorcet, 18 rue Elie Pelas · 13016 Marseille, France,
benedicte.frey@arteliagroup.com, anne.piveteau@arteliagroup.com, bastien.solera@arteliagroup.com

De nombreuses possibilités sont offertes pour simuler le ruissellement dynamique depuis les nouvelles avancées des logiciels de modélisation. Différents types de modèles existent et doivent être choisis en fonction d'un besoin précis et des moyens disponibles.
Les modèles les plus séduisants actuellement sont ceux qui permettent la propagation de la pluie directement appliquée sur chacune des mailles du modèle, appelés modèles « entièrement distribués » (modèles FD) offrant une illustration d'apparence « réaliste » du phénomène. Ils se distinguent ainsi des modèles semi-distribués (modèles SD) déjà largement utilisés dans le cadre des études de débordements de cours d'eau.

Ces modèles sont surtout utilisés dans le cadre de modélisation du ruissellement urbain, là où les paramètres hydrologiques liés à l'infiltration dans les sols sont moins complexes à appréhender. Les possibilités de couplage avec les réseaux permettent une bonne représentation des phénomènes, d'autant plus lorsqu'ils sont confrontés aux données de terrains et aux observations lors d'événements historiques. Toutefois, les résultats obtenus doivent être utilisés avec précaution : ils restent entachés d'une incertitude liée aux multiples entrants : données topographiques, hydrologie, type de modèle, maillage, paramètres de calage.

Mots-clefs : Modélisation, ruissellement, modèle semi-distribués, modèle entièrement distribué, couplage 1D/2D, Précipitations, sensibilités, incertitudes.

Runoff Modeling: Challenges and Issues of Numerical Models

Numerous possibilities are offered to simulate dynamic runoff from new advances in modeling software. Different types of models exist and must be chosen according to a precise need and the means available.
The most attractive models at present are those that allow rainfall to propagate directly on each of the model's meshes, called "fully distributed" models (FD models) that provide a "realistic" appearance of the phenomenon. They thus differ from the semi-distributed models (SD models) already widely used in the context of river overflow studies.

These models are mainly used for urban runoff modelling, where the hydrological parameters related to infiltration into the soil are less complex to understand. The possibilities of coupling a fully distributed model with networks allow a good representation of the phenomena, especially when confronted with field data and observations during historical events. However, the results obtained must be used with caution: they are still marred by an uncertainty linked to the multiple inputs: topographic data, hydrology, type of model, mesh size, calibration parameters.

Key words: Modeling, runoff, semi-distributed model, fully distributed model, 1D/2D coupling, Precipitation, sensitivities, uncertainties.

INTRODUCTION

Les inondations exceptionnelles de ces dix dernières années en France ont fait émerger de nouvelles pratiques d'évaluation de l'aléa ruissellement. Jusqu'alors, la modélisation hydraulique était le plus souvent envisagée dans le but :

- de caractériser l'aléa inondation par débordement de cours d'eau ou par submersion marine, utilisée notamment pour aboutir aux Plans de Prévention des Inondations (PPRi),
- d'évaluer les impacts d'aménagements dans le lit mineur et / ou le lit majeur d'un cours d'eau,
- d'établir un diagnostic des réseaux d'eaux pluviales dans les villes visant généralement à envisager un programme de travaux (Schéma Directeur des Eaux Pluviales).

Les retours d'expériences sur les évènements de cette dernière décennie ont montré que la connaissance du risque inondation par ruissellement pluvial est limitée ce qui pose un problème majeur pour les collectivités, pour des raisons de sécurité des personnes et des biens, d'organisation des secours et de perspectives d'aménagement du territoire. Le ruissellement est rarement pris en compte dans les études citées ci-avant alors que le besoin d'évaluation devient un enjeu majeur des stratégies d'aménagement du territoire. Toutefois, de nouvelles méthodes spécifiques d'analyse commencent à se développer.

I/ DIFFERENTES APPROCHES DE CARACTERISATION DU RUISSELLEMENT

a) Différentes approches

La cartographie de l'aléa inondation par ruissellement à l'échelle d'un territoire est un enjeu fort pour orienter les stratégies d'aménagements. Ces cartes peuvent résulter de différentes approches, notamment :

- les approches simplifiées (à l'instar de la méthode du « Débit Linéique », conçue par Sogreah) utilisant des hypothèses simplificatrices et la connaissance du terrain ;
- les approches basées sur la topographie (méthode d'Extraction des Zones d'Ecoulement, ExZEco) ;
- les approches à scores (IRIP, Indicateur du Ruissellement Intense Pluvial, par exemple), faisant intervenir en plus de la topographie, des paramètres supplémentaires visant à représenter les processus de ruissellement en fonction de l'aptitude des surfaces à produire, transférer, accumuler ;
- les approches basées principalement sur l'hydrologie ;
- les approches basées sur les modèles numériques d'écoulement.

Les deux premières approches permettent d'aboutir à une cartographie des axes d'écoulement et d'accumulation. Certaines approches, comme IRIP, apportent une division du territoire en plusieurs classes (zones de production, zones de transfert, zones d'accumulation). Mais leur principale limite est de ne pouvoir donner d'informations sur les débits en jeux, les hauteurs d'eau et les vitesses.

Avant l'apparition des outils numériques, les méthodes de caractérisation de l'aléa ruissellement reposaient sur une analyse hydrologique des bassins versants faisant appel à différents modèles adaptés au contexte local. La cartographie de l'aléa se faisait ensuite à main levée, sur le plan topographique, selon un calcul de hauteurs et de vitesses au droit de sections en travers des différents axes d'écoulements, de la même façon que l'aléa inondation par débordements de cours d'eau. Cette méthode repose sur un bon niveau d'expertise, mais trouve une difficulté évidente lorsque l'écoulement principal se divise (diffluence), ce qui est souvent le cas pour le ruissellement en milieu urbain, du fait d'un réseau viaire important et influent sur les écoulements [Araud, 2013].

Les approches basées principalement sur l'hydrologie permettent d'évaluer les débits et volumes précipités. Des logiciels comme Hec-Hms et Canoe peuvent être utilisés à cette fin. Toutefois, les écoulements en surface, en dehors du réseau ne sont pas représentés. Il n'est donc pas possible de connaître la hauteur et la vitesse en un point donné de la surface.

Aujourd'hui, les développements récents offrent des solutions afin de modéliser les processus physiques d'écoulement des eaux issues des précipitations sur différents types de surfaces.

b) L'approche numérique faisant intervenir les modèles d'écoulements

ARTELIA possède de nombreux logiciels de propagation bidimensionnelle des écoulements : PC-SWMM, Telemac, Infoworks ICM, Mike Flood (DHI), Hec-Ras2D, résolvant les équations de Barré de Saint -Venant.

Avec le nombre croissant de sollicitations de la part des collectivités et d'aménageurs recherchant à aménager « en toute sécurité », les ingénieurs d'ARTELIA utilisent différentes approches de modélisations du ruissellement :

- modélisations du domaine 1D (avec couplage possible 1D/1D);
- Modélisation du domaine 2D de type semi-distribuée SD (de l'anglais *semi-distributed*) ou entièrement distribuée FD (de l'anglais *Fully distributed*) ou mixte.
- Modélisation 2D (SD ou FD) en couplage avec le domaine 1D

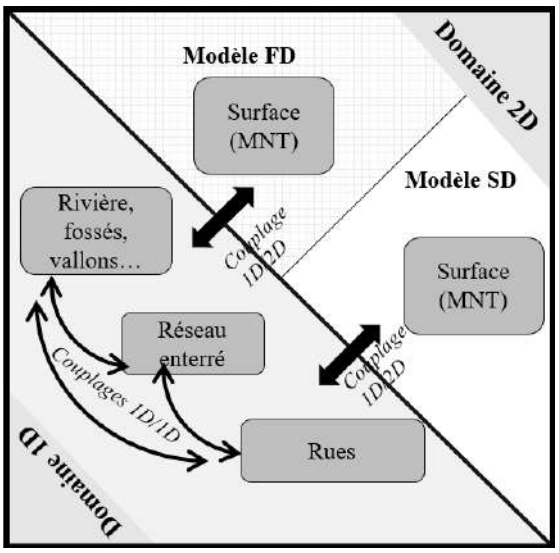


Figure 1 : Différentes approches de modélisations numériques des écoulements

Modélisations du domaine 1D

Dans le cadre d'études de ruissellement, les modélisations unidirectionnelles (1D/1D) sont parfois utilisées. Elles sont intéressantes dans les cas particuliers d'études sans complexité particulière. Le système « majeur » en surface est couplé avec le système « mineur » souvent enterré. L'axe d'écoulement en surface est représenté par une série de profils en travers (de type profil de rue par exemple). Le couplage se fait alors au niveau de points d'échanges généralement situés au droit des regards d'eaux pluviales, avec un contrôle du débit. Les échanges se produisent du réseau 1D de surface vers le réseau 1D enterré ou l'inverse, suivant le choix du modélisateur. Les conditions limites amont (débits) sont issues d'une analyse hydrologique préalable ou d'une modélisation hydrologique couplée avec le modèle d'écoulement. Si le maillage des rues est important, avec des diffluences possibles au niveau des écoulements, le modèle ne parviendra pas correctement à représenter les échanges.

Modélisations du domaine 2D

Les modélisations les plus souvent utilisées pour le traitement du ruissellement relèvent de la modélisation bi-dimensionnelle pure. Deux approches distinctes sont alors possibles [Pina, 2016]:

- la modélisation semi-distribuée (SD) : les débits sous forme d'hydrogrammes sont injectés au niveau de points d'injection sur le maillage ou sont issus d'une modélisation hydrologique couplée, simultanément au modèle d'écoulement ;
- la modélisation entièrement distribuée (FD) : la pluie nette sous forme de lame d'eau est appliquée directement sur les mailles du modèle de sorte que les volumes d'eau à chaque pas de temps de calcul sont calculés sur chaque maille puis propagés d'une maille à l'autre décrivant ainsi le phénomène de ruissellement.

La première approche (modélisation SD) est adaptée dans les cas où l'analyse hydrologique doit être réalisée de manière approfondie ; par exemple lorsque la variation du comportement des sols à l'infiltration varie pendant l'évènement pluviométrique. Elle est également adaptée aux grands bassins versants. Les logiciels Mike Flood (grâce au noyau de calcul Mike Urban), PC-SWMM et Infoworks ICM ont l'avantage de permettre une modélisation hydrologique et hydraulique couplée. Cela nécessite d'intégrer les bassins versants et de paramétrer la transformation pluie-débit dans le modèle. Les points d'injection doivent être placés bien en amont de la zone d'étude car ils génèrent des points fictifs de forts débits où l'on observera dans les résultats des hauteurs d'eau très supérieures à la réalité (Cf Figure 3). De même, cela peut provoquer une sorte de cône d'étalement de l'eau en aval qui propage les écoulements sur la surface. La position et le nombre de points d'injection relèvent du choix du modélisateur : il doit se faire en cohérence avec le terrain, les caractéristiques des ouvrages, la situation de la zone d'étude.

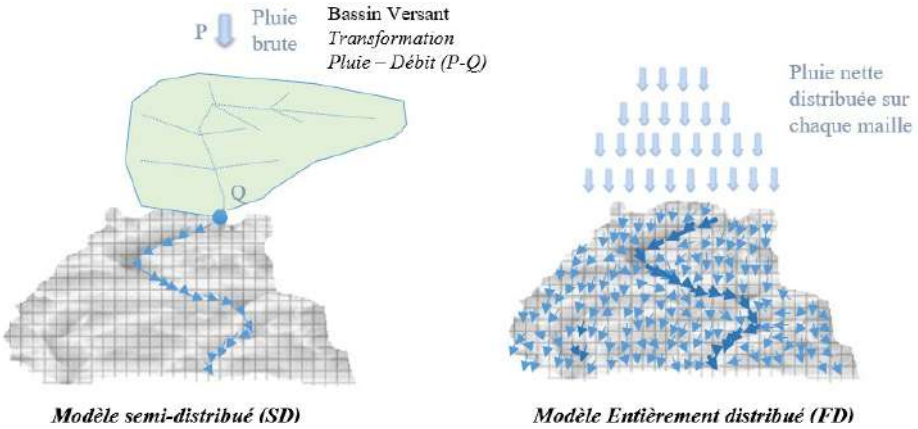


Figure 2 : Principes des modèles d'écoulement semi-distribués et entièrement distribués

La seconde approche (modélisation FD) est plus simple à mettre en œuvre mais impose d'intégrer toute la partie du bassin versant en amont de la zone étudiée. Elle s'adapte très bien aux modèles de ruissellement urbains. Les durées de calculs-machine sont alors rallongés et cette approche peut conduire à la création d'un modèle d'emprise bien plus importante que la zone d'étude, nécessitant une connaissance topographique du secteur plus étendue. Elle donne de bons résultats sur des maillages fins et les modèles sont généralement plus stables car il n'y a pas de variation localement brusque de débit due à l'injection d'un débit en provenance d'un bassin versant. Le rendu cartographique est d'apparence plus proche de la réalité. Une fois la simulation réalisée, il est possible d'extraire, à chaque pas de temps, sur toute la surface, les valeurs des paramètres tels que : champs de hauteurs, de vitesses, croisement hauteur / vitesses, niveaux d'eau, série d'hydrogrammes obtenus au niveau de sections de contrôle (par exemple au niveau d'une rue). La cinétique des écoulements (durée de submersion, condition de ressuyage d'un secteur particulier par exemple) peut être étudiée. Il est également possible de réaliser des cartes d'aléas croisant la hauteur et la vitesse, à chaque pas de temps, puis d'extraire les jeux de valeurs maximums.

Pour cette approche, les logiciels tels que PC-SWMM, Mike Flood, Infoworks ICM, Telemac sont les plus utilisés par les ingénieurs ARTELIA.

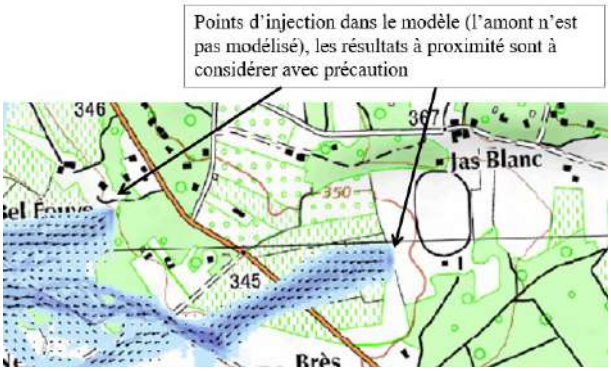


Figure 3 : Points d'injection directement sur le maillage

Souvent, les ingénieurs procèdent à une démarche à la croisée de ces deux approches, intéressante pour modéliser à la fois des débordements de cours d'eau et le ruissellement (Cf figure 4).

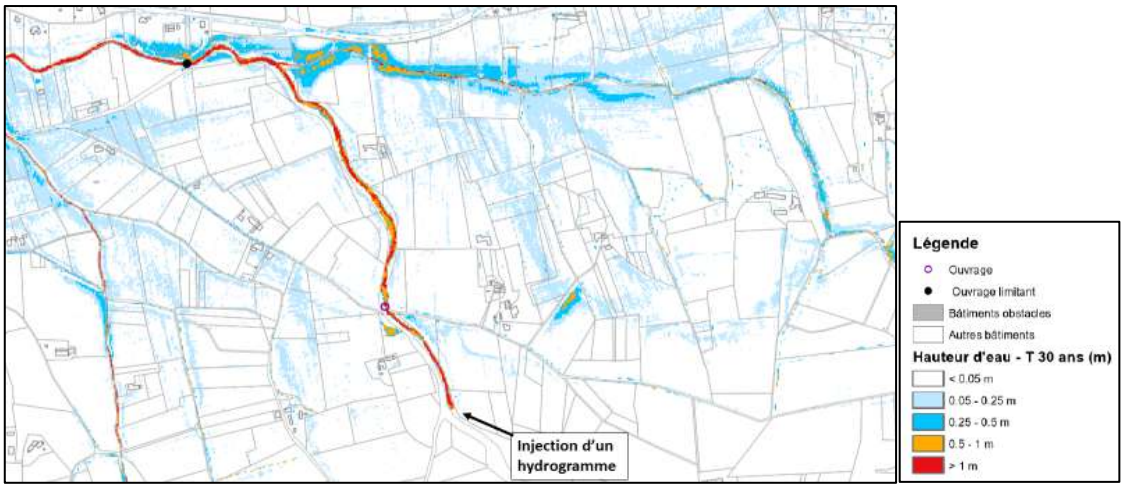


Figure 4 : Exemple de démarche croisée modélisant à la fois le débordement d'un cours d'eau 1D par modélisation de type SD et le ruissellement sur la surface de type FD. Etude de ruissellement, Valréas. (ARTELIA, 2019).

Modélisations 2D (FD ou SD ou mixte) en couplage avec le domaine 1D

Certains logiciels (Mike Flood, PC-SWMM, Infoworks ICM, …) peuvent être utilisés en couplage 1D/2D avec le réseau hydrographique de surface et / ou le réseau enterré.

La prise en compte ou non du réseau pluvial dépend des objectifs propres à chaque étude, des scénarios et périodes de retour étudiés. Une des hypothèses simplificatrice et sécuritaire est de considérer le réseau soit largement saturé pour la période de retour étudiée ou soit défaillant ; ce qui n'est pas toujours le cas.

Plusieurs hypothèses sont alors envisageables :

- Ne pas modéliser le réseau : souvent, il est fait l'hypothèse que les réseaux étant rapidement saturés, ils n'auraient que peu d'impacts sur les résultats maximums ; et que, s'ils en avaient, ce serait plutôt en faveur d'une légère surestimation des hauteurs. Or, c'est parfois l'inverse qui est remarqué : les réseaux, en se mettant en charge, peuvent refouler en des points particuliers et aggraver la situation voire même provoquer l'inondation de zones qui ne le seraient pas en l'absence de réseau.
- Modéliser les pertes et points de refoulement de façon simplifiée : Une perte du modèle 2D peut être modélisée sur une maille en fonction de la capacité du réseau à « absorber ». La perte pourra alors être modélisée à l'aide d'une loi hauteur / débit, qui sera créée par le modélisateur et intégrée dans le modèle. Certains logiciels (Mike 21 FM par exemple) permettent la création d'une liaison dynamique faisant transiter les débits entre un point d'absorption « puits » avec un point de refoulement « source ».
- Modéliser le réseau pluvial enterré en couplage. A l'heure actuelle, Telemac et Hec-Ras 2D ne le permettent pas (sauf partie 1D-surface libre pour Hec-Ras). Cette approche est délicate car le couplage du réseau nécessite d'intégrer de nombreux nœuds d'échanges entre réseau et surface libre. Aussi, il ne s'agit pas de modéliser uniquement des regards d'eaux pluviales mais bien toutes les grilles et bouches avaloirs situées dans les points bas et dans les axes d'écoulements. Souvent, il est préférable de rajouter le modèle 1D-réseau après un premier jeu de résultats sans prise en compte de ce dernier.

II. TESTS DE SENSIBILITES ET INCERTITUDES DES MODELES NUMERIQUES

Après avoir fait le choix du modèle à mettre en œuvre, la définition des paramètres à intégrer constitue une étape clé de la construction d'une modélisation numérique. En fonction du type de modèle choisi (1D, 2D, couplé ou non) et du secteur représenté, les caractéristiques nécessaires à l'élaboration du modèle sont différentes et présentent des incidences variables.

La sensibilité des modèles provient de nombreux paramètres parmi lesquels :

a) Sensibilité aux paramètres hydrologiques

Les phénomènes hydrologiques sont complexes à appréhender et dépendent étroitement des conditions locales (intensité pluviométrique, caractéristiques physiques des bassins versants dont la géologie, la pédologie, les pentes, le couvert végétal…). L'analyse pluviométrique est basée sur des études statistiques dont la représentativité est limitée par le nombre de points de mesure (pluviomètres) et l'hétérogénéité spatiale de la pluie. L'estimation de la pluie précipitée participant effectivement au ruissellement est également une source importante d'incertitude, en particulier via les erreurs relatives au choix du type de fonction de production pluie brute – pluie nette et du type de fonction de transfert.

-Sensibilité à la pluie de projet. La forme de la pluie et la durée influencent les résultats de la modélisation puisque les bassins versants réagissent différemment en fonction de leurs caractéristiques physiques. Il est de ce fait complexe de qualifier la période de retour d'un phénomène sur un secteur impliquant des bassins versants de caractéristiques différentes (en particulier dans les secteurs pouvant impliquer du ruissellement et du débordement de cours d'eau).

Figure 5 : impact du choix du pas de temps de discrétisation d'une pluie de type Chicago (dt =5 minutes et dt=15 minutes) sur les hauteurs d'eau maximales pour un modèle Telemac2D entièrement distribué. Etude de ruissellement - Arnouze et Régal à Carcassonne (ARTELIA, 2020).

- Sensibilité à la fonction de production. Dans le cas des modèles SD, l'hydrologie peut être construite en amont du modèle, via des logiciels spécifiques ou couplés aux principaux logiciels de modélisation numérique. Dans ce cas, une multitude de modèles existent (empiriques, conceptuels…). Il est intéressant de pouvoir tester différents modèles. La fonction de production peut également être intégrée au modèle numérique sous la forme d'une pluie brute, appliquée maille par maille (modèle FD). Dans ce cas, la transformation de la pluie brute en pluie nette est effectuée directement par application d'un coefficient de ruissellement appliqué sur chaque maille (Cf figure 6). Les résultats dépendent donc directement de ce paramètre qui a un rôle prépondérant dans la fiabilité de la modélisation réalisée. Pour ce type de modélisation, il est difficile de faire intervenir des fonctions plus complexes, c'est pourquoi ces modèles se prêtent bien à la modélisation en zone urbaine ou sur sol saturé.

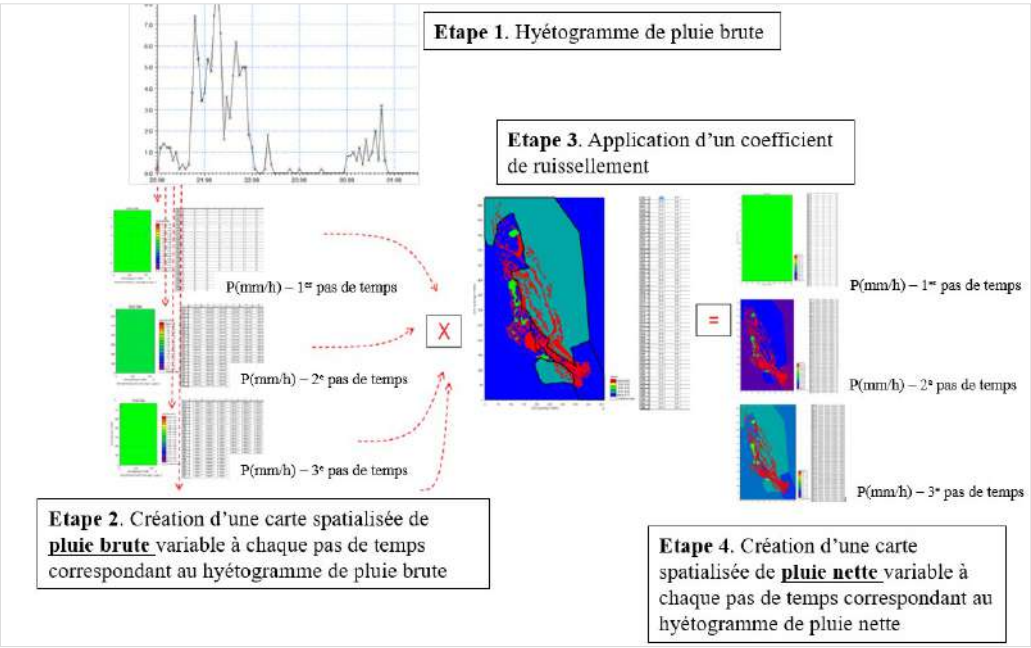


Figure 6 : Etapes de la transformation de la pluie brute à la pluie nette pour une modèle FD réalisé sous MIKE

Des tests ont été réalisés sur différents modèles réalisés par ARTELIA visant à rechercher d'une part les écarts entre une modélisation de type SD et une modélisation de type FD. Ils ont permis de relever certains écarts dus :

- Au paramétrage des pertes initiales dans le modèle SD. Les pertes initiales dans le modèle FD sont provoquées par le stockage des micro-cuvettes du maillage. Ces micro-cuvettes ne sont pas toujours homogènes sur un bassin versant. Cela nécessite de réaliser un découpage plus fin des sous bassins versants dans le modèle SD pour tenir compte de cette hétérogénéité.

- Aux pertes continues : le modèle SD peut faire varier les pertes continues par infiltration au fur et à mesure que les sols se saturent au cours de la pluie. Dans le cadre du modèle FD, les coefficients de ruissellement sont appliqués sur chaque maille sans qu'il soit possible de les faire varier au cours du temps de manière automatique. Sur ce point, des codes numériques sont en cours de développement pour certains logiciels afin de permettre une meilleure prise en compte du phénomène.

b) Sensibilité aux paramètres de maillage

La taille des mailles est également un paramètre sensible si le pas de temps utilisé est variable, dans la mesure où plus la taille de la maille est importante, plus une légère variation de l'intensité de la pluie (dépendant du pas de temps de calcul) introduira des écarts de remplissage importants en termes de volume.

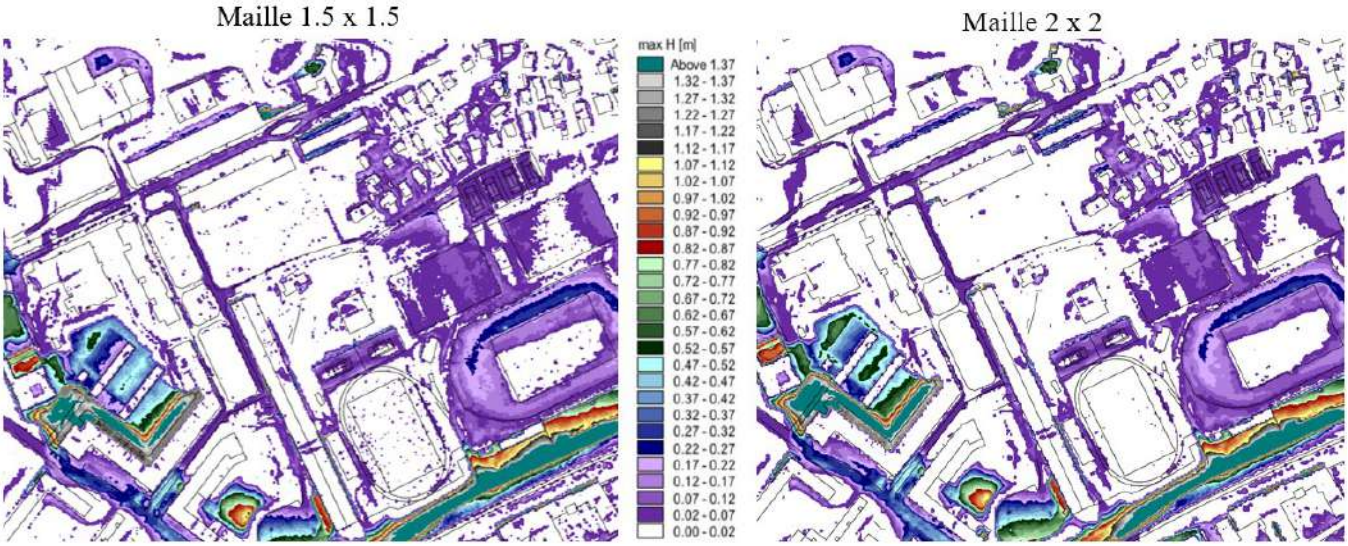


Figure 7 : Hauteurs d'eau obtenues avec deux maillages non flexibles avec des tailles de mailles de 1.5 x 1.5 (à gauche) et 2 x 2 (à droite), pas de temps constant, logiciel Mike 21, Modèle Pissevin à Nîmes (ARTELIA, 2019)

c) Sensibilité aux pas de temps de calculs

Le pas de temps de modélisation peut avoir une légère influence sur les résultats. Aussi, pour éviter les artefacts de calculs en effectuant des comparaisons entre un état actuel et un état projeté, il est préférable d'effectuer alors des comparaisons avec un pas de temps fixe, même s'il est très petit.

d) Sensibilité au nombre et à la position des nœuds d'échanges entre 1D-réseau et 2D

Dans le cas d'une modélisation 1Dréseau/2D entièrement distribuée (FD), le choix de ne modéliser qu'une partie du réseau en ne tenant pas compte de certains regards EP et certains tronçons de réseau peut avoir une incidence importante sur les résultats par rapport à la réalité. Il est toutefois possible de le faire avec précaution en réalisant au préalable une modélisation 2D seule, sans la partie 1D-réseau, afin de mettre en évidence les zones d'écoulement potentielles et les zones de stockages. Cette première carte de ruissellement sera ensuite superposée avec le réseau afin de pouvoir éventuellement éliminer certains éléments (regard perché en dehors d'une zone d'écoulement, réseau non alimenté car mal positionné, etc). Par ailleurs, les éléments de réseau pluvial peuvent en réalité n'absorber qu'une part des écoulements compte tenu de la capacité de chaque avaloir, chaque grille. Ces paramètres sont alors à intégrer dans le modèle en fonction des choix de modélisation (par exemple : 1 lien pour 4 grilles ou 1 lien pour 1 grille, etc.).

e) Sensibilité liées aux obstacles

Lors de la construction d'un modèle numérique, quel qu'il soit, se pose la question de la représentativité de ce dernier. Pour s'attacher à décrire le plus fidèlement possible la réalité, une reconnaissance de terrain précise et une mesure des données associées (levés topographiques et bathymétriques) doivent être engagées. Pour des modèles de ruissellement, se pose naturellement la question d'intégrer des obstacles aux écoulements « peu visibles » en termes de hauteurs (murets, trottoirs) notamment afin d'affiner la connaissance des écoulements. En fonction des besoins du client, de ses attentes et des moyens disponibles, le choix de l'intégration de l'un ou l'autre obstacle se fait de façon plus ou moins aisée. Dans le cadre de très grands modèles de ruissellement,

le choix est souvent fait de ne modéliser que les bâtiments, issus des cartographies du cadastre. Pour des modèles plus petits, l'intégration des murets principaux, qui peuvent rediriger les écoulements peut être intéressante. La stratégie proposée est à ce stade d'engager dans un premier temps une modélisation « nue » comprenant uniquement les bâtiments du cadastre. Les cartes de vitesses et de hauteurs d'eau résultant de cette modélisation sont alors confrontées aux cartes d'obstacles « mineurs » recensés lors de la reconnaissance de terrain, qui se doit d'être exhaustive. On peut alors faire le choix, si c'est nécessaire, de modifier le modèle localement pour intégrer les obstacles qui semblent les plus impactant sur les écoulements (transverses aux écoulements, dans des zones de fortes vitesses, non submersibles, etc.). Cette approche permet de cibler directement les obstacles principaux et de limiter les frais de mise en œuvre du modèle, liés à la fois au temps de construction du modèle et aux données topographiques nécessaires. Cette méthodologie permet ainsi de définir et d'insister sur les limites de la représentativité de phénomènes très locaux.

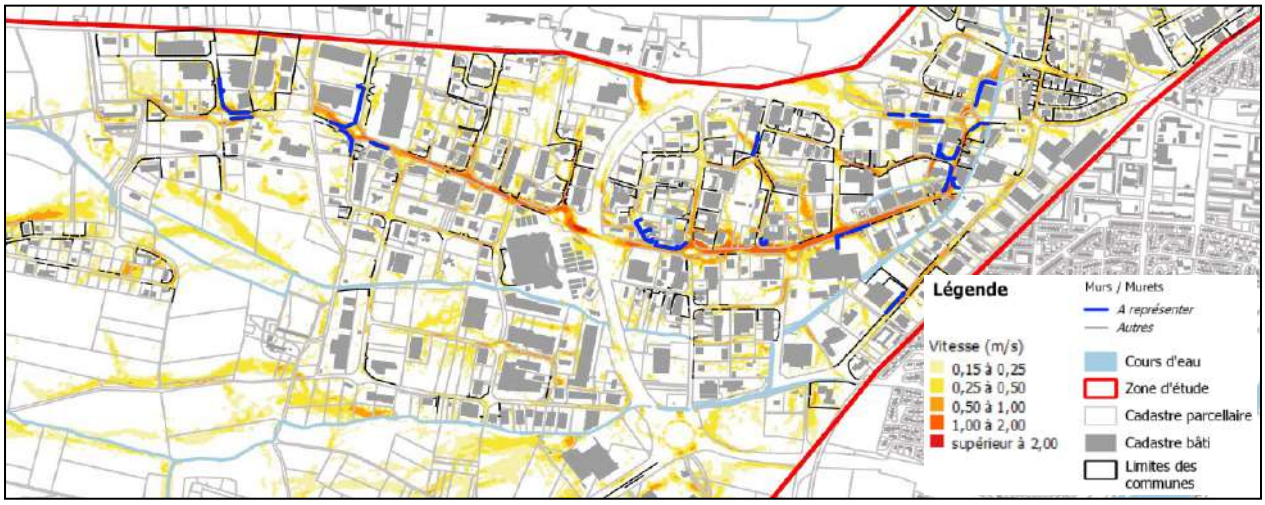


Figure 8 : Exemple d'analyse croisée entre la cartographie de vitesses résultant d'une modélisation avec bâtiments seuls et proposition d'obstacles à représenter en bleu. Etude de ruissellement - Arnouze et Régal à Carcassonne (ARTELIA, 2020).

f) Sensibilité aux paramètres de rugosité

L'abaissement ou l'augmentation des coefficients de rugosité peut avoir un impact important sur les résultats en hauteurs d'eau et vitesses, surtout lorsque les hauteurs d'eau sont faibles, ce qui implique une influence forte du frottement. Par contre, dans les secteurs de stockage où lorsque les hauteurs sont importantes, l'influence est plus faible sur ce paramètre. Une carte de rugosité est généralement établie et intégrée au modèle en fonction de l'occupation des sols. D'autres aspects entrent également en jeu ; à titre d'exemples : le stationnement le long des voies, les clôtures au sein des zones pavillonnaires, etc.

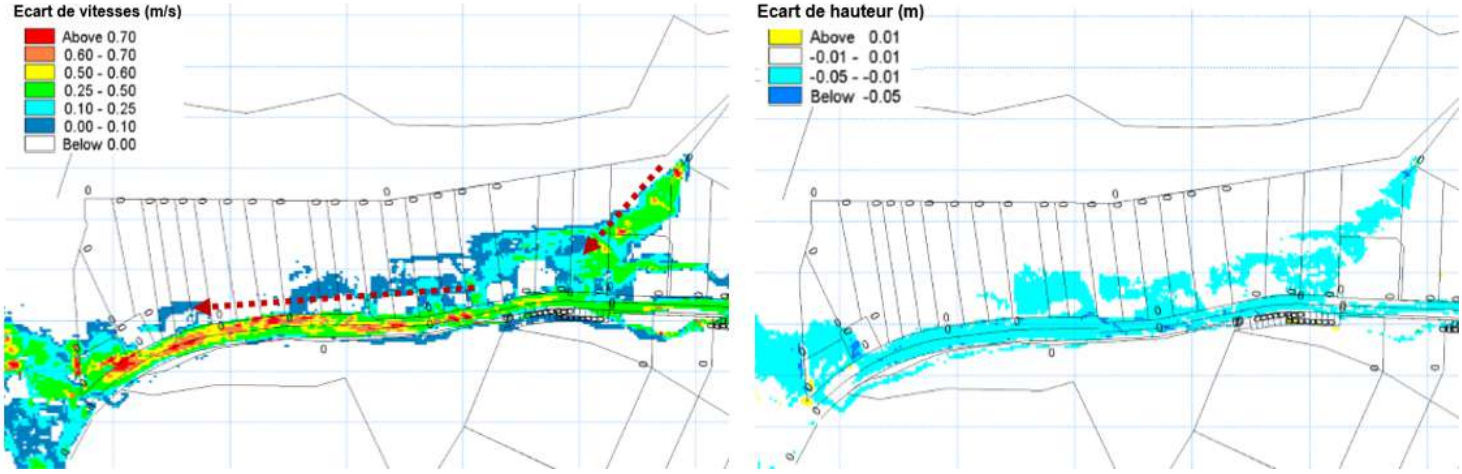


Figure 9 : Carte d'impact de l'abaissement de la rugosité (de K=20 à K=30) sur les hauteurs et vitesses (Schéma directeur Pluvial de Rognes – 13, ARTELIA, 2015)

III. ANALYSE CROISEE DES DIFFERENTS MODELES NUMERIQUES DE RUISSELLEMENT EN FONCTION DU BESOIN ET DES DONNEES DISPONIBLES

S'accorder un temps pour bien cerner le besoin et vérifier la pertinence de mise en œuvre d'une modélisation numérique au regard des autres approches possibles devrait être la priorité avant de démarrer un modèle de ruissellement. Bien souvent, une « simple » expertise peut répondre à toutes les interrogations posées.

L'analyse croisée des différents types de modèles numériques permet aujourd'hui de proposer un cadre d'utilisation en fonction des besoins, de la situation géographique, des données d'entrées disponibles et des moyens d'exploitation du modèle.

Dans tous les cas, une confrontation des résultats d'un modèle avec le terrain est indispensable.

L'étape de calage des modèles est essentielle. Elle nécessite des données souvent couteuses (débitmètres dans les réseaux, postes vidéos, etc…) et qui ne sont pas toujours disponibles (observations suite à un évènement telles que vidéos, photographies prises au plus fort de l'évènement, traces sur le mobilier urbain, témoignages, etc.).

Sans calage, les possibilités de valorisation des modèles numériques sont plus limitées. Le cas échéant, elles restent intéressantes :

- dans le cas des analyses comparatives de scénarios d'aménagements ;
- pour suggérer un risque de façon moins catégorique qu'en lui associant un débit ou une période de retour ; par exemple, à la manière des TRI (Territoire à Risque Important d'Inondation) qui proposent trois scénarios : « Evènement fréquent, Evènement moyen, Evènement extrême)

Concernant les logiciels, ils ont chacun leurs particularités et se prêtent plus ou moins bien aux différents types de modèles. Les maîtres d'Ouvrages souhaitent souvent que les modélisations soient réalisées sur des logiciels gratuits, libres ou open source. Toutefois, ces logiciels ne sont pas toujours les plus adaptés au besoin.

Table 1 : Types de modèles numérique pouvant être mis en œuvre en fonction du besoin

Besoins	**Analyse hydrologique préalable et Modélisation 1D rues/ 1D réseau**	**Modélisation 2D Modélisation de la Pluie sur les mailles du bassin versant (Modèle Entièrement distribué - FD)**		**Modélisation 2D Modélisation P-Q classique et écoulement sur les mailles (Modèle semi-distribué - SD)**	
		Sans couplage	**Couplage réseau**	**Sans couplage**	**Couplage réseau**
Etude de type « aléa ruissellement » sur un grand bassin versant	Pas adaptée	oui (prise en compte éventuelle de « pertes » et « sources »)	Généralement pas adaptée	oui (prise en compte éventuelle de « pertes » et « sources »)	Généralement pas adaptée
Etude ponctuelle sur un secteur situé en aval d'un grand bassin versant	Généralement pas adaptée	Pas adaptée	Pas adaptée	oui	oui si justifiée
Etude ponctuelle sur un secteur situé en amont d'un grand bassin versant	Généralement pas adaptée	oui	oui si justifiée	oui	oui si justifiée
Etude portant sur un axe d'écoulement sans diffluence possible - réseau enterré majeur rarement saturé	oui	Pas adaptée	Généralement pas adaptée	Pas adaptée	oui
Etude de type Schéma directeur pluvial et de ruissellement	oui Le ruissellement est moins bien traité	En complément	oui (à retenir si possible)	Pas adaptée	oui

Table 2 : Données d'entrées nécessaires en fonction du type de modèle

Données disponibles	Analyse hydrologique préalable et Modélisation 1D rues/ 1D réseau	Modélisation 2D Modélisation de la Pluie sur les mailles du bassin versant (Modèle Entièrement distribué - FD)		Modélisation 2D Modélisation P-Q classique et écoulement sur les mailles (Modèle semi-distribué - SD)	
		Sans couplage	Couplage réseau	Sans couplage	Couplage réseau
Pluies réelles (dont épisode pluvieux de référence) et autres données pluviométriques (SHYREG, montana, etc.)	x	x	x	x	x
Sections travers du réseau à ciel ouvert	x				
MNT précis (ou semis de points issu d'un LIDAR)		x Sur tout le bassin versant amont + zone d'étude	x Sur tout le bassin versant amont + zone d'étude	x	x
Données du réseau pluvial (dimensions, niveau des fil d'eau et des cotes TN, rugosité, état du réseau, etc.)	x		x		x
Données de calage (PHE, mesures de débits, photos, vidéos…)	x Les plus complètes possibles	x Les plus complètes possibles	x Les plus complètes possibles	x Les plus complètes possibles	x Les plus complètes possibles

CONCLUSION

L'accroissement de la puissance de calcul numérique couplée à l'augmentation de la qualité des données disponibles pour le modélisateur (qualité des relevés pluviométriques, précision accrue des Modèles Numérique de Terrain, Big data.) offre de nouvelles techniques de modélisation numérique du ruissellement.

La variété des approches et des logiciels permet aux ingénieurs de s'adapter à la fois aux données disponibles mais également aux attentes des maitres d'ouvrage dans le cadre de mission d'évaluation des risques liés au ruissellement.

Ces nouvelles méthodes ne se substituent pas pour autant au travail de l'ingénieur hydraulicien, mais sont au contraire des outils mettant à contribution toute l'expertise et l'expérience du modélisateur pour réaliser un modèle hydraulique traduisant le plus fidèlement possible le réel.

En effet, les logiciels actuels permettent l'intégration de nombreux paramètres tout en étant malgré tout de plus en plus robustes. L'expertise de l'ingénieur et la connaissance du terrain sont donc d'autant plus cruciaux pour réaliser un modèle de qualité.

Enfin, les approches entièrement distribuées, en s'affranchissant de plus en plus des modèles pluie-débit classiques à l'échelle du bassin versant, et en travaillant sur des échelles de plus en plus fines, offrent des perspectives intéressantes dans le cadre de l'évaluation du ruissellement.

REFERENCES

Araud Q. (2013). *Simulations des écoulements en milieu urbain lors d'un évènement pluvieux extrême*. Université de Strasbourg

Nicolas M. (2010). *Étude expérimentale et numérique du ruissellement de surface : effets des variations d'intensité de la pluie. Application à une parcelle de vigne en Cévennes-Vivarais.* Université de Grenoble.

Pina R.D. & al. (2016). *Semi-vs Fully-Distribuled urban stormwater models: model set up and comparison with two real case studies*, MDPI, Water

Posters session 2

Améliorer la prise en compte du ruissellement sur le bassin de la Dordogne : retour d'expérience et prospections engagées par EPIDOR (Thomas *et al.*)

Améliorer la prise en compte du ruissellement sur le bassin de la Dordogne : retour d'expérience et prospections engagées par EPIDOR

Mikaël THOMAS[1], Olivier GUERRI[2]

[1] EPIDOR – m.thomas@eptb-dordogne.fr
[2] EPIDOR – o.guerri@eptb-dordogne.fr

Le bassin de la Dordogne a été à plusieurs reprises touché par des phénomènes qui peuvent être qualifiés de ruissellement (juin 2007, mai-juin 2008, juin-juillet 2018).
EPIDOR (EPTB du bassin de la Dordogne) s'est impliqué depuis plusieurs années autour de cette problématique, pour chercher à mieux la connaître et la prendre en compte dans le cadre de l'aménagement du territoire.
Après un premier travail de retour d'expérience, une étude de caractérisation a été engagée en 2015, aboutissant à des cartes de susceptibilité à la production, au transfert et à l'accumulation de ruissellement. Les résultats sont utilisables à une échelle macroscopique ou régionale mais parfois plus difficilement à une échelle locale ; leur retranscription dans les documents d'urbanisme s'est donc avérée peu évidente.
Par la suite, une déclinaison locale a été réalisée à l'échelle d'un PLUi. Chaque zone « A Urbaniser » du PLUi a été expertisée et une note d'« enjeu ruissellement » a été attribuée. Le travail a apporté une plus-value pour les réflexions dans la planification urbaine mais a réclamé une expertise fine, rendant l'exercice difficilement reproductible pour chaque document d'urbanisme.
Grâce désormais aux dernières données topographiques disponibles, une nouvelle modélisation est engagée en 2020 à l'échelle du bassin de la Dordogne. Elle se basera la méthodologie « Exzeco » développée par le Cerema. L'idée est de disposer d'une cartographie des « chemins de l'eau » ou « zones inondables potentielles », qui puisse être facilement interprétée et utilisée.
Mots-clefs : Bassin Dordogne, ruissellement, aménagement du territoire

Improving surface runoff in the Dordogne basin: feedback and surveys initiated by EPIDOR

The Dordogne basin has been repeatedly affected by phenomena that can be described as runoff (June 2007, May-June 2008, June-July 2018).
EPIDOR (EPTB of the Dordogne basin) has been involved for several years around this issue, to understand it and take it into account in the context of regional planning.
After initial feedback, a characterization study was launched in 2015, leading to maps of susceptibility to production, transfer and accumulation of runoff. The results can be used on a macroscopic or regional scale but with more difficulties on a local scale; their transcription in the urban planning documents was therefore not very obvious.
Subsequently, a local variation was carried out on the scale of a PLUi. Each zone planned to be urbanized has been assessed. The work provided added value for reflections in urban planning but required fine expertise, making the exercise difficult to reproduce for each urban planning document.
Thanks to the latest available topographic data, new modeling is planned in 2020 across the Dordogne basin. It will be based on the "Exzeco" methodology developed by Cerema. The idea is to have a map of "waterways" or "potential flood zones", which can be easily interpreted and used.
Key words : Dordogne Basin, runoff, regional planning.

CONTEXTE

Le bassin de la Dordogne est un territoire vaste d'environ 25 000 km², sur lequel différentes problématiques d'inondations se présentent.

Les risques d'inondation sur les principaux cours d'eau (Dordogne, Isle, Vézère, Dronne…) sont relativement bien connus. Des études hydrauliques identifient l'emprise des zones inondables (cf figure 1), permettant de contrôler l'aménagement du territoire par l'intermédiaire de PPRI (Plan de Prévention du Risque Inondation) qui valent servitude d'utilité publique et s'imposent aux documents d'urbanisme. Des Atlas de

Zones Inondables (AZI) sont parfois également disponibles en complément ; ils n'ont pas forcément la même précision et portée que les PPRI mais doivent être pris en compte dans le cadre de l'aménagement du territoire.

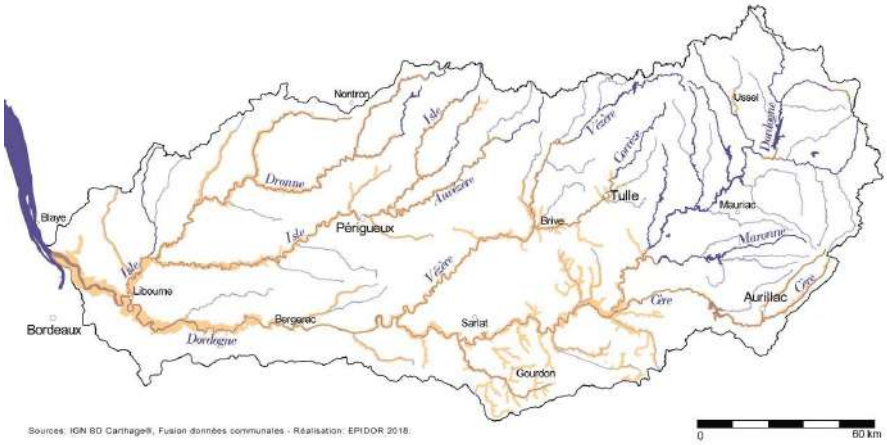


Figure 1 : Principales zones inondables identifiées sur le bassin Dordogne (PPRI et AZI)

En dehors des zones couvertes par des PPRI ou des AZI, on trouve encore de très nombreux secteurs de passage de l'eau. On évoque alors souvent la problématique de ruissellement, même si derrière cette notion peu évidente, différents phénomènes peuvent se retrouver. De façon générale, le ruissellement caractérise l'eau qui plutôt que de s'infiltrer, va s'écouler en surface. Lié souvent à des orages avec des pluies intenses, il peut se traduire par l'accumulation d'eau dans des vallées sèches, par le gonflement de cours d'eau, par des coulées de boues. En secteur urbain, on l'évoque souvent lorsque l'eau s'écoule sur les surfaces imperméabilisées, parfois à cause d'une saturation des réseaux d'eau pluviale. Les perturbations ou dommages peuvent être divers : danger pour les personnes, inondation de maisons ou autres infrastructures, dégradations de routes, érosion des sols et de parcelles agricoles…

De tels phénomènes ont touché plusieurs secteurs du bassin de la Dordogne, en juin 2007, mai 2008 ou plus récemment en mai-juin 2018.

EPIDOR (Etablissement Public Territorial du Bassin de la Dordogne) travaille sur la gestion de l'eau et des rivières à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Dordogne. Animateur de PAPI (Programme d'Actions de Prévention des Inondations), l'établissement a identifié cette problématique de ruissellement comme forte sur son territoire. Il a donc été décidé mieux l'identifier, avec l'objectif d'éviter notamment des erreurs d'aménagement du territoire. Le travail engagé par EPIDOR s'est décliné en plusieurs étapes.

RETOUR D'EXPERIENCE SUR DES EPISODES PASSES

La première étape a consisté à lancer une étude de retour d'expérience sur trois épisodes orageux intervenus en juin 2007 et en mai 2008. Pour chacun de ces évènements, les cumuls pluviométriques ont atteint entre 50mm et 100mm en moins d'une journée sur plusieurs secteurs du bassin de la Dordogne. Le retour d'expérience a été réalisé par un prestataire sur une cinquantaine de Communes, avec analyse de situation et des dégâts et dommages après prise de contact avec des élus ou employés communaux.

Il s'avère que les conséquences ont été assez contrastées d'une Commune à une autre, dépendant bien évidemment des intensités pluviométriques, mais aussi de caractéristiques physiques tels que la pente, la géologie et l'hydrogéologie, ou encore des ouvrages hydrauliques (traversée de route par des cours d'eau / fossés, collecteurs urbains), du mode d'urbanisation, de la structure des bâtis touchés…

PREMIERES CARTOGRAPHIES DE CARACTERISATION DU RUISSELLEMENT

Par la suite, EPIDOR a engagé un appel d'offres pour une étude cartographique de caractérisation du ruissellement à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Dordogne. L'objectif étant de chercher à prendre en compte cette problématique dans le cadre de l'aménagement du territoire. Les données topographiques de l'époque étaient assez hétérogènes : données LIDAR (issues de passages aériens qui fournissent un point tous les mètres en X, Y) disponibles sur les grandes vallées fluviales, et données de base de la BD-ALTI de l'IGN (un point tous les 25 mètres environ en X, Y) sur le reste du territoire. Différents modèles ont été utilisés (SCS-

CN, IRIP, STREAM) et ont permis d'élaborer cartographies de susceptibilité à la production, au transfert et à l'accumulation de ruissellement.

Les résultats sont utilisables à une échelle macroscopique ou régionale (Figures 3, 4 et 5), mais parfois plus difficilement à une échelle locale car les 3 cartes disponibles demandent une certaine expertise en termes de lecture. Elles permettent de mieux appréhender le phénomène de ruissellement mais on n'y retrouve pas forcément les talwegs de l'ensemble des cours d'eau. Ainsi, leur retranscription dans les documents d'urbanisme s'est donc avérée peu évidente dans un premier temps, malgré une notice établie par les prestataires avec une liste de préconisations.

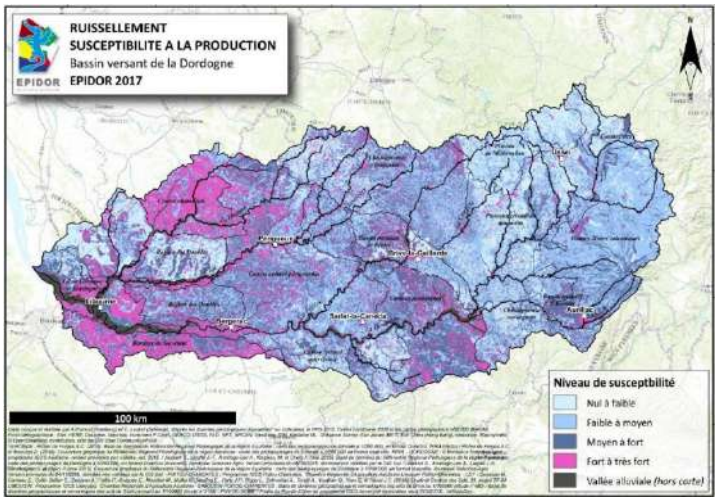


Figure 3 : Susceptibilité à la production sur le BV Dordogne

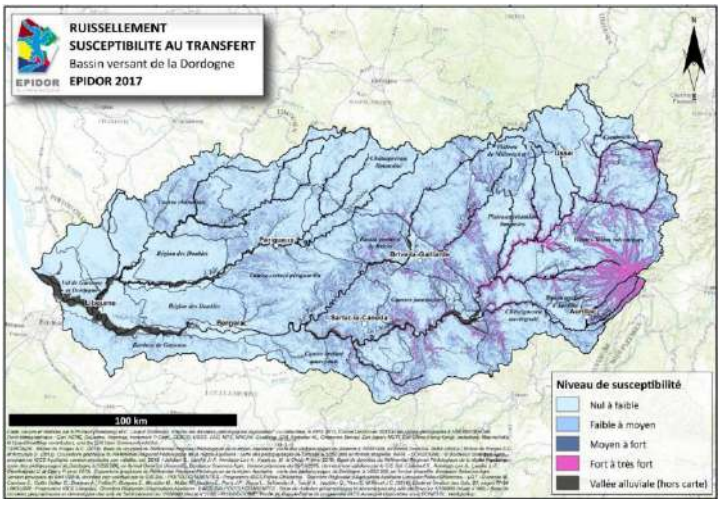


Figure 2 : Susceptibilité au transfert sur le BV Dordogne

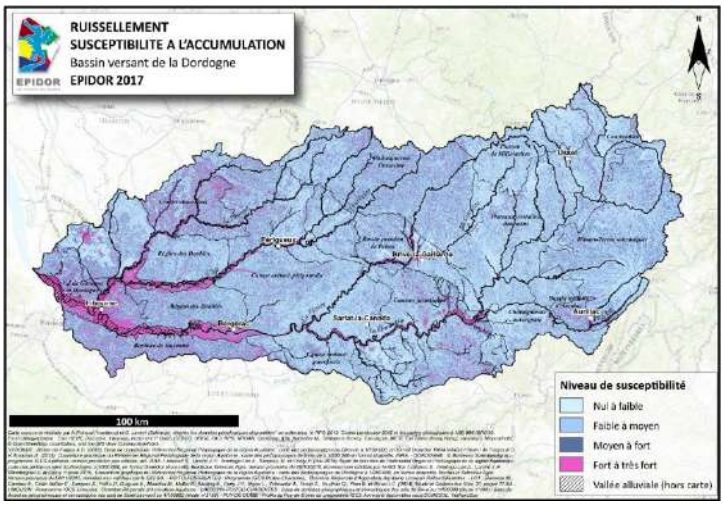
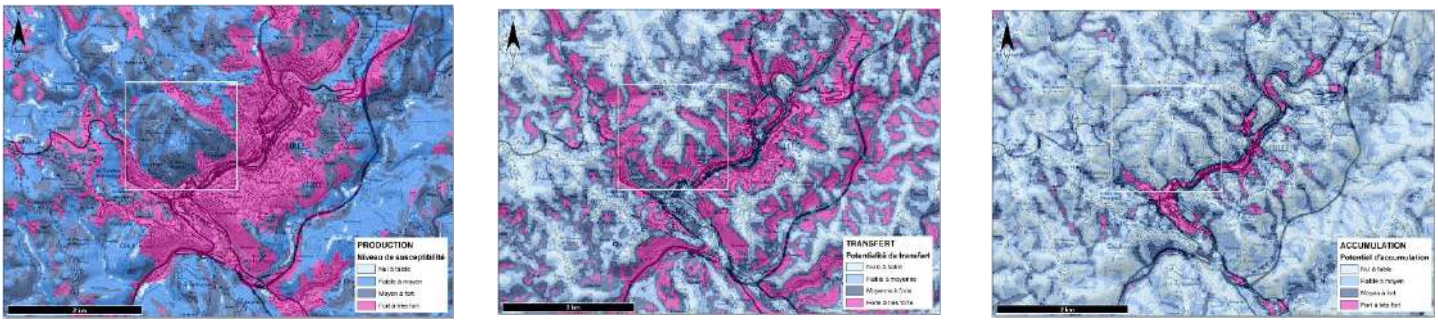


Figure 4 : Susceptibilité à l'accumulation sur le BV Dordogne



Figures 5 : Susceptibilité à la production, au transfert et l'accumulation de ruissellement autour du secteur de Tulle (Corrèze)

DECLINAISON A L'ECHELLE D'UN DOCUMENT D'URBASNIME : LE PLUI BERGERACOIS

Pour progresser dans l'utilisation des résultats du travail précédent dans le cadre de l'aménagement du territoire, une déclinaison locale a été réalisée à l'échelle du PLUi bergeracois. Chaque zone ciblée « A Urbaniser » du PLUi a été expertisée, avec une note d'« enjeu ruissellement » délivrée. Le travail a permis de discuter du maintien ou non de certaines zones « A Urbaniser ». En revanche, il a réclamé une expertise fine, rendant l'exercice difficilement reproductible pour chaque document d'urbanisme.

L'exercice d'une cartographie unique a également été tenté (cf figure 6). Une dizaine de groupes de susceptibilité ont été distingués, nécessitant toujours une expertise dans la lecture et l'interprétation.

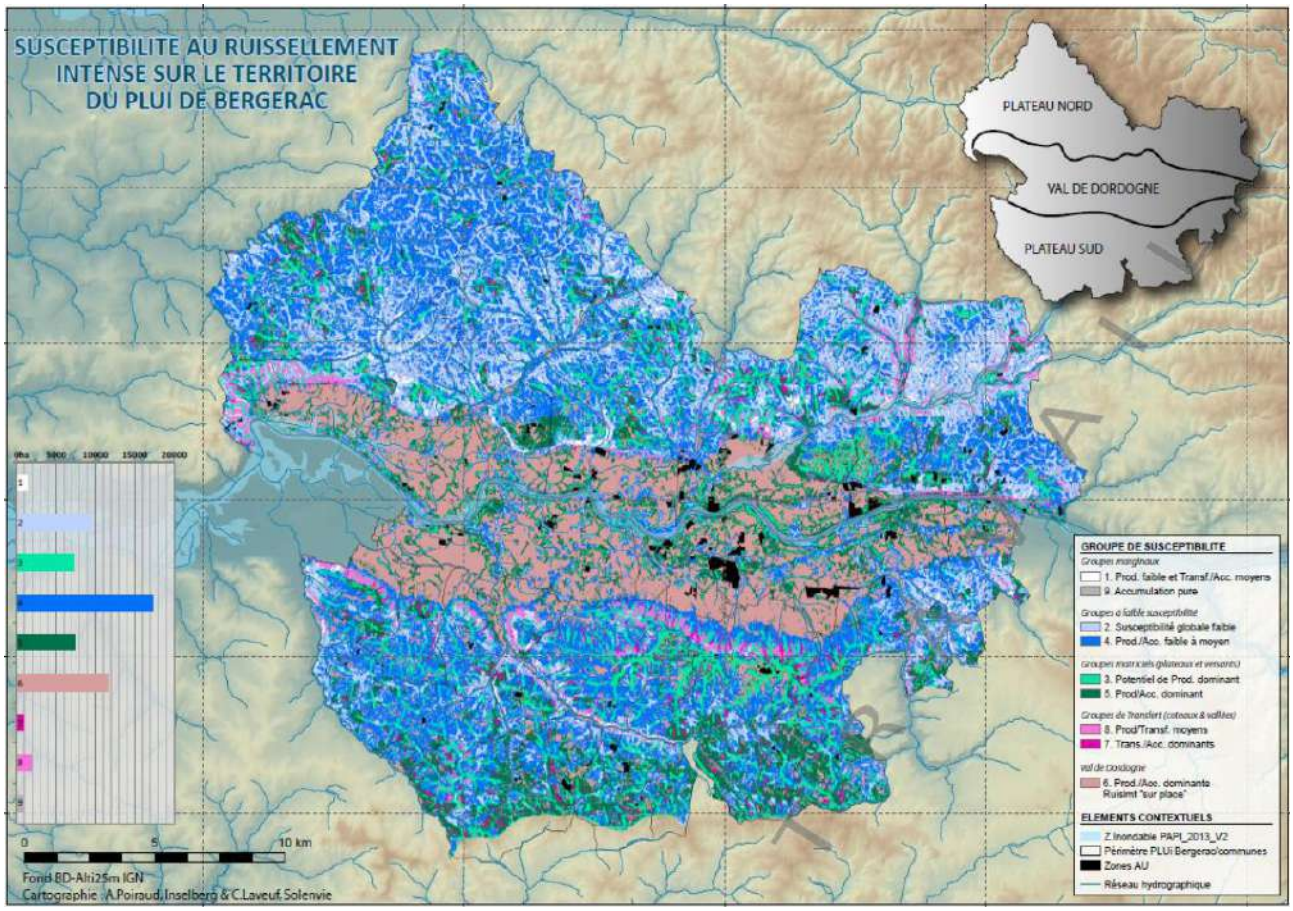


Figure 6 : Cartographie unique de susceptibilité de ruissellement établie pour le PLUI Bergeracois

TEST DES CHEMINS DE L'EAU SUR LE TERRITOIRE BERGERACOIS

Assez récemment, l'IGN a rendu disponibles de nouvelles données topographiques sur le bassin de la Dordogne. Les données LIDAR (un point tous les mètres en X, Y) couvrent désormais plus de la moitié du territoire. Des données dites « corrélées » (issues de données radar, un point tous les 3 à 5 mètres en X ,Y environ) sont également disponibles sur certaines parties du bassin versant. Pour les zones blanches restantes, ce sont les données de base de la BD-ALTI de l'IGN qui sont fournies (cf figure 7Figure 7).

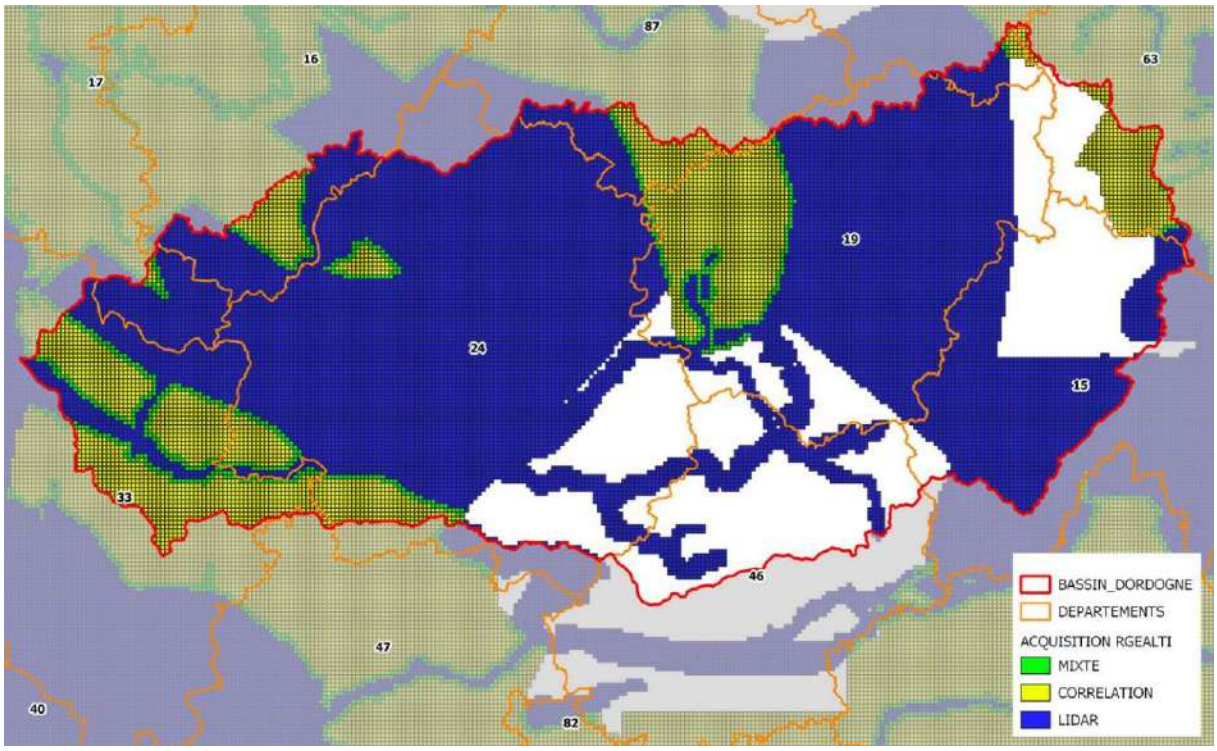


Figure 7 : Nouvelles données topographiques de l'IGN aujourd'hui récupérées

Ces nouvelles données ont permis d'engager une nouvelle phase test sur le secteur bergeracois, de modélisation de zones « inondables potentielles » ou « chemins de l'eau ». Deux méthodologies ont été comparées : méthodologie de type « Exzeco » du Cerema et de type « SAGA-TWI (cf figures 8 et 9) :

- Exzeco est un modèle topographique probabiliste, qui fournit une carte facilement compréhensible ; il nécessite des calculs relativement lourds (nombre d'itérations important pour obtenir une enveloppe de zone potentiellement inondable).
- SAGA-TWI consiste pour chaque pixel à effectuer un calcul qui tient compte de l'aire drainée amont et de la pente du pixel. La méthode nécessite une expertise pour le paramétrage en fonction du secteur d'étude.

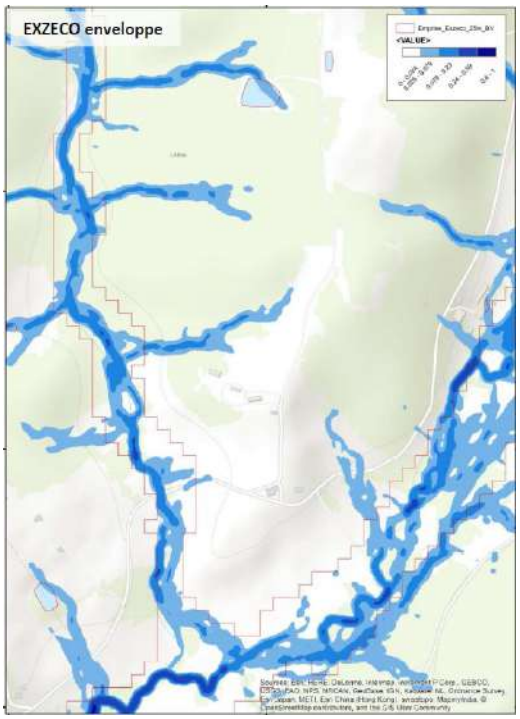


Figure 9 : Modélisation test des chemins de l'eau par Exzeco sur un secteur du Bergeracois

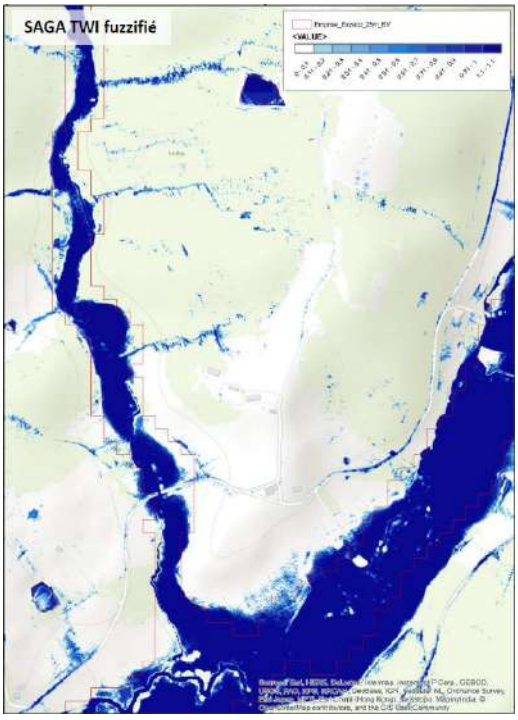


Figure 8 : Modélisation test des chemins de l'eau par SAGA-TWI sur un secteur du Bergeracois

Quelle que soit la méthode, le rendu avec cartographie unique de zones potentielles d'inondation présente l'avantage d'une simplicité de lecture.

Il est utile de préciser que le travail de modélisation de type « Exzeco » a déjà été engagé par l'Etat avec le Cerema sur l'ensemble de l'Arc Méditerranéen (soumis à des crues éclairs). Sur certains départements, les services de l'Etat ont développé des doctrines d'utilisation des résultats dans le cadre de la planification urbaine.

MODELISATION DES CHEMINS DE L'EAU SUR TOUT LE BASSIN DE LA DORDOGNE

Après cette dernière phase test, EPIDOR a décidé d'engager une modélisation des « chemins de l'eau » ou « zones potentielles d'inondation » sur l'ensemble du bassin de la Dordogne.

Un appel d'offre a été lancé et le Cerema a été retenu pour engager ce travail courant 2020 (les premiers résultats seront attendus pour l'été). L'objectif principal reste de mieux prendre en compte la problématique de ruissellement dans le cadre de l'aménagement du territoire, ce qui pourrait se traduire dans les documents d'urbanisme mais également dans d'autres domaines : érosion des sols et agroforesterie, gestion des zones humides et des fossés routiers…

CONCLUSIONS

Les différentes étapes engagées jusqu'à présent par EPIDOR autour du ruissellement sur le bassin de la Dordogne ont permis de progresser dans la compréhension des phénomènes.

Certains résultats se sont parfois révélés difficiles à interpréter et à utiliser, mais le besoin de prendre en compte ce type de risque dans l'aménagement du territoire se fait toujours sentir. C'est d'autant plus le cas que les problèmes locaux d'inondation liés à des orages locaux et des pluies intenses sont assez réguliers ces dernières années, souvent assimilés à la question du changement climatique.

Il est fortement espéré que la nouvelle étape (en cours), de modélisation des « chemins de l'eau » via la méthodologie Exzeco se révélera utile pour les collectivités locales. En attirant une vigilance, elle pourrait permettre d'éviter certaines erreurs d'aménagement qui ont pu se faire par le passé…

REFERENCES

Inselberg pour EPIDOR (2019). *Phase test pour une modélisation des « chemins de l'eau » sur le bassin de la Dordogne.*

Inselberg et Solenvie pour EPIDOR (2018). *PLUI de Bergerac – méthodologie de prise en compte de l'aléa ruissellement et préconisations*.

Inselberg et Solenvie pour EPIDOR (2017). *Cartographie du ruissellement lié à des pluies intenses sur le bassin versant de la Dordogne.*

Emma HAZIZA pour EPIDOR (2010). *Etude de retour d'expérience de trois épisodes orageux de juin 2007 et mai 2008 sur le bassin de la Dordogne.*

Prévenir du risque de ruissellement via un système d'alerte basé sur l'imagerie satellite radar (James *et al.*)

Prévenir du risque de ruissellement via un système d'alerte basé sur l'imagerie satellite radar

Julia JAMES[1], Jean-François BERTHOUMIEU[2]
Mael AMELINE[3]

[1] ACMG – Aérodrome Garenne 47520 Le Passage – acmg.environnement@orange.fr
[2] ACMG –Aérodrome Garenne 47520 Le Passage – acmg@acmg.asso.fr
[3] ACMG-Aérodrome Garenne 47520 Le Passage- acmg.teledetection@orange.fr

L'Association Climatologique de la Moyenne Garonne (ACMG) étudie les aléas climatiques qui impactent le Lot et Garonne, plus largement les territoires ruraux, péri-urbains et urbains, et les moyens de s'adapter localement afin de prévenir le risque et d'aménager les bassins versants en fonction du risque. Pour cela un travail pluridisciplinaire est mené, il s'agit de cerner les risques via la télédétection et la climatologie; et d'analyser l'articulation entre les acteurs présents sur le territoire via une analyse territoriale mêlant histoire, sociologie et économie.

L'un des principaux impacts induit par les aléas est l'érosion. Celle-ci marque à la fois les espaces ruraux et les espaces urbanisés. L'ACMG développe un outil permettant de cerner le risque d'érosion via les images satellites radar. Aujourd'hui cet outil est mis en service et en voie d'automatisation.

L'outil permet de déterminer l'occupation principale des parcelles agricoles à partir du registre parcellaire général et des images satellites de Sentinel 1. L'utilisation de l'imagerie satellite radar est la principale innovation de cet outil.

Mots-clefs : Erosion, climat, agriculture, satellite

Prevent the risk of erosion via an alert system based on radar satellite imagery.

The Association Climatologique de la Moyenne Garonne studies the climatic hazards that impact the Lot et Garonne, and more generally the rural, peri-urban and urban territories, and the ways to adapt locally in order to prevent the risk and to develop the catchment basins according to the risk. To do this, a multidisciplinary work is carried out to identify the risks via remote sensing and climatology; and to analyse the articulation between the actors present on the territory via a territorial analysis combining history, sociology and economy.
One of the main impacts induced by hazards is erosion. It affects both rural and urban areas. The ACMG is developing a tool to identify the risk of erosion using satellite radar images. This tool is now being put into service and is in the process of being automated. The use of radar satellite imagery is the main innovation of this tool.

Key words : Erosion, climat, agriculture, satellite

INTRODUCTION

L'Association Climatologique de la Moyenne Garonne et du Sud-Ouest étudie les aléas climatiques et l'évolution du climat depuis 1959. Aujourd'hui, l'ACMG travaille autour de l'adaptation au changement climatique et de l'atténuation des effets.

En 30 ans il est possible d'observer une augmentation de la température annuelle moyenne de 1.3°C à partir de la station météorologique située à Agen. On observe une augmentation des journées de plus de 35°C en moyenne et l'apparition des journées à plus de 40°C en moyenne depuis 2003.

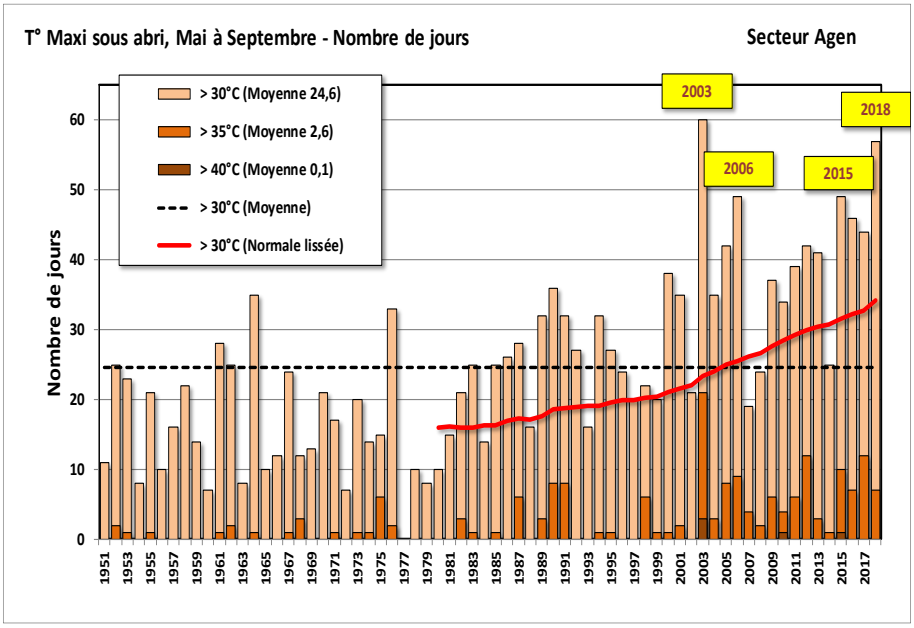


Figure 1 Augmentation des températures entre 1951 et 2017 au sein du Lot et Garonne.

Tandis que les températures augmentent la quantité des précipitations reste stable, on remarque cependant une modification progressive de la distribution de ces pluies : augmentation des orages violents, raréfaction des pluies en été. Ces phénomènes climatiques engendrent une augmentation des risques sur le territoire dans le milieu agricole (manque d'eau, érosion, qualité de l'eau insuffisante, destruction des cultures, lessivage …).

En 2017, le projet *interreg Risk-AquaSoil* voit le jour pour répondre aux besoins des territoires : pouvoir quantifier le risque et proposer des mesures viables face à ce risque. Le projet se concentre donc sur la mise en place d'outils et sur l'étude des territoires pour comprendre les bassins versants, leur fonctionnement, les besoins, les freins rencontrés par les différents acteurs.

Dans cet objectif, l'ACMG a mis en place un outil pour déterminer rapidement les occupations du sol afin de cartographier le risque d'érosion au sein des territoires et ainsi prévenir l'érosion mais aussi aménager les zones fréquemment en situation de risque sur du moyen-long terme.

Afin de proposer des mesures viables et durables face au risque cerné via l'imagerie satellite, l'ACMG a mené des enquêtes socio-économiques auprès de différents acteurs tels que les Maires et les agriculteurs afin de saisir leurs besoins, leur vision du futur avec les aléas climatiques.

LE RISQUE D'EROSION :

Au sein de notre zone, l'intensité des pluies combinée à l'occupation du sol et à la pente sont les facteurs principaux du phénomène d'érosion. Les périodes de travaux agricoles sont les plus sujettes au risque d'érosion : ces dernières années les pluies s'intensifient au printemps et à l'automne tandis que les sols s'assèchent ce qui entraîne des lessivages de semis ainsi que la perte des principaux éléments du sol.

Dans l'objectif de proposer un outil efficace et rapide, l'ACMG a décidé de produire des cartes d'occupation du sol selon les pentes moyennes des parcelles avec quatre occupations du sol :

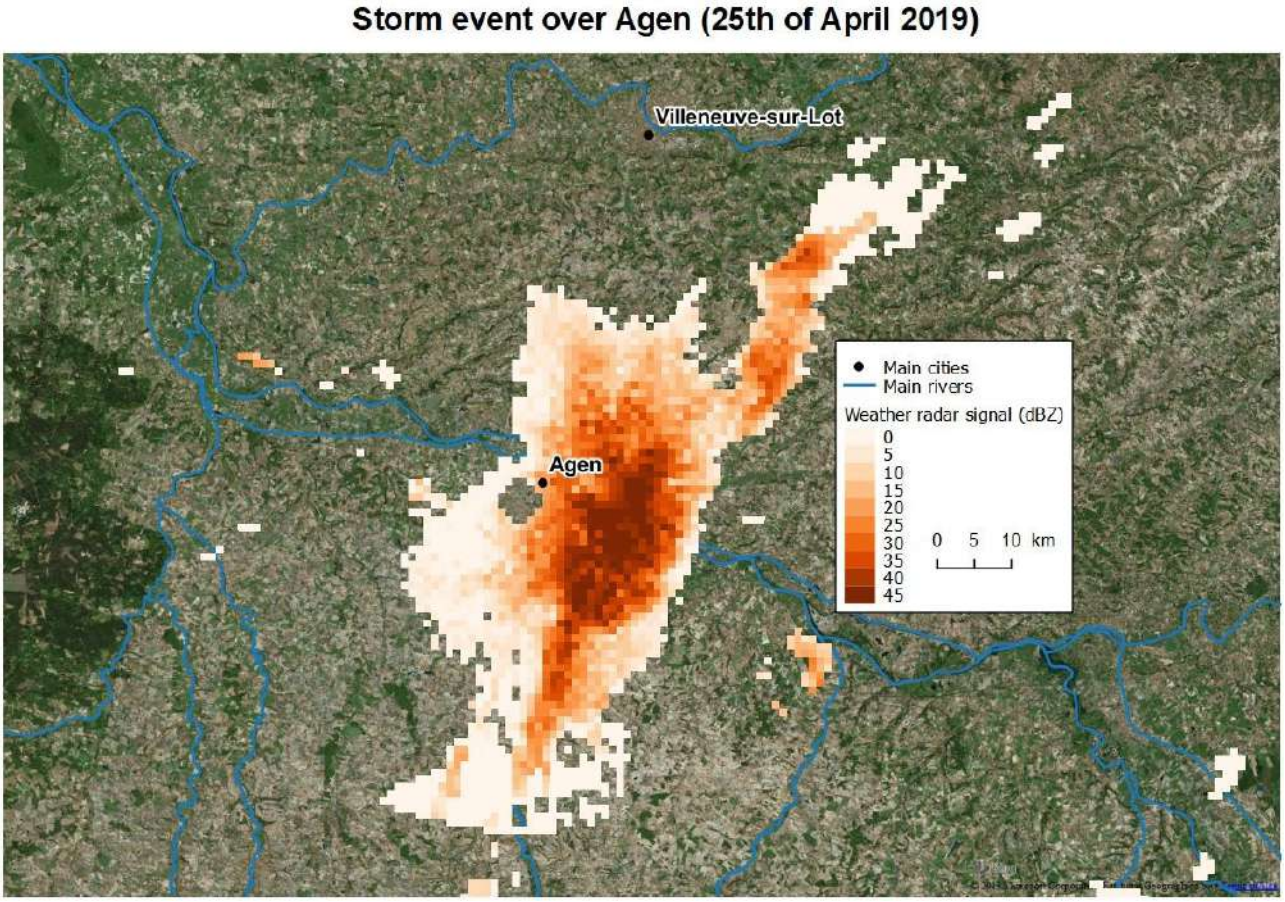
- Végétation active : végétation en capacité de retenir les flux de ruissellement et de permettre l'infiltration de l'eau
- Vigne
- Parcelle boisée
- Sols nus

Le travail s'effectue sur le parcellaire agricole pour plusieurs raisons :

- Le parcellaire agricole représente en moyenne 60% des bassins versants du Lot et Garonne.
- Aujourd'hui de nombreux conflits entre les acteurs émergent au sein des territoires et reposent sur l'agriculture.
- Les pratiques agricoles sont une source importante du phénomène d'érosion.

- Travailler sur le milieu agricole permettra ensuite de relier les acteurs entre eux, chacun d'eux présentant des avantages pour l'autre. Notre objectif final étant de convaincre les acteurs locaux à soutenir l'adaptation des parcelles agricoles (apport en nutriments, bande enherbées, couvert, haie).

Une fois les cartes produites, l'ACMG relie l'état des cours d'eau, l'intensité de la pluie et l'occupation du sol afin de qualifier le ruissellement et de pouvoir par la suite modéliser le risque via une plateforme en ligne. La plateforme est aujourd'hui en cours de développement. L'Association dispose d'un radar météorologique fournissant des données de quantité et d'intensité des pluies dans un rayon de 100 km chaque minute.



Des sondes d'humidité du sol sont positionnées aux abords des cours d'eau pour suivre l'état de saturation du sol et ainsi relier l'occupation du sol avec l'effet de ruissellement. Des capteurs de température, turbidité et de niveau d'eau ont été positionnés au sein de certains cours d'eau pour pouvoir relier les phénomènes entre eux.

Il a été démontré, grâce aux sondes d'humidité, qu'un sol végétalisé et/ou structuré peut recevoir 80mm de pluie entre le bas de la RFU (réserve utile en eau) et l'état de saturation (début du phénomène de ruissellement) tandis qu'un sol nu, tassé arrive à saturation avec 35 mm de pluie.

Les cartes permettent alors de saisir les zones d'infiltration à améliorer via la végétation pour augmenter la recharge des nappes phréatiques et la teneur en eau des sols.

Les cartes d'occupation du sol, combinées aux outils technologiques sont des outils permettant le maintien économique et environnemental des bassins versants.

UTILISATION DE L'IMAGERIE SATELLITE POUR DETERMINER LE RISQUE

Méthode : Sentinel 1comme source de données

Pour déterminer l'occupation du sol des bassins versants, il est possible d'utiliser les images optiques et radar. L'ACMG s'est concentrée sur l'imagerie radar afin de pallier aux problèmes causés par les nuages, les périodes les plus propices à l'érosion étant aussi les plus pluvieuses.

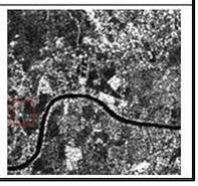
	OPTIQUE	RADAR
PASSAGE	6 jours	6 jours
CONDITION D'OBSERVATION	soleil, sans nuages	Tout temps, toute heure
COMPREHENSION DE L'IMAGE	Aisée	Moins aisée
EXEMPLE		

Figure 2 Comparaison satellite optique et radar.

Les images utilisées proviennent du satellite Sentinel 1 avec un pixel 10m*10m après échantillonnage. Les polarisations radar utilisées dans le cadre de cette étude sont VH et VV, celles-ci étant sensibles à la rugosité, à l'humidité et à la structure des milieux observés.

Une fois l'image téléchargée, celle-ci est calibrée et géorectifiée sur le logiciel libre de droit SNAP. Un des objectifs de l'ACMG est de produire un outil à faible coût, l'utilisation de logiciels libres de droit a été une volonté dans le cadre de ce travail.

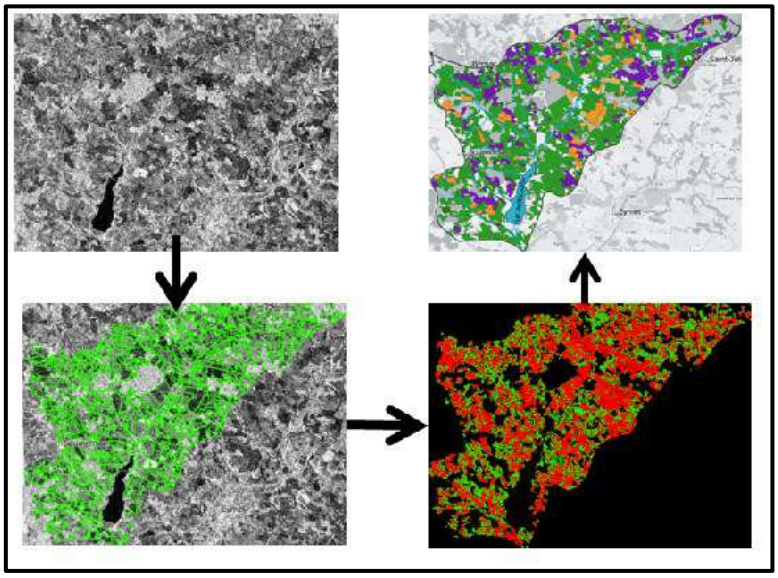


Figure 3 Schéma de la procédure pour déterminer l'occupation du sol.

L'étape de classification des occupations des bassins versants se déroule sur le logiciel payant ENVI. Cette étape consiste à classifier les pixels au sein des parcelles agricoles selon leur valeur en décibels. Pour cette étape, un travail d'identifcation des comportements des parcelles selon les différents signaux radar a été mené.

Les comportements des principales cultures et occupations du sol ont été tracés sur plusieurs années afin de saisir les seuils de décibels permettant de distinguer les cultures entre elles. La polarisation VH permet de

distinguer les cultures hautes lors des périodes automnales, tandis que deux polarisations devront être utilisées pour regrouper l'ensemble des parcelles de végétation active au printemps.

Suite à la classification des pixels, le logiciel QGIS est utilisé pour déterminer l'occupation majoritaire des parcelles grâce à des statistiques de zone et à la sélection de l'occupation médiane au sein des parcelles. Une fois la classe sol nu déterminée, il s'agit de comprendre l'exposition de ces sols nus face au risque d'érosion.

Les sols nus sont classés selon 3 catégories de pentes moyennes au sein de la parcelle : **pente <2° → Risque faible, Pente ≥2° et <6° → Risque modéré, Pente ≥6° → Risque élevé**. Les catégories de pentes ont été déterminées dans le cadre du projet Interreg auprès de partenaires spécialisés dans l'étude du phénomène (West Country RiverTrust).

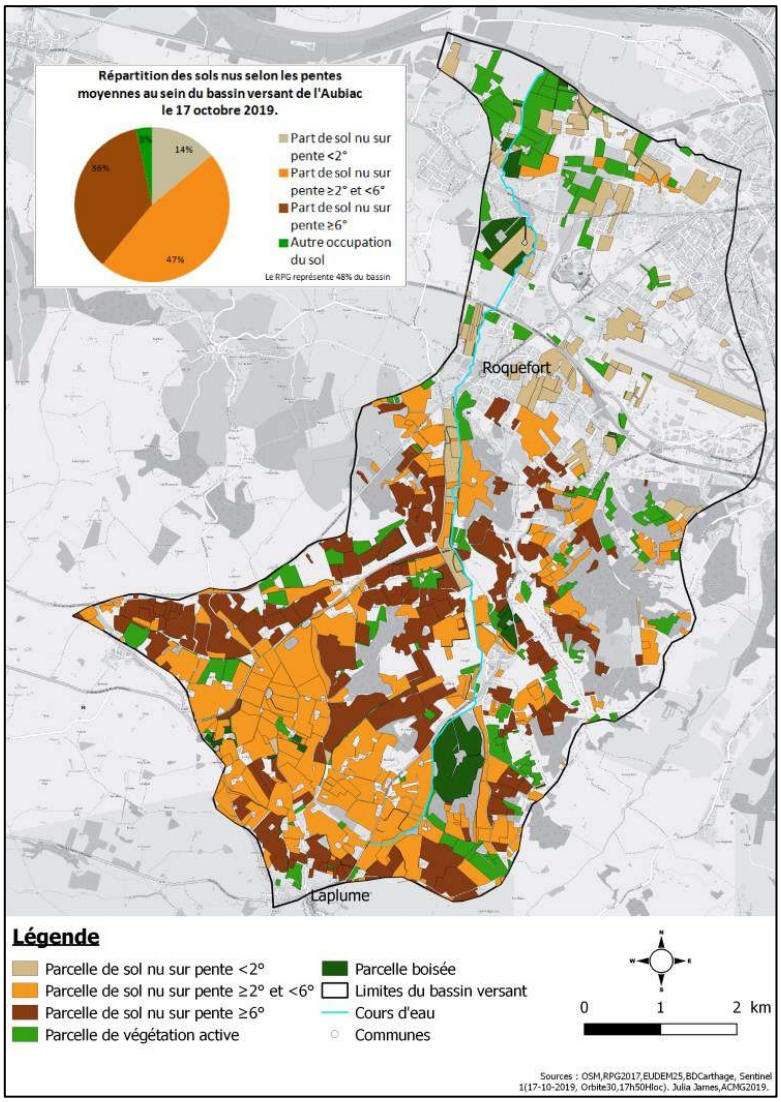


Figure 4 Exemple de carte du risque d'érosion produite par l'ACMG.

Validation de la méthode

La méthode a été validée via plusieurs démarches :

Utilisation des données existantes : le RPG (Registre Parcellaire Graphique) a été utilisé lors du tracé du comportement des cultures selon les différentes polarisations radar. Le satellite Sentinel 1 a été mis en service en 2015, le RPG 2015 et 2016 ont permis de vérifier les identifications des occupations du sol faites à partir de 2017 sur les années 2015 et 2016.

Observation des territoires et référencement de parcelles de validation : afin d'obtenir des parcelles de référence pour publier les matrices de confusion lors de la mise en place de la méthode mais aussi pour valider les observations durant les périodes clés, des vols en planeur sont exécutés. Ces vols permettent de vérifier les occupations à grande échelle, de photographier les parcelles afin de recueillir des données de référence.

Utilisation des images optiques : le NDVI (indice de végétation) obtenu à partir des bandes rouge et proche infra-rouge des satellites optiques permet de valider ou non les classifications faites chaque mois par l'ACMG. Il a été possible de remarquer que les comportements du signal divergent selon le relief, aujourd'hui les milieux à haut relief ne sont pas encore observés par l'ACMG.

Contact terrain : les agriculteurs ainsi que les organismes présents sur le terrain et observant les phénomènes d'érosion fournissent des informations permettant de valider ou non la méthode.

Suite aux pluies intenses au printemps 2020, une concordance a été remarquée entre les observations terrain suite à des pluies intenses (60mm d'eau tombée en moins de 24 heures) et les cartes produites par l'ACMG.

Figure 5 Cartographie du risque et illustration sur le terrain.

Utilisation actuelle des cartes

Aujourd'hui les cartes sont mises à disposition chaque mois sur le site internet de l'ACMG pour la zone du Lot et Garonne. (http://www.acmg.asso.fr/)

Ces cartes sont commandées par différents acteurs dans le cadre de l'amélioration de la qualité de l'eau des cours d'eau des bassins versants. Véritables outils de travail, les acteurs souhaitent obtenir des données d'occupation du sol sur plusieurs années (les rétrospectives sont possibles jusqu'à 2015) pour relier les évènements climatiques et les observations terrain. Dans le futur, il sera possible de cartographier le risque selon la fréquence d'exposition d'une même parcelle.

Enfin, cette méthode est aujourd'hui utilisée dans le cadre du programme européen Clim'Alert qui vise à développer une plateforme pour prévenir autour du risque en temps réel.

ELABORER FACE AU RISQUE

Une étude socio-économique a été menée pour connaître la disposition des acteurs à s'adapter face aux aléas, leurs besoins, les freins qu'ils rencontrent. Ce travail a permis d'améliorer nos connaissances concernant un milieu et ses acteurs, d'alimenter les connaissances local-global mais aussi d'instaurer une méthode d'analyse des besoins locaux et de la capacité d'adaptation.

Tandis que les agriculteurs ont été interrogés via des questions ouvertes afin de saisir leur regard et leur sensibilité sur le changement climatique et l'avenir des exploitations, les Maires ont été interrogés dans le cadre de leur fonction via des questions à choix multiples. Qualitatives, ces enquêtes ont permis de mettre au jour plusieurs points :

- Les agriculteurs sont témoins du changement climatique, 80% d'entre eux utilisent le terme d'extrême climatique pour évoquer les aléas climatiques les plus dévastateurs au sein de leur exploitation. Un extrême a tendance à impressionner, dominer et inhiber les actions ; la situation est vue aujourd'hui comme une calamité non physique ou presque ; la notion d'extrême climatique indique un point de non retour chez les agriculteurs.
- La majorité des agriculteurs déclarent s'adapter face aux impacts ; cependant ces adaptations ne passent pas par les mesures préconisées. Concernant le futur, les agriculteurs réclament un meilleur accès à l'irrigation pour pouvoir s'adapter.

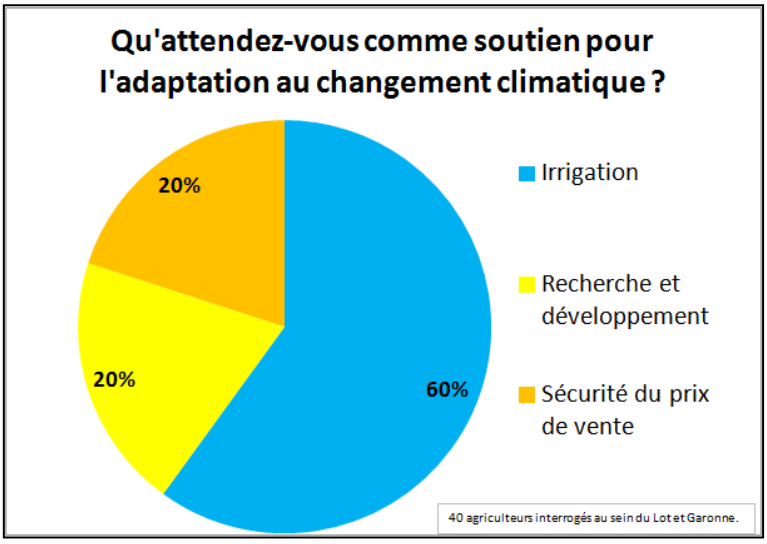


Figure 6 Réponses des agriculteurs lors des interviews menées dans le cadre du projet autour de l'érosion.

- Au niveau des mairies la notion de risque et d'adaptation au risque est issue de facteurs qui ne sont pas définis localement, les décisionnaires ne sont pas appelés à définir le changement climatique. Il

est aujourd'hui possible de remarquer deux tendances fortes au sein des collectivités locales : une appropriation de la cause climatique ou au contraire une désappropriation totale de la question climatique.

- Les exploitants agricoles rejettent l'idée de subvention, celle-ci venant pervertir le système agricole. Les Maires et élus rejoignent cette idée. Selon les décisionnaires locaux, l'adaptation au changement climatique passe par des aides à l'investissement et de la recherche et développement.

CONCLUSIONS

L'outil pour déterminer l'occupation du sol est aujourd'hui utilisé pour répondre à différentes problématiques climatiques telles que la qualité de l'eau mais aussi l'amélioration du stockage de l'eau, la formation d'ilots de fraicheur (IFU). Véritable source de données, l'outil répond à une demande croissante sur le terrain et a pu faire ses preuves auprès d'agglomérations, de syndicat des eaux, de chambres d'agriculture.

Les cartes de risque combinées à une connaissance du contexte et des attentes permettent de tisser un lien ville-campagne, zone urbanisée-zone agricole. Aujourd'hui il convient d'améliorer notre connaissance des risques mais aussi de renouveler la culture autour des aléas climatiques afin d'améliorer la résilience au sein des bassins versant.

BIBLIOGRAPHIE

- Borelli P, Robinson D, Fleischer L, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Meusburger K, Modugno S, Schutt B, Ferro V, Bagarello V, Van Oost K, Montanarella L, Panagos P, An assessment of the global impact of the 21st century land use change on soil erosion. Nature communications 8, 2017.
- Flottum K, Quelles conceptions du « changement climatique » en France et en Norvège ? Résultats de deux enquêtes. Congés mondial de linguistique française. 2018
- Fournier F, L'érosion hydrique et le climat, Bulletin technique de l'information 237, 1969.
- Markantonis V, Bithas K, The application of the contingent valuation method in estimating the climate change mitigation and adaptation policies in Greece. An expert-based approach, 2010.
- Mohamadi M.A, Kavian A, Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots, International Soil and Water Conservation Research 3, 273-281, 2015.
- Moser S, Reflection on climate change communication research and practice in the second decade of the 21st century : what more is there to say ? WIREs Clim change 2016
- Ndebele T, Forgie V, Estimating the economic benefits of a wetland restoration programme in New Zealand: A contingent valuation approach. Economic Analysis and Policy 55, 75-89, 2017.
- Rivière G, L'interaction Homme-Machine contre le changement climatique : retour sur une controverse. HAL 2018
- Rossi G, Notre érosion et celle des autres, Chiers Outre Mer 50, 1997.
- Smith R, Soils and natural flood management, Devon and Cornwall, Catchment Based Approach 2017.
- Talab Ou Ali H, Niculescu S, Sellin V, Bougault C. Contribution de la nouvelle série d'images Sentinel-1 pour le suivi de la vegetation côtière dans le pays de Brest. Spatial Analysis and GEOmatics 2017.
- Urban M, Berger C, Mudau Tami E, Heckel K, Truckenbrodt J, Odipo V O, Smit Izak PJ, Schmullius C, Surface moisture and vegetation cover analysis for drought monitoring in the southern Kruger national park using Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat-8, Romte Sensing 10, 2018.
- Vilagra P, Drivers of Community Resilience to Natural Hazards: The Experience in Southern Chile, Environment Science and Policy for sustainable development, 2019.

Cartographie du ruissellement de surface - CRUS
(Remy *et al.***)**

CARTOGRAPHIE DU RUISSELLEMENT DE SURFACE (CRUS)

Vincent REMY[1], Manuel COLLONGUES[1]
Delphine PORCHERON[2]

[1] Cerema Est, 71 rue de la Grande Haie 54420 Tomblaine, France, vincent.remy@cerema.fr et manuel.collongues@cerema.fr
[2] Cerema IDF, 12 rue Teisserenc de Bort 78190 Trappes en Yvelines, France, delphine.porcheron@cerema.fr

La méthode CRUS permet de cartographier la sensibilité des sols à générer du ruissellement en s'appuyant sur des données publiques et facilement accessibles que sont la pédologie, l'occupation des sols et un modèle numérique de terrain (MNT). Le traitement de ces différentes données par un SIG permet d'identifier les zones préférentielles de production mais également de déterminer le réseau de drainage des différents bassins versants ainsi que la zone d'accumulation des écoulements.
C'est une méthode dite « sèche » dans la mesure où elle se soustrait des épisodes pluviométriques pour identifier la sensibilité du territoire à produire du ruissellement. Un couplage avec des données hydrologiques est néanmoins à l'étude, afin d'évaluer les ordres de grandeur des volumes d'eau potentiellement générés pour différentes périodes de retour.
Elle a pour objectif principal d'accompagner les collectivités territoriales et les services de l'état dans la planification du territoire vis-à-vis d'une problématique encore mal appréhendée, en faisant comprendre aux élus la genèse des phénomènes et surtout les modalités d'impact sur l'aménagement.
Elle à pour but d'apporter à l'ensemble des acteurs des territoires une vision sur l'opportunité de leurs opérations de planification et des pistes d'action de réduction de la vulnérabilité, en identifiant notamment les secteurs de sensibilité préférentielle sur lesquels des études plus fines méritent d'être engagées.
Mots-clefs : Cartographie, Ruissellement, sols, écoulements.

Runoff mapping (CRUS)

CRUS (French acronym for Surface Runoff mapping) is a method to map the susceptibility of soils to generate surface runoff using public and accessible data extracted from pedology, land use and a digital elevation model. Processing these different data with a GIS gives the preferential production areas but also determines the drainage network of watersheds and the flow accumulation areas.
CRUS is a "dry" method: no rainfall episodes data is used to identify the susceptibility of soils to generate surface runoff. Nevertheless, taking into account hydrological data is possible with CRUS; this option is under consideration in order to assess potential water volumes potentially generated for different return periods.
CRUS main objective is to assist local authorities and state services in territory planning regarding a poorly understood phenomenon. The provided maps will help elected officials in understanding the genesis of phenomena and especially their consequences on development policies.
This method aims to provide stakeholders another perspective for planning operations and vulnerability reducing actions, in particular by identifying the sectors of preferential susceptibilities to surface runoff where more detailed studies are needed.
Key words : Mapping, surface runoff, soil, flows

INTRODUCTION

Dans un contexte d'imperméabilisation croissante des sols, d'intensification des pratiques agricoles mais aussi en lien avec les premiers effets du changement climatique, les territoires et les collectivités sont de plus en plus affectés par les phénomènes d'inondation par « ruissellement » et de coulées boueuses.

QUELS BESOINS ?

Si les inondations par débordement lent de cours d'eau sont de mieux en mieux connues et font l'objet de modélisations permettant de mieux gérer l'aménagement du territoire, notamment à travers les PPRi, les collectivités sont relativement démunies face aux problématiques de ruissellement et ne savent pas comment prendre en compte ce risque dans leur stratégie de planification.

A ce niveau, la mise à disposition de documents cartographiques à grande échelle doit permettent aux collectivités d'évaluer de manière globale et de cibler ensuite les secteurs nécessitant une analyse plus fine

de la vulnérabilité de leur territoire, en identifiant notamment les secteurs les plus sensibles, en matérialisant les cheminements d'écoulement afin de mieux comprendre la genèse des phénomènes et surtout les modalités d'impact sur les aménagements. Cette compréhension vise à faciliter leur action et la mise en place de mesures adaptées pour se prémunir des différents effets du ruissellement.

Cette action s'inscrit dans la droite ligne du rapport du Gouvernement au Parlement sur la maîtrise des eaux pluviales et de ruissellement aux fins de prévention des inondations – avril 2018, s'appuyant notamment sur le rapport CGEDD n°010159-01 / Gestion des eaux pluviales : dix ans pour relever le défi – avril 2017.

PRINCIPES TECHNIQUES

Le ruissellement ne peut être regardé sous un prisme unique mais doit être appréhendé à différents niveaux avec une approche intégratrice.

De ce fait, la méthode CRUS, qui se veut robuste et simple d'utilisation, permet de caractériser la sensibilité des sols à générer du ruissellement, d'identifier les cheminements et axes de concentration des écoulements et de matérialiser leur extension. Elle donne ainsi l'occasion de mieux comprendre l'interdépendance entre ruissellement et aménagement du territoire, apportant à l'ensemble des acteurs des territoires une vision sur l'opportunité de leurs opérations de planification et des pistes d'action de réduction de la vulnérabilité.

Il s'agit d'une méthode dite « sèche » car elle se détache de tout événement pluvieux pour appréhender le territoire dans sa réalité physique. Ce choix permet de se soustraire des discussions relatives à un évènement pluvieux de référence, à son intensité, à sa durée…en s'attachant simplement à caractériser la sensibilité des sols à générer du ruissellement. Ainsi, plus la sensibilité sera forte, plus la capacité à occasionner du ruissellement en cas de phénomène intense sera élevée. Toutefois, il reste possible de mettre en œuvre un raisonnement hydrologique simplifié associé à l'analyse de la sensibilité au ruissellement d'un bassin versant. Il peut s'agir par exemple de l'utilisation de données pluviométriques spatialisées (pluie de bassin à différentes périodes de retour et durées) couplée à une analyse sommaire de la dynamique de crue.

UNE COMPOSANTE SOL INTEGREE

D'un point de vue technique, la méthode intègre à la fois des données sur la perméabilité et la battance des sols, sur l'occupation de ces derniers (types de cultures réalisées…), ce qui permet de déterminer des zones de sensibilités préférentielles au ruissellement.

Perméabilité et battance

Concernant ces données, c'est le référentiel régional pédologique de l'INRA à l'échelle du 1/250000ème © INRA, unité INFOSOL, Orléans 2013, 2014, 2017 qui a été exploité pour déterminer à la fois la perméabilité des unités cartographiques mais également leur battance, en s'appuyant sur les teneurs en sable (**S**), argile (**A**) et limons (**L**) des unités typologiques, obtenues après une extraction de la base.

5 classes de perméabilité, classées de 1 (très forte) à 5(très faible) sont déterminées en reportant ces données dans un triangle ternaire de perméabilité [CEC, 1985 modifié]

Un diagramme ternaire est également construit pour évaluer le potentiel de battance [Antoni et al, 2006]

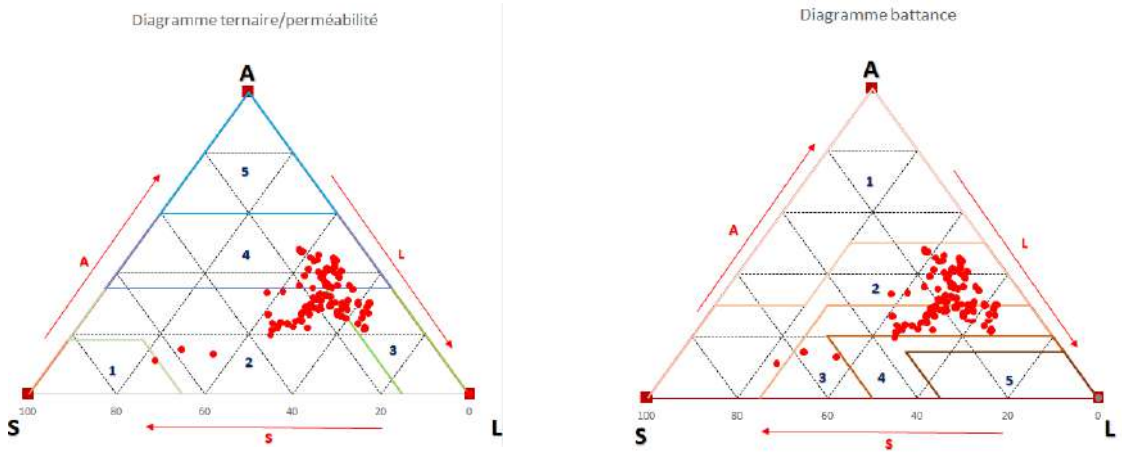


Figure1 : Diagrammes ternaires de perméabilité et de battance

Une note sur 100 est attribuée à chaque classe de perméabilité de la manière suivante :

Valeur Perméabilité	Note perméabilité
1	1
2	25
3	50
4	75
5	100

Tableau 1 : note perméabilité

La gestion effectuée au niveau du paramètre de battance et son intégration est détaillé plus loin.

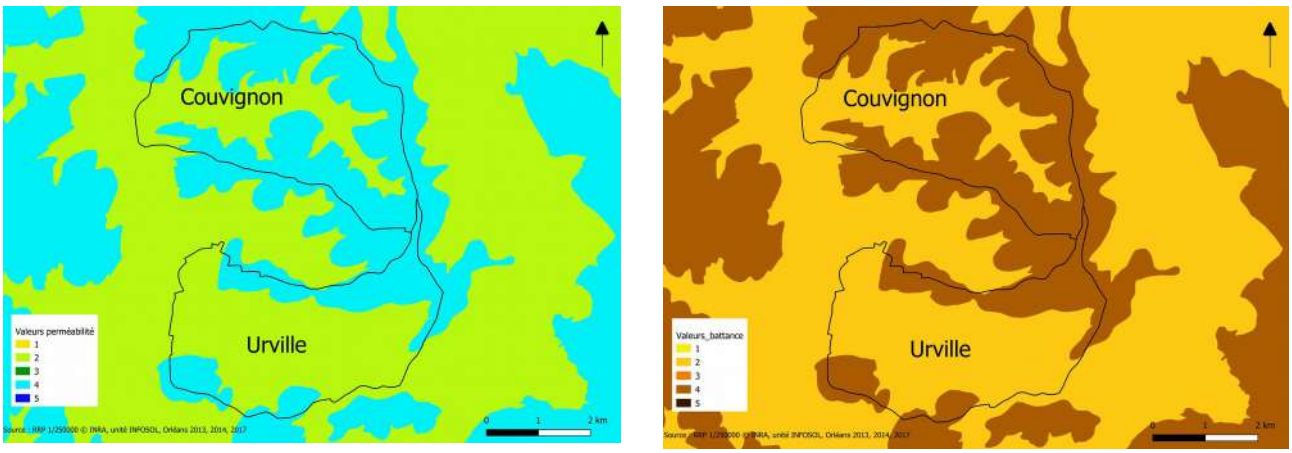


Figure 2: carte de perméabilité et de battance

Occupation des sols

Différentes bases de données sont utilisées à ce niveau :

- CORINE Land Cover (CLC) produite par le MTES et l'IGN dans le cadre du projet européen Copernicus: la donnée la plus large en termes de spatialisation de l'occupation biophysique des sols
- Registre Parcellaire Graphique (RPG) produit par l'IGN, sur la base de données fournies dans le cadre de la mise en œuvre des aides le la Politique Agricole Commune (PAC): données annuelles de déclaration des parcelles et îlots de cultures
- Données spécifiques locales : données parcellaires AOC vigne par exemple, fourni par la Direction Départementale des Territoires (DDT) 10.

L'idée est ici de partir de la donnée la plus fine et précise et ensuite de décliner jusqu'à la plus large afin d'aboutir à une couche SIG constituée d'un assemblage de polygones, caractérisés par une occupation du sol spécifique.

Cette occupation du sol est ensuite regroupée en 5 catégories, présentées dans le tableau suivant, qui font l'objet d'une notation en fonction de leur sensibilité relative à générer du ruissellement.

Occupation du sol	Note occupation du sol
Forêt	0
Prairies/vergers	20
Cultures fermées	40
Cultures ouvertes	80
Sol nu/zones urbaines	100

Tableau 2 : note occupation sol

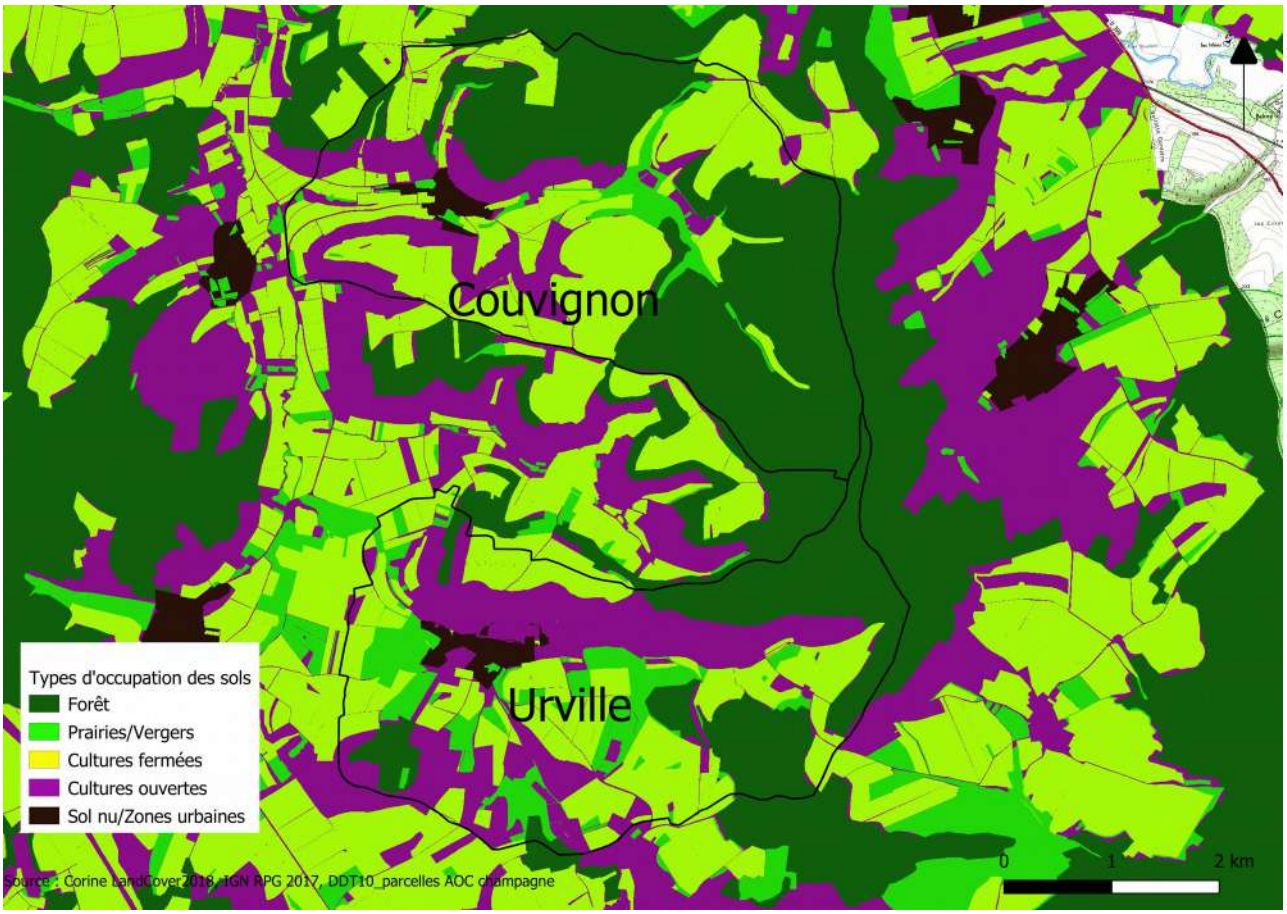


Figure 3: Carte d'occupation des sols

Pentes

Deux modèles numériques de terrain (MNT) de l'IGN peuvent être utilisées à ce niveau, la Bd alti® à 25m et le RGE alti® 5m.

Le choix a été fait ici d'utiliser le RGE alti® à 5m, en raison d'un maillage plus fin et d'une meilleure représentation physique des territoires, pour lequel des classes de pente ont été définies et auxquelles une valeur a été attribuée.

Classe de pente	Note pente
0-2	5
2-5	15
5-10	25
10-15	50
15-30	60
30-50	80
>50	100

Tableau 3 : note pente

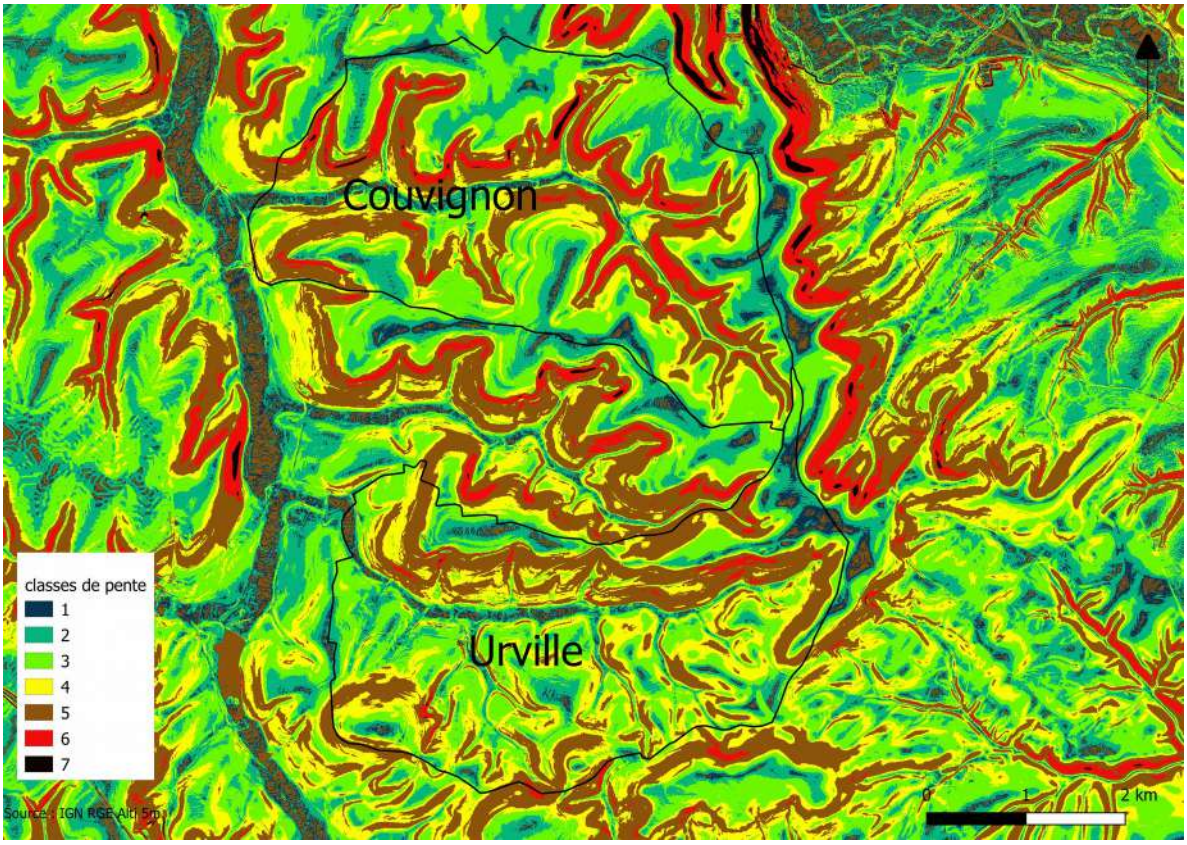


Figure 4: Carte des pentes

DETERMINATION DE LA SENSIBILITE A GENERER LE RUISSELLEMENT

Un croisement des 4 couches SIG définies ci-dessus (occupation du sol, perméabilité, battance, pente) est opéré pour déterminer une couche unique selon la formule suivante (cf. figure 9) :

$$_{\mathbf{Note}}\mathbf{CRUS} = [(C^{Permea} * {}_{Note}Permea + C^{OccSol} * {}_{Note}OccSol + C^{Pente} * {}_{Note}{}^{Pente})] * C^{Battance}\ f({}_{Valeur}Battance \text{ et } {}_{Note}OccSol)$$

Où $_{Note}$Permea, $_{Note}$OccSol et $_{Note}$Pente sont les notes spatialisées obtenues lors de la construction des couches SIG expliquées ci-avant, $_{Valeur}$Battance est la valeur déterminée en positionnant les Taux d'argile, sable et limons dans le diagramme ternaire et C^{Permea}, C^{pente} et C^{OccSol} les coefficients d'influence des différents paramètres sur le territoire.

Avec : $0 < {}_{Note}Permea , {}_{Note}OccSol , {}_{Note}Pente < 100$

$C^{Permea} + C^{OccSol} + C^{Pente} = 1$

$0 < C^{Permea} , C^{OccSol} , C^{Pente} < 1$

$1 < {}_{Valeur}Battance < 5$

$1 < C^{Battance} < 1{,}6$

Cette couche résultante est un raster dans lequel chaque pixel est caractérisé par une combinaison de valeurs perméabilité/occupation du sol/pente.

En fonction de la connaissance du territoire et de son fonctionnement, il apparait que l'apport de chacun de ces 4 paramètres (perméabilité, occupation des sols et pentes) n'est pas toujours homogène. Il a donc été choisi de pouvoir faire varier l'influence de ces paramètres pour correspondre au mieux à la réalité du terrain.

C'est également à ce niveau qu'il est tenu compte de la battance pour les cultures « fermées » (qui protègent en partie le sol de la formation d'une croute de battance : blé, orge, colza…) ; les cultures « ouvertes » (type vigne, houblon, maïs...) et les sols nus, dans le cas de valeur de battance égales à 3, 4 ou 5. L'influence de cette battance est traitée par un facteur multiplicatif (variable au sein de la zone d'étude, en fonction des valeurs de battance, ainsi que de l'occupation du sol) du résultat de la combinaison $[(C^{Permea} * {}_{Note}Permea + C^{OccSol} * {}_{Note}OccSol + C^{Pente} * {}_{Note}{}^{Pente})]$ selon le tableau suivant :

Occupation du sol	Valeur battance	Combinaison Perméa/occup sol/pente	Facteur multiplicatif	Note CRUS
Cultures fermées Cultures ouvertes Sols nus	1	α	1	α
	2	α	1	α
	3	α	1,15	1,15*α
	4	α	1,35	1,35*α
	5	α	1,6	1,60*α

Tableau 4 : Prise en compte de la battance dans la note CRUS

A noter que pour les forêts et les prairies, il est ici considéré que le phénomène de battance ne s'exerce pas ou est négligeable. Il est par ailleurs négligé pour les valeurs de battance de 1 et 2, comme visualisé dans le tableau ci-dessus.

A partir des valeurs obtenues dans l'arbre de décision, des matrices de sensibilité des sols à générer du ruissellement sont déterminées, avec ou sans battance, afin de bien visualiser l'influence notable de cette dernière.

Les classes définies sur la base d'une approche de terrain pour déterminer cette sensibilité sont les suivantes :

Classe	Sensibilité
Note CRUS < 32	Faible
32 =< Note CRUS < 42	Moyenne
42=<Note CRUS < 55	Forte
Note CRUS >= 55	Très forte

Tableau 5 : classes de sensibilité des sols à générer du ruissellement

Figure 5 : matrices sans et avec battance.

La création des cartes de sensibilités des sols à générer du ruissellement correspond, in fine, à l'application d'une couleur à chaque pixel en fonction de sa note CRUS et donc de sa sensibilité, sur la base du code couleur illustré ci-dessus.

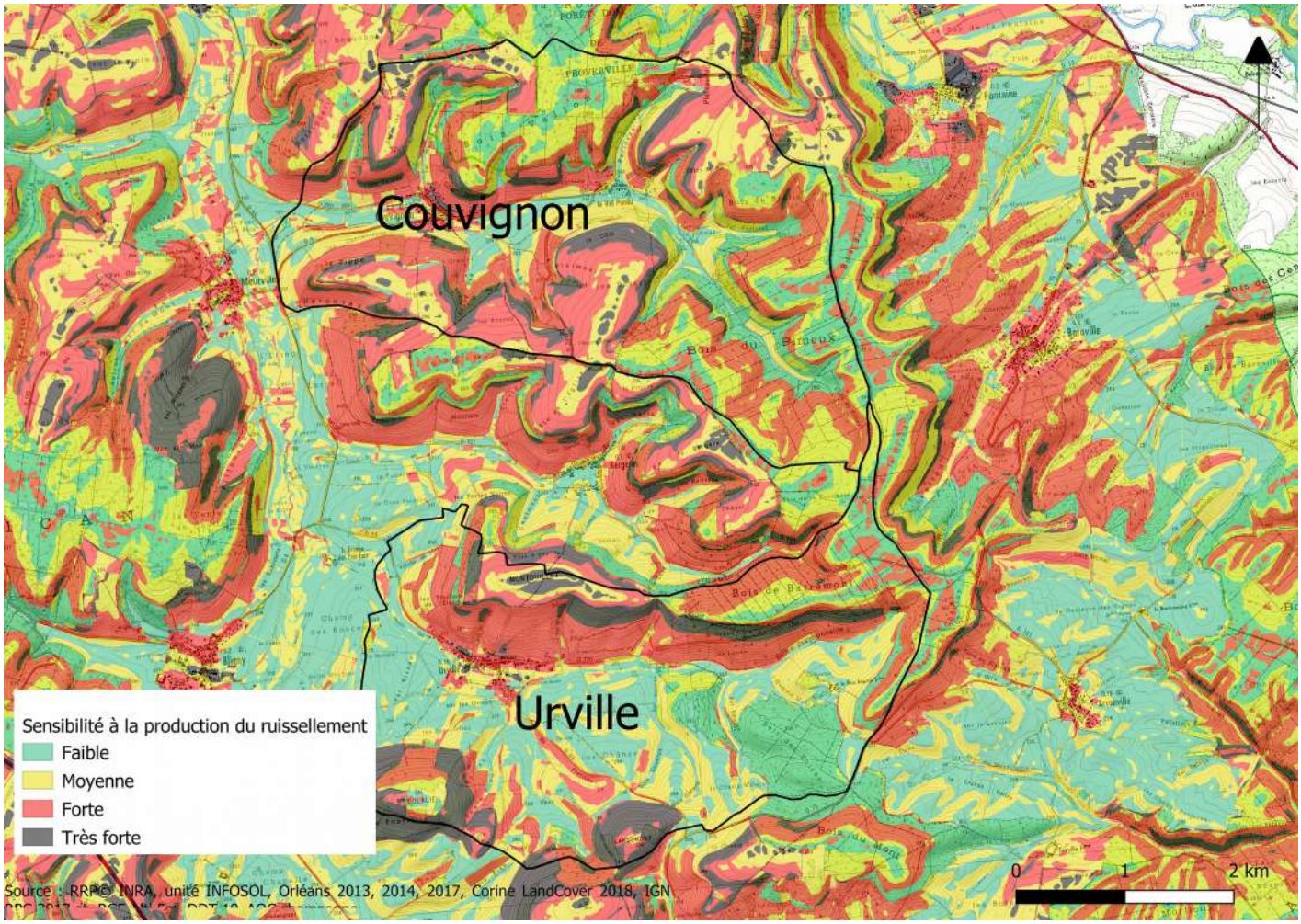


Figure 6 : Carte de sensibilité des sols à générer du ruissellement.

DETERMINATION DU SCHEMA DE DRAINAGE, DES AXES DE TRANSFERT ET DES ZONES D'ACCUMULATION

Une première étape a consisté à réaliser un traitement du RGEalti®5m afin de déterminer le réseau de drainage à partir de l'utilitaire Watershed D8 Multiflow de Qgis pour différents seuils de superficie de bassins versants (BV) (retenu 100 et 1000 cellules drainées après différents tests).

Pour chacun de ces seuils 100 et 1000, les points haut et bas de chaque BV sont déterminés, avec identification, à l'exutoire du BV, de la surface contributive de ce dernier et du ratio (en valeur absolue et en pourcentage de la superficie du BV) de chaque catégorie de sensibilité présente au sein du BV.

A ce niveau, un couplage « hydrologique » est à l'étude, via l'utilisation de données pluviométriques de bassin à différentes occurrences/durées et une analyse sommaire de la dynamique de crue. L'objectif est d'évaluer les volumes susceptibles de s'écouler au sein d'un (ou d'un ensemble) de bassin versant et de guider les réflexions dans la perspective de mise en place de mesures de réduction de vulnérabilité.

Pour matérialiser le réseau de drainage ainsi que les zones d'accumulation des eaux de ruissellement, une deuxième étape consiste à modifier l'outil EXZECO, développé par le Cerema dans le cadre de la Directive Inondation (DI) [Pons et al, 2010 a/b]. Cet algorithme – dont le principe consiste à fusionner les différents réseaux de drainages obtenus sur la base de multiples « bruitages » du MNT – est en cours de modification afin de prendre en compte la spatialisation de la sensibilité des bassins versants à générer du ruissellement

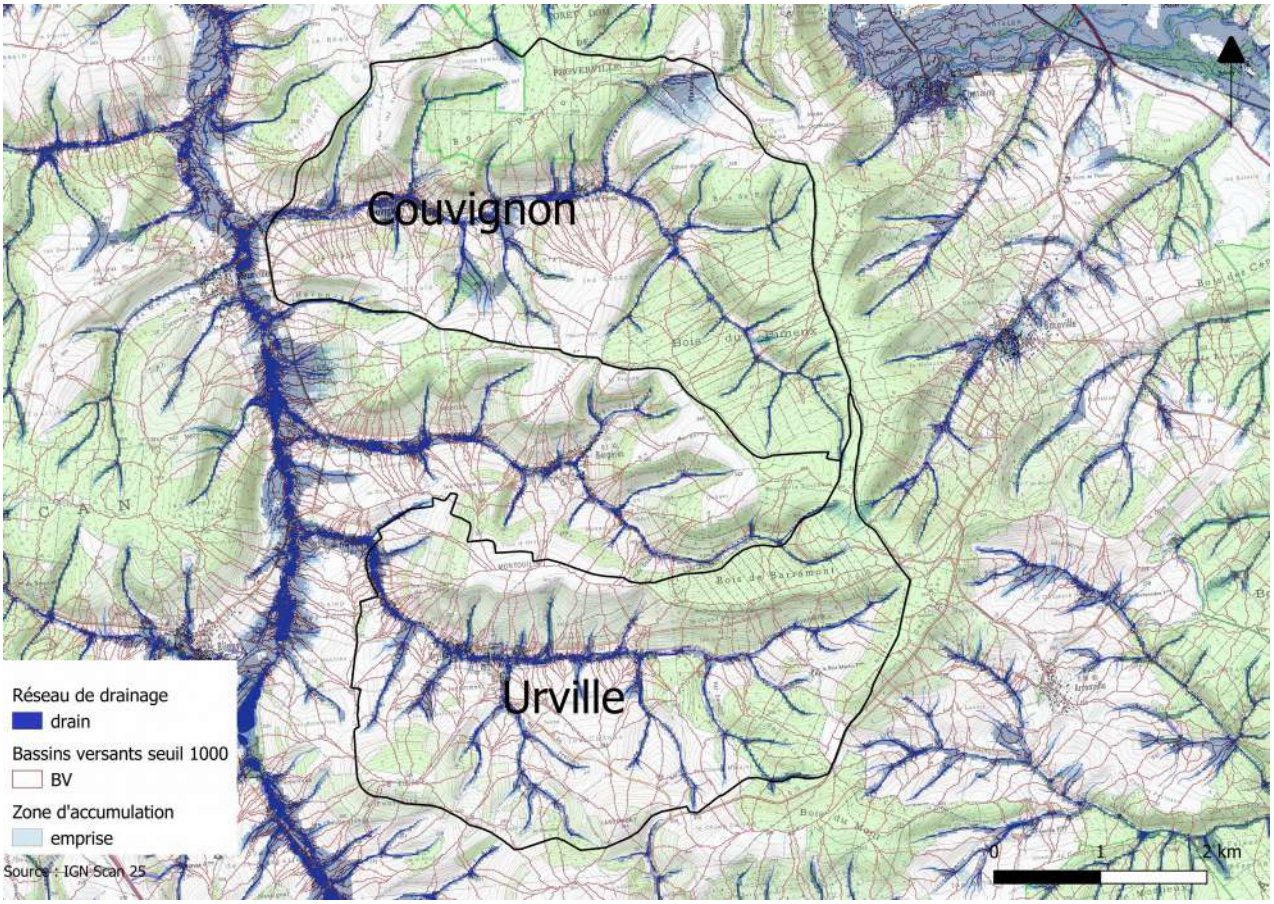


Figure 7 : Carte de drainage (seuil de 1000 cellules drainées) et d'accumulation (données EXZECO DI)

IMPACT SUR L'AMENAGEMENT

Sur la base de l'ensemble de paramètres présentés précédemment, divers types d'impacts sur l'aménagement peuvent être déduits sur la figure 8 :

- Un impact spécifique au droit du passage du réseau de drainage, qui concentre de manière préférentielle les écoulements issus des bassins versants situées en amont. Dans de nombreux cas, les thalwegs sont occupés par une voirie qui conduit directement les flux dans l'entrée de ville.
- Un impact plus diffus lié aux écoulements se produisant dans les bassins versant de plus petite taille situés directement à l'aplomb des habitations. Dans de nombreux cas, avec des pentes très marquées, des coulées de boues viennent impacter l'urbanisme.
- Un impact plus classique de débordement de cours d'eau, avec un évènement pluviométrique intense et des temps de concentrations très rapides vers le fond de thalweg au regard de la topographie et de l'occupation des sols. Cette situation est typique des « crues flash » observables dans les têtes de bassins versants (il convient de noter que ce point n'est pas traité par la méthode CRUS mais est déduit dans le cas présent. Par contre, il peut être appréhendé par l'outil de modélisation automatique des bassins versants CARTINO 2D [Pons et al, 2017] développé par le Cerema).

A ce niveau, des tests de sensibilité seront réalisés pour simuler l'influence d'une imperméabilisation de secteur (création de lotissement par exemple) ou de la déforestation d'une zone forestière pour y implanter du vignoble par exemple et mesurer leur effet en aval. De la même manière, des tests seront réalisés pour simuler les effets de la mise en place de mesures de lutte contre le ruissellement et évaluer les effets positifs attendus.

Un développement reste à finaliser pour générer en routine une identification de la vulnérabilité au ruissellement des aménagements, qu'il s'agisse de zones urbaines ou periurbaines bâties mais aussi d'infrastructures routière ou de captage AEP/STEP.

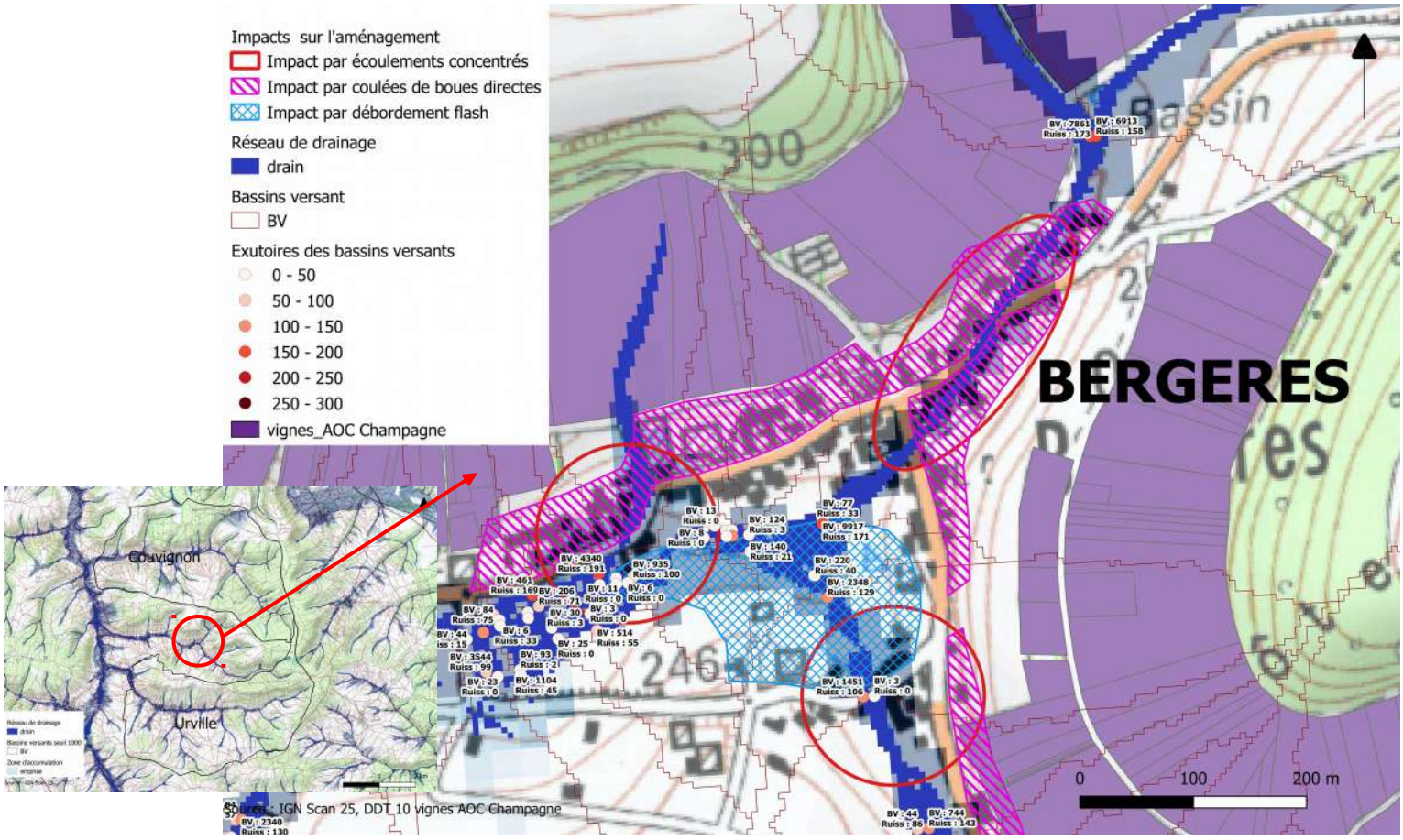


Figure 8 : Carte d'identification des zones d'impact sur l'aménagement

CONCLUSIONS

CRUS constitue une méthode simple d'utilisation, robuste, basée sur les principaux paramètres physiques à l'origine des phénomènes de ruissellement. Sur la base de données facilement accessibles, elle permet de caractériser, comme illustré sur la figure 9 :

- la sensibilité des sols à générer du ruissellement,
- les cheminements et axes de concentration des écoulements,
- les zones de stockage en fond de thalweg.

Les cartographies générées par la méthode CRUS apporteront des réponses aux attentes des collectivités en proposant une approche à l'échelle départementale et/ou des EPCI.

Son utilisation à l'échelle supra-communale peut s'avérer suffisante en termes de planification mais nécessitera probablement une approche plus poussée dès lors qu'il s'agira de mettre en place des mesures de lutte contre le ruissellement et de réduction de vulnérabilité.

Un des objectifs de la méthode sera bien de tester et d'évaluer les incidences sur le ruissellement de plusieurs occupations du sol et aménagements, à différentes échelles de bassins versants, dans le but d'orienter les décideurs vers une occupation du territoire et/ou des mesures de lutte pertinentes et adaptées.

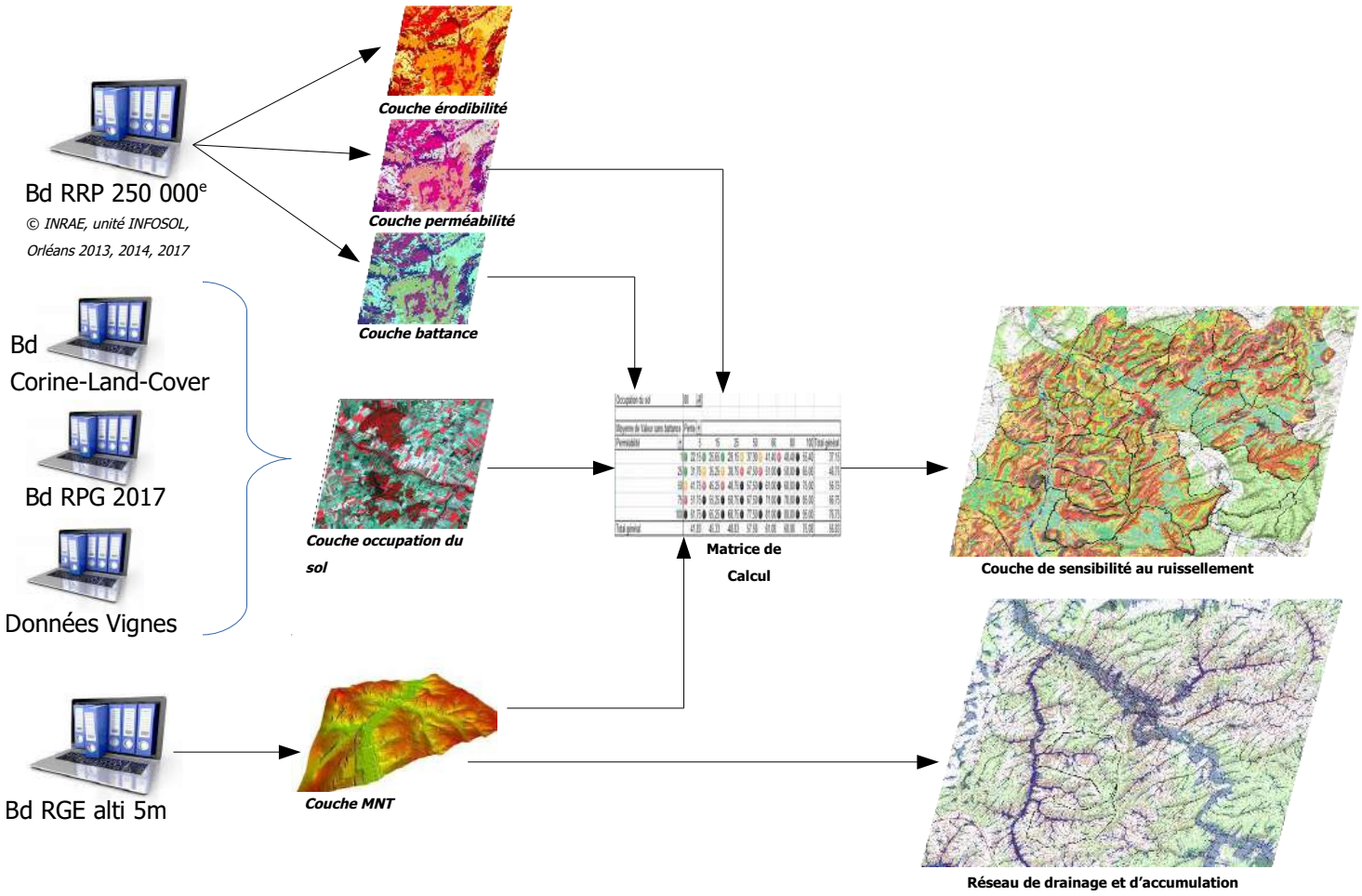


Figure 9 : Graphique de synthèse des composantes de la méthode CRUS

La méthode est actuellement en finalisation de développement et doit être testée sur différents territoires nationaux exposés à des problématiques connues de ruissellement et de coulées de boue au cours des années 2020 et 2021. Ces mises en situation sur des territoires variés et dans des contextes divers afin de vérifier la pertinence des paramètres retenus et si nécessaire, d'apporter des ajustements pour consolider et valider la méthode avant son déploiement.

REFERENCES

Commission of the Eurpean Communities (CEC), 1985 - Soil map of the European Communities. Scale 1:1000000. CEC-DGVI, Luxembourg

V. Antoni, Y. Le Bissonnais, J. Thorette, N. Zaidi, B. Laroche, S. Barthès, J. Daroussin et D. Arrouays, 2006 - Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux. Etude et gestion des sols P 201 à 222.

Pons F., JL.Delgado, P.Guero, E.Berthier (2010a) - EXZECO : a GIS and DEM bases method for predetermination of flood risk related to direct runoff and flash floods, 9th International Conference on Hydroinformatics HIC 2010 Tianjin, China.

Pons F., Guero, P., Bruno, K.h., Delgado, J.-L., Berthier, E., Piney, S. and Felts, D. (2010b) - Une contribution à l'évaluation de l'aléa inondation par ruissellement et crues soudaines, SimHydro 2010 : Hydraulic modeling and uncertainty, Sophia-Antipolis, France.

Pons F., Alquier M., Roux I. (2017) - Semi-automatic Maps for 2015 French Riviera Flooods, SimHydro 2017 : Choosing the right model in applied hydraulics, Singapore, Malaisie.

Cartographie de l'aléa ruissellement à échelle fine (Ding *et al.*)

CARTOGRAPHIE DE L'ALEA HYDROLOGIQUE A ECHELLE FINE

Auteurs : Ding Qifan[(1)] & Arnaud Patrick[(1)]

[1] INRAE, 3275 route de Cézanne, 13182 Aix-en-Provence, France, qifan.ding@inrae.fr

[1] INRAE, 3275 route de Cézanne, 13182 Aix-en-Provence, France, patrick.arnaud@inrae.fr

L'aléa hydrologique exprime la probabilité d'occurrence d'un phénomène hydrologique d'intensité donnée, que ce soient les crues ou les étiages. Cet aléa peut être évalué aussi bien à grande échelle spatiale associée aux « débordements de cours d'eau », qu'à plus petite échelle spatiale associée au « ruissellement ». Il existe cependant une continuité dans tous ces phénomènes qui peut être prise en compte via la modélisation hydrologique. La continuité temporelle est étudiée par des modélisations hydrologiques continues, par opposition aux approches événementielles, et la continuité spatiale est étudiée par des modélisations hydrologiques distribuées, par opposition aux approches globales. C'est donc pour étudier l'aléa dit de « ruissellement » que l'on s'intéresse à une modélisation distribuée de l'aléa, qui permettra de faire le lien entre la grande échelle, pour laquelle la donnée hydrologique existe, et la petite échelle pour laquelle la donnée hydrologique est beaucoup plus rare. On s'appuie alors sur la méthode SHYREG qui propose actuellement au niveau national une estimation de l'aléa hydrologique pour des bassins de plus de 10 km². Calée sur les données des bassins jaugés, la modélisation est cependant réalisée à des mailles de calcul pouvant être très fines (jusqu'à 50 m ou moins), qui permettent de garantir l'aléa à l'échelle plus grande des bassins versants jaugés. La question posée ici est la validité de l'aléa calculé à l'intérieur des bassins versants jaugés et donc de sa variabilité spatiale. Cette variabilité spatiale de l'aléa à l'échelle des mailles de calcul est dans un premier temps contrôlée par la variabilité de l'aléa pluviographique bien appréhendée par la méthode. Dans un second temps, une variabilité spatiale du paramètre de production du modèle hydrologique est obtenue lors de son calage, via une méthode de « calage régional » intégrant des variables environnementales pour expliquer la variabilité spatiale du paramètre. Enfin, une variabilité spatiale supplémentaire peut être imposée à plus petite échelle par l'introduction d'un a priori dans la variabilité du paramètre de production. Cet a priori est imposé par l'idée que l'on a des facteurs environnementaux pouvant influencer l'aptitude au ruissellement d'un versant. L'étude présentée ici fait état des différentes cartographies possibles de cet aléa hydrologique à une échelle fine (50m), en présentant les résultats de contrôle de la méthode sur les sous-bassins de petite superficie. On essayera ainsi d'évaluer la pertinence des différents facteurs permettant d'étudier la variabilité spatiale de l'aléa hydrologique aux échelles spatiales fines qui intéresse « l'aléa ruissellement ».

Mots-clefs : approche distribuée, aléa, extrêmes, a priori.

FINE-SCALE HYDROLOGICAL HAZARD MAPPING

2637/5000
The hydrological hazard expresses the probability of occurrence of a hydrological phenomenon of a given intensity, whether it be floods or low flows. This hazard can be assessed both on a large spatial scale such as "watercourse overflows", and on a smaller spatial scale such as "runoff". There is however a continuity in all these phenomena which can be taken into account via hydrological modeling. Temporal continuity is studied by continuous hydrological models, as opposed to event-driven approaches, and spatial continuity is studied by distributed hydrological models, as opposed to global approaches. It is therefore to study the so-called "runoff" hazard that we are interested in a distributed modeling of the hazard, which will make it possible to make the link between the large scale, for which the hydrological data exists, and the small scale for which hydrological data is rarer. We then rely on the SHYREG method, which currently offers at the national level an estimate of the hydrological hazard for basins of more than 10 km². Based on the data from the gauged basins, the modeling is however carried out at calculation meshes that can be very fine (up to 50 m or less), which make it possible to guarantee the hazard at the larger scale of the gauged watersheds. The question posed here is the validity of the calculated hazard within the gauged watersheds and therefore of its spatial variability. This spatial variability of the hazard at the scale of the calculation meshes is firstly controlled by the variability of the rainfall hazard, which is well understood by the method. Secondly, a spatial variability of the production parameter of the hydrological model is obtained during its calibration via a "regional calibration" method integrating land use to explain the spatial variability of the parameter. Finally, additional spatial variability can be imposed on a smaller spatial scale by introducing a priority into the variability of the production parameter. This priority is imposed by the idea that there are environmental factors that can influence the runoff ability of a slope. The study presented here reports on the different possible maps of this hydrological hazard at a fine scale (50m), by presenting the results of the method control on small area sub-basins. We will thus try to assess the relevance of the

various factors allowing the study of the spatial variability of the hydrological hazard at fine spatial scales which concerns "runoff hazard".

Key words : distributed approach, runoff hazard, extremes, priority

INTRODUCTION

L'aléa hydrologique peut être défini comme la probabilité d'occurrence d'un phénomène hydrologique d'intensité donnée (https://hydrologie.org/). Le phénomène hydrologique en question peut correspondre aussi bien aux crues qu'aux étiages, et aussi bien aux phénomènes de grandes échelles spatiales associées aux « débordements de cours d'eau » ou de plus petites échelles spatiales associées au « ruissellement ». Pour étudier l'aléa dit de « ruissellement », on s'appuiera ici sur la méthode SHYREG.

La méthode SHYREG propose une estimation distribuée de l'aléa hydrologique pour des bassins de plus de 10 km² sur le territoire français [Arnaud et al, 2014]. Cette estimation est réalisée à l'échelle de pixels de 1 km² grâce à la simulation de chroniques de pluies horaires transformées en débits par un modèle hydrologique simple. Ce modèle hydrologique est paramétré localement par un paramètre de production (S0/A) qui représente une sorte de coefficient de ruissellement non linéaire sur le pixel. Les débits ainsi générés sur chaque pixel sont agrégés suivant un plan de drainage et abattus en fonction de la surface, ce qui permet de calculer des débits tout le long du réseau hydrographique (y compris les talwegs secs). Le calage du paramètre hydrologique (noté S_0/A) est fait de manière à retrouver les quantiles de débits courants (périodes de retour inférieures à 10 ans) des bassins versants jaugés. La régionalisation de ce paramètre est réalisée par une méthode d'interpolation prenant en compte certaines variables environnementales qui expliquent la variabilité du paramètre hydrologique à grand échelle. Ainsi l'aléa hydrologique est évalué sur l'ensemble du territoire, sur tout bassin non jaugé, avec une certaine variabilité spatiale liée à plusieurs facteurs : la variabilité liée à l'information pluviométrique, la variabilité liée à l'hydrologique locale (calage sur les bassins jaugés) et la variabilité liée à la méthode de régionalisation en lien avec d'éventuelles variables environnementales. Suite à ce travail de cartographie nationale de l'aléa hydrologique par la méthode SHYREG, on se pose la question de pouvoir utiliser l'information hydrologique fournie par la méthode à l'échelle de la maille de calcul (pixels de 1 km²) voire à des échelles plus fines, pour répondre à la question du ruissellement. Ce travail vise donc à étudier la pertinence de l'aléa hydrologique estimé à l'intérieur des bassins versants jaugés, donc à échelle fine, au regard avec la disponibilité des données.

LES DONNEES

La méthode SHYREG a été mise en œuvre sur le territoire national à partir de l'utilisation d'une information pluviométrique exhaustive (Arnaud et al 2008) et d'une information hydrologique fournie par la base de données nationale HYDRO (www.hydro.eaufrance.fr). La méthode a donc été calée et régionalisée sur la base d'une sélection de 1935 bassins versants de moins de 5000 km² sur le territoire (Aubert et al 2014, Arnaud et al, 2014).

Les données hydro-climatiques utilisées par la méthode ont servi à la tester et à la caler dans différents contextes climatiques et hydrologiques. Une étape de régionalisation a ensuite été réalisée (Odry et Arnaud, 2017) à partir d'une méthode de « calage régional » prenant en compte des variables environnementales pour expliquer la variabilité du paramètre hydrologique « S_0/A ». Ces variables environnementales sont multiples et différentes en fonction des grandes régions (10) hydro-écologiques établies en France. Le travail de régionalisation effectué jusque-là a surtout servi à combler les zones « blanches » sur lesquelles aucune information hydrologique n'était disponible, tout en proposant une information à l'intérieur des bassins jaugés. Cette régionalisation plutôt de grand échelle (territoire national) ne permet pas de prendre en compte les particularités locales des bassins, pouvant créer une variabilité spatiale dans les écoulements. C'est pourquoi la méthode a toujours été associée à une limite de surfaces des bassins versants en deçà de laquelle l'utilisation de la méthode n'était pas jugée pertinente. Cette limite estimée à 10 km² est liée à la disponibilité des observations hydrologiques pour des bassins de petites tailles.

Afin de proposer une estimation de l'aléa hydrologique à une échelle plus fine, on va se focaliser sur les performances de la méthode sur les plus petits bassins versants, et en particulier ceux compris à l'intérieur des bassins jaugés. On veut alors évaluer des techniques de régionalisation et de désagrégation spatiale de l'information sur ces bassins. Pour cela on a procédé à une sélection de bassins versants jaugés sur la base de

« groupes de bassins versants » permettant d'avoir des bassins « aval » ou « grands » pour le calage et des bassins « amont » ou « petits » pour la validation.

Il est tout d'abord important de définir le terme « petits ». Le seuil de surface ne doit pas être trop grand pour éviter de sélectionner des bassins trop hétérogènes, ni trop petit au risque d'avoir un échantillon trop restreint. En France métropolitaine, les bassins versants jaugés ayant une surface de moins de 10 km² représentent seulement 3,8% de tous les bassins versants jaugés sélectionnés pour la mise en œuvre de la méthode. A partir de l'échantillon total des bassins étudiés par la méthode (1935 bassins de moins de 5000 km²), on a pu déterminer 358 groupes de bassins emboîtés, regroupant entre 2 et 47 bassins. Pour sélectionner la surface seuil déterminant la notion de petits bassins versants, on a calculé le nombre de groupes disponibles en fonction de la taille minimale que l'on veut pour le plus petit bassin du groupe (graphique de la figure 1).

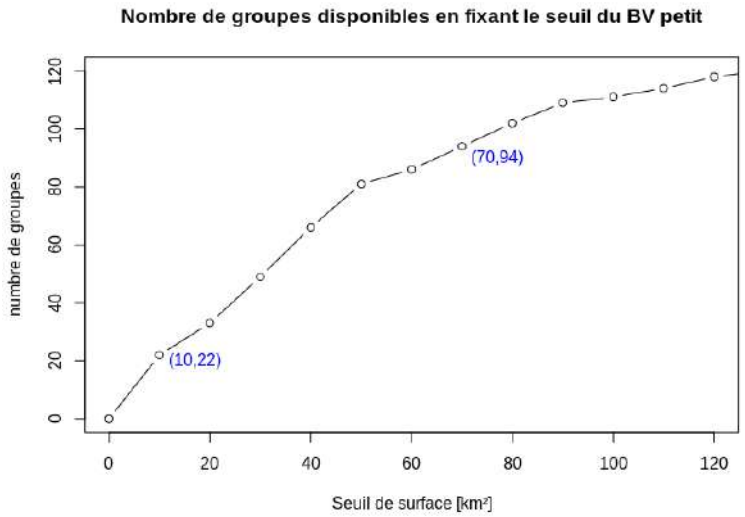


Figure 1: Nombre de groupes de bassins disponibles

Après une étude sur la caractéristique de tous les bassins emboîtés, les seuils de 10 km² et 70 km² sont retenus. Les groupes de bassins versants ayant au moins un bassin d'une surface de moins de 10 km² sont les échantillons idéaux pour tester les méthodes de désagrégation envisagées. Pourtant, le nombre de groupes de bassins associés n'est pas grand avec seulement 22 groupes concernés parmi les 358. Un deuxième seuil à 70 km² est aussi choisi pour avoir un plus grand échantillon de groupes de bassins à étudier (94). Ce sont les deux échantillons de groupe de bassins emboîtés sur lesquels on étudiera plus tard les méthodes de régionalisation et de désagrégation du paramètre hydrologique de la méthode SHYREG.

Afin de mieux expliquer les démarches de régionalisation/désagrégation qui seront en œuvre, on a choisi pour cette présentation, un groupe de bassins versants qui servira d'exemple pour illustrer les différentes étapes. C'est un groupe de 11 bassins versants dont 5 ont des surfaces de moins de 10 km². Les surfaces des trois bassins versants les plus grands sont 283 km², 70 km² et 65 km² (figure 2).

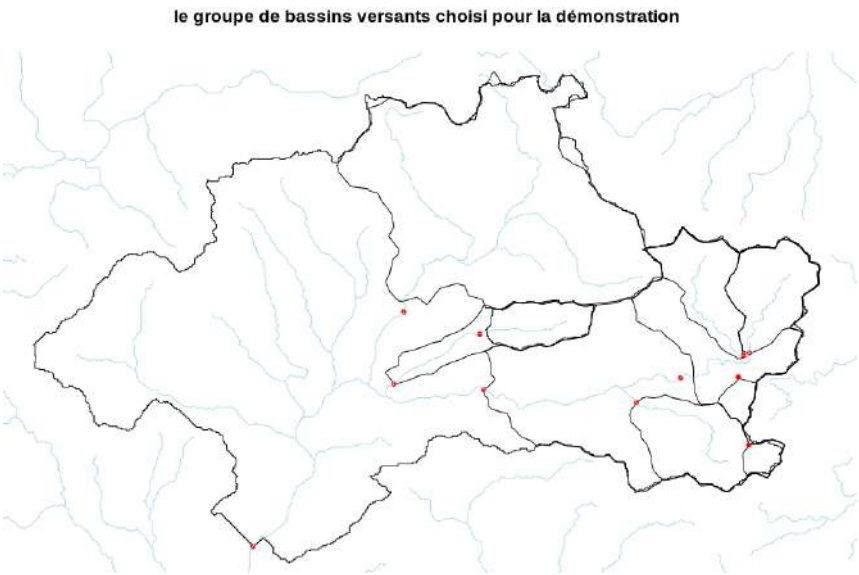


Figure 2: Groupe de bassins étudié

MÉTHODOLOGIE

Comme cela a été expliqué dans l'introduction, la variabilité spatiale de l'aléa hydrologique est liée à plusieurs facteurs propres à la mise en œuvre de la méthode SHYREG. Les débits estimés sont variables parce que la pluie est variable sur le bassin et parce que le paramètre hydrologique est aussi variable dans l'espace.

On s'intéresse ici uniquement à la variabilité spatiale du paramètre hydrologique, noté S_0/A, qui représente une sorte de coefficient de ruissellement non linéaire. Ce paramètre correspond au taux de remplissage du réservoir de production du modèle GR3H au début d'un événement pluvieux. Pour une même valeur de ce paramètre, les différents hyétogrammes simulés par le générateur de pluies horaires sont transformés en événements de crues. Pour chaque événement ainsi simulé, on peut calculer le « rendement » du modèle hydrologique. Ce rendement peut être associé à un coefficient de ruissellement de l'événement qui sera alors extrêmement variable en fonction de la forme des pluies, de leurs durées et de leurs intensités, alors que le paramètre (S_0/A) reste le même.

Si on s'intéresse à la cartographie de ce paramètre, sa variabilité spatiale est liée à trois étapes décrites ci-dessous et illustrées par les cartographies du paramètre sur le groupe cité en exemple.

a) Variabilité liée au calage

Une première variabilité du paramètre est liée au calage de la méthode sur les bassins jaugés. Dans le cas présenté on considère les trois plus grands bassins comme des bassins de calage, qui serviront à la régionalisation du paramètre sur le reste des sous-bassins.

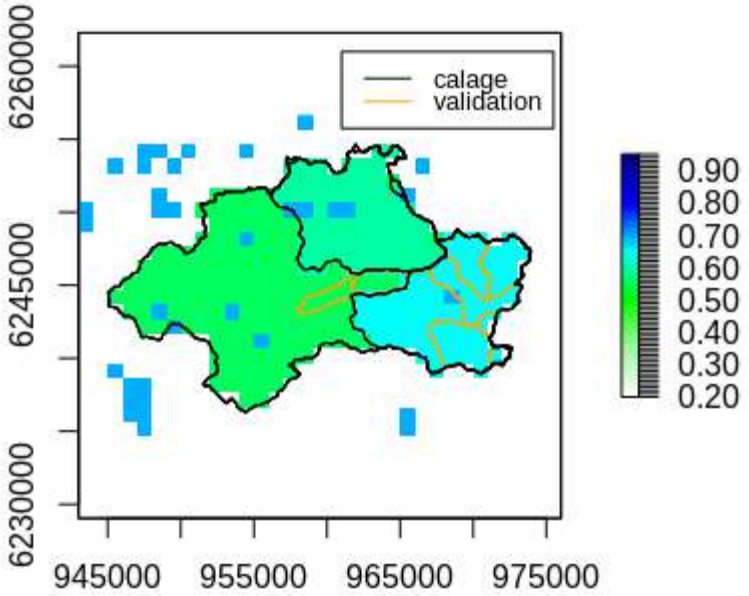


Figure 3: Résultat de calage

On observe que le calage du paramètre se fait sur chaque bassin en tenant compte de la présence des bassins emboîtés. Dans ce cas, un bassin à l'aval d'un autre bassin prendra les valeurs du paramètre du bassin amont sur sa partie amont et calera la valeur du paramètre sur la partie aval complémentaire qui lui est propre. Dans tous les cas, le paramètre est supposé uniforme sur les parties complémentaires de chaque bassin. Dans l'exemple présenté (figure 3) on observe bien une variabilité liée à la présence de trois bassins emboîtés qui propose trois zones de paramètre. Dans ce cas, on voit que les bassins les plus petits, à l'est de la zone, présentent tous la même valeur de paramètre.

Cette méthode de calage sert à éliminer l'incohérence entre le débit amont et aval et aussi à minimiser les erreurs relatives de calage entre les bassins amont et aval.

b) Variabilité liée à la régionalisation

Une fois le calage effectué, les paramètres moyens de chaque bassin (partie complémentaire pour les bassins emboîtés) sont comparés à des valeurs moyennes de variables environnementales calculées sur les mêmes entités. On cherche alors une corrélation spatiale entre le paramètre hydrologique et les variables environnementales. Cette corrélation peut être recherchée directement lors du calage de la méthode par le biais d'un « calage régional » mis en œuvre dans la méthode (Odry et Arnaud, 2017). Ces corrélations sont généralement déterminées par grandes régions. Elles ne peuvent pas être utilisées de façon locale sur des groupes de quelques bassins, car elles ne seraient pas suffisamment robustes. Dans notre exemple, la corrélation sur la zone à laquelle appartient le groupe de bassin étudié n'est pas suffisamment significative pour être prise en compte. Dans ce cas aucune variabilité spatiale supplémentaire du paramètre n'est intégrée à sa cartographie à l'intérieur des bassins de calage. Par contre la variabilité en dehors des bassins de calage est liée à l'interpolation des paramètres calés, en lien avec la présence d'autres groupe de bassin pouvant être présents à proximité.

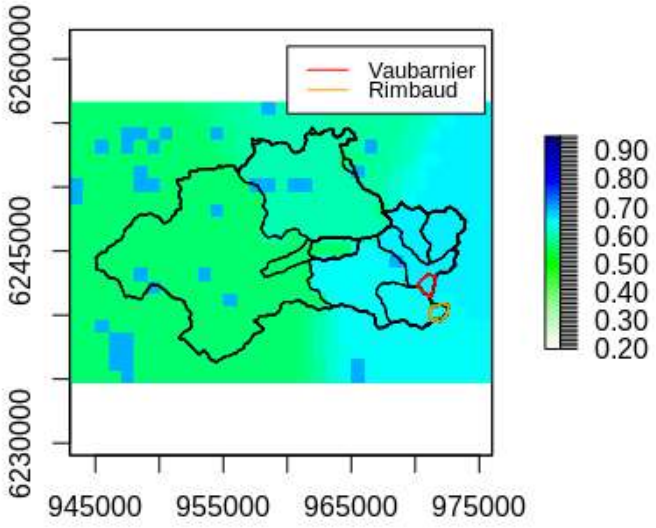


Figure 4: Création d'une variabilité en dehors les bassins de calage

On choisit de prendre les bassins versants Vaubarnier et Rimbaud pour zoomer sur la pertinence de la cartographie proposée. Ces deux bassins sont voisins et de même taille. Ils sont donc sous le même climat. On observe que selon la carte de la figure 4, les valeurs du paramètre S_0/A des deux bassins sont les mêmes. Cela est logique car ils appartiennent au même bassin « donneur » ou « aval » et que l'on a pas retenu de régression lors de la régionalisation. Cependant, en connaissant l'hydrologie de ces deux bassins, on sait que cette hypothèse d'homogénéité spatiale du paramètre n'est pas acceptable car les débits spécifiques de ces deux bassins différent d'un rapport de 1 à 3.

c) Variabilité introduite a priori

Une dernière variabilité spatiale du paramètre peut être introduite par une correspondance « a priori » entre des variables environnementales et le paramètre. Cette pratique est courante dans les méthodes régionales basées sur des abaques de valeurs de paramètres liés aux caractéristiques du bassin. C'est le cas pour la plupart des méthodes estimant le temps de concentration des bassins versants, mais aussi pour estimer des paramètres de production comme l'estimation du *Curve Number* dans la méthode « SCS » et le calcul de coefficient de ruissellement dans d'autres méthodes. Cette liaison entre les caractéristiques du bassin et le paramétrage d'une méthode régionale est parfois liés à des régressions et parfois liés à des « a priori » sur les facteurs physio-graphiques influençant le fonctionnement hydrologique des bassins.

Ces facteurs à introduire peuvent être du type « occupation des sols » (Corine Land Cover), « géologiques » (nature de la roches, profondeur des sols, texture, altération), « topographiques » (pente, relief, orientation), « hydrographique » (densité de drainage et autres indices de drainage comme l'IDPR développée au BRGM), etc. Ces facteurs sont souvent bien distribués dans l'espace à des échelles pouvant être très fines (quelques mètres) et couvrent de grande région.

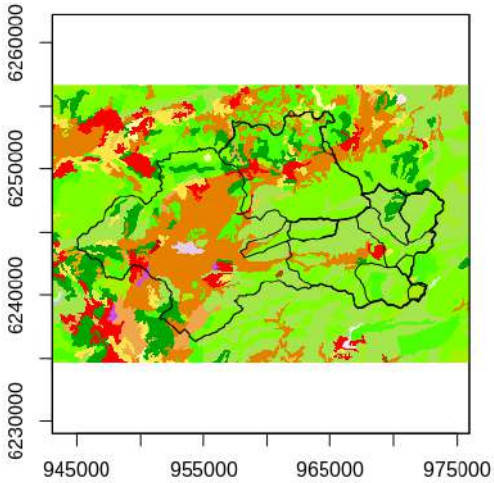


Figure 5: Raster Corine Land Cover

La méthode choisie pour intégrer un « a priori » est une méthode simple qui contraint la valeur du paramètre hydrologique a une modulation soit à la hausse soit à la baisse en fonction d'un facteur explicatif. Pour affecter un poids aux facteurs explicatifs, on fait une classification et une hiérarchisation « a priori » en fonction de leur effet attendu sur la production ou sur le ruissellement. Les pixels du paramètre S_0/A sont alors augmentés ou diminués en fonction des classes.

Une étude sur la corrélation entre les descripteurs et les S_0/A dans les bassins emboîtés est en cours. Dans un premier temps, et pour l'exemple présenté ici, on choisit de procéder de façon « experte » en hiérarchisant à priori les classes d'occupation des sols de la base Corine Land Cover (CLC). Par exemple les classes d'occupation du sol (CLC), déterminées sur des pixels de 50m, sont hiérarchisées de la façon suivante :

Nature	Glacier	Aéroport / route	Roche nue / incendie	Landes	Paturage	Multiculture	Conifères	Forêt mixte	Feuillus	Plage
Poids	0,3	0,2	0,15	0,1	0	- 0,1	- 0,2	- 0,25	- 0,3	- 0,4

Tableau 1 : affectation à priori de poids additifs au paramètre S_0/A en fonction de l'occupation des sols

Cela se traduit par une cartographie d'une pondération du paramètre S_0/A directement reliée à une classe d'occupation du sol (figure 6). Ici les poids sont dits « additifs », c'est à dire qu'ils seront ajoutés (ou retranchés si négatifs) à la valeur du paramètre S_0/A régionalisé.

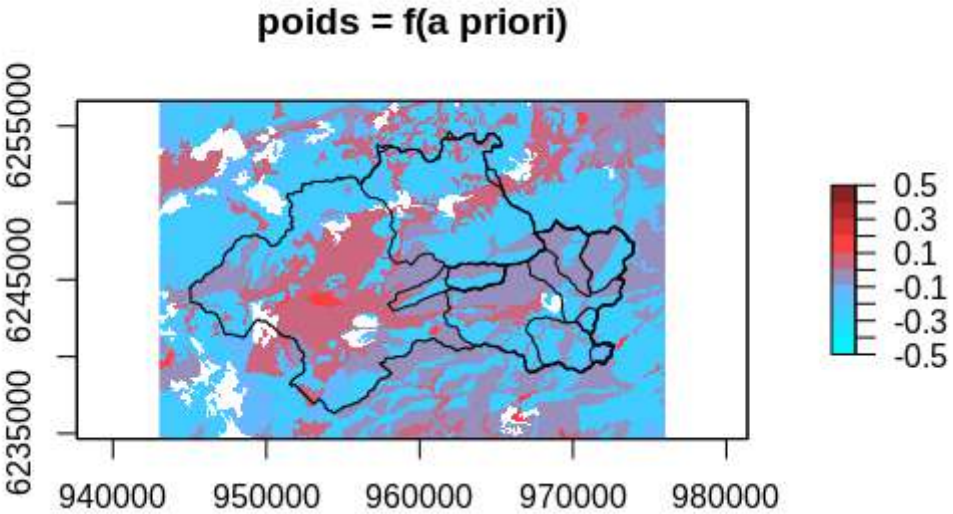


Figure 6: Poids additif de chaque pixel

Si toutes les valeurs de S_0/A des pixels d'un bassin versant sont transformées de cette manière cela peut conduire à des biais qui sont ensuite corrigés à l'échelle des bassins versants jaugés. C'est à dire que l'on s'assurera qu'à l'échelle du bassin versant jaugé le paramètre S_0/A moyen n'a pas été changé et que la nouvelle paramétrisation donne les mêmes débits bien qu'une variabilité ait été créée par un « a priori ».

Du coup, même si les valeurs estimées localement ne peuvent pas être confirmées (à cause du manque des données pour la validation), malgré tout la nouvelle cartographie n'est pas moins fiable à l'échelle des bassins jaugés (jusqu'à 10 km²). Par contre, si la façon d'imposer les paramètres va dans le bon sens, il existe une possibilité d'avoir les débits plus proches de la réalité à l'intérieur des bassins versants, avec la nouvelle cartographie.

La désagrégation est donc réalisée pour créer une variabilité a priori du paramètre hydrologique, tout en respectant les valeurs déterminées à plus grande échelle, c'est à dire à l'échelle des bassins versants jaugés.

RÉSULTATS

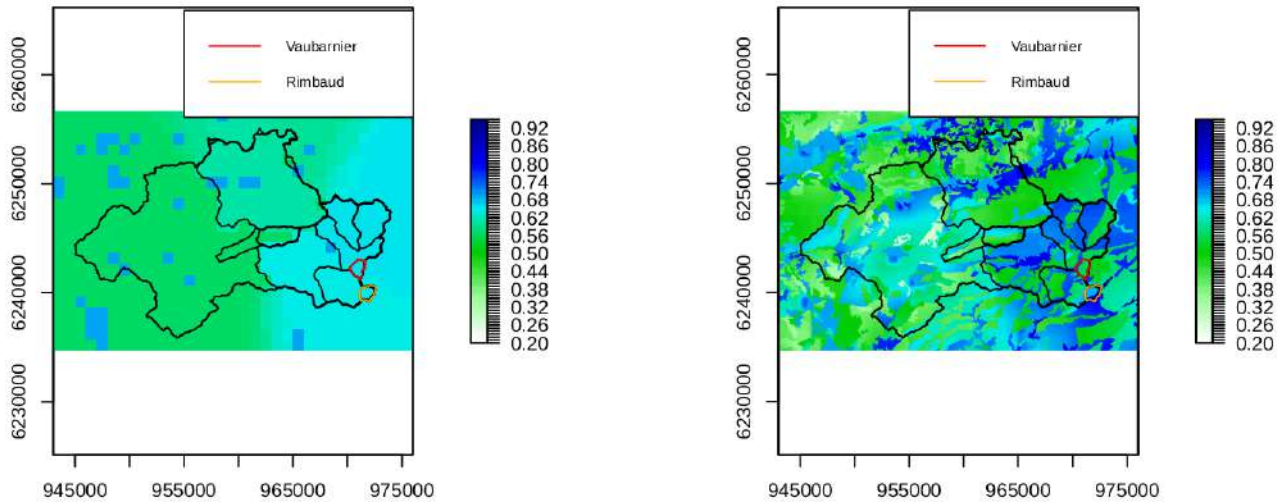


Figure 7: Comparaison entre la carte S0A initiale et la carte désagrégée

La procédure de calage sur les grands bassins puis validation sur les petits bassins permet de tester la pertinence de la régionalisation et de la désagrégation proposée. C'est une première évaluation possible.

Sur le groupe de bassin étudié, les résultats sont analysés sur la restitution des débits des plus petits bassins, en particulier sur deux bassins de 1,5 km² présentant des caractéristiques hydrologiques très contrastées.

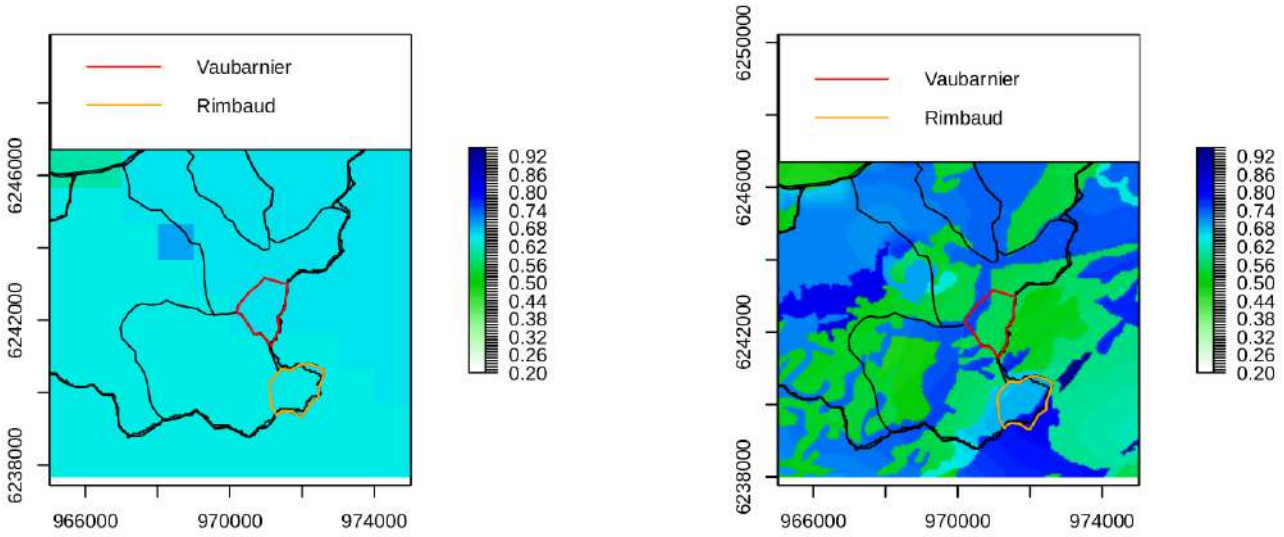


Figure 8: Zoom sur la région intéressante pour la validation

Avec la cartographie « désagrégée » par un a priori sur le rôle de l'occupation du sol, les paramètres sont devenus plus variables pour ces deux bassins et ont conduit finalement à des valeurs qui vont plus dans le sens des observations avec des débits respectivement de 2,1 et 2,7 pour Vaubarnier et Rimbaud. Cette évolution dans le bon sens pour les deux bassins est cohérente avec l'occupation du sol :

- le bassin de Vaubarnier est associé aux classes « Forêt de feuillus » et « Forêt mixte » reliées à un coefficient pondérateur à la baisse.
- Le bassin de Rimbaud est associé aux classes « Forêt arbustive transitoire », « Végétation éparse » et « Paturage » reliées à un coefficient pondérateur à la hausse.

Cette variation des débits n'est pas suffisamment marquée par rapport les débits spécifiques de ces deux bassins. Des études antérieures ont montré que c'est l'épaisseur du sol et sa fractuosité qui jouent un rôle important sur la production associée à ces deux bassins. Il fallait donc ajouter cet a priori lors de la désagrégation pour mieux modéliser la particularité de fine échelle de ces deux bassins.

Ce résultat est certes lié au cas particulier de l'exemple présenté, mais il permet d'illustrer la possibilité de pouvoir proposer une variabilité spatiale de l'aléa à une échelle plus fine que celle que les observations le permettent. Ce travail reste à généraliser sur plusieurs autres groupes de bassins. De plus, la recherche de facteurs pertinents pour la désagrégation va faire l'objet de la suite de ce travail, avec le test de différentes variables environnementales, de différentes méthodes de désagrégation et de procédures d'optimisation par calage/contrôle. La comparaison à d'autres méthodes d'évaluation du coefficient de ruissellement des sols sera aussi affectée.

CONCLUSION

Cet article présente la méthodologie envisagée pour introduire une variabilité supplémentaire dans la paramétrisation de la méthode SHYREG, et fait l'objet d'un travail de thèse en cours. Le travail qui va suivre consiste à vérifier si à petite échelle les débits calculés sur les petits bassins de validation sont plus proches de l'observation après la procédure de désagrégation. Étant donné qu'à l'intérieur des bassins versants les données ne sont pas toujours disponibles du fait du manque de stations de mesure, une autre façon de contrôler sera appliquée en comparant la méthode avec d'autres méthodes appliquées à l'estimation des débits sur de petits bassins versants. Une approche plus statistique sur les débits estimés ponctuellement sur des petits bassins versants suite à des événements pluvieux intenses sera aussi une autre source de validation de la méthode.

Il en ressort cependant en première estimation que la méthode SHYREG est un bon candidat pour évaluer l'aléa hydrologique à échelle fine, car elle permet de bien prendre en compte la pluviométrie et l'information

hydrologique disponible sur les bassins versants jaugés. La cartographie qu'elle propose actuellement à échelle fine repose sur l'hypothèse que le comportement des bassins versants est homogène lorsque l'on descend en résolution spatiale. En effet, à l'intérieur des bassins jaugés, la paramétrisation est homogène spatialement et correspond au comportement certes spécifique du bassin de calage, mais au comportement moyen.

L'intégration d'une variabilité en dehors des caractéristiques observées sur les stations jaugées a été introduite par les régressions entre les paramètres et des caractéristiques environnementales des bassins. Cependant ces régressions peuvent avoir un sens au niveau d'une région mais peuvent ne pas être significatives à l'intérieur d'un groupe de bassin, ce qui les rendent difficilement utilisables pour passer à des échelles spatiales fines. L'usage d'une information a priori est courant en hydrologie et c'est cette information que l'on compte prendre en compte pour étudier une désagrégation spatiale de la méthode SHYREG la plus pertinente possible.

REFERENCES

Aubert Y, Arnaud P., Ribstein P., Fine J.-A. (2014) La méthode SHYREG débit - application sur 1605 bassins versants en France Métropolitaine. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (5) 2014, 993-1005. DOI: 10.1080/02626667.2014.902061

Arnaud P., Aubert Y., Organde D., Cantet P., Fouchier C., Folton N. (2014) Estimation de l'aléa hydrométéorologique par une méthode par simulation : la méthode SHYREG – Présentation – Performances – Base de données. *La Houille Blanche - Revue Internationale de l'Eau.* 2 (2014) 20-26. DOI :10.105/lhb/2014012

Arnaud P., Lavabre J., Sol B. et Desouches Ch. (2008) Regionalization of an hourly rainfall generating model over metropolitan France for flood hazard estimation. Hydrological Sciences Journal, 53 (1) 34-47.

Collier J. G. et Thome, J. R. (1994). - *Convective boiling and condensation*. third end. Oxford: Clarendon Press.

Delhaye J. M., Giot M., Riethmuller M. L. (1981). - *Thermal-hydraulics of two-phase systems for industrial design and nuclear engineering.* Hemisphere and McGraw Hill.

Lamb H. (1932). - *Hydrodynamics*. Cambridge University Press.

Odry J., Arnaud P. (2017) Comparison of flood frequency analysis methods for ungauged catchments in France. *Geosciences* 2017, 7, 88; doi:10.3390/geosciences7030088

Utilisation de la méthode EXZECO pour la connaissance de l'aléa ruissellement (Thomas *et al.*)

Utilisation de la méthode EXZECO pour la connaissance de l'aléa ruissellement

Delphine PORCHERON[1], Cédric PAYET[2], Céline GIBELIN[2]

[1] Cerema Ile-de-France - 12 rue Teisserenc-de-Bort, 78190 Trappes, France - delphine.porcheron@cerema.fr
2 Cerema Ile-de-France - 12 rue Teisserenc-de-Bort, 78190 Trappes, France - cedric.payet@cerema.fr et celine.gibelin@cerema.fr

La cartographie de l'aléa inondation par ruissellement est globalement peu aisée. Ce phénomène concerne en effet les bassins versants de petite taille où il est généralement constaté un manque de connaissance de leur comportement particulier (ex. crues éclairs) et de leur réseau hydrographique. Sur des territoires d'étude de grande étendue (i.e. dépassant 100 km² de superficie), il peut alors être judicieux d'employer des méthodes automatisées qui permettront d'identifier les secteurs les plus à risque.
C'est ce que propose cette utilisation de la méthode EXZECO (Extraction des Zones d'ECOulement), qui permet de façon paramétrée d'identifier les thalwegs à risque et les zones à l'aval d'écoulement et d'accumulation. Son utilisation présente l'avantage de ne nécessiter qu'une donnée d'entrée, un MNT ; l'ajustement de trois paramètres (hauteur de bruitage, surface drainée minimale et nombre d'itérations) permet ensuite de définir des emprises inondables associées aux axes d'écoulement. Cet ajustement est effectué en fonction d'une analyse de terrain, associée à une analyse des données historiques.
La méthodologie d'utilisation proposée se base sur l'exploitation des résultats d'EXZECO et de résultats intermédiaires issus de la chaîne de traitement appliquée sur la base de l'algorithme D8. Cette méthodologie de cartographie de l'aléa ruissellement sera décrite sur la base d'un exemple de paramétrage sur un secteur de l'ordre de 200 km², situé en Ile-de-France.
Mots-clefs : ruissellement, risque inondation, cartographie

Surface runoff hazard assessment using EXZECO method

Résumé anglais dans le même style. Pour un texte en français, le résumé en anglais pourra être légèrement plus long (300 mots max).
Preparation of flood hazard maps considering surface runoff remains a complex task. Floods induced by direct runoff occur indeed in small catchment areas where there is a general lack of knowledge about hydrological processes (i.e. flash floods) and drainage network. Using automated GIS procedure for identifying highest risk zones can be an advantage in terms of cost for large study areas (above 100 km²).
The proposed approach aims to map surface runoff areas using the EXZECO method (French Acronym for Extraction of runoff concentration zones). The EXZECO model is based on standard DEM (Digital Elevation Model) treatment algorithms to compute drainage networks, upstream catchment areas and a random modification of the DEM. The model requires also three parameters (filling height, drained surface threshold and number of iterations). These three parameters are calibrated considering field observations and historical information.
The suggested methodology exploits output results from EXZECO model and from standard DEM treatment algorithms. The present work describes this methodology for flood hazard maps related to surface runoff, based on an example of calibration in a French study case (200 km²).
Key words : direct runoff, flood, mapping

INTRODUCTION

Les crues dites de ruissellement sont connues pour être potentiellement dévastatrices et soudaines (ex. crues éclairs). L'étude de l'aléa inondation par ruissellement, lié aux bassins versants de faible superficie, est cependant peu aisée. Il n'existe en effet pas de méthodologie nationale précise pour sa définition, comme c'est le cas pour l'aléa débordement. Il est également techniquement difficile de distinguer les inondations par ruissellement de celles par débordement sur ces petits cours d'eau pérennes ou intermittents.

Les méthodes classiquement utilisées pour définir l'aléa débordement peuvent être appliquées mais plusieurs difficultés sont rencontrées dans la pratique, notamment :

- un manque de connaissance de leur réseau hydrographique, bien souvent incomplet (discontinuité des réseaux de la Base de Données (BD) Topo et BD Carthage), voire inexistant (tête de réseau, thalwegs intermittents ou secs non répertoriés) ;

- un manque de connaissance hydrologique car il s'agit majoritairement de petits bassins versants non jaugés, sur lesquels il est souvent difficile d'évaluer les débits et les volumes de crue (dynamique particulière à évaluer au cas par cas) ;
- le coût financier et temporel prohibitif lié à des modélisations hydrauliques sur des linéaires conséquents (plusieurs dizaines voire centaines de km) suivant le domaine d'étude.

Dans le cadre de l'élaboration de documents de connaissance de l'aléa ruissellement (retour d'expériences, cartographie de l'aléa, porter à connaissance, etc.) sur des territoires dépassant 100 km², des méthodes à « grand rendement » peuvent cependant être employées, comme la méthode EXZECO (EXtraction des Zones d'Écoulement) [Pons et al., 2010 a, b], basée sur un traitement automatisé de la topographie du bassin versant.

Plusieurs cartographies et études opérationnelles déjà réalisées sur la base de son utilisation ont permis d'apporter des réponses aux attentes des services de l'Etat et des collectivités, en proposant une connaissance du ruissellement à des échelles variées (de 0,1 à plusieurs centaines de km²). Après présentation d'EXZECO, l'objectif sera ici de décrire une méthodologie de cartographie de l'aléa ruissellement, sur la base d'un exemple de paramétrage sur un secteur de l'ordre de 200 km², situé en Ile-de-France.

DEFINITION GENERALE DU PHENOMENE DE RUISSELLEMENT ET RISQUE ASSOCIE

Le ruissellement est la circulation de l'eau qui se produit sur les versants en dehors du réseau hydrographique lors d'un événement pluvieux. Il apparaît lorsque les eaux de pluie ne peuvent pas ou plus s'infiltrer dans le sol. Sa genèse est liée à plusieurs facteurs dits de prédisposition (la nature des sols et des couches géologiques, le couvert végétal, la topographie, etc.) ou déclenchant, comme l'intensité des précipitations. L'action de l'homme est globalement un facteur d'aggravation (construction de voiries canalisant les eaux et accélérant les vitesses d'écoulement par exemple).

Trois types de ruissellement sont généralement distingués :

- le ruissellement diffus de faible hauteur d'eau et dont les filets d'eau buttent et se divisent sur le moindre obstacle,
- le ruissellement concentré organisé en rigoles ou ravines parallèles suivant la ligne de la plus grande pente. Ce phénomène est à l'origine de l'érosion du sol et peut temporairement laisser sa marque sur le versant,
- le ruissellement en nappe, plutôt fréquent sur les pentes faibles, qui occupe toute la surface du versant.

Parmi ces trois phénomènes, le ruissellement concentré est celui qui est le plus facilement identifiable et prévisible mais aussi le plus dommageable. Fortement dépendant des conditions topographiques, de l'occupation du sol et de l'intensité des pluies, ce type de ruissellement est caractérisé par des axes d'écoulement localisés pouvant être à l'origine d'inondations soudaines et de coulées de boues. À l'aval des versants ou dans les secteurs situés à la confluence de plusieurs axes de ruissellement, des cumuls d'écoulement peuvent se produire. Ce phénomène d'accumulation est particulièrement aigu en présence de cuvettes topographiques agissant comme de véritables « pièges à eau ».

Ces zones d'écoulement et d'accumulation constituent les deux grandes catégories de secteurs qui concentrent les risques les plus importants, associées à des hauteurs et/ou vitesses élevées. La méthode de cartographie présentée ici propose donc de se focaliser sur la détermination de ces zones d'écoulement et d'accumulation du ruissellement concentré.

EXZECO : UNE METHODE D'EXTRACTION DES ZONES D'ECOULEMENT

EXZECO [Pons et al., 2010 a, b] permet d'obtenir à large échelle des emprises potentiellement inondables sur de petits bassins versants. Il s'agit d'une méthode purement topographique qui permet de façon paramétrée d'identifier les thalwegs à risque et les zones à l'aval d'écoulement et d'accumulation.

EXZECO utilise l'algorithme D8 (disponible sur les logiciels de SIG) pour déterminer le réseau hydrographique [*e.g.* O'Callaghan, 1984], c'est-à-dire des directions d'écoulement de l'eau et les surfaces drainées. L'algorithme D8 permet, en fonction de la valeur d'altitude des mailles du MNT (Modèle Numérique de Terrain), de définir pour chacune d'entre elle une direction d'écoulement parmi les 8 possibles (Figure 1).

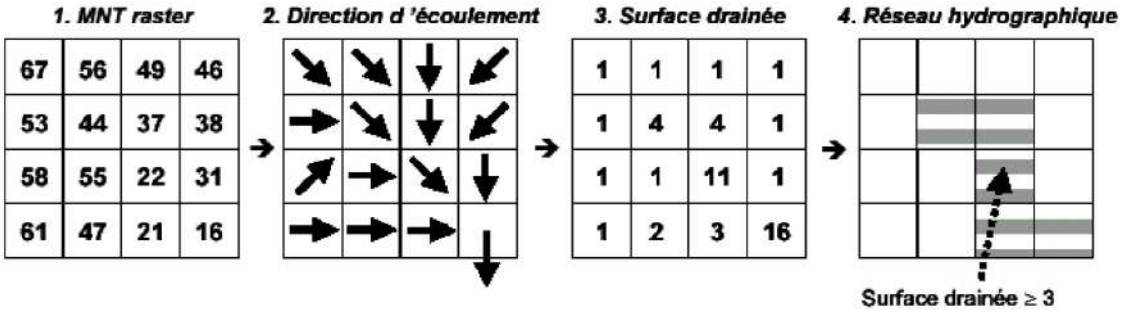


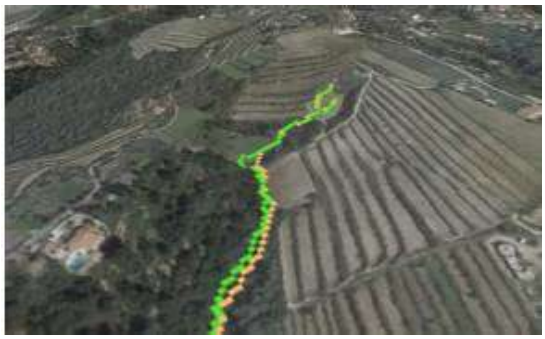
Figure 1 : calcul du réseau hydrographique et des surfaces drainées à partir d'un MNT (exemple avec un seuil fixé à 3 cellules)

Le D8 s'apparente ainsi à une simulation de l'écoulement de l'eau en surface, sachant que l'eau emprunte le chemin défini par la ligne de plus grande pente. Pour cela, plusieurs étapes (à réaliser « en chaîne ») sont nécessaires :

- élimination des dépressions du MNT,
- calcul du sens d'écoulement à partir des altitudes du MNT sans dépressions,
- calcul de l'accumulation d'eau pour chaque cellule en fonction du sens d'écoulement,
- extraction du réseau hydrographique sur la base d'un seuil à partir duquel on considère qu'il y a émergence d'un écoulement. La valeur du seuil indique le nombre de cellules se déversant à l'intérieur d'une même cellule (cf. Figure 1).

Le principe d'EXZECO repose sur un bruitage aléatoire des mailles du MNT (ajout ou non d'une « hauteur d'eau » sur les pixels) couplé à un calcul du réseau hydrographique sur la base d'un seuil minimum de surface drainée. Un grand nombre de simulations de ce type permettent alors d'identifier des chemins d'écoulement préférentiels et de faire ainsi apparaître des zones potentiellement inondables (Figure 2).

1. Résultat d'un calcul de thalweg



2. Nouveau calcul de thalweg (en vert), légèrement différent car le MNT a été modifié (« bruité)

3. De nombreuses itérations forment une surface

Figure 2 : principe de la méthode EXZECO d'après [Cerema, 2019]

Pour résumer, la méthode EXZECO ne nécessite qu'une donnée d'entrée, un MNT, et l'ajustement de trois paramètres : la hauteur de bruitage, la surface drainée minimale et le nombre d'itérations. Le traitement consiste à définir un MNT sans cuvettes ou dépressions, évaluer la direction des flux et les surfaces drainées en chaque maille. Le résultat peut ensuite être vectorisé en ne retenant que les pixels avec des surfaces drainées supérieures à un seuil défini (10 ha, 1km²…).

UTILISATION DANS LE CADRE D'UNE CARTOGRAPHIE DE L'ALEA RUISSELLEMENT

Description du secteur d'étude et des données d'entrée

Une approche adaptée au secteur d'étude : le bassin versant de la Beuvronne (77)

Le bassin versant de la Beuvronne (Figure 3) est un affluent en rive droite de la Marne et draine un bassin d'une superficie de 205 km² sur le département de la Seine et Marne (77). Il s'agit d'un bassin versant majoritairement rural (moins de 10% de surfaces urbanisées), au relief globalement peu marqué (pente moyenne de 0,62%) avec quelques vallées encaissées sur les parties amont. Le point culminant du bassin versant se situe 201 m d'altitude pour un point bas, situé à 40 m d'altitude au niveau de la confluence avec la Marne.

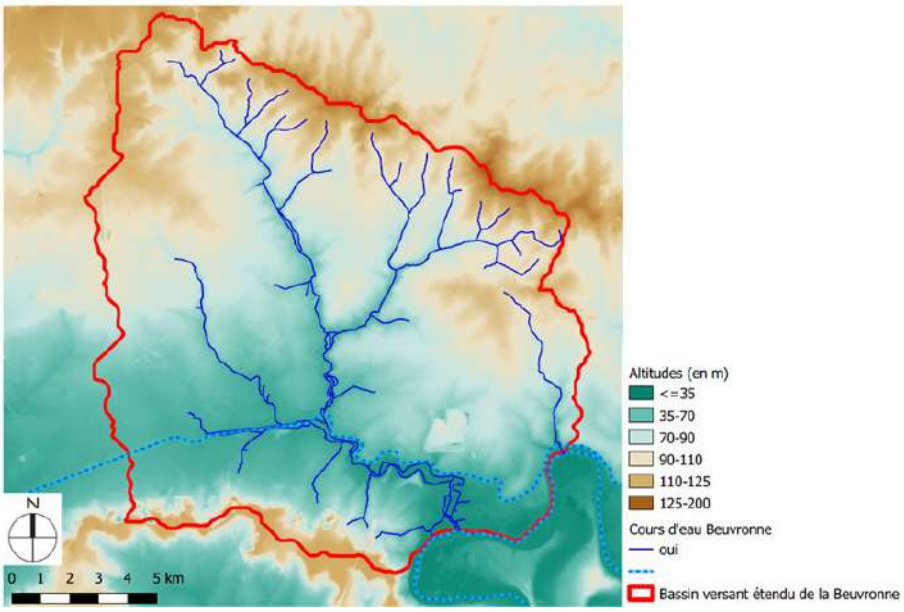


Figure 3 : Bassin versant de la Beuvronne, MNT du RGE ALTI 5 m (source IGN)

Dans le cadre de cette étude de cartographie de l'aléa inondation par ruissellement, l'utilisation d'une méthodologie basée sur EXZECO est ici justifiée par :

- des données historiques insuffisantes,
- une superficie trop importante pour l'utilisation d'une approche hydraulique complexe,
- une nécessité de réaliser une cartographie homogène pour qualifier l'aléa ruissellement.

Cette approche est utilisée sur l'ensemble du périmètre d'étude mais n'est jugée valide que sur les secteurs dits « de versants », c'est-à-dire situés en dehors du lit majeur inondable par débordement de cours d'eau. Par ailleurs, l'étude du réseau d'assainissement des eaux pluviales n'est pas incluse.

Donnée d'entrée utilisée

Le MNT utilisé est le RGE ALTI 5 m (Référentiel à Grande Échelle de l'IGN) défini au pas de 5 m et d'exactitude altimétrique comprise entre 0,5 m et 0,7 m (Figure 3). L'idée est de disposer d'un MNT relativement fiable et homogène afin d'obtenir des résultats cohérents pour un temps de calcul raisonnable sur l'ensemble du secteur d'étude.

Méthodologie globale : sorties du modèle EXZECO considérés

Axes d'écoulement

Les axes d'écoulement sont déduits directement de la chaîne de traitement appliquée sur la base de l'algorithme D8, après comblement des dépressions (cf. plus haut : EXZECO une méthode d'extraction des zones d'écoulement). Le fichier raster résultat est filtré pour ne garder que les mailles présentant une surface drainée supérieure à 0,25 km² puis vectorisé.

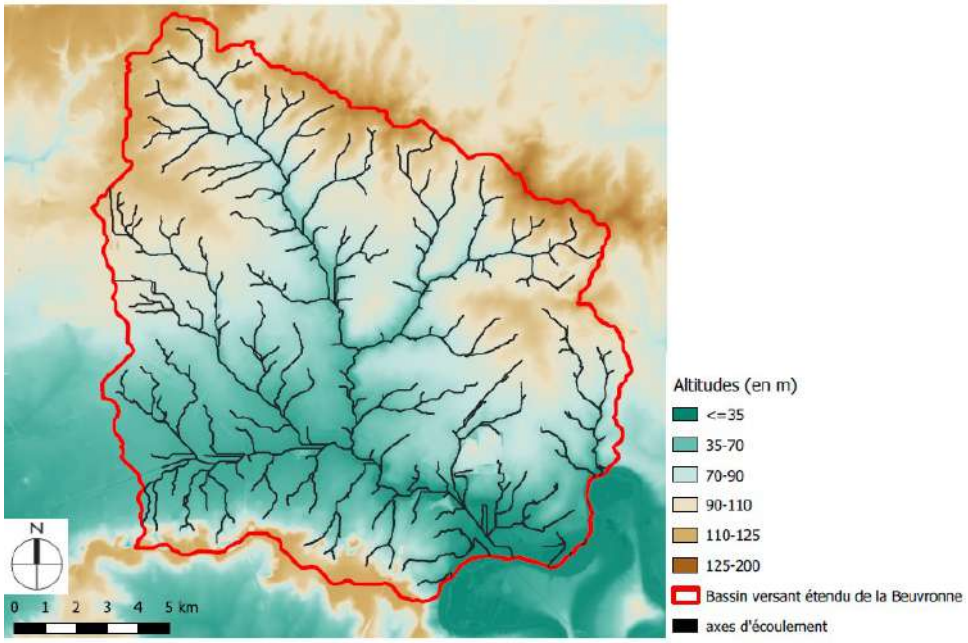


Figure 4 : axes d'écoulement détectés sur la base d'une superficie drainée minimale de 0,25 km²

Emprises inondables associées aux axes d'écoulement

Il s'agit des fichiers de sortie du traitement de bruitage effectué par EXZECO (cf. EXZECO une méthode d'extraction des zones d'écoulement). Plusieurs hauteurs de bruitage ont été considérées : 15 cm, 25 cm, 50 cm et 75 cm, chacune sur une base de 1000 simulations, pour une superficie drainée minimale de 0,15 km².

Les fonds de thalweg ainsi identifiés, sièges d'écoulements potentiels, permettent de réaliser une approximation de l'emprise inondable associée aux axes d'écoulement. L'idée est ici d'identifier l'équivalent du lit majeur, voire moyen des axes d'écoulement définis précédemment, c'est-à-dire une zone relativement plane, bordée par des versants marqués et « encadrant » l'axe d'écoulement (Figure 5 et Figure 6).

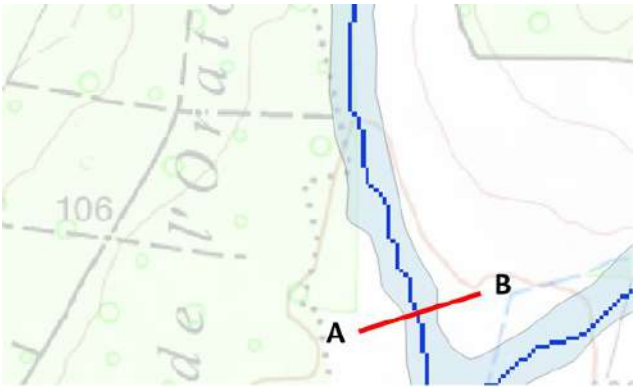


Figure 5 : emprise inondable (en bleu clair, hauteur de bruitage 25 cm) associée à un axe d'écoulement (en bleu foncé)

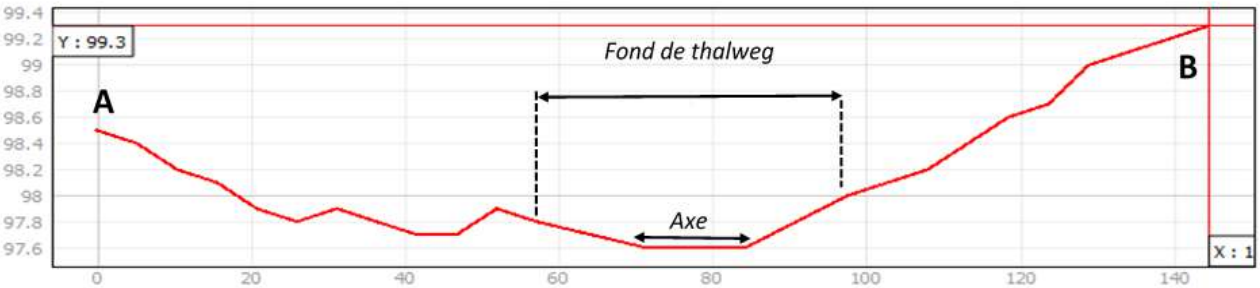


Figure 6 : profil topographique transversal au niveau du thalweg mettant en évidence son fond plat associé à l'emprise inondable retenue en Figure 5

Zones d'accumulation

La mise en évidence des zones d'accumulation se base sur un fichier raster intermédiaire matérialisant les dépressions topographiques, les « cuvettes » topographiques. Ce raster provient de la chaîne de traitement décrite avant (cf. EXZECO une méthode d'extraction des zones d'écoulement) et identifie, pour chaque maille :

- si la maille est située sur une cuvette,
- et si oui, sa profondeur par rapport au sommet de la cuvette.

Un filtrage du raster des cuvettes topographiques est alors réalisé (Figure 7) pour ne conserver que :

- les cuvettes situées au sein de l'emprise inondable des thalwegs définie à l'étape précédente,
- les cuvettes dont la profondeur est supérieure ou égale à 0,8 m.

La valeur seuil de 0,8 m est retenue pour ne considérer que les dépressions topographiques particulièrement marquées et pour s'affranchir ainsi des éventuelles imprécisions ou erreurs du MNT dont la précision en z est de l'ordre de 0,5 à 0,7 m.

Par ailleurs, en ne retenant que les zones situées dans l'emprise inondable qui est le siège d'écoulements superficiels potentiels, la hauteur d'eau au sein des cuvettes est potentiellement proche du mètre : 0,8 m de profondeur (cuvette) à laquelle s'ajoute une faible épaisseur d'écoulement au sein de l'enveloppe inondable, classiquement comprise entre 10 et 20 cm (Figure 7).

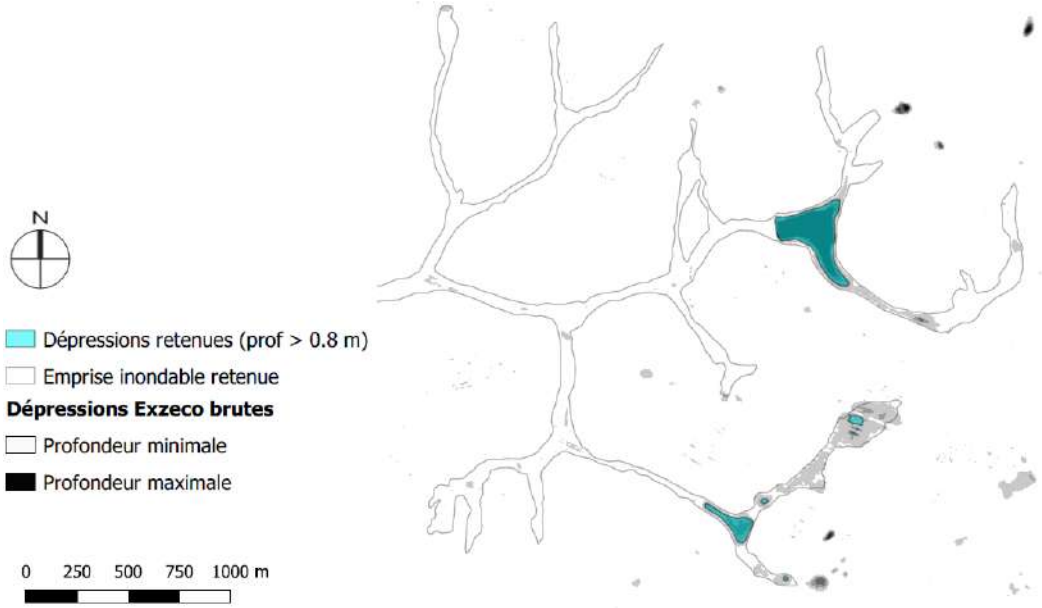


Figure 7 : Extrait cartographique des zones d'accumulation retenues (en bleu) à partir du raster des cuvettes topographiques

Limites

De manière générale, la méthodologie employée pour qualifier l'aléa ruissellement dépend du contexte, de l'étendue du bassin versant, des données disponibles, etc. De fait, les résultats obtenus sont à considérer avec prudence, d'autant plus qu'il existe un manque de données de calage localisées précisément pour valider les méthodes. Dans le cadre de la méthodologie employée sur le bassin versant de la Beuvronne, les limites identifiées sont :

- liées aux données d'entrée, c'est-à-dire aux données topographiques : les résultats sont tributaires de la précision du MNT utilisé, ici le RGE ALTI 5 m. Celui-ci ne permet pas de prendre en compte des superstructures comme les bâtiments, ce qui peut conduire à ne pas représenter de façon cohérente des écoulements en milieu urbain et explique que cette méthode soit retenue plutôt pour des bassins à dominante rurale ;
- la non prise en compte des réseaux d'assainissement, ouvrages hydrauliques (ou autres) sous le niveau du MNT et éléments de taille inférieure à la taille de la grille du MNT (mobilier urbain, trottoirs, mur de clôture, mur, digue…) ;

- la non prise en compte de la pédologie, de la capacité d'infiltration, des données pluviométriques/hydrométriques, etc.
- enfin, l'outil ne fournit pas d'éléments tels que hauteur d'eau, vitesse d'écoulement, période de retour. Les résultats obtenus et les hauteurs de bruitage doivent donc faire l'objet d'une expertise. Il est à noter qu'une surestimation est possible dans les zones planes (difficulté d'identifier les zones d'écoulement).

NIVEAUX D'ALEA ASSOCIES : EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DE LA BEUVRONNE

Les classes d'aléa sont définies à partir des zones d'écoulement et des zones d'accumulation. Un classement en trois niveaux d'aléa (Fort, Moyen et Faible) est établi pour cette cartographie de l'aléa ruissellement, sur la base d'appréciation de l'intensité qualitative du phénomène à partir d'une étude de terrain et des données historiques disponibles. Sur les zones d'emprise inondables, différentes couches ont été considérées pour définir les classes d'aléa en fonction de la superficie drainée : 15 cm, 25 cm, 50 cm et 75 cm.

Définition pour l'aléa Fort

Les zones d'accumulation (« cuvettes topographiques »)

Les zones d'accumulation ont été assimilées aux « cuvettes topographiques » au sein desquelles les écoulements convergent. Cette convergence s'observe en cas d'absence d'exutoire rendant possible l'accumulation d'eau. Dans ces zones, les vitesses d'écoulement sont donc faibles voire nulles mais les hauteurs potentiellement élevées.

Les cuvettes topographiques retenues (dont la profondeur – et non la hauteur d'eau – est au minimum de 0,8 m) sont situées au sein des « fonds de thalweg ». En conséquence, les hauteurs d'eau dans ces zones d'accumulation peuvent atteindre ou dépasser 1 m.

Pour l'ensemble de ces raisons, l'aléa dans ces zones d'accumulation est considéré comme fort.

Axes d'écoulement

Les axes de ruissellement représentent le « cœur » du processus d'écoulement des eaux en surface. En concentrant et en accélérant les écoulements, ils justifient leur étude et leur analyse poussées. En conséquence, chaque axe d'écoulement retenu (surface drainée supérieure à 0,25 km²) est considéré comme présentant un aléa fort.

Ces secteurs sensibles sont par ailleurs souvent le siège d'écoulements particulièrement turbides (forte teneur en matériaux érodés ou divers transportés). Dans certains cas, des embâcles peuvent se produire et aggraver localement le phénomène (augmentation de la hauteur d'eau et/ou élargissement de la zone d'écoulement) : en conséquence, un tampon (enveloppe forfaitaire qualitative) de 10 m de part et d'autre est associé à chacun de ces axes d'écoulement.

Emprises inondables associées aux axes d'écoulement

Le zonage des zones d'écoulement en aléa fort a été complétée par la détection des fonds de thalweg pour des superficies drainées supérieures à 5 km². A partir de ce seuil de superficie, il est considéré que les débits de crue peuvent être élevés et que les écoulements des eaux de surface ne sont pas uniquement concentrés au niveau des axes d'écoulement. Pour évaluer cette emprise, la couche de hauteur de bruitage 15 cm est utilisée. L'objectif est ici de considérer que ces zones sont détectées sur la base d'une faible hauteur de bruitage, pouvant être associée à une crue fréquente. En d'autres termes, les emprises ainsi identifiées sont facilement inondables. Lors de la survenue d'un évènement rare (évènement pluviométrique intense, embâcle entraînant des débordements latéraux, etc.), celles-ci seront fortement touchées, avec de fortes hauteurs d'eau potentiellement associées à des vitesses d'écoulement importantes. Ces zones sont donc classées en aléa fort.

Définition pour l'aléa Moyen

Pour évaluer l'aléa moyen, plusieurs couches de hauteur de bruitage sont utilisées. Son emprise a ainsi été définie pour des superficies drainées supérieures à 1 km², seuil à partir duquel les débits de crue peuvent devenir plus conséquents. L'objectif est de sélectionner des secteurs aux vitesses et hauteurs moyennes. Par ailleurs, une règle mettant en relation hauteur de bruitage et superficie drainée est mise en œuvre. Celle-ci repose sur le principe que la hauteur d'eau augmente de l'amont vers l'aval. Le Tableau 1 expose cette relation entre classe de superficie drainée et hauteur de remplissage.

Tableau 1 : relations entre superficie drainée et hauteur de remplissage pour l'aléa moyen

Superficie drainée minimale (en km²)	Superficie drainée maximale (en km²)	Hauteur de remplissage (en m)
1	5	0.15
5	10	0.25
≥ 10	-	0.50

Définition pour l'aléa Faible

De manière similaire au zonage de l'aléa moyen, le zonage de l'aléa faible est fondé sur la détection du lit majeur des thalwegs. Son emprise a été définie pour des superficies drainées supérieures à 0,15 km², seuil à partir duquel des écoulements de ruissellement de moindre ampleur peuvent être observés. Les vitesses d'écoulement, ainsi que les volumes en transit, y sont en effet plus faibles qu'au niveau de l'axe en lui-même ou du lit moyen.

L'emprise de l'aléa faible est évaluée sur la base de plusieurs couches de remplissage, comme pour l'aléa moyen, suivant des règles hauteur de bruitage/superficie drainée. Le tableau ci-dessous détaille ces relations entre classe de superficie drainée et hauteur de remplissage

Tableau 2 : relations entre superficie drainée et hauteur de remplissage pour l'aléa moyen

Superficie drainée minimale (en km²)	Superficie drainée maximale (en km²)	Hauteur de remplissage (en m)
0.15	1	0.15
1	2	0.25
2	5	0.50
≥ 5	-	0.75

Il est à noter que les hauteurs de remplissage associées aux superficies sont plus importantes que pour l'aléa moyen. A l'inverse des emprises inondables classées en aléa fort, l'objectif est ici de considérer que ces zones sont détectées sur la base d'une hauteur d'eau plus importante, pouvant être associée à une crue plus rare. En d'autres termes, les emprises ainsi identifiées sont plus rarement inondables et donc moins « sensibles ». Lors de la survenue d'un évènement rare, celles-ci seront ainsi moins touchées que les zones d'aléa moyen ou fort, avec de plus faibles hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement moindres.

Cartographie de l'aléa ruissellement proposée

Une cartographie de l'aléa ruissellement est actuellement proposée pour l'ensemble du territoire d'étude (Figure 8). La Figure 9 ci-après permet de visualiser plus précisément les zonages effectués, sur le territoire de la commune de Montgé-en-Goëlle.

Les secteurs non couverts sont des secteurs :

- où la morphologie plane et/ou l'urbanisation importante ne permettent pas de remplir les conditions normales d'utilisation de la méthode EXZECO.
- où les emprises définies par l'outil EXZECO (zones d'écoulement et d'accumulation) présentent un problème de « blocage » par un relief (cf. limites).

La cartographie de l'aléa ruissellement établie a ensuite été comparée aux données historiques recensées et étudiées. La grande majorité des axes et secteurs inondables sont bien retrouvés, ce qui conforte la pertinence de la méthodologie déployée. Néanmoins, en fonction de la qualité des données fournies et de l'intensité du phénomène, certains ajouts ont été effectués pour affiner les résultats fournis par l'outil EXZECO. Sur ces secteurs, une analyse de terrain, des données historiques et des résultats du modèle a été réalisée afin de déterminer les retraitements manuels nécessaires. Les emprises (aléas fort, moyen et faible) ont ainsi été modifiés sur les secteurs où des données historiques suffisamment précises étaient disponibles.

Par ailleurs, une carte de l'aléa débordement (à venir) permettra de remplacer le zonage sur les cours d'eau de l'étude. Sur les secteurs/tronçons inclus dans le périmètre de la future étude de l'aléa débordement, c'est en effet la carte de l'aléa débordement qui prévaudra sur celle de l'aléa ruissellement. La comparaison des résultats des deux cartographies est également envisagée afin d'évaluer les surestimations/sous-estimations de la méthode EXZECO vis-à-vis d'une approche hydraulique, voire hydrogéomorphologique classique sur les secteurs communs.

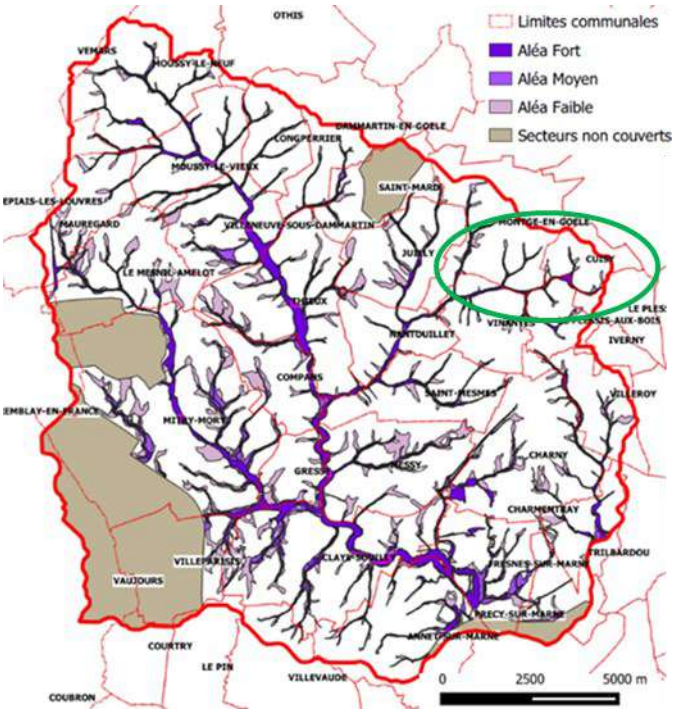


Figure 8 : Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement, bassin versant de la Beuvronne (77)

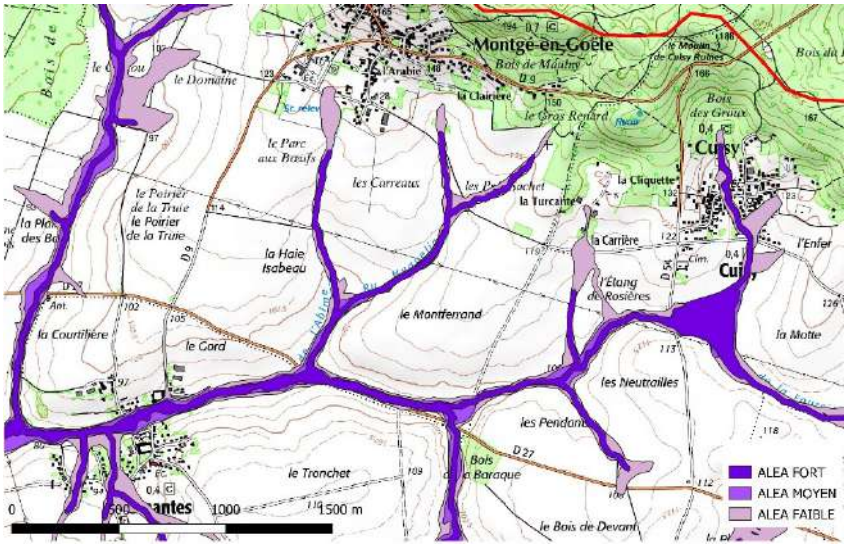


Figure 9 : Zoom sur la commune de Montgé-en-Goële (zone cerclée de vert en Figure 8)

CONCLUSIONS

Sur les secteurs de grande étendue dépassant 100 km², il peut être difficile et/ou coûteux de caractériser l'aléa inondation par ruissellement. Dans ces conditions, il peut être judicieux d'employer des méthodes automatisées qui permettront d'identifier les secteurs les plus à risque. C'est ce que propose l'utilisation de la méthode EXZECO, qui permet de façon paramétrée d'identifier les thalwegs à risque et les zones à l'aval d'écoulement et d'accumulation, au-travers d'un exemple de territoire d'étude : le bassin versant de la Beuvronne (200 km²), situé en Seine-et-Marne (77).

La démarche est fondée sur une cartographie en trois classes d'aléa (faible, moyen et fort). La définition de ces trois niveaux d'aléa se base sur la caractérisation des axes d'écoulement et zones d'accumulation, ainsi que des zones d'emprise inondables associées aux axes d'écoulement. La cartographie de l'aléa ruissellement est proposée pour l'ensemble du périmètre d'étude à l'exception des secteurs où les conditions normales d'utilisation de la méthode EXZECO ne sont pas remplies (zones de morphologie plane et/ou d'urbanisation importante et zones de « blocage » par un relief).

L'avantage de son utilisation est qu'elle ne nécessite qu'une donnée d'entrée, un MNT ; l'ajustement de trois paramètres (hauteur de bruitage, surface drainée minimale et nombre d'itérations) permet ensuite de définir des emprises inondables associées aux axes d'écoulement. Cet ajustement est effectué en fonction d'une analyse de terrain, associée à une analyse des données historiques. Les difficultés rencontrées sont de l'ordre de la représentativité d'un phénomène complexe : non prise en compte de l'occupation et de la nature du sol, des conditions hydrologiques, etc. Par ailleurs, et comme pour l'ensemble des méthodes de caractérisation du ruissellement, l'absence de données homogènes à l'échelle nationale constitue également un frein à l'évaluation des résultats fournis.

REFERENCES

[1] Cerema, (2019) - *ruissellement sur l'Arc Méditerranéen, application de la méthode EXZECO*

21] O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M. (1984) - *The extraction of drainage networks from digital elevation Data*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28, 323-344.

[3] Pons F., JL.Delgado, P.Guero, E.Berthier (2010a) - *EXZECO : a GIS and DEM bases method for predetermination of flood risk related to direct runoff and flash floods*, 9th International Conference on Hydroinformatics HIC 2010 Tianjin, China.

[4] Pons, F., Guero, P., Bruno, K.h., Delgado, J.-L., Berthier, E., Piney, S. and Felts, D. (2010b) - *Une contribution à l'évaluation de l'aléa inondation par ruissellement et crues soudaines*, SimHydro 2010 : Hydraulic modeling and uncertainty, Sophia-Antipolis, France.

Utilisation d'un MNT pour la construction de la topologie de drainage de l'agglomération de Dakar (Dieme *et al.*)

Utilisation d'un MNT pour la construction de la topologie de drainage de l'agglomération de Dakar.

Laurent Pascal M. DIEME[1*], Christophe BOUVIER[2]
Ansoumana BODIAN[1] & Alpha SIDIBE[3]

[1]Laboratoire Leïdi "Dynamique des Territoires et Développement", Université Gaston Berger (UGB), Saint Louis, Sénégal, malspaco4@gmail.com, ansoumana.bodian@ugb.edu.sn
[2]IRD UMR 5569 CNRS-IRD-UM, HSM, France, christophe.bouvier@ird.fr
[3]DPGI "Direction de la Prévention et de la Gestion des Inondations au Sénégal", MEA Sénégal, vieuxalpha@gmail.com

A Dakar, les inondations sont récurrentes depuis 2005 avec de lourds impacts sur les actifs sociaux comme économiques. Trois facteurs permettent d'expliquer les causes : (1) le milieu physique (composé de près 4 800 ha de zones humides) sur lequel s'est opéré (2) un étalement urbain rapide sans aménagements adéquats et (3) la fréquence de fortes intensités pluviométriques. La récurrence de ces inondations dans un contexte de reprise pluviométrique nécessite de développer des outils de monitoring permettant de réduire le risque. Cette étude vise à développer une méthodologie originale et performante, capable de fournir, en temps réel ou différé, une représentation à échelle fine (5m) des flux d'écoulements sur l'ensemble de l'agglomération de Dakar et d'identifier des points de débordement du réseau pluvial lors d'un épisode pluvieux. Deux étapes méthodologiques sont combinées pour atteindre cet objectif : (a) reconstituer les trajectoires des écoulements en tenant compte du terrain et des modifications induites par les objets urbains ; (b) définir et valider les modèles d'écoulement, en procédant au couplage d'un modèle hydrologique de calcul des écoulements à l'exutoire de petits bassins versants urbanisés avec un modèle hydraulique de propagation en réseau. Cet article traite principalement de la première phase de l'étude. Elle est basée sur un MNT de résolution 5m à partir duquel on extrait un premier modèle de drainage qui est ensuite modifié afin d'intégrer les conditions urbaines et ainsi spatialiser les nouvelles directions des flux d'écoulement. La chaîne de traitement a été implémentée dans le logiciel ATHYS.

Mots-clefs : Inondation, drainage urbain, ATHYS, MNT, Dakar

Construction of drainage network topology using Digital Elevation Model: case of Dakar.

In Dakar, floods have been recurring since 2005 with negative social and economic impacts. These flooding are caused by: (1) physical environment (nearly 4,800 ha of wetlands in Dakar) on which (2) increased urbanization without proper management and (3) frequency of heavy rainfall intensities. The recurrence of these floods in the context of rainfall recovery requires monitoring tools to reduce risks. This study aims to develop a methodology, capable of providing, in real or deferred time, a fine-scale representation (5m) of the flowflux over the entire Dakar metropolitan area and of identifying areas presenting overflow during a rainy episode. Two key steps are followed to achieve this objective: (a) reconstitute the trajectories of the flows by taking into account the terrain and the modifications induced by urban objects; (b) define and validate the flow models, by coupling a hydrological model for calculating flows at the outlet of small urbanized watersheds with a hydraulic network propagation model. This article mainly deals with the first phase of the study. It is based on a 5m resolution DEM from which we extract a first drainage model which is then modified in order to integrate urban conditions and thus spatialize the new directions of flow flux. The processing chain has been implemented in the ATHYS software.

Key words: Flooding, urban drainage, ATHYS, DTM, Dakar

INTRODUCTION

Les espaces urbains sont vulnérables aux inondations en raison du type d'occupation du sol mais aussi de la concentration des actifs sociaux et économiques [Hammond et al., 2015 ; Israel, 2017 ; Azzam et Ali, 2019]. Dans les pays sous-développés, notamment en Afrique subsaharienne, plusieurs auteurs [Bull-Kamanga et al., 2003 ; Dodman et al., 2017 ; Fraser et al., 2017] indiquent qu'il existe des liens directs et indirects entre le processus d'urbanisation et l'accumulation de l'exposition au risque d'inondation. Cette situation s'observe bien à Dakar, capitale du Sénégal. En effet, Dakar concentre sur 0,3% du territoire national plus de la moitié des infrastructures du pays et près de 25% de la population totale [ANSD, 2013]. L'agglomération est marquée par une urbanisation rapide, irrégulière et non encadrée [Mbow et al., 2008] atteignant les zones marécageuses [Diop et al, 2018, Sène et al., 2018] ; cela sans infrastructures de drainage pluviale fonctionnelles [Diouf, 2011]. Avec le retour des conditions humides ces deux dernières décennies [Sène et Ozer, 2002 ; Bodian,

2014 ; Panthou et al., 2014 ; Diop et al., 2016], elle est sujette à des inondations pluviales notamment en 2005, 2009, 2012 ou 2019 [Hungerford et 2019 ; Sy, 2019 ; Nouaceur 2020]. Ces inondations ont occasionné des pertes en vies humaines (26 morts en 2012 et 2 morts en 2019) (Sané et al., 2016), englouti des maisons et quartiers entiers (29 640 concessions en 2009, plus de 12 km^2 sous les eaux), et affecté l'économie [GRS, 2010], l'environnement et la santé des populations [De Magny et al., 2012]. En 2009 les dommages et pertes liés aux inondations ont été évalués à 35,5 milliards de FCFA [GRS, 2010]. L'inondation de 2009 figure parmi les plus dévastatrices [Bottazzi et al., 2018] et le manque d'expertise en matière de lutte contre les inondations a fragilisé l'efficacité des actions [Diop, 2019]. La reprise des pluies et leur intensification (figure 1) est à l'origine des inondations à Dakar même si elles sont aggravées par la déficience des ouvrages de drainage, les implantations humaines anarchiques et l'affleurement du niveau de la nappe [Mbow et al., 2008 ; Hungerford, 2019].

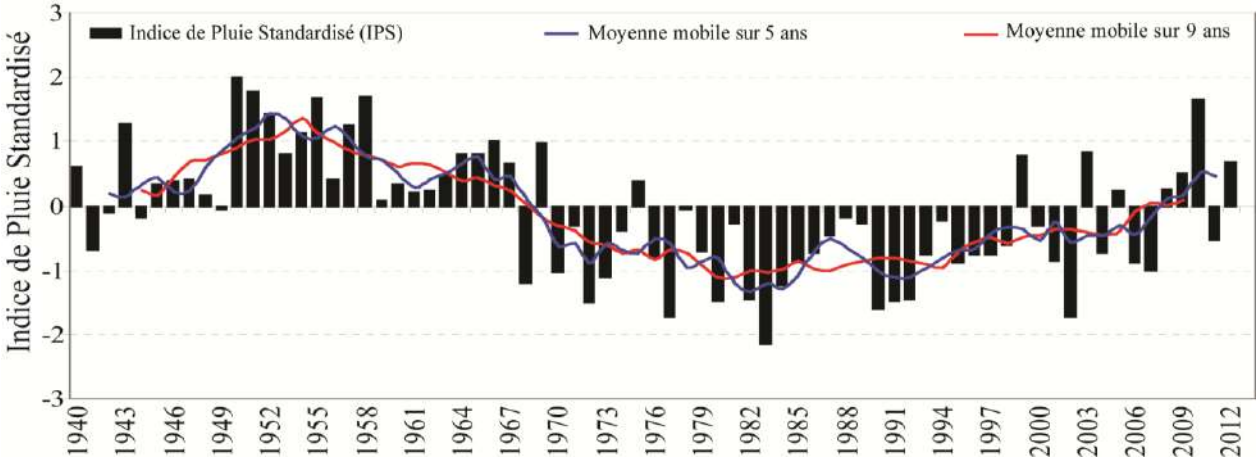


Figure 1 : Variation temporelle des indices de pluie standardisée au Sénégal sur la période 1940-2013 [Bodian, 2014]

La gestion des inondations représente un enjeu fort de développement durable de la ville. De ce fait, diverses actions sont menées par l'Etat du Sénégal et ses partenaires visant à minimiser les impacts négatifs des inondations et à renforcer la résilience des populations au moyen d'actions de réduction du risque [Sy et al., 2016]. Des mesures structurelles de construction d'infrastructures (150 km de canaux et 190 bassins) comme non structurelles (comités locaux de lutte contre les inondations exemple du COLIGEP, communication sur le risque, intercommunalité dans la gestion des inondations) sont dès lors mises en avant [ADM, 2019]. En cas de grave inondation, un plan de contingence dénommé Plan ORSEC (Plan National d'Organisation des Secours) est actionné par le gouvernement. Il s'agit d'un dispositif d'urgence destiné à faire face à tout événement calamiteux d'ordre exceptionnel dépassant les possibilités opérationnelles de secours locaux [Diop, 2019]. Il a été déclenché lors des inondations de 2005, 2009, 2012 et 2019. Cependant, en pratique, sa mise en œuvre est principalement réduite au pompage des eaux par les sapeurs-pompiers, à l'évacuation et la prise en charge temporaire des sinistrés [Schaer et al., 2018].

A l'échelle de toute l'agglomération dakaroise, peu d'études portent sur la mise en place d'un système d'alerte précoce aux inondations qui aiderai à identifier les mesures de réduction lors des situations de crises [Kama et al., 2018]. Pour la mise en place de ces outils, il convient de caractériser le fonctionnement hydrologique des bassins urbains, d'évaluer l'impact de l'imperméabilisation du sol ou de l'artificialisation du réseau sur les écoulements. Toutefois, l'inondation en milieu urbain est particulièrement difficile à modéliser du fait de la présence d'objets urbains : modification des directions liés au bâti et de l'hydraulique des axes drainants aux ouvrages de stockage ou de relèvement etc. [Bouvier et al., 2017]. L'objectif de ce travail est de construire une topologie du drainage intégrant les conditions urbaines de l'agglomération de Dakar avec comme perspective de mettre en place un modèle de simulation des débits d'écoulements à l'exutoire des bassins versants urbains et du comportement du réseau en temps quasi-réel. Cette construction s'est faite en utilisant le logiciel ATHYS qui réunit un ensemble de modèles hydrologiques associés à des traitements de données hydro-climatiques et géographiques. Son module de traitement des données géographiques (VICAIR) intègre certaines fonctions originales en mode raster : représentation fléchée et correction interactive des directions de drainage, drainage forcé selon un réseau squelettisé, correction des directions de drainage dans les ouvrages de stockage.

I- LE SITE

L'espace géographique sur lequel est appliqué cette méthode est l'agglomération de Dakar (figure 2). Etendue sur une superficie de 550 km^2, elle comptait 3 732 282 d'habitants en 2019 [ANSD, 2020] et comptera selon les projections de l'ANSD 4 356 697 d'habitants en 2025, avec une plus grande concentration de la population dans la banlieue et les nouvelles zones d'extension de la ville. Sur le plan géomorphologique, Dakar est en grande partie constituée de Niayes qui sont des cuvettes naturellement humides [Wade et al., 2009]. La prédominance des faibles altitudes, dont près de 40% est constitué de terrains situés à moins de 7 m d'altitude [Diop, 2019], renseigne sur le caractère dépressionnaire du site. Le fonctionnement hydrologique de ces zones marécageuses a grandement été perturbé par la sécheresse des années 1970 [Sircoulon et Olivry, 1986 ; Bodian, 2014 ; Diop et al., 2016 ; Bodian et al., 2016] qui a conduit à leur asséchement. L'urbanisation de la région à près de 96,4 % [Diop et al., 2017], entamée depuis 1857 s'est accéléré vers les années 1990 [Sané, 2013 ; Ndiaye, 2015]. Aujourd'hui elle a largement recouvert ces espaces anciennement humides, réduisant ainsi leurs capacités d'infiltration, cela en l'absence d'ouvrages d'assainissement pluvial [Mbow et al., 2008]. De plus, les implantations humaines (principalement de populations issues de l'exode rural), des services et du réseau routier se sont faits sans prendre en compte le sens de l'orientation du réseau hydrographique et de la topographie [Ndao, 2012 ; Bodian et al., 2016]. Ce type d'occupation a entrainé une modification du sens naturel de l'écoulement aggravant et déplaçant ainsi la vulnérabilité vers d'autres zones qui l'étaient moins. L'affleurement de la nappe phréatique, du fait à la fois de l'arrêt des pompages à cause d'un taux élevé de nitrate (600 mg/l pour une norme OMS de 50 mg/l) et du retour à des conditions humides, a accentué l'exposition de plusieurs quartiers de la banlieue aux inondations [Cissé et Faye, 2004]. Désormais une simple pluie peut entrainer la stagnation des eaux voir créer des situations d'inondations [Ndiaye et al., 2018]. A Pikine, environ 75% de l'espace du bassin de la grande Niaye est vulnérable aux inondations. Aussi, 50% des maisons et services occupent la surface vulnérable du bassin [Diop et al., 2017]. Un nouveau réseau de drainage, mis en place grâce au PROGEP, a permis de libérer plusieurs zones des difficultés liées aux inondations. D'autres réalisations d'ouvrages prévues par le PDGI (2012-2022 pour un coût de 720 milliards de FCFA) et du PGIIS (2019-2023 pour environ 10 milliards de FCFA) viendront en appoint à celles déjà construites enfin de continuer l'élan de réduction de la susceptibilité aux inondations des populations.

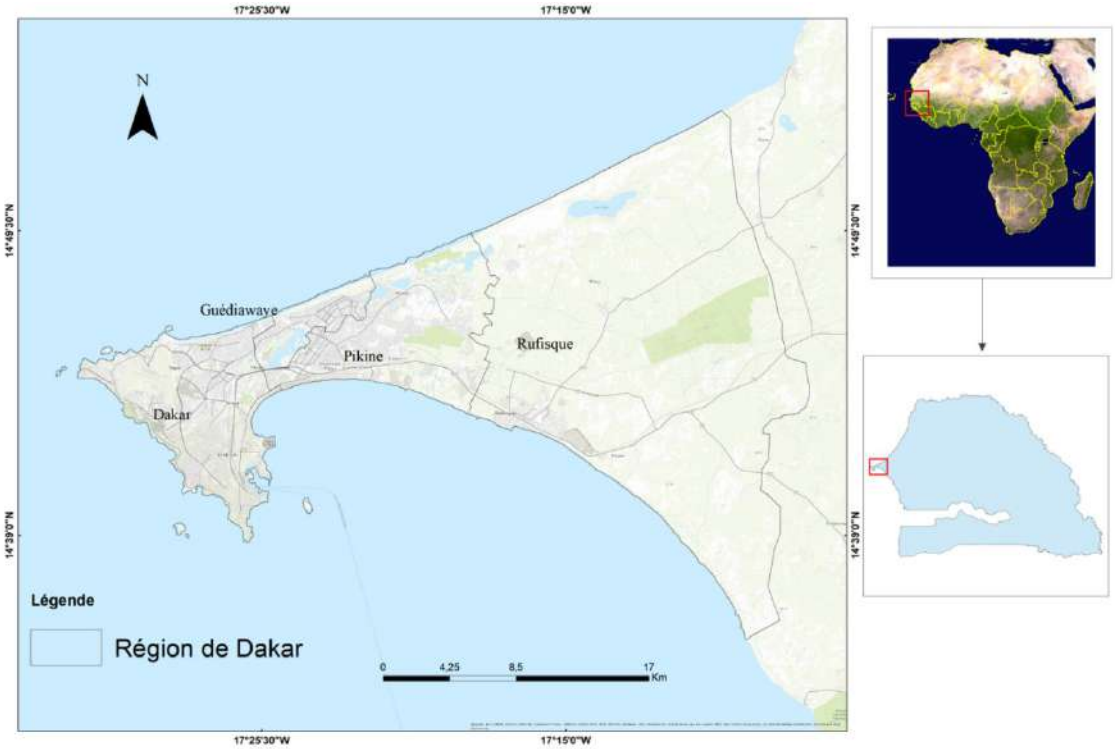


Figure 2 : Carte de situation de l'agglomération de Dakar

II- DONNEES ET METHODE

Plusieurs données géographiques sont nécessaires pour la construction de la topologie de drainage. Il s'agit du (1) MNT, (2) de la couche des bâtiments, (3) du tracé des canaux pluviaux et d'autres objets urbains tels que les bassins de rétention, les murets, les talus etc. Le MNT constitue l'information de base. Plus précise est sa résolution, meilleurs seront les résultats des traitements. Dans cette étude nous disposons d'un MNT couvrant l'ensemble de l'agglomération avec une résolution spatiale de 10m reprojeté à 5m. Il nous a été fourni par la DPGI. Sa réalisation, en 2010, s'est faite par restitution photogrammétrique, dans le cadre du Projet de mise en place d'un système d'information géographique appliqué aux zones inondées et inondables de la périphérie de Dakar. De ce MNT on a extrait un premier modèle de drainage (figure 3). Il s'agit d'une matrice de valeurs codées de 0 à 8, représentant la direction du flux sortant de chaque maille, correspondant à des multiples de 45° (1=nord, 2 = nord-est, etc… ; 0 = dépression endoréique). La direction est choisie selon l'altitude de la maille voisine la plus faible. Cependant, le calcul des directions de drainage peut générer des anomalies : fausses dépressions (point bas codé 0), boucles de drainage. Les dépressions et les boucles sont fréquemment dues à un défaut de précision du MNT et elles doivent nécessairement être éliminées. Les directions ainsi obtenues ont ensuite été modifiées pour prendre en compte les obstacles à l'écoulement (bâti, talus, murets), les axes drainants (réseau de canalisation) et les ouvrages de retenue (bassins de rétentions, dépressions naturelles) (figure 4). L'intégration des limites des ilots urbains dans la méthode consiste à forcer les directions de drainage en fonction du bâti. Pour cela, après avoir rastérisé la couche, on surélève artificiellement de 10m les altitudes de chaque maille du bâti dans le MNT, et on extrait à nouveau le modèle de drainage. Les modifications en fonction des axes drainants sont intégrées à partir du plan des canaux disponible dans la base de données urbaine de Dakar. Le programme utilisé consiste à détecter les nœuds du réseau (mailles possédant plus de 2 voisins, après squelettisation du réseau, ou maille extrémité ne possédant qu'un voisin) et les tronçons correspondants. Les directions de drainage de chaque tronçon sont déterminées en fonction des altitudes des extrémités du tronçon, en partant de l'altitude la plus élevée vers l'altitude la plus faible. L'intégration des bassins de retenue est réalisée à partir du plan rastérisé de ces bassins, l'exutoire de chaque bassin est déterminé par l'altitude minimale de la crête du bassin, et les directions de drainage des mailles du bassin sont dirigées vers cet exutoire, avec introduction d'une pente minimum.

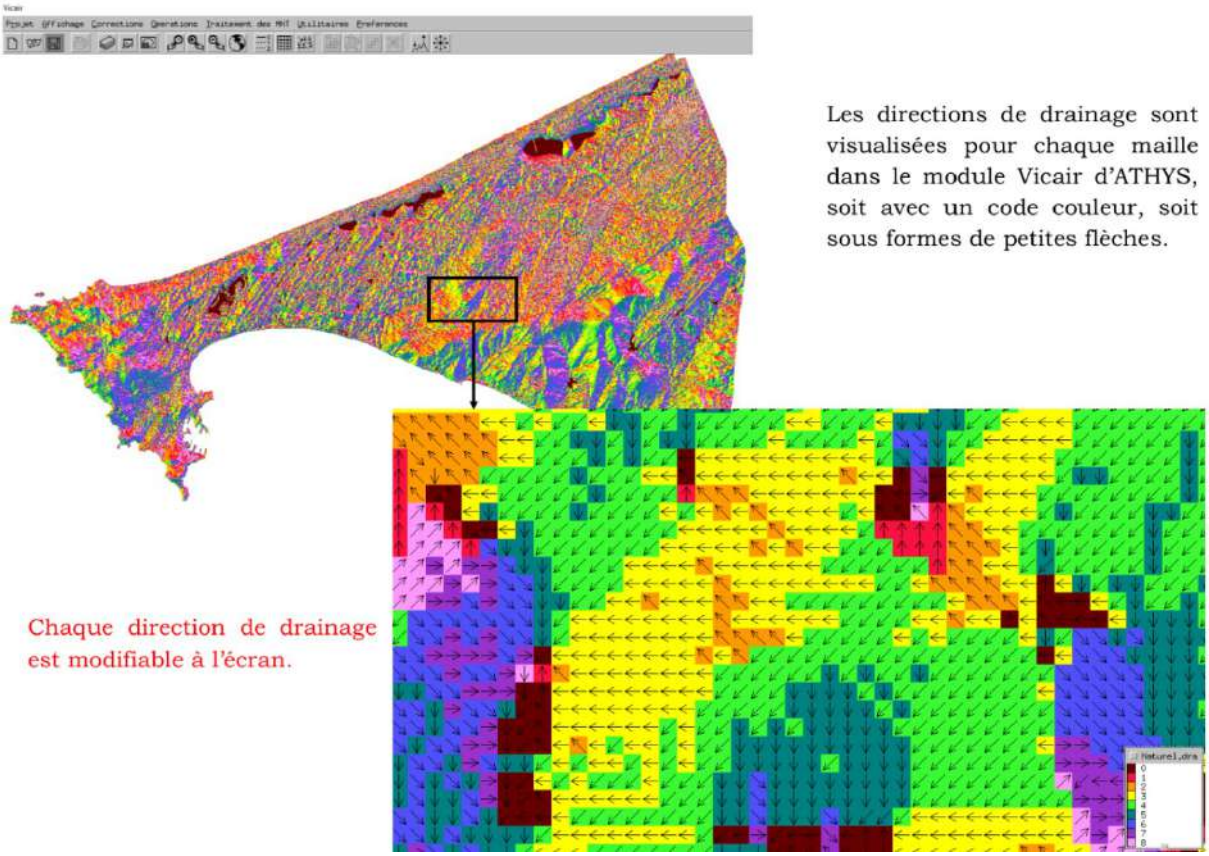


Figure 3 : Modèle de drainage naturel issu des altitudes du MNT de Dakar.

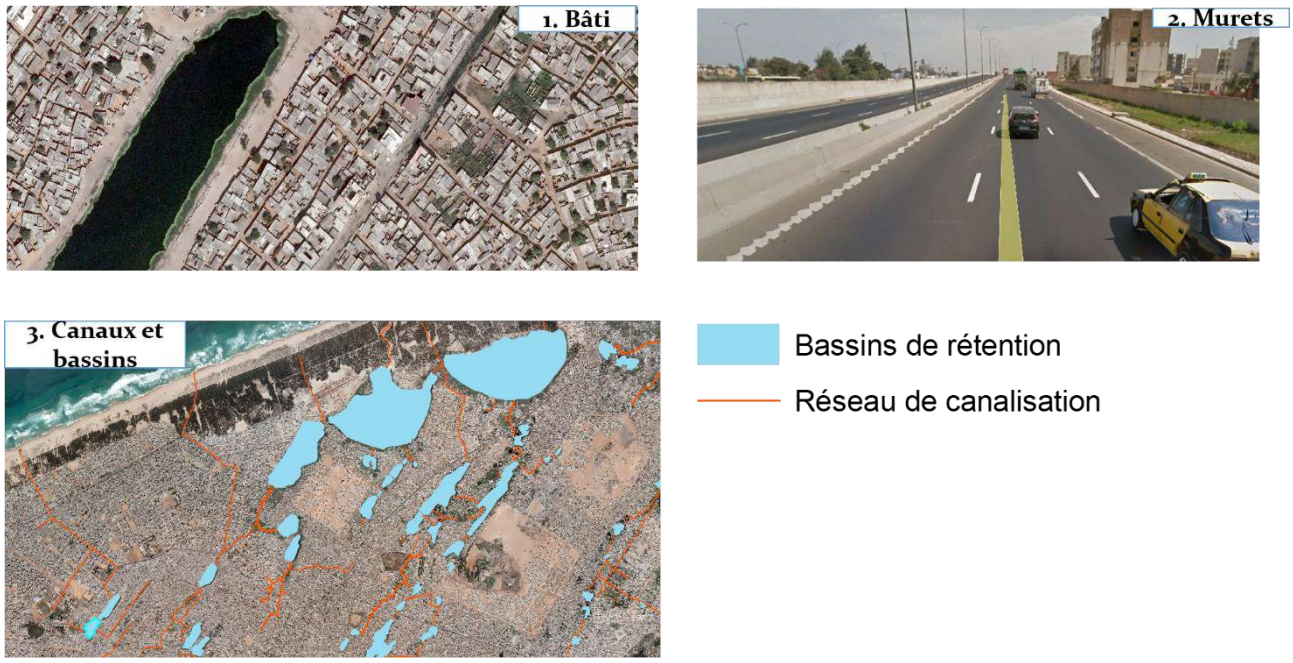


Figure 4 : Aperçu de quelques objets urbains à intégrer dans la construction de la topologie du drainage

III- RESULTATS

La figure 5 compare les directions de drainage naturelles et celles modifiées par le bâti. Entre les interstices des blocs bâtis, les flux d'écoulement (ici les flèches en noir) opèrent une déviation à chaque rencontre d'un bloc (en gris). Les directions de drainage ne sont pas modifiées au sein (ou à l'intérieur) des blocs.

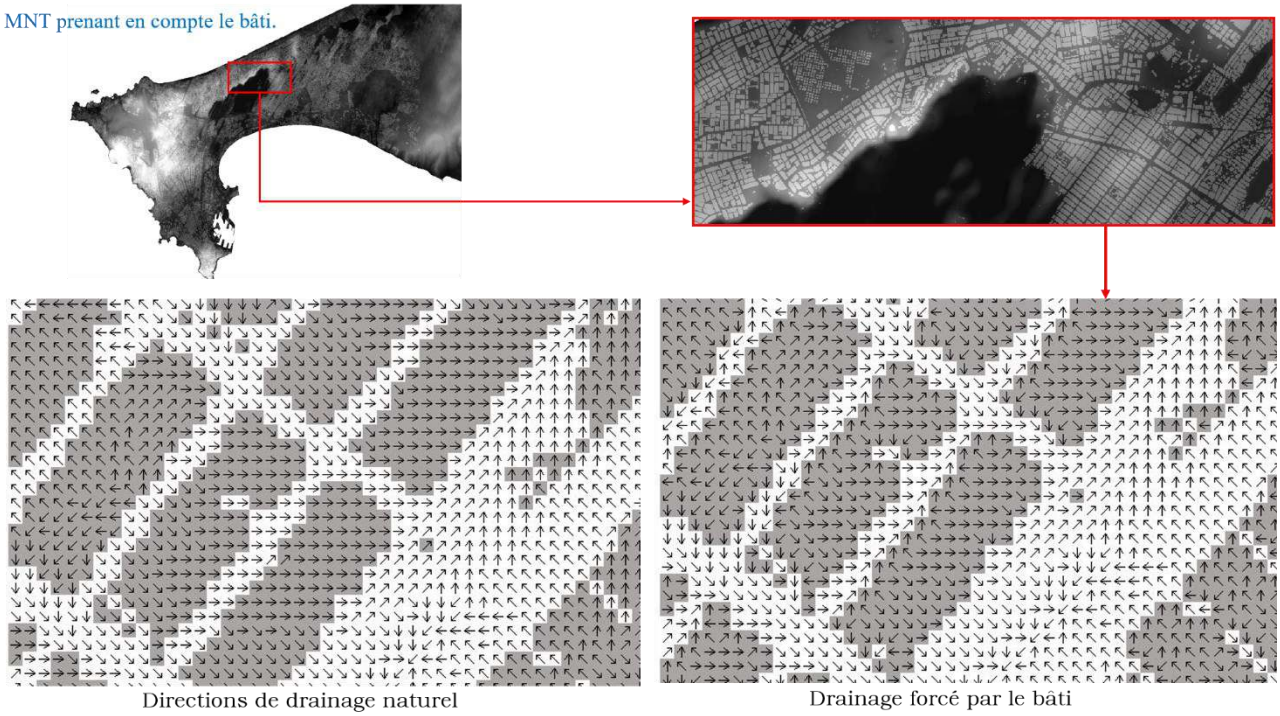


Figure 5 : Forçage des directions de drainage en fonction du bâti

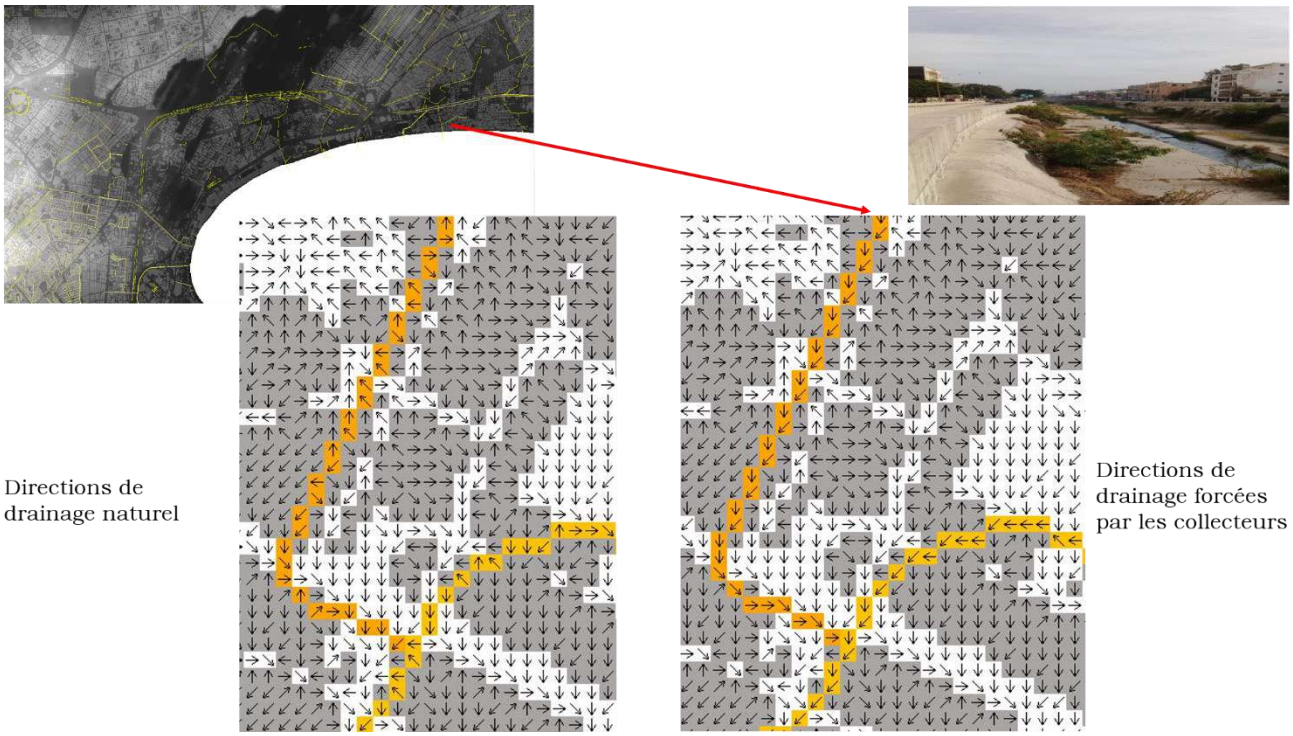


Figure 6 : Forçage du sens de l'écoulement des eaux en fonction des axes drainants

A l'issue du traitement, l'algorithme prend en compte les modifications du drainage causées par le bâti (en gris) puis intègre les directions de drainage modifiées par axes drainants (en jaune), dont les flux suivent les collecteurs dans le sens de la pente, tels qu'ils ont été cartographiés à la figure 6.

IV- PERSPECTIVES

Après la construction de la topologie de drainage, la suite des traitements va consister à délimiter sur l'ensemble de l'agglomération de Dakar de petits bassins urbains d'égale superficie (basée sur des rapports de superficies entre mailles amont et aval) à l'exutoire desquels seront déterminés, à l'aide d'un modèle hydrologique distribué (SCS-LR), les débits en fonction des épisodes pluvieux. Ces débits seront ensuite injectés dans le réseau de drainage des eaux pluviales grâce à un modèle hydraulique (onde cinématique). La combinaison de ces deux modèles fournira les débits à l'exutoire de chaque bassin et sur tout le réseau (figure 7), ce qui permettra de déterminer, par différence entre la capacité du réseau et les débits simulés, les points de débordement sur l'ensemble du réseau de drainage. L'application de ce modèle a été faite dans des villes africaines tels que Ouagadougou (Burkina -Fasso) et Bamako (Mali) (Bouvier et al., 2017, 2018).

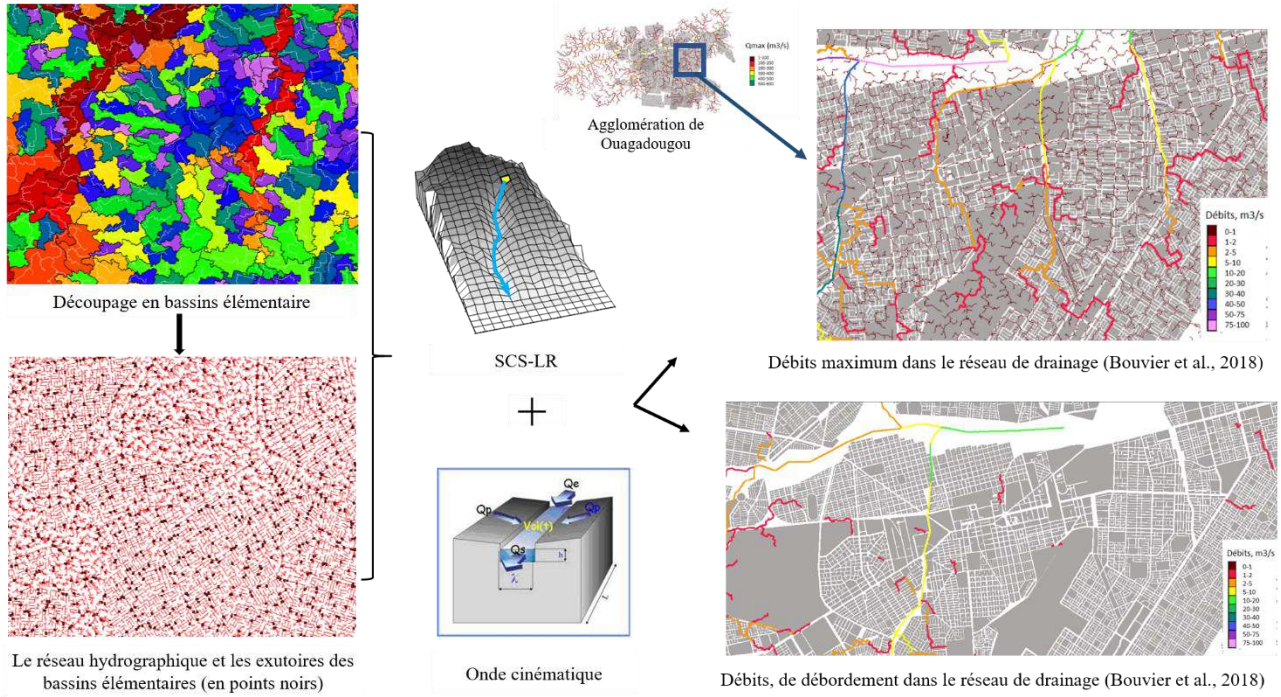


Figure 7 : Application de la méthode pour la modélisation des inondations à Ouagadougou (Bouvier et al., 2018)

CONCLUSIONS

Dans ce travail, nous avons développé une méthodologie de construction de la topologie du drainage de l'ensemble de l'agglomération de Dakar. Elle est basée sur le MNT à partir duquel est extrait un premier modèle de drainage. Ce modèle est ensuite modifié pour intégrer les spécificités du milieu urbain qui agissent sur la formation des écoulements. Les algorithmes développés pour intégrer les informations spatiales relatives à l'hydrosystème urbain reproduisent parfaitement les modifications des directions de drainage induites. Les modifications des directions de drainage liées à la présence de dépressions naturelles ou de bassins de stockage sont en cours d'intégration dans le logiciel.

La méthode, qui est automatique, peut fournir une représentation spatiale détaillée de la trajectoire des flux lors d'un épisode pluvieux. Elle constitue le début d'une chaine de modélisation visant à estimer en temps quasi-réel les débits découlement à l'exutoire de bassins versants urbanisés et d'identifier les points de débordement du réseau de drainage pluvial à l'échelle de toute l'agglomération de Dakar. Un tel résultat permet d'orienter le déploiement des secours sur le terrain.

NOMENCLATURE

ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie

DPGI : Direction de la Prévention et de la Gestion des Inondations au Sénégal

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PDGI : Programme Décennal de Gestion des Inondations

PGIIS : Projet de Gestion Intégrée des Inondations au Sénégal

PROGEP : Projet de gestion des eaux pluviales et d'adaptation au changement climatique

REFERENCES

ADM (Agence de Développement Municipal) (2019). Eradiquer durablement les inondations par la mise en place d'un système de drainage innovant, Notes, 12p.

ANSD, (2013) : Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage (RGPHAE), rapport définitif, 418 p.

ANSD, (2020). Population du Sénégal 2019, 21p.

Azzam A., et Ali A. B., (2019). Urban sprawl in Wadi Goss Watershed (Jeddah City/Western Saudi Arabia) and its impact on vulnerability and flood hazards. Journal of Geographic Information System, vol 1, n° 03 : 371.

Bodian A., (2014). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). Revue Physio-Géo, vol. 8 : 297-312.

Bodian A., Dacosta H., Diouf R.N., Ndiaye E.O., et Mendy A., (2016). Contribution à la connaissance de l'aléa pluvial au Sénégal grâce à la valorisation des données pluviographiques historiques. Climatologie, vol. 13 (2016)

Bouvier C., Chahinian N., Adamovic M., Crespy A., Cres A., Cassé C., Alcoba M., (2017). Large-scale GIS-based urban flood modelling: A Case study in the city of Ouagadougou ». In. Advances in Hydroinformatics - SimHydro 2017: Choosing the right model in applied hydraulics, 14-16 June 2017, Springer Water, 703-718.

Bouvier C., Alcoba M., Cazenave F., Chahinian N., Coulibaly G., Crès A., Crespy A., Fowe T., Gosset M., Miller J., Turko M., Sawadogo L., Modélisation à fine résolution spatiale des inondations dans une agglomération urbaine, par couplage d'un modèle hydrologique et d'un modèle de transfert en réseau. SHF, Novembre 2018, Avignon (France)

Bottazzi P., Winkler M. S., & Speranza C. I., (2019). Flood governance for resilience in cities: The historical policy transformations in Dakar's suburbs. Environmental Science and Policy n° 93: 172–180.

Bull-Kamanga L., Diagne K., Lavell A., Leon E., Lerise F., MacGregor H., ... et Satterthwaite D., (2003). From everyday hazards to disasters: the accumulation of risk in urban areas. Environment and Urbanization, vol 15, n°1: 193-204.

Cissé Faye S., C., Faye S., Wohnlich S., et Gaye C. B., (2004). An assessment of the risk associated with urban development in the Thiaroye area (Senegal). Environmental Geology, vol 45, n°3: 312 322.

De Magny G. C., Thiaw W., Kumar V., Manga, N. M., ... & Colwell R. R., (2012). Cholera outbreak in Senegal in 2005: was climate a factor? PLoS One, vol. 7, n°8: e44577.

Diop L., Bodian A., Diallo D., (2016). Spatiotemporal trend analysis of the mean annual rainfall in Senegal. European Scientific Journal, vol. 12, n°12 : 231-245.

Diop M. S., (2019) : Les capacités adaptatives des communautés de la périphérie de Dakar face aux inondations, thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, 354p.

Diop A., Ndiaye M. L., Sambou Y, Dacosta H. & Sabou B, (2017). Integrated a GIS and Multicriteria Evaluation approach for Mapping Flood Vulnerability of Buildings in the Grande Niaye Watershed of Dakar, Senegal. American Journal of Geographic Information System 2017, 6(2): 41-53.

Diouf R. Nd., (2011) : Etude hydro-pluviométrique des bassins versants urbains de la presqu'île du Cap Vert, thèse de doctorat de 3ème cycle, Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 248 p.

Dodman D., Leck H., Rusca M., et Colenbrander S., (2017). African urbanisation and urbanism: Implications for risk accumulation and reduction. International Journal of Disaster Risk Reduction, vol 26: 7-15.

Fraser A., Leck H., Parnell S., Pelling M., Brown, D., et Lwasa S., (2017). Meeting the challenge of risk-sensitive and resilient urban development in sub-Saharan Africa: Directions for future research and practice. International journal of disaster risk reduction, vol 26 : 106-109.

GRS (Gouvernement De La République Du Sénégal), 2010 : Rapport d'évaluation des besoins post-catastrophe, inondation urbaine à Dakar 2009, Gouvernement du Sénégal, Banque Mondial, Nations Unies, Commission Européenne, 184p.

Gulyani S., Bassett E. M., et Talukdar D., (2014). A tale of two cities: A multi-dimensional portrait of poverty and living conditions in the slums of Dakar and Nairobi. Habitat International, vol 43 : 98 107.

Hungerford H., Smiley S. L., Blair T., Beutler S., Bowers N., & Cadet E. (2019). Coping with Floods in Pikine, Senegal: An Exploration of Household Impacts and Prevention Efforts. Urban Science, vol 3 (2): 54.

Israel A. O., (2017). Nature, the built environment and perennial flooding in Lagos, Nigeria: The 2012 flood as a case study. Urban Climate, vol 21 : 218-231.

Kama A., Diallo M., & Drame M. S. (2018). Low cost connected and autonomous rain gauge for real time rainfall monitoring in Dakar. In 2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT) (pp. 660-664). IEEE, June 2018.

Mbow C., Diop A., Diaw A. T., Niang C. I., (2008). Urban sprawl development and flooding at Yeumbeul suburb (Dakar-Senegal). African Journal of Environmental Science and Technology, vol. 2 (n°4): 075-088.

Ndao M., (2012) : Dynamiques et gestion environnementale de 1970 à 2010 des zones humides au Sénégal : étude de l'occupation du sol par télédétection des Niayes avec Djiddah Thiaroye Kao (à Dakar), Mboro (à Thiès) et Saint-Louis, thèse de Doctorat de Géographie et aménagement de l'université de Toulouse, 373 p. et annexes.

Ndiaye C. H. C., Ngom N. F., Niang O., et Fall A., (2018). Web based GIS for multicriteria vulnerability classification and prediction in urban area : the case of Yeumbeul (Dakar). In 2018 1st International Conference on Smart Cities and Communities (SCCIC), July, IEEE.: 1-10.

Ndiaye I., (2015). Étalement urbain et différenciation sociospatiale à Dakar (Sénégal). Cahiers de géographie du Québec, vol. 59, n°166 : 47- 69.

Nouaceur Z., (2020). La reprise des pluies et la recrudescence des inondations en Afrique de l'Ouest sahélienne. Physio-Géo. Géographie physique et environnement, vol 15 : 89-109.

Panthou G., Vischel T., et Lebel T., (2014). Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. International Journal of Climatology, vol 34, n°15 : 3998 - 4006.

Sané Y., (2013). La politique de l'habitat au Sénégal : une mutation permanente. Les Cahiers d'Outre-Mer. Revue de géographie de Bordeaux, vol. 66, n°263 : 311-334.

Sané O.D., Gaye A.T., Diakhaté M., et Aziadekey M., (2016). Critical Factors of Vulnerability That Enable Medina Gounass (Dakar/Senegal) to Adapt against Seasonal Flood Events. Journal of Geographic Information System, vol 8, n°4 : 457- 469. http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2016.84038

Schaer C., Thiam M. D., et Nygaard I., (2018). Flood management in urban Senegal: an actor- oriented perspective on national and transnational adaptation interventions. Climate and Development, vol. 10, n° 3 : 243-258.

Sène & Ozer, (2002). Évolution pluviométrique et Relation inondations – événements pluvieux Au Sénégal. Bulletin de la Société géographique de Liège, n°42 : 27-33.

Sène A., Sarr M. A., Kane A. et al., (2018). L'assèchement des lacs littoraux de la grande côte du Sénégal : mythe ou réalité ? Cas des lacs Thiourour Warouwaye et Wouye de la banlieue de Dakar. Journal of Animal & Plant Sciences, vol 35, n° 2 : 5623-5638.

Sy B., Frischknecht C., Dao H., Giuliani G., Consuegra D., Wade S., & Kêdowidé C., (2016). Participatory approach for flood risk assessment: the case of Yeumbeul Nord (YN), Dakar, Senegal. WIT Transactions on the built environment, vol. 165 : 331-342.

Sircoulon J., et Olivry J. C., (1986). Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest et centrale (considération sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières) : communication n°6. In Compte rendu du colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse. Ouagadougou (BKF), 1986/05/20-24.

Wade S., Faye S., Dieng M., Kaba M., Kane N. R., (2009). Télédétection des catastrophes d'inondation urbaine : le cas de la région de Dakar (Sénégal). In : Journées d'Animation Scientifique (JSA09) de l'AUF, Alger, Novembre 2009, 7p.

Cartographie automatisée des zones inondables sur les têtes de bassins versants : évaluation de 3 approches sur 3 crues rapides exceptionnelles dans le sud de la France (Hocini *et al.*)

Cartographie automatisée des zones inondables sur les têtes de bassins versants : évaluation de 3 approches sur 3 crues rapides exceptionnelles dans le sud de la France

Nabil HOCINI[1], Olivier PAYRASTRE [1], Eric GAUME[1], François BOURGIN[2], Philippe DAVY[3], Dimitri LAGUE[3], Frédéric PONS[4], Léa POINSIGNON[4]

[1] GERS-LEE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-44344 Bouguenais, France

[2] University Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, Antony, France

[3] Géosciences Rennes, 35042 Rennes, France

[4] Cerema Méditerranée, 13290 Aix-en-Provence, France

Les crues éclair qui touchent les têtes de bassin causent d'importants dégâts matériels et humains dans le monde entier. En France, elles frappent fréquemment les petits cours d'eau de la zone méditerranéenne, entraînant souvent des conséquences catastrophiques. Compte tenu du grand nombre de petits cours d'eau concernés, l'utilisation de méthodes de cartographie automatisée des zones inondées peut être d'une grande aide pour l'identification des zones susceptibles d'être touchées et la prévision des impacts potentiels de ce type de crues. Une application de trois méthodes de cartographie d'un niveau de complexité croissant (HAND/MS, caRtino 1D, et Floodos 2D), est présentée ici pour la simulation de trois crues éclair majeures observées au cours des dix dernières années (15 juin 2010 sur l'Argens et ses affluents, 3 octobre 2015 sur les côtiers des Alpes Maritimes, et 15 octobre 2018 sur l'Aude et ses affluents). Les simulations hydrauliques sont exécutées en régime permanent sur la base des débits de pointe estimés par un modèle hydrologique, ajusté sur chaque événement. Les résultats des simulations sont comparés aux cartes d'inondations observées et aux marques des plus hautes eaux (PHE). Ces résultats révèlent une hiérarchie assez nette entre les méthodes utilisées, en faveur des méthodes basées sur des modèles hydrauliques St Venant. Avec ces méthodes, les différences entre niveaux d'eau simulés et les marques de crue restent majoritairement inférieures à 70 cm. Les erreurs les plus importantes sont généralement liées à la représentation du lit mineur et des ouvrages (digues, ponts) dans la modélisation.

Mots-clefs : crues-éclair, inondation, cartographie, automatisation.

Automated inundation mapping for small headwater streams : evaluation of 3 mapping approaches for 3 exceptional flash floods in southern France

Flash floods observed in headwater catchments cause significant material and human damage worldwide. In France, they frequently hit small watersheds in the Mediterranean area, often causing catastrophic impacts. Considering the large number of small rivers possibly affected, the use of automated methods for flood hazard mapping flooded can be of great help for the identification of threatened areas and the prediction of potential impacts of these floods. An application of three mapping methods of increasing level of complexity (HAND / MS, caRtino 1D, and Floodos 2D) is presented herein for the simulation of three major flash floods observed during the last ten years in France: the 15th of june 2010 flood on the Argens river and its tributaries (585 km of rivers simulated) ; the 3rd of october 2015 flood on small coastal rivers of the French Riviera (131 km of rivers); and the the 15th of october 2018 floods on the Aude river and its tributaries (561 km of rivers). The common feature of these 3 approaches is their high level of automatization, their application based on a high-resolution (5m) DTM, and their reasonable computation times. Hydraulic simulations are run in steady state regime on the basis of peak discharges estimated with a hydrological model, which has been preliminary adjusted for each event. The results of the simulations are compared with the observed flood maps and the high-water marks. These results reveal a clear hierarchy between the methods used, in favour of the methods of the St Venant hydraulic models. With these methods, the differences between the simulated water levels and the flood marks remain mostly below 70 cm. The most important errors are related to the representation of the riverbed cross section (no bathymetry) and the artificial structures (dikes, bridges) in the models.

Key words : Flash-floods, inundation, flood mapping, automatization.

INTRODUCTION

Lors des événements pluviométriques intenses sur de courtes durées, la concentration des écoulements dans les fonds de talwegs occasionne régulièrement des crues très rapides sur les petits cours d'eau situés en tête de bassin. Ces crues, souvent qualifiées de crues éclair ou crues soudaines, s'avèrent particulièrement

dommageables du fait de leurs forts débits, et de leur évolution très rapide qui limite fortement les capacités d'anticipation. Bien que ces crues s'avèrent nettement plus fréquentes dans les secteurs méditerranéens du fait d'un aléa pluviométrique plus intense, elles concernent potentiellement l'ensemble des petits cours d'eau du territoire Français, comme l'illustrent par exemple les crues qui ont causé d'importants dégâts dans l'agglomération de Nancy en 2012 [Chiffre et al., 2014].

La connaissance des zones inondables associées aux petits cours d'eau reste relativement limitée à l'heure actuelle en France, du fait du grand nombre de cours d'eau concernés (120.000 km de cours d'eau de plus de 1m de large d'après les bases de données existantes), et du manque de données descriptives de ces cours d'eau et de leur régime (topographie, bathymétrie, débits, ...). Des progrès importants ont été néanmoins réalisés du point de vue de la connaissance des débits et de la topographie, avec le développement de la base nationale des débits SHYREG [ARNAUD et al., 2013], et la généralisation progressive des MNT Lidar à haute résolution au sein du RGE Alti.

Le contexte est donc de plus en plus favorable à la connaissance des zones inondables associées aux petits cours d'eau. Compte tenu de la quantité importante de cours d'eau concernés, une avancée significative ne pourra néanmoins être réalisée qu'à la condition de disposer de méthodes de cartographie facilement applicables sur de grands linéaires de cours d'eau. Ceci implique notamment un grand niveau d'automatisation de ces approches, et un recours aussi limité que possible à l'expertise humaine et au calage des modèles. Des méthodes de cartographie répondant à cet objectif se sont petit à petit développées au cours des dernières années. Ces méthodes peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Des modèles hydrodynamiques 2D, avec des schémas de résolution simplifiés ou parallélisés pour accélérer les temps de calcul (Lisflood, Iber, ...). D'abord appliquées pour la cartographie des grands cours d'eau à une échelle continentale et à des résolutions assez grandes [Pappenberger et al., 2012; Alfieri et al., 2014; Sampson et al., 2015; Dottori et al., 2016], ces méthodes évoluent peu à peu vers des applications plus locales et des résolutions plus fines (inférieure à 10m) pour la cartographie associée aux petits cours d'eau [Cea and Bladé, 2015; Xia et al., 2017; García-Feal et al., 2018; Nguyen et al., 2016; Neal et al., 2018; Sanders and Schubert, 2019]

- Des méthodes basées sur l'application de modèles hydrodynamiques 1D, proposées plus récemment, et appliquées sur la base de profils en travers extraits des MNT [Choi and Mantilla, 2015; Le Bihan et al., 2017; Lamichhane and Sharma, 2018].

- Des approches des remplissages directs du MNT à partir d'une hauteur d'eau déterminée localement. Ce groupe comprend la méthode Autoroute [Follum et al., 2017], ainsi que plusieurs approches basées sur le concept de hauteur par rapport au point de drainage le plus proche (HAND ou Height Above Nearest Drainage; [Rennó et al., 2008; Nobre et al., 2011]: approches f2HAND [Speckhann et al., 2017], Geoflood [Zheng et al., 2018], MHYST [Rebolho et al., 2018]. Dans ces approches une relation débit/hauteur est déterminée à partir de la géométrie du profil en travers extraite du MNT (moyennée sur un tronçon pour les approches basées sur HAND), et d'une formule hydraulique (Manning strickler, Debord, ...). Ces approches présentent l'avantage d'être très efficaces en temps de calcul [Teng et al., 2017]. Mais leurs limites en précision ont déjà été mises en évidence par rapport à des approches 2D conventionnelles [Afshari et al., 2018].

Cet article propose une comparaison de trois méthodes de cartographie issues de ces trois familles, dans le contexte des crues-éclair observées dans le sud-est de la France. Les trois méthodes appliquées sont : 1 - une approche de remplissage du MNT basée sur un raster HAND, ici nommée HAND/MS; 2 - la méthode caRtino [Pons et al., 2014] de modélisation 1D; 3 - une application automatisée du modèle 2D Floodos [Davy et al., 2017].

Si ces trois approches répondent à l'objectif de construire des scénarios d'inondation sur de grands linéaires de petits cours d'eau, leur simplicité et/ou leur application automatisée introduit néanmoins inévitablement des erreurs, qu'il est nécessaire d'évaluer et de limiter dans la mesure du possible. Cet article présente donc les résultats d'un effort important d'évaluation, portant sur la capacité de ces méthodes à reconstituer trois crues récentes observées dans le sud-est de la France (emprises inondées et plus hautes eaux observées).

L'article est organisé de la façon suivante : la première partie présente les trois méthodes utilisées, ainsi que leurs modalités d'application et d'évaluation sur trois études de cas sélectionnées; dans un deuxième temps les résultats obtenus sont présentés et discutés ; la dernière partie présente les conclusions de ce travail.

APPROCHES DE CARTOGRAPHIE ÉVALUÉES

HAND/MS

La méthode « HAND/MS » est une approche de remplissage du MNT analogue à la méthode Geoflood [Zheng et al., 2018]. Cette approche se base sur l'utilisation d'un raster HAND directement déduit du MNT, et d'une formule de Manning Strickler. Le raster HAND est utilisé dans un premier temps pour estimer la géométrie hydraulique "moyenne" à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau (relation hauteur - surface et périmètre mouillés), puis une relation hauteur-débit est établie sur chaque tronçon en appliquant la formule de Manning-Strickler. En suivant cette relation, chaque valeur de débit détermine le seuil de hauteur d'eau à appliquer sur le raster HAND pour retrouver l'extension de la zone inondée. Cette méthode présente l'avantage d'être très rapide en temps de calcul. Elle a déjà été appliquée à très grande échelle sur des MNT de très haute résolution. Néanmoins elle présente des simplifications fortes: géométrie hydraulique et hauteur d'eau « moyennées » à l'échelle du tronçon, débit unique le long de chaque tronçon, pas de représentation des effets de remous hydraulique (hauteur normale), débordement limité aux seuls pixels "associés" à chaque tronçon dans le raster HAND (pas de débordement possible d'un tronçon vers un autre).

caRtino 1D

La méthode caRtino 1D [Pons et al., 2014; Le Bihan et al., 2017], permet la construction et l'application automatisée d'un modèle hydrodynamique 1D (Mascaret, Flutor, HEC-RAS) à partir du MNT. La méthode permet le positionnement et l'extraction automatique de profils en travers à partir du MNT, qui sont utilisés pour construire la structure de la modélisation 1D. Un post-traitement de la ligne d'eau simulée permet de récupérer l'emprise de la zone inondée et les hauteurs d'eau sur le maillage du MNT. Cette approche permet une représentation 1D de la ligne d'eau tenant compte des variations de géométrie du lit et de certains effets de remous. Ses limites se situent principalement dans l'application automatisée qui supprime la plus-value de l'expertise dans la construction de la structure du modèle: profils en travers parfois mal positionnés ou de largeur inadaptée, pas de pertes de charge introduites, pas de distinction lit mineur/lit majeur, pas de fonctionnement à casiers. Ces limites prennent une importance particulière dans les secteurs des lits très larges, les lits perchés, ou les secteurs de confluences.

Floodos 2D

Cette approche correspond à une application automatisée du modèle hydrodynamique 2D Floodos [Davy et al., 2017]. Ce modèle présente l'avantage d'une certaine simplicité de mise en œuvre puisque le calcul est effectué directement sur le maillage du MNT. La résolution des équations de St Venant, basée sur la circulation dans le domaine de volumes d'eau élémentaires appelés précipitons, présente l'avantage d'une grande rapidité. Néanmoins les termes d'inertie sont négligés dans la résolution, ce qui peut occasionner quelques erreurs dans des secteurs de variations brusques de direction et/ou de chocs contre des obstacles. Cette méthode reste également plus lourde en temps de calcul que les précédentes. Elle nécessite une vérification attentive de la convergence du modèle, qui a été automatisée ici.

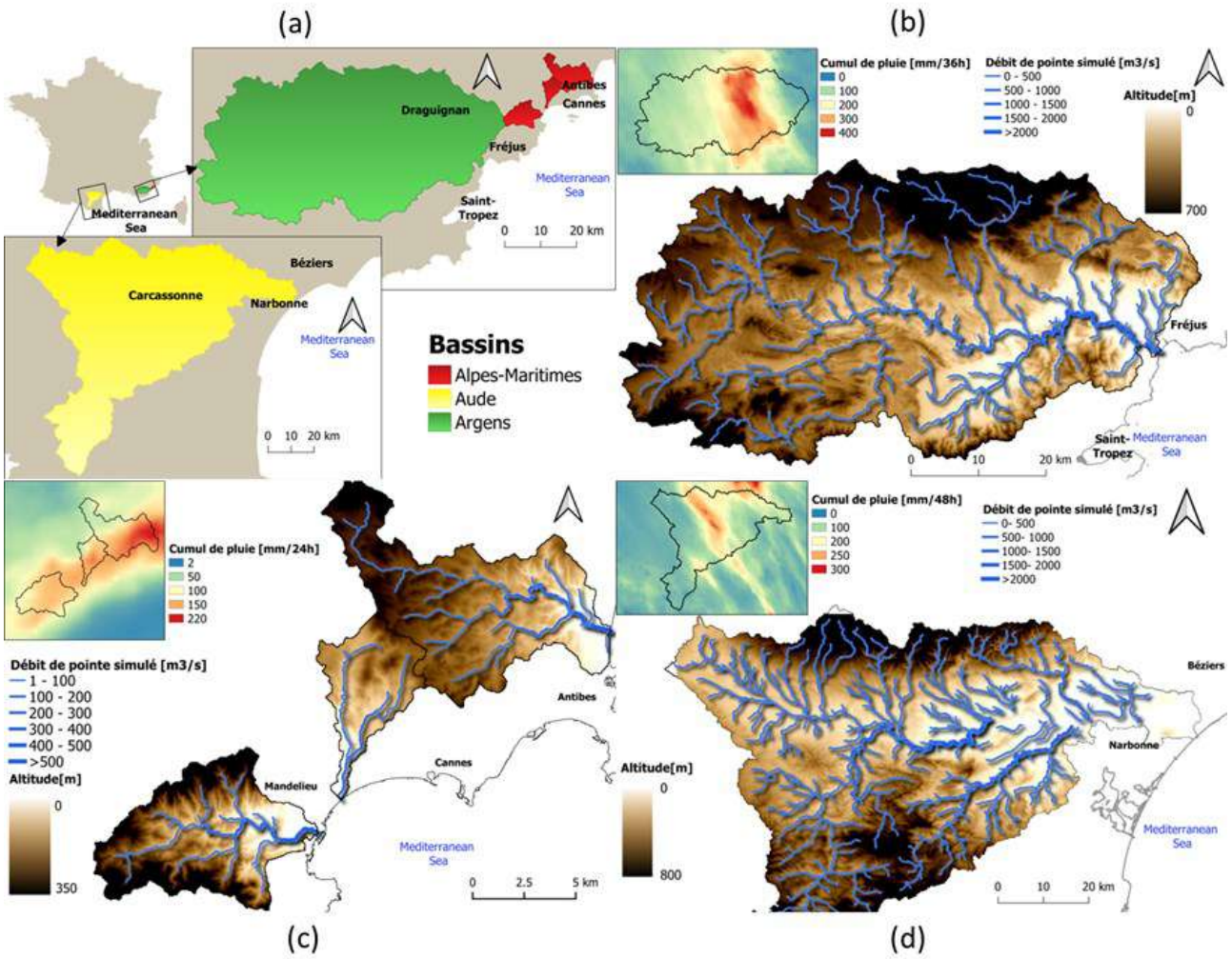


Figure 1. Présentation des 3 études de cas: a) Localisation des bassins étudiés, b) Bassin de l'Argens et pluviométrie observée en juin 2010, c) Bassins côtiers des Alpes Maritimes et pluviométrie observée en octobre 2015, d) Bassin versant de l'Aude et pluviométrie observée en octobre 2018

ETUDES DE CAS SÉLECTIONNÉES ET APPLICATION DES MODELES

Les études de cas sélectionnées sont présentées sur la Figure 1. Elles correspondent à trois crues-éclair majeures observées dans le sud de la France au cours des dernières années: les crues du 15 juin 2010 sur la partie orientale du bassin versant de l'Argens; les crues du 3 octobre 2015 sur les cours d'eau côtiers des Alpes Maritimes (Brague, Grande Frayère, Riou de l'Argentière); les crues du 15 octobre 2015 sur le bassin intermédiaire de l'Aude.

Ces études de cas ont été sélectionnées en raison de la disponibilité de données d'observation détaillées, permettant à la fois une bonne connaissance des pluies et débits observés, ainsi que des champs d'inondation. Des estimations de débits de pointe sur les cours d'eau non jaugés ont notamment été réalisées pour les 3 événements dans le cadre du programme HyMeX [Ducrocq et al., 2019 ; Payrastre et al., 2019]. Des relevés détaillés des niveaux de Plus Hautes Eaux (PHE) sont disponibles pour les trois événements, ainsi que les enveloppes des zones inondées pour les deux événements de l'Argens et de l'Aude.

Les trois approches de cartographie sont appliquées ici à partir des MNT de RGE Alti à 5m, après incorporation des derniers relevés Lidar disponibles dans le cas de l'Aude. Ces MNT ont été prétraités de façon à s'assurer de l'effacement des ponts et ouvrages de franchissement pouvant rester présents dans les MNTs. Néanmoins, ces MNTs n'incluent pas la bathymétrie des cours d'eau (relativement limitée pour les études de cas traitées), et ne peuvent tenir compte d'éventuelles évolutions morphologiques des lits en cours de crue.

Les domaines de calcul retenus correspondent aux cours d'eau pour lesquels un débordement a été observé, et incluent les petits cours d'eau à partir d'une surface drainée élémentaire de 5 km² (1km² dans le cas des Alpes Maritimes). Ces domaines incluent 585 km de cours d'eau dans le cas de l'Argens, 131 km dans le cas de l'événement des Alpes Maritimes, et 569 km dans le cas de l'Aude.

Les calculs sont réalisés en régime permanent à partir des débits de pointe de la crue à simuler, ce qui permet un gain important en temps de calcul. Ceci conduit à négliger les effets dynamiques liés au régime transitoire, hypothèse qui parait acceptable pour des cours d'eau amont dont les champs d'inondation restent peu volumineux par comparaison avec les volumes des crues. Les débits de pointe n'étant pas connus partout, ils sont estimés par un modèle pluie-débit (Cinecar), sur chaque branche du réseau hydrographique à couvrir. La validité des débits estimés sur les petits affluents a pu être vérifiée grâce à la disponibilité des observations produites dans le cadre du programme HyMeX. Les écarts entre simulation et observation (Figure 2) restent généralement dans une limite de 20%, ce qui s'avère raisonnable compte tenu des incertitudes associées aux observations.

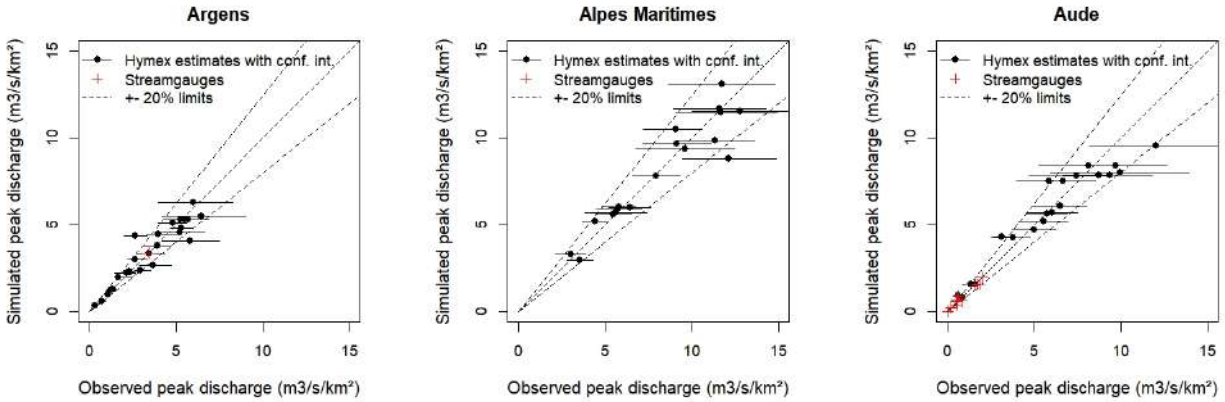


Figure 2. Comparaison des observations de débits de pointe disponibles (exprimées en débit spécifique), avec les débits obtenus par simulation pluie-débit et utilisés pour les calculs hydrauliques

Le même coefficient de rugosité est utilisé dans tous les calculs (K=15), sans effectuer de calage, de façon à respecter le principe d'automatisation complète des méthodes évaluées. La valeur de rugosité retenue correspond à une valeur réaliste pour ce type de crues, d'après les données d'enquête post-événement disponibles [Lumbroso et Gaume, 2012]. Ce choix peut bien sûr être à l'origine de certaines erreurs dans les résultats, mais qui seront néanmoins identiques pour les trois méthodes.

En raison de l'étendue des domaines à couvrir, les calculs ne peuvent être réalisés en une seule fois (soit par construction des méthodes, soit en raison des capacités mémoire disponibles pour un calcul). Un principe commun de segmentation du calcul par tronçons de cours d'eau est donc appliqué ici, avec au minimum un découpage à chaque confluence. Un calcul indépendant est effectué sur chaque tronçon de cours d'eau, puis les résultats sont combinés en retenant si nécessaire la hauteur maximale dans les secteurs où plusieurs simulations se chevauchent (cas des méthodes 1D et 2D). Une segmentation plus fine a été appliquée dans le cas de l'approche HAND/MS, avec des tronçons de 1500 m de long maximum, de façon à limiter les erreurs liées aux variations de géométrie hydraulique le long d'un tronçon.

CRITERES D'EVALUATION

Comparaison des emprises inondées simulées et observées

L'évaluation des résultats se fait ici en comparant l'emprise inondée calculée à l'emprise de référence observée, dans les cas de l'Aude et de l'Argens, pour lesquels les emprises inondées observées sont disponibles. Cette comparaison (Figure 3) permet de distinguer quatre zones : zone inondée commune (a),

zone en excès (b), zones en défaut (b), et zone sèche commune (d). L'étendue respective de ces zones est synthétisée sous forme d'un score pour chaque tronçon de cours d'eau, le Critical Success Index (CSI):

$$\boldsymbol{CSI} = \frac{\boldsymbol{a}}{\boldsymbol{a+b+c}} \tag{1}$$

Les valeurs du CSI varient de 0% (aucune zone commune entre simulation et observation) à 100% (correspondance parfaite). [Fleischmann et al., 2019] suggère qu'un modèle hydrodynamique fournit des estimations localement pertinentes de l'étendue des inondations lorsque le CSI est supérieur à 65%.

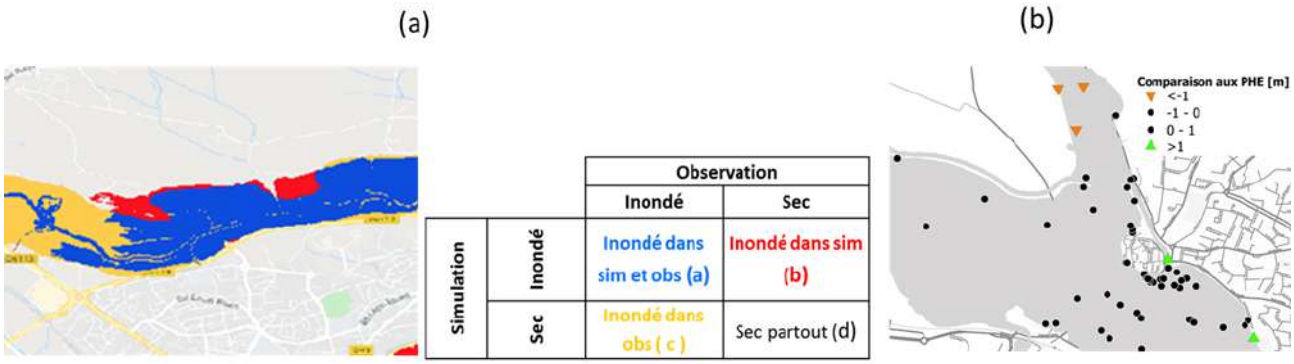


Figure 3. Processus d'évaluation : a) Comparaison des étendues d'inondation simulée et observée, b) comparaison des hauteurs d'eau simulées et observées

Comparaison des hauteurs d'eau simulées et observées

Les hauteurs d'eau simulées sont comparées aux marques des plus hautes eaux (PHE) relevées sur le terrain pour les 3 événements étudiés (plusieurs centaines de relevés PHE disponibles pour chaque événement).

Les résultats sont illustrés à partir de la différence d'altitude de la ligne d'eau entre simulation et observation. Une valeur négative indique donc une sous-estimation des hauteurs par le modèle, et une valeur positive une surestimation (cf. Figure 3).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La Figure 4 donne une illustration d'une sortie de modèle et de son évaluation à partir des emprises observées et des relevés PHE. Cette figure illustre la diversité des résultats obtenus, avec des secteurs très bien modélisés, et à l'inverse des erreurs importantes concentrées sur certains tronçons. Les principales origines de ces erreurs (souvent communes aux trois méthodes) seront présentées en fin d'article.

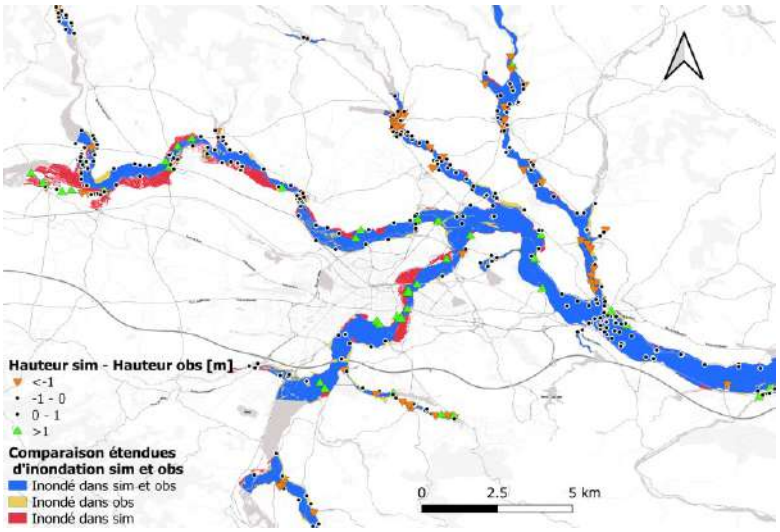


Figure 4. Résultat de la simulation de la crue de l'Aude avec le modèle Floodos (seule une partie du domaine simulé est représentée ici)

Une synthèse de l'évaluation à partir des emprises inondées est présentée sur la Figure 5. Cette figure illustre notamment les limites de l'approche HAND/MS par rapport aux modélisations hydrauliques 1D ou 2D. Les valeurs de CSI obtenues s'avèrent en effet sensiblement plus faibles avec cette méthode pour un nombre important de tronçons. Une analyse détaillée des résultats sur les tronçons concernés montre que les erreurs effectuées sont directement attribuables à plusieurs des simplifications introduites par cette méthode: géométrie hydraulique moyennée à l'échelle du tronçon, sans tenir compte des effets de resserrement/élargissement du lit; absence de représentation des effets de remous, en particulier ceux liés aux confluences qui peuvent avoir un effet important sur la zone inondée; impossibilité de représenter la continuité des débits (débit unique par tronçon) et des écoulements (débordement limité aux pixels HAND associés à chaque tronçon) entre tronçons et versants associés, notamment dans les secteurs plats. Ce dernier aspect est mieux traité avec les méthodes hydrauliques du fait d'un recouvrement des domaines de calcul entre les différents tronçons. Du point de vue des emprises inondées, les deux méthodes hydrauliques caRtino 1D et Floodos 2D donnent pour leur part des résultats relativement proches: les valeurs de CSI obtenues ne s'écartent de plus de 10% que pour un nombre limité de tronçons.

La comparaison des hauteurs d'eau simulées avec les relevés PHE est présentée sur la Figure 6. Ces résultats confirment la performance moindre de l'approche HAND/MS, avec notamment la présence d'un biais négatif (sous-estimations des hauteurs) de quelques dizaines de cm, dont l'importance varie d'une étude de cas à l'autre, mais que l'on ne retrouve pas avec les deux autres approches. La comparaison en hauteur permet également d'illustrer l'apport de l'approche 2D Floodos par rapport à l'approche 1D caRtino: les écarts en hauteurs s'avèrent sensiblement plus faibles avec Floodos, quelle que soit l'étude de cas considérée. Ceci est probablement attribuable aux limites de l'automatisation de l'approche 1D dans des secteurs hydrauliquement complexes tels que les lits majeurs très larges et/ou endigués, ainsi que les secteurs de confluences. Finalement, la méthode Floodos fournit donc la meilleure reconstitution de la ligne d'eau, avec des écarts qui s'avèrent le plus souvent inférieurs à 70 cm (cf. limites des intervalles à 70% sur la Figure 6).

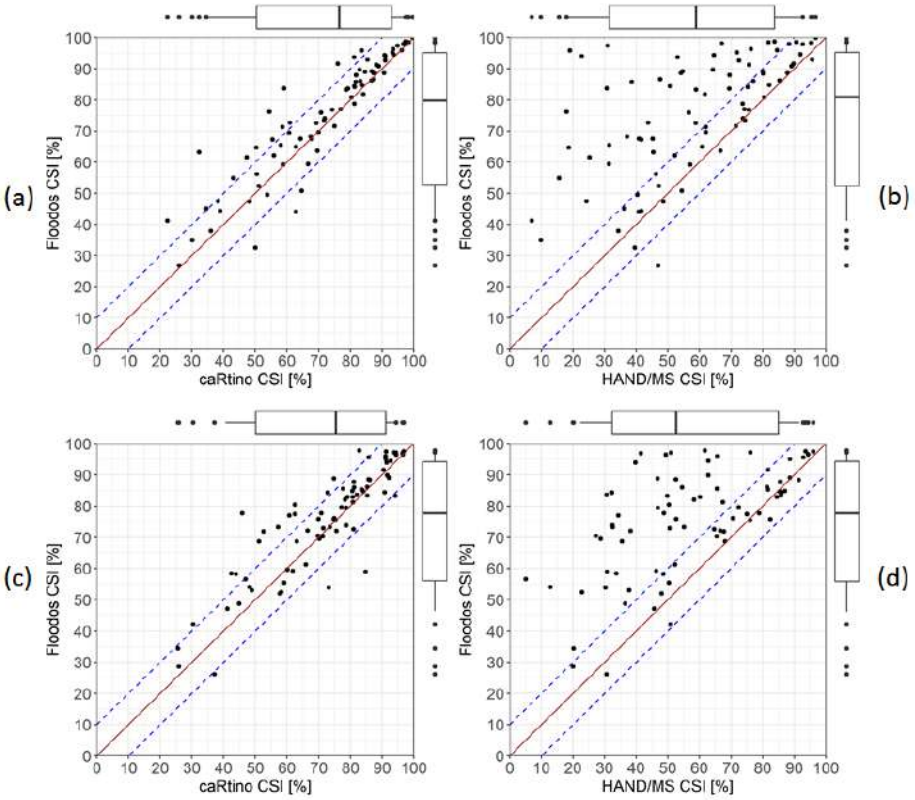


Figure 5. Comparaison des CSI à l'échelle des tronçons : a) Cartino vs Floodos, Argens 2010, b) HAND/MS vs Floodos, Argens 2010, c) Cartino vs Floodos, Aude 2018, d) HAND/MS vs Floodos, Aude 2018

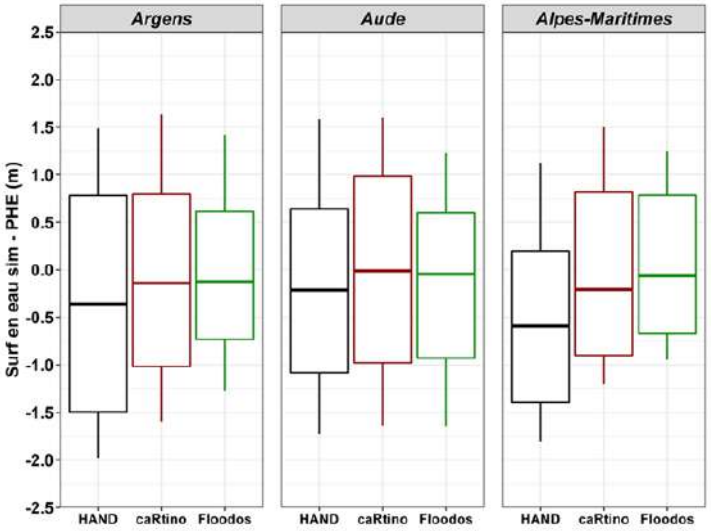


Figure 6. Comparaison des hauteurs d'eau simulées et observée (relevés PHE) pour les 3 méthodes et les 3 événements étudiés. Les boîtes représentent les quantiles 15% et 85% (70% des valeurs dans l'intervalle), et les moustaches les quantiles 5% et 95% (90% des valeurs dans l'intervalle)

Comme l'illustrent les figures Figure 4 et Figure 5, des erreurs importantes de modélisation sont constatées sur certains tronçons, avec des valeurs de CSI inférieures à 50 % traduisant une mauvaise représentation de la zone inondée, ainsi que des erreurs sur les hauteurs d'eau pouvant parfois largement dépasser 1 voire 2 m. Ces erreurs se retrouvent généralement avec les trois méthodes appliquées et sont donc dues à des sources d'erreurs communes. L'examen des tronçons concernés fait apparaître trois sources principales:

- L'absence de représentation de la bathymétrie et l'interpolation réalisée au niveau des zones en eau dans le MNT, peuvent ponctuellement occasionner une grande surestimation de la zone inondée. Ceci est

particulièrement vrai pour les tronçons qui ont été en limite de débordement, la bathymétrie pouvant dans ce cas représenter une part significative de la section d'écoulement.

- Les tronçons endigués peuvent concentrer de fortes erreurs, avec notamment des débordements trop larges. Ceci peut être associé aux limites de certaines des méthodes appliquées (HAND/MS et caRtino), qui par construction s'avèrent moins adaptées pour traiter ces secteurs. Néanmoins, ces erreurs sont également rencontrées avec Floodos, du fait de l'arasement de la crête des digues dans les MNT à 5m utilisés.
- Enfin, les crues simulées étant particulièrement intenses sur certains tronçons, elles ont occasionné la mise en charge d'un nombre important d'ouvrages de franchissement des cours d'eau. Ces mises en charge génèrent une surélévation importante de la ligne d'eau qui ne peut pas être représentée dans les modèles appliqués ici. Dans ces secteurs les hauteurs d'eau et emprises inondées s'avèrent assez nettement sous-estimés (Figure 6).

CONCLUSIONS

Les résultats présentés ici permettent d'illustrer la performance d'approches de cartographie automatisée des inondations, destinées à combler les lacunes existantes en termes de cartographie des zones inondables sur les petits cours d'eau secondaires soumis aux crues éclair (environ 100.000 km de cours d'eau concernés en France).

Les méthodes présentées sont appliquées directement à partir d'un MNT de 5 m de résolution, sans calage ni mobilisation d'expertise dans la construction des modélisations. Elles sont évaluées ici à partir de leur capacité à représenter les zones inondées et hauteurs d'eau pour 3 crues-éclair majeures observées au cours des 10 dernières années.

Les résultats illustrent une performance nettement supérieure des deux approches caRtino et Floodos basées sur des modèles hydrauliques. L'approche HAND/MS semble sensiblement moins adaptée au contexte des crues éclair étudié ici. Le modèle 2D Floodos est finalement celui qui permet la reconstitution la plus précise des hauteurs d'eau sur les études de cas présentées.

Ces résultats illustrent également les principales sources d'erreur occasionnant localement des écarts importants entre modélisation et observations: absence de bathymétrie dans le MNT, mauvaise représentation des digues avec une résolution de 5 m, et absence de représentation des remous importants liés à la mise en charge des ponts.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de recherche PICS (http://pics.ifsttar.fr), financé par l'ANR (convention n°ANR-17-CE03-0011). Les données de débits ont été obtenues dans le cadre du programme de recherche HyMeX (http://hymex.org), avec le soutien financier du programme MISTRALS du CNRS, et du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (DGPR/SCHAPI). Les données pluviométriques ont été fournies par Météo France, les données MNT ont été obtenues auprès de l'IGN.

RÉFÉRENCES

Afshari, S., Tavakoly, A.A., Rajib, M.A., Zheng, X., Follum, M.L., Omranian, E., Fekete, B.M., 2018. Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model. Journal of Hydrology 556, 539–556. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.036

Alfieri, L., Salamon, P., Bianchi, A., Neal, J., Bates, P., Feyen, L., 2014. Advances in pan-European flood hazard mapping. Hydrological Processes 28, 4067–4077. https://doi.org/10.1002/hyp.9947

ARNAUD, P., EGLIN, Y., JANET, B., PAYRASTRE, O., 2013. BASES DE DONNEES SHYREG-DEBIT 35.

Cea, L., Bladé, E., 2015. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. Water Resources Research 51, 5464–5486. https://doi.org/10.1002/2014WR016547

Chiffre, E., Mathis, D., Mathis, A., 2014. Les inondations à Nancy – Anciennes et nouvelles problématiques. developpementdurable. https://doi.org/10.4000/developpementdurable.10665

Choi, C.C., Mantilla, R., 2015. Development and Analysis of GIS Tools for the Automatic Implementation of 1D Hydraulic Models Coupled with Distributed Hydrological Models. Journal of Hydrologic Engineering 20, 06015005. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001202

Davy, P., Croissant, T., Lague, D., 2017. A precipiton method to calculate river hydrodynamics, with applications to flood prediction, landscape evolution models, and braiding instabilities. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 122, 1491–1512. https://doi.org/10.1002/2016JF004156

Dottori, F., Salamon, P., Bianchi, A., Alfieri, L., Hirpa, F.A., Feyen, L., 2016. Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. Advances in Water Resources 94, 87–102. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.002

Ducrocq, V., Boudevillain, B., Bouvier, C., Braud, I., Fourrie, N., Lebeaupin-Brossier, C., Javelle, P., Nuissier, O., Payrastre, O., Roux, H., Ruin, I., Vincendon, B., 2019. Le programme HYMEX – Connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région méditerranéenne. La Houille Blanche 5–12. https://doi.org/10.1051/lhb/2019048

Fleischmann, A., Paiva, R., Collischonn, W., 2019. Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. Journal of Hydrology X 3, 100027. https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100027

Follum, M.L., Tavakoly, A.A., Niemann, J.D., Snow, A.D., 2017. AutoRAPID: A Model for Prompt Streamflow Estimation and Flood Inundation Mapping over Regional to Continental Extents. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 53, 280–299. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12476

García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, M.J., Formella, A., 2018. An Accelerated Tool for Flood Modelling Based on Iber. Water 10. https://doi.org/10.3390/w10101459

Lumbroso, D. and Gaume, E., 2012. Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges, Journal of Hydrology, 414, 16–30, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.048

Lamichhane, N., Sharma, S., 2018. Effect of input data in hydraulic modeling for flood warning systems. Hydrological Sciences Journal 63, 938–956. https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1464166

Le Bihan, G., Payrastre, O., Gaume, E., Moncoulon, D., Pons, F., 2017. The challenge of forecasting impacts of flash floods: test of a simplified hydraulic approach and validation based on insurance claim data. Hydrology and Earth System Sciences 21, 5911–5928. https://doi.org/10.5194/hess-21-5911-2017

Neal, J., Dunne, T., Sampson, C., Smith, A., Bates, P., 2018. Optimisation of the two-dimensional hydraulic model LISFOOD-FP for CPU architecture. Environmental Modelling & Software 107, 148–157. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.011

Nguyen, P., Thorstensen, A., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Sanders, B., Koren, V., Cui, Z., Smith, M., 2016. A high resolution coupled hydrologic–hydraulic model (HiResFlood-UCI) for flash flood modeling. Journal of Hydrology 541, 401–420. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.047

Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Hodnett, M., Rennó, C.D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., Saleska, S., 2011. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. Journal of Hydrology 404, 13–29. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051

Pappenberger, F., Dutra, E., Wetterhall, F., Cloke, H.L., 2012. Deriving global flood hazard maps of fluvial floods through a physical model cascade. Hydrol. Earth Syst. Sci. 16, 4143–4156. https://doi.org/10.5194/hess-16-4143-2012

Payrastre, O., Gaume, E., Javelle, P., Janet, B., Fourmigué, P., Lefort, P., Martin, A., Boudevillain, B., Brunet, P., Delrieu, G., Marchi, L., Aubert, Y., Dautrey, E., Durand, L., Lang, M., Boissier, L., Douvinet, J., Martin, C., l'équipe « enquêtes post-événements » d'HyMeX, 2019. Analyse hydrologique de la crue-éclair catastrophique du 15 juin 2010 dans la région de Draguignan (VAR, France). La Houille Blanche 140–148. https://doi.org/10.1051/lhb/2019057

Pons, F., Laroche, C., Fourmigue, P., Alquier, M., 2014. Cartographie des surfaces inondables extrêmes pour la directive inondation : cas de la Nartuby. La Houille Blanche 34–41. https://doi.org/10.1051/lhb/2014014

Rebolho, C., Andréassian, V., Le Moine, N., 2018. Inundation mapping based on reach-scale effective geometry. Hydrol. Earth Syst. Sci. 22, 5967–5985. https://doi.org/10.5194/hess-22-5967-2018

Rennó, C.D., Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Soares, J.V., Hodnett, M.G., Tomasella, J., Waterloo, M.J., 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. Remote Sensing of Environment 112, 3469–3481. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018

Sampson, C.C., Smith, A.M., Bates, P.D., Neal, J.C., Alfieri, L., Freer, J.E., 2015. A high-resolution global flood hazard model: A HIGH-RESOLUTION GLOBAL FLOOD HAZARD MODEL. Water Resour. Res. 51, 7358–7381. https://doi.org/10.1002/2015WR016954

Sanders, B.F., Schubert, J.E., 2019. PRIMo: Parallel raster inundation model. Advances in Water Resources 126, 79–95. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.02.007

Speckhann, G.A., Borges Chaffe, P.L., Fabris Goerl, R., Abreu, J.J. de, Altamirano Flores, J.A., 2017. Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model. Hydrological Sciences Journal 1–14. https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1409896

Teng, J., Jakeman, A.J., Vaze, J., Croke, B.F.W., Dutta, D., Kim, S., 2017. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. Environmental Modelling & Software 90, 201–216. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006

Xia, X., Liang, Q., Ming, X., Hou, J., 2017. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations. Water Resources Research 53, 3730–3759. https://doi.org/10.1002/2016WR020055

Zheng, X., Maidment, D.R., Tarboton, D.G., Liu, Y.Y., Passalacqua, P., 2018. GeoFlood: Large-Scale Flood Inundation Mapping Based on High-Resolution Terrain Analysis. Water Resources Research 0. https://doi.org/10.1029/2018WR023457

Amélioration des axes de concentration du ruissellement générés sur base du LIDAR 2015 à la résolution de 1m : LIDAXES (Pineux *et al.*)

Amélioration des axes de concentration du ruissellement générés sur base du LIDAR 2015 à la résolution de 1m : LIDAXES

Nathalie PINEUX[1], Pierre DEMARCIN[1]

[1]SPW - agriculture ressources naturelles environnement- Direction du Développement rural - Cellule GISER, Avenue Prince de Liège, 7, 5100 Jambes, Belgique, e-mail: nathalie.pineux@spw.wallonie.be ; pierre.demarcin@spw.wallonie.be

Le ruissellement contribue à la problématique des inondations en Wallonie (Belgique). Pour prévenir les inondations par ruissellement (via des remises d'avis sur permis d'urbanisme les plus documentées possibles) et les solutionner (via des expertises techniques réalisées aux sites touchés), les données cartographiques disponibles doivent représenter au mieux la réalité. Depuis 2009, toute la Wallonie était couverte d'une couche d'axe de concentration du ruissellement d'une résolution 10 m. En 2013, la carte d'aléa d'inondation se dotait d'une donnée relative au débordement de cours d'eau et également au ruissellement concentré également à une résolution de 10m.
Les levés altimétriques de 2013-2014 de haute résolution (1m avec 6 points de mesure par m²) par vol LiDAR sur l'ensemble de la Wallonie ont ensuite permis de créer une carte des axes de concentration du ruissellement à la résolution de 1m : LIDAXES. Cependant, cette grande précision s'est avérée trompeuse et le ruissellement cartographié avait tendance à suivre la microtopographie, alors que lors d'événement pluvieux extrême, ce n'est généralement pas cette microtopographie qui est suivie.
Les principales évolutions actuelles de LIDAXES portent sur (i) un MNT agrégé à 2m, (ii) une meilleure intégration des données transfrontalières pour des axes corrects également aux frontières, (iii) la recherche d'un chemin d'écoulement dans un plus grand rayon (algorithme breach) et (iv) un algorithme de calculs permettant une direction des flux multiple et non unidirectionnelle (algorithme GMPD).
Cette nouvelle carte permet un meilleur diagnostic des zones à risque pour les activités de prévention et d'expertise liées à la problématique des coulées boueuses wallonnes.

Mots-clefs : Wallonie, ruissellement concentré, cartographie, résolution.

LIDAXES: an improved map of runoff flow concentration axis derived from 1-m resolution LIDAR 2015

In Wallonia (Belgium), runoff is part of flood problems. To prevent floods due to runoffs (which is done through highly documented technical advices on planning permits) and to solve them (which is done through technical expertise on damaged sites), mapping data have to represent reality as close as possible. Since 2009, Wallonia has been covered by a layer of runoff flow concentration axis with a resolution of 10 m. In 2013 based on this previous layer, flood hazard maps were improved with data related to watercourses overflowing and concentrated runoff.
The 2013 and 2014 altimetry survey with a high resolution (i.e. 1-m with six measures per m²) based on Lidar flight on Wallonia allowed to build maps of runoff flow concentration axis at 1-m resolution: LIDAXES. However, this high precision could be misleading. Indeed, mapped runoff tended to follow microtopography which is not the way necessarily observed during extreme rainfall events.
Thereby, the main recent evolutions of LIDAXES involve (i) a Digital Elevation Model (DEM) aggregated at 2-m, (ii) a better integration of crossed-border data which means correct axis also at borders, (iii) a search for a flow path over a greater radius-distance (breaching algorithm) and (iv) a computer algorithm allowing for multiple-flow-direction instead of single-flow-direction (maximum downslope gradient algorithm).
This new map offers a better tool to identify risk areas for prevention and expertise activities related to runoff and mudflows in Wallonia.

Keywords: Wallonia, runoff flow concentration axis, mapping, resolution

INTRODUCTION

Le ruissellement contribue de manière conséquente à la problématique des inondations en Wallonie (Belgique). La cellule GISER (Gestion Intégrée Sol Erosion Ruissellement) de la Direction du Développement rural du Service Public de Wallonie a besoin de données cartographiques précises pour réaliser ses deux missions principales que sont la prévention des inondations par ruissellement grâce à la remise d'avis technique sur les demandes de permis d'urbanisme (mission qui s'est généralisée sur l'ensemble de la Wallonie depuis l'entrée en vigueur du Code de Développement territorial le 1er juin 2017) et la recherche de solutions techniques concertées pour les sites touchés par des coulées boueuses. Parmi les éléments nécessaires à l'analyse du risque d'inondation par ruissellement et/ou de coulées boueuses, deux informations sont essentielles, à savoir i) le cheminement préférentiel de l'eau dans une zone donnée, essentiellement déterminé

par la topographie et ii) la taille de la zone contributive en chaque point de ce tracé, exprimée en hectares de surface drainée qui aboutit à un point donné.

Dès 2009, avec le projet ERRUISSOL [Demarcin et al., 2009], une carte des axes de concentration du ruissellement est créée sur l'ensemble de la Wallonie. En 2013, la Wallonie s'est dotée d'une cartographie de l'aléa d'inondation reprenant les zones susceptibles d'être inondées de manière plus ou moins importante et fréquente, par le débordement naturel d'un cours d'eau ou par la concentration de ruissellement naturel des eaux pluviales. Ces deux cartes sont basées sur des données raster de 10 m de résolution et des données d'altitude datant pour les plus récentes de 2008.

La disponibilité de nouvelles données altimétriques issues de vols LIDAR en 2013 et 2014 d'une précision bien supérieure a permis la mise à jour de la carte des axes de concentration du ruissellement ainsi que le développement d'une nouvelle méthodologie d'élaboration du tracé de ces axes pour aboutir en 2016 à la donnée LIDAXES I [Maugnard, 2016], d'une résolution de 1 mètre. Le choix avait été fait de forcer le passage des axes de ruissellement par les fossés considérés comme des vecteurs importants des écoulements de surface. Néanmoins, si ce choix permet une bonne approximation du réseau de drainage de surface pour des événements pluvieux moyens, il n'est pas toujours pertinent pour prédire la localisation des axes de ruissellement générés par des événements pluvieux intenses qui peuvent court-circuiter les fossés. La deuxième version (LIDAXES II), dont il est question dans cet article, constitue une version améliorée dont les résultats se rapprochent encore de la réalité du terrain.

OBJECTIFS

Cet outil d'aide à décision contribue à répondre à un besoin formulé dans la législation wallonne. En effet, depuis l'entrée en vigueur du Code de Développement territorial, les communes wallonnes sont dans l'obligation de consulter la cellule GISER dans le cadre de l'instruction d'une demande de permis ou de certificat d'urbanisme n°2 qui porte sur un projet situé dans un axe de ruissellement concentré défini comme étant un axe de concentration naturel des eaux de ruissellement qui correspond à un thalweg, une vallée ou un vallon sec. L'existence d'une cartographie telle que LIDAXES permet ainsi de visualiser ces axes de concentration du ruissellement et facilite le travail des services urbanisme amenés à solliciter la cellule GISER. Cette cartographie permet également aux candidats bâtisseurs de se prémunir face au risque d'inondation par ruissellement en l'intégrant dans la conception de leurs projets. Cet aspect préventif est d'autant plus pertinent qu'actuellement plus de la moitié des sinistres dus aux inondations concerne les inondations par ruissellement [Assuralia[1], 2019].

La cellule GISER utilise également cette cartographie lors de sa recherche de solutions pour des sites ayant connu des coulées boueuses. La représentation des axes de concentration du ruissellement à l'échelle du bassin versant aide à appréhender son fonctionnement à y localiser les aménagements adéquats.

Enfin, les axes de concentration du ruissellement LIDAXES constituent l'une des données d'entrée pour la nouvelle carte d'aléa d'inondation par ruissellement et par débordement élaborée dans le cadre de la directive Inondations (la carte actuelle étant basée sur le tracé des axes ERRUISSOL). Des simulations hydrologiques intégrant des scénarii de pluie et l'occupation du sol permettent de calculer des valeurs de débits maximales en tout point des axes de ruissellement et de les classifier pour représenter l'aléa d'inondation.

METHODOLOGIE

La méthodologie de création des axes LIDAXES intègre une chaine de traitement dont la première phase vise à obtenir un Modèle Numérique de Terrain (MNT) hydrologiquement corrigé, préalable indispensable pour le calcul des flux.

La figure 1 décrit les différentes étapes d'élaboration de ce MNT. Il subit en première étape une agrégation à une échelle de 2 m sans lissage. Un MNT gravé est ensuite obtenu via l'algorithme "Burn Streams" de Whitebox GAT pour y intégrer le réseau hydrographique wallon (RHW Lidaxes2). Les pixels hydrologiquement isolés sont corrigés par la fonction « Breach » développée par Lindsay et Dhun (2015) avec un rayon d'action de 5, 40 et 200 pixels soit une distance doublée par rapport à la première version de Lidaxes.

[1] Union professionnelle des entreprises d'assurances belges

Afin d'améliorer la qualité des données et notamment la contribution au ruissellement des zones frontalières, les MNT des pays et régions voisines ont été fusionnés. Pour la Flandre et les Pays-Bas, les MNT obtenus ont une résolution de 1 m, pour le Luxembourg, une résolution de 5m. Pour le reste de la zone frontalière, le MNT disponible à la meilleure résolution est la version 1.1 du MNT 25 m résultant de la fusion des MNTs SRTM et ASTER (https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-eu-dem).

Dans une deuxième phase, le MNT hydrologiquement continu est utilisé pour déterminer le réseau de drainage de surface. Pour ce faire, il convient de déterminer la direction des flux qui repose sur l'utilisation d'un algorithme permettant de décider pour une cellule donnée la ou les cellules, vers laquelle ou lesquelles l'eau va s'écouler. Le choix s'est porté sur la méthode D8, l'algorithme à direction d'écoulement transférant tout le flux contenu dans une cellule à une seule et unique cellule. Elle permet de définir des axes en fonction des aires contributives, mais ne permet pas de définir les flux divergents et peut devenir très peu précise pour des reliefs très peu marqués topographiquement, car limité à un angle de 45° dans la direction des flux [Galant and Wilson, 2000]. Pour compenser ces imprécisions, une information relative à la variation possible du tracé de l'axe a été ajoutée. Cette variation est obtenue par un algorithme de direction de flux multiple. Les algorithmes qui ont été testés sont FD8 [Huang et al., 2007], GMPD [Qin et al., 2011], D-infinity [Tarborton, 1997] et Triangular Multiple Flow Direction [Seibert et McGlynn, 2007]. L'algorithme de direction de flux basé sur le gradient maximal de pente descendante (GMPD) a été sélectionné sur base d'une analyse visuelle des résultats fournis par ces différents algorithmes, en comparaison à des données observées sur le terrain lors d'évènements pluvieux intenses par les agents de la cellule GISER.

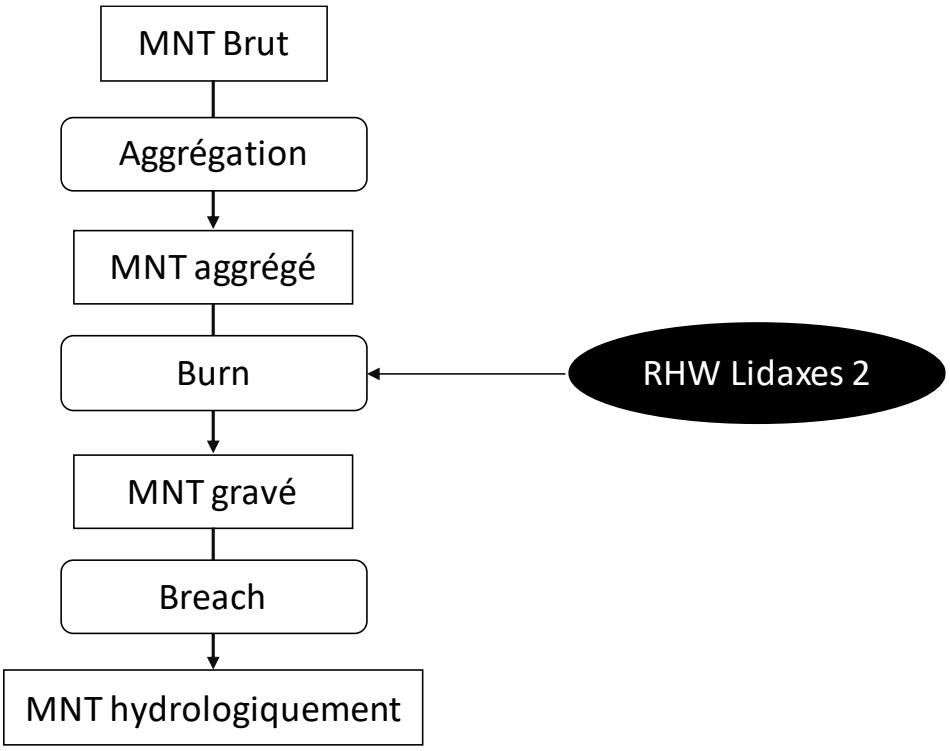


*Figure 1 - **Phase I de la procédure pour la création des axes de ruissellement concentré. Les boites rectangles représentent des fichiers rasters, les boites ovales des fichiers vectoriels (shp) et les boites à coins arrondis des étapes du processus.***

La troisième phase permet de stopper dans certains cas, les axes de concentration du ruissellement lorsqu'ils atteignent des dépressions naturelles, des chantoires ou des carrières qui ne débordent jamais. Pour déterminer si ces dépressions sont susceptibles ou non de déborder en cas d'événement pluvieux extrême, leur capacité de stockage est calculée sur base de leur profondeur et le volume de ruissellement drainé est obtenu par la méthode NRCS (anciennement SCS) du Curve Number avec une pluie de projet, définie par commune, d'une durée de 24 heures et d'une période de retour de 100 ans.

RESULTATS

Le produit final LIDAXES II se présente sous la forme d'axes vectoriels classés en cinq catégories selon la taille de la surface drainée par l'axe : de 1 à 10 ha, de 10 à 20 ha, de 20 à 50 ha, de 50 à 100 ha et plus de 100

ha. Cela représente 104751 km d'axes cartographiés sur l'ensemble de la Wallonie avec une moyenne de 6,3 km par km² de superficie communale. A cela s'ajoutent des zones de « variation possible du tracé de l'axe » représentées sous la forme de pixels colorés. Ces zones permettent de mettre en évidence les zones de divergences du flux et, également, un tracé différent du flux obtenu en D8. La figure 2 illustre la bonne concordance entre les axes de concentration du ruissellement Lidaxes, couplés aux zones de variation possible du tracé de l'axe, et les photographies d'inondations fournies par les riverains sur un site étudié par la cellule GISER. Cet exemple de résultats fait partie des +/- 100 bassins versants étudiés par la cellule GISER sur les plus de 920 étudiés (~35000 ha). Des dégâts sont observés dans cette zone de variations possibles du tracé de l'axe. Grâce à cet outil d'aide à la décision, ces dégâts peuvent être anticipés ce que n'aurait pas permis la seule présence sur la carte des axes de concentration du ruissellement.

Cet outil d'aide à la décision est utilisé pour anticiper et prendre en compte le risque d'inondation par ruissellement lors de la délivrance de permis d'urbanisme et pour trouver des solutions sur les sites inondés dans le cadre des expertises techniques.

CONCLUSIONS

Entre LIDAXES I et LIDAXES II, les méthodes de calcul ont donc été améliorées pour correspondre davantage à la réalité. Les principaux changements portent sur (i) un MNT agrégé à 2m, (ii) une meilleure intégration des données transfrontalières pour des axes corrects également aux frontières de la Wallonie, (iii) la recherche d'un chemin d'écoulement dans un plus grand rayon (algorithme breach) (iv) un algorithme de calculs permettant une direction des flux multiple et non unidirectionnelle (algorithme GMPD) et (v) l'intégration des dépressions de type chantoires et carrières.

Cette nouvelle carte permet un meilleur diagnostic des zones à risque pour les activités de prévention et d'expertise liées à la problématique des coulées boueuses en Wallonie.

Cet outil d'aide à la décision peut être aisément mis à jour selon la même méthodologie en intégrant les nouvelles données topographiques du LIDAR 2020 quand elles seront disponibles.

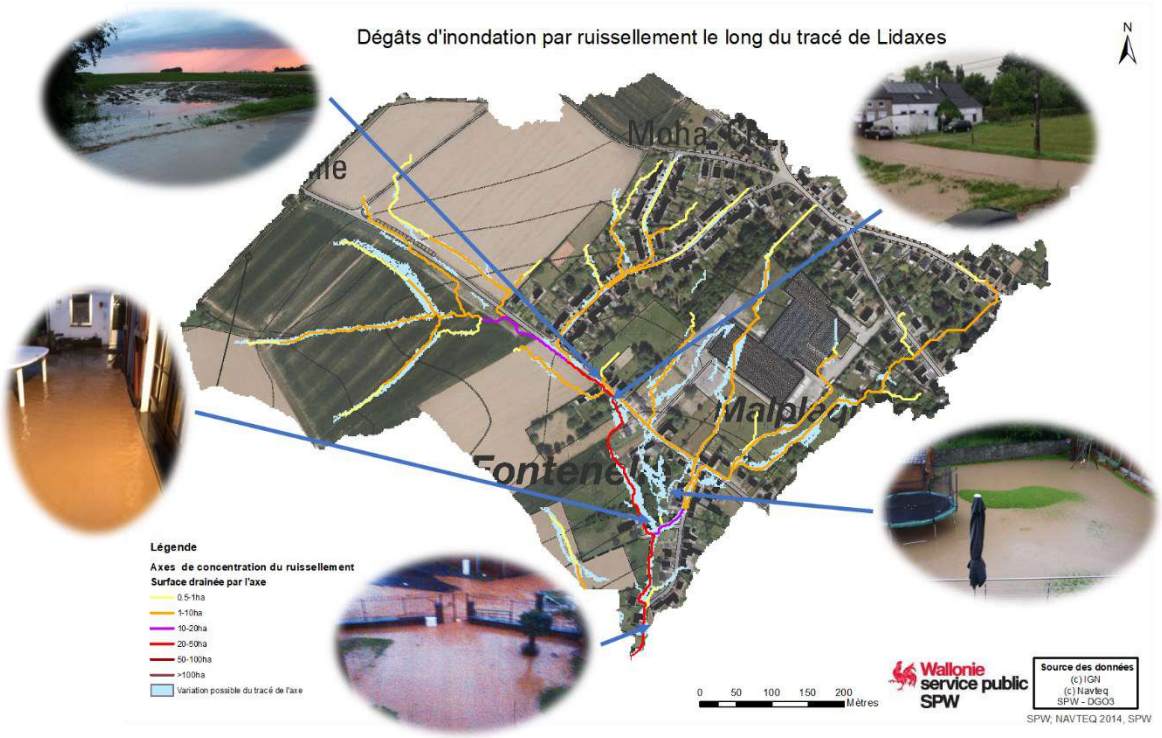


Figure 2 – Inondations par ruissellement le long des axes de concentration du ruissellement LIDAXES II au sein d'un bassin versant de 42 ha. Les lignes jaunes représentent les axes de 0,5 à 1 ha, les oranges de 1 à 10 ha, les mauves de 10 à 20 ha, les rouges de 20 à 50 ha. Les zones de pixels bleu pâle correspondent à la variation possible du tracé de l'axe.

REFERENCES

Assuralia, 2019. Communication personnelle

Demarcin P., Degré A., Smoos A., Dautrebande S. (2009). - *Cartographie numérique des zones à risque de ruissellement et d'érosion des sols en Région wallonne*. SPW.

Gallant J. P. M. et Wilson J. P. (2000). – *Primary topographic attributes.* In Terrain analysis: Principles and Applications. John Wiley and sons 51-86

Huang J. C., Kao S. J., Hsu M. L., Liu Y. A. (2007). - *Influence of Specific Contributing Area algorithms on slope failure prediction in landslide modeling*. Natural Hazards and Earth System Science, **7**, 6 781-792.

Lindsay J. B. et Dhun K. (2015). - *Modelling surface drainage patterns in altered landscapes using LiDAR. International Journal of Geographical Information Science*, **29**, 3 1-15.

Maugnard A. (2016). - *Axe de ruissellement concentré" sur l'ensemble de la région wallonne sur base du nouveau jeu de données LiDAR et autres données disponibles.* SPW.

Qin C. Z., Zhu A. X., Pei T., Li B. L., Scholten T., Behrens T., Zhou C. H. (2011). - *An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient*. Precision Agriculture, **12**, 1 32-43.

Seibert J. et McGlynn B. L. (2007). - *A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models.* Water Resources Research, **43**, 4 1-8

Tarboton D. G. (1997). - *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models.* Water resources research, **33**, 2 309-319.

Éléments de cartographie du risque de ruissellement urbain intégrant les capacités d'engouffrement, construit à partir d'outils non dédiés (Braun)

Éléments de cartographie du risque de ruissellement urbain intégrant les capacités d'engouffrement, construit à partir d'outils non dédiés

Thierry BRAUN

Conseil départemental de la Seine-Saint-denis, tbraun@seinesaintdenis.fr

Mots clefs : Ruissellement, engouffrement, outils SIG

Résumé

Le département de la Seine-Saint-Denis est globalement plat. Toutefois, quelques plateaux et coteaux avec des pentes localement marquées sont à l'origine d'inondations par ruissellement lors de certaines pluies orageuses. Ces inondations peuvent être relativement spectaculaires pour la région.

L'objectif de ce travail est d'établir une forme de modélisation compatible avec les outils et données disponibles de manière relativement classique depuis ces dernières années, (outils SIG et données associées (descriptions géoréférencées de réseaux et voiries, modèles numériques de terrain, etc)), sans faire appel à des calculs hydrauliques complexes.

La méthode mise en œuvre a permis dans un secteur chroniquement affecté par des inondations consécutives à des pluies orageuses, d'identifier les zones les plus critiques. Au travers d'un dialogue avec les services en charge de la voirie, il a été possible d'aborder l'impact sur le ruissellement des travaux planifiés.

Dans un autre secteur géographique, la méthode à permis en première approche de montrer que les désordres n'étaient sans doute pas imputables à un manque d'équipement mais étaient plus probablement dus a un dysfonctionnement de ceux-ci (embâcles ou obstruction)

Elements of urban runoff risk mapping integrating runoff capacities, built from non-dedicated tools

Keywords :Runoff, waterlogging, GIS tools (GIS = Geographical Information System)

Abstract

The department of Seine-Saint-Denis is globally flat. However, a few plateaux and hillsides with locally marked slopes are the cause of flooding by runoff during certain stormy rains. These floods can be relatively spectacular for the region.

The objective of this work is to establish a form of modeling compatible with the tools and data available in a relatively conventional way for the last few years, (GIS tools and associated data (georeferenced descriptions of networks and roads, digital terrain models, etc.)), without resorting to complex hydraulic calculations.

The method implemented has made possible to identify the most critical areas in a sector chronically affected by flooding due to stormy rains. Through a dialogue with the services in charge of the road network, it has been possible to apporch the impact of the planned works on runoff.

In another geographical area, the method made possible to show that the disorders were probably not due to a lack of equipment but were more likely due to a malfunction of the equipments.

Contenu

Résumé..... 1
Abstract..... 1
Introduction..... 3
Méthodologie..... 4
Données utilisées pour cette analyse (non hydraulique)..... 4
Construction d'une surface forçant les écoulements dans les caniveaux..... 4
Recherche des bassins-versants pour chaque bouche avaloir et arborescence des bouches avaloir... 5
Caractérisation indépendante des BA..... 5
Etude au niveau des bouches-avaloir des accumulations de débits non engouffrés..... 7
Structure du programme d'analyse des accumulations..... 8
Simulation d'obstruction de BA, ou de création de nouvelle BA..... 8
Conclusion et perspectives..... 8
Annexes..... 10
Construction de la surface de ruissellement..... 10
Prise en compte de la forme du BV..... 10
Pondération de l'efficacité des BA en fonction de la pente de la rue..... 10
Réferences..... 11

Introduction

En zone fortement anthropisée, les pluies brèves, si elles sont intenses, peuvent provoquer par accumulation des ruissellements localisés dévastateurs.

fig 1: Inondation de ruissellement à Montreuil en 2014

Quoique appartenant à la Seine-Saint-Denis, département doté d'un relief peu accentué, certaines communes sont affectées par ce phénomène et notamment Montreuil (fig 1). Le Département a cherché en première approche à analyser les configurations qui favorisent ces inondations, sans recourir à une modélisation hydraulique des écoulements de surface.

L'objectif principal de ce travail est d'identifier en première approche les zones au sein desquelles les dispositifs d'engouffrement ne sont pas suffisants pour absorber une pluie déterminée. La méthode permet de tester la réponse du système des bouches avaloir pour des pluies caractérisées par leur durée et leur intensité (intensité constante).

Pour réduire les ruissellements il faut maîtriser des apports et contrôler des flux. Les paramètres principaux qui définissent ces flux et ces contrôles sont : les surfaces drainées, les pentes, les capacités d'engouffrement, et la structuration des talwegs (hiérarchie des écoulements), et bien entendu les précipitations Il fallait donc, en fonction des informations disponibles, parvenir à les cerner.

Ce papier commence par exposer la méthode de construction des talwegs (trajets préférentiels des ruissellements de surface).
Puis les talwegs ayant été identifiés, deux approches permettent de mettre en relief les zones pour lesquels les insuffisances d'engouffrement sont probables.

- une classification des bouches avaloirs (BA) vis-à-vis de la surface drainée en fonction de la durée de la précipitation
- une exploration récursive des débits traités par les BA en fonction de l'arborescence de ces BA et de la durée et de l'intensité de la pluie

Méthodologie

Données utilisées pour cette analyse (non hydraulique)

- Le modèle numérique de terrain (MNT) (BD Alti de l'IGN)
- Le relevé des BA (bouches avaloirs) (480 BA relevées)
- Le tracé des rues et des îlots bâtis (BD_Topo de l'IGN)
- Les points cotés (en particuliers les tampons du réseau d'assainissement)
- Les chroniques de pluie depuis 1976
- Les constats localisés des inondations

Dans la zone étudiée, on postule que le réseau collecteur, qui est un réseau unitaire à Montreuil, a la capacité de prendre en charge la totalité des flux engouffrés quel que soit l'intensité et la durée de la pluie. Un bassin de rétention en cours de construction en 2017 renforce cette hypothèse. La saturation et les débordements du réseau ne sont donc pas pris en compte.

Construction d'une surface forçant les écoulements dans les caniveaux

A partir des points cotés, notamment les tampons de voirie, et du relevé de 480 BA , un MNT (modèle numérique de terrain) au pas de 1m passant par ces points a été construit par interpolation (ArcMap méthode des voisins naturels).

Les élévations des axes de rue ont été déduits par projection des axes de rue sur ce MNT. L'extrusion d'un profil en travers en W, de largeur déterminée par l'attribut largeur de la rue (fichier BD_Route de la BD Topo de l'IGN), le long de ces lignes 3D, a produit des lignes additionnelles matérialisant les bords de rue, et les fond de caniveaux

Après l'élimination des lignes en conflit au croisement des rues, un TIN (réseau irrégulier de triangles) a été construit sur ces lignes conservées. Parallèlement on a fabriqué un MNT à l'intérieur des îlots bâtis en attribuant à l'intérieur de chacun de ces îlots l'altitude maximum du MNT de la BD_Alti rencontrée dans le polygone décrivant l'îlot bâti, augmentée de 2 m (on obtient une surface composée d'une juxtaposition de 'boites'). La réunion de ces deux surfaces a donné une surface (MNT) constituée de rues canyon (voir Annexe). Dans ces canyons l'axe de la rue est plus haut que ses bords (fig 2). Les talwegs de la surface coïncident par conséquent avec les caniveaux.

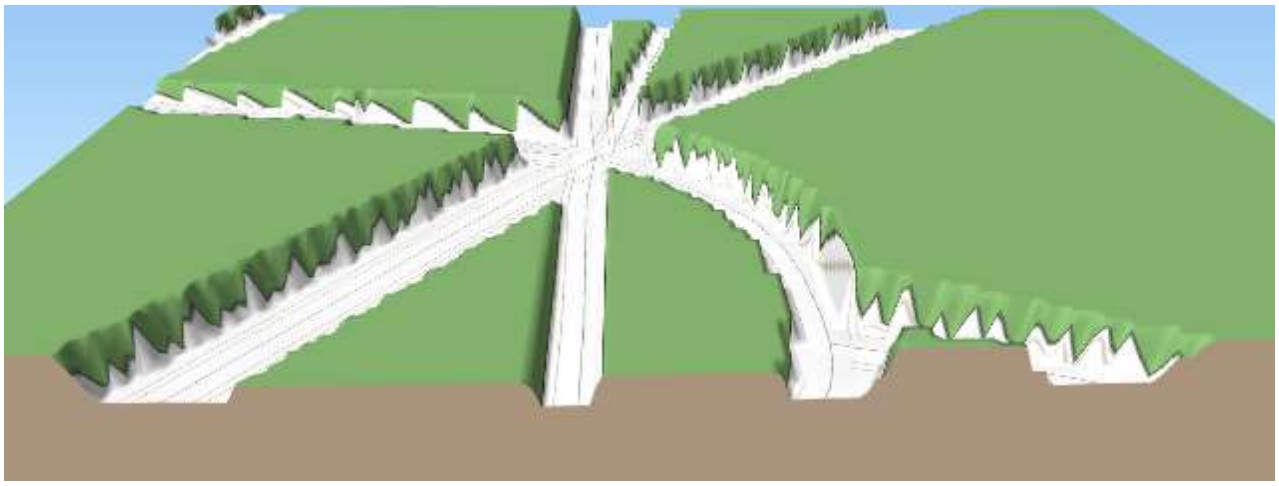


fig 2: rendu Qgis2threejs (extension de QGIS) d'un carrefour de la surface constituée

Recherche des bassins-versants pour chaque bouche avaloir et arborescence des bouches avaloir

A l'aide de l'extension ArcHydro de ArcMap d'ESRI (méthode D8) on calcule les talwegs de cette surface, ils s'inscrivent dans les caniveaux construits sur le bord des rues. Après avoir vérifié que les BA (bouche avaloir) répertoriées sont proches de ces caniveaux virtuels, on calcule pour chacune d'entre elles le BV (bassin-versant) qui lui correspond. En calculant l'intersection des surfaces (complémentaire de la plus grande surface par rapport à la plus petite) on restreint la surface des BV de chaque BA à celle qui n'est contenue dans aucun BV de BA amont. La hiérarchie des inclusions successives des BV appartenant à un même réseau de talweg donne l'arborescence des BA (fig 3)

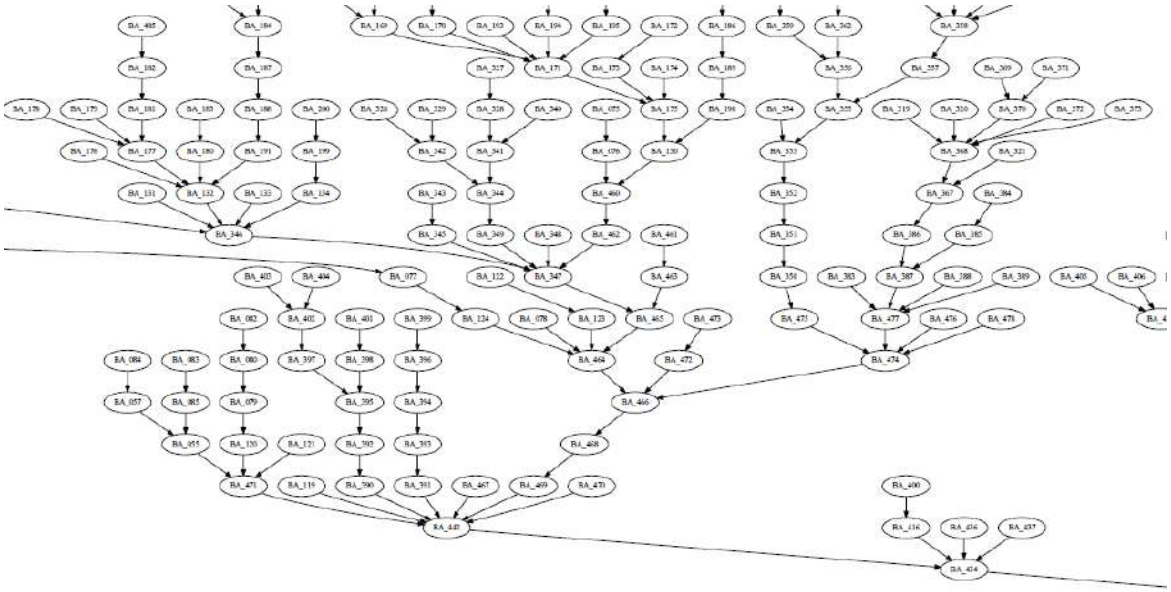


fig 3: Partie de l'arborescente des 486 BA relevées de Montreuil, déduite des écoulements

En soustrayant la surface des îlots bâtis de celle du BV réduit propre à une BA, on calcule pour chacune, la surface des rues qui ne sont drainée que par cette BA. Cette surface représente la surface active reliée à la BA. (on ne tient donc pas compte des surfaces des toits qui sont reliées directement au réseau pluvial ou unitaire)

Enfin on calcule les pentes moyennes des rues en amont de chaque BA

A partir de ces éléments deux approches sont suivies

- la caractérisation des BA (indépendamment les unes des autres)
- l'étude au niveau des BA des accumulations des débits non engouffrés

Caractérisation indépendante des BA

En toute première approche on peut qualifier les BA en fonction de la surface active propre raccordée. Dans un deuxième temps on affine en répartissant ces surfaces en fonction du temps que met un écoulement à les parcourir (le temps est déduit d'une vitesse de Strickler fonction de la pente de la rue et d'un caniveau type). Cela revient à les répartir en fonction des débits sur une durée fixée. Plus la pente d'une rue sera importante, plus la distance atteinte en un temps donné sera importante.

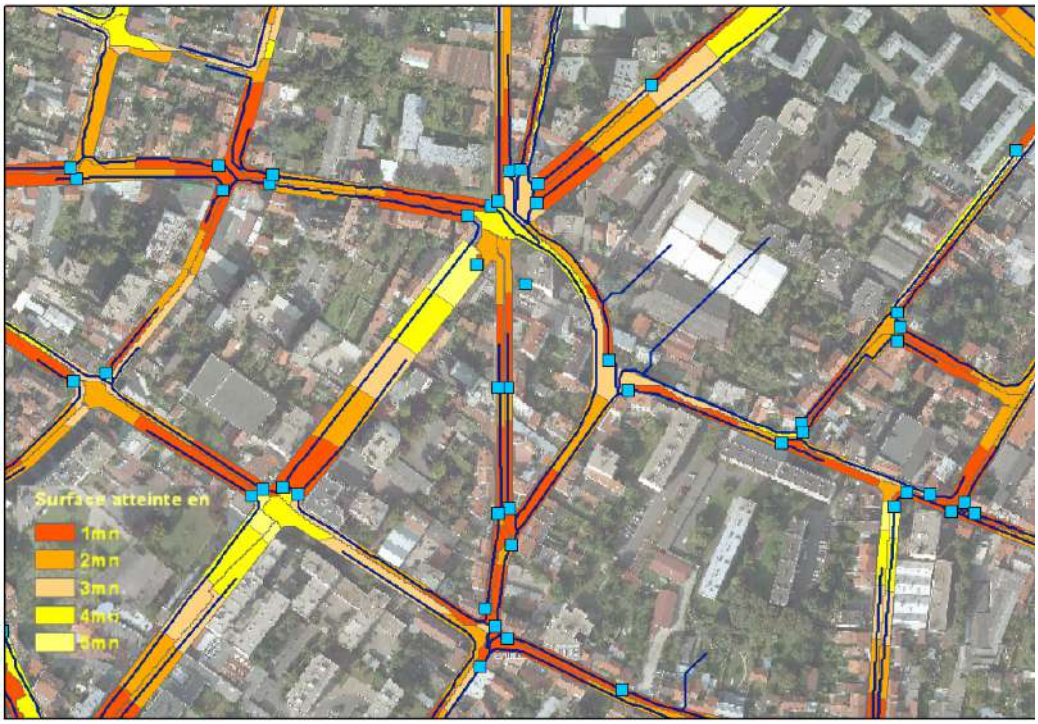


fig 4: Surface connectée à la BA aval en fonction du temps (du rouge au jaune clair de 1 minute à 5 minutes)

Une BA est caractérisée par ses capacités d'engouffrement. Pour ne pas trop alourdir l'étude, on attribue dans un premier temps à toutes les BA étudiées des caractéristiques identiques, conformes à ce qui est trouvé dans la littérature. Une capacité d'engouffrement maximum de 40 l/s et une efficacité de 100 % en dessous de 10 l/s et de 80 % au-delà. De plus pour tenir compte des vitesses locales on fait varier cette efficacité en fonction de la pente en amont de la BA (voir annexe).

La pente moyenne associée à la portion de BV analysée permet de calculer une vitesse probable de progression de l'eau dans les caniveaux (Strickler)

L'étude des pluies enregistrées dans le département depuis la création du parc de pluviomètres en 1976 a permis de calculer des fréquences d'apparition pour un panel de périodes, y compris pour des pluies courtes (Tableau 1).

1.

mm / heure	1 minute	2 minutes	3 minutes	4 minutes	5 minutes	6 minutes	7 minutes	8 minutes	9 minutes
1 an	116,0	106,0	92,7	84,8	78,1	73,2	68,1	63,4	59,1
2 ans	136,0	121,6	111,0	104,4	98,4	90,6	82,3	77,0	73,0
5 ans	201,1	152,0	138,6	126,3	119,2	112,7	104,8	99,0	93,0
10 ans	260,5	190,8	177,6	155,7	142,5	128,3	119,9	116,8	113,7
20 ans	289,2	230,3	200,7	179,2	165,2	158,5	148,8	141,9	135,4
	10 minutes	15 minutes	30 minutes	1 heure	2 heures	4 heures	6 heures	12 heures	24 heures
1 an	55,8	44,3	27,9	16,8	10,0	5,8	4,3	2,4	1,4
2 ans	69,0	55,0	33,9	20,6	12,6	7,3	5,1	2,8	1,7
5 ans	89,0	74,6	48,2	28,2	16,0	8,9	6,0	3,5	2,0
10 ans	109,4	95,1	59,4	35,8	19,0	9,9	7,1	3,9	2,2
20 ans	129,8	107,8	66,3	39,4	20,9	11,0	8,0	4,9	2,6

Tableau 1 Intensité-durée-fréquence pour les pluies en Seine-Saint-Denis calculées sur la période 1976 -2016

Pour chaque durée d'intervalle de n minutes, on associe à chaque BA le débit correspondant à surface du BV propre drainée en n minutes (en fonction de la durée n et de la pente moyenne du BV), pour une pluie décennale de n minutes. (lignes 10 ans de Tableau 1)
Les BA sont alors caractérisées en fonction de ces débits n minutes et des capacités d'engouffrement estimées

Cette approche permet de mettre en évidence les BA qui pour une pluie déterminée (intensité, durée) seront en sous-capacité. (fig 5 exemple pour une pluie de 10 minutes décennale)

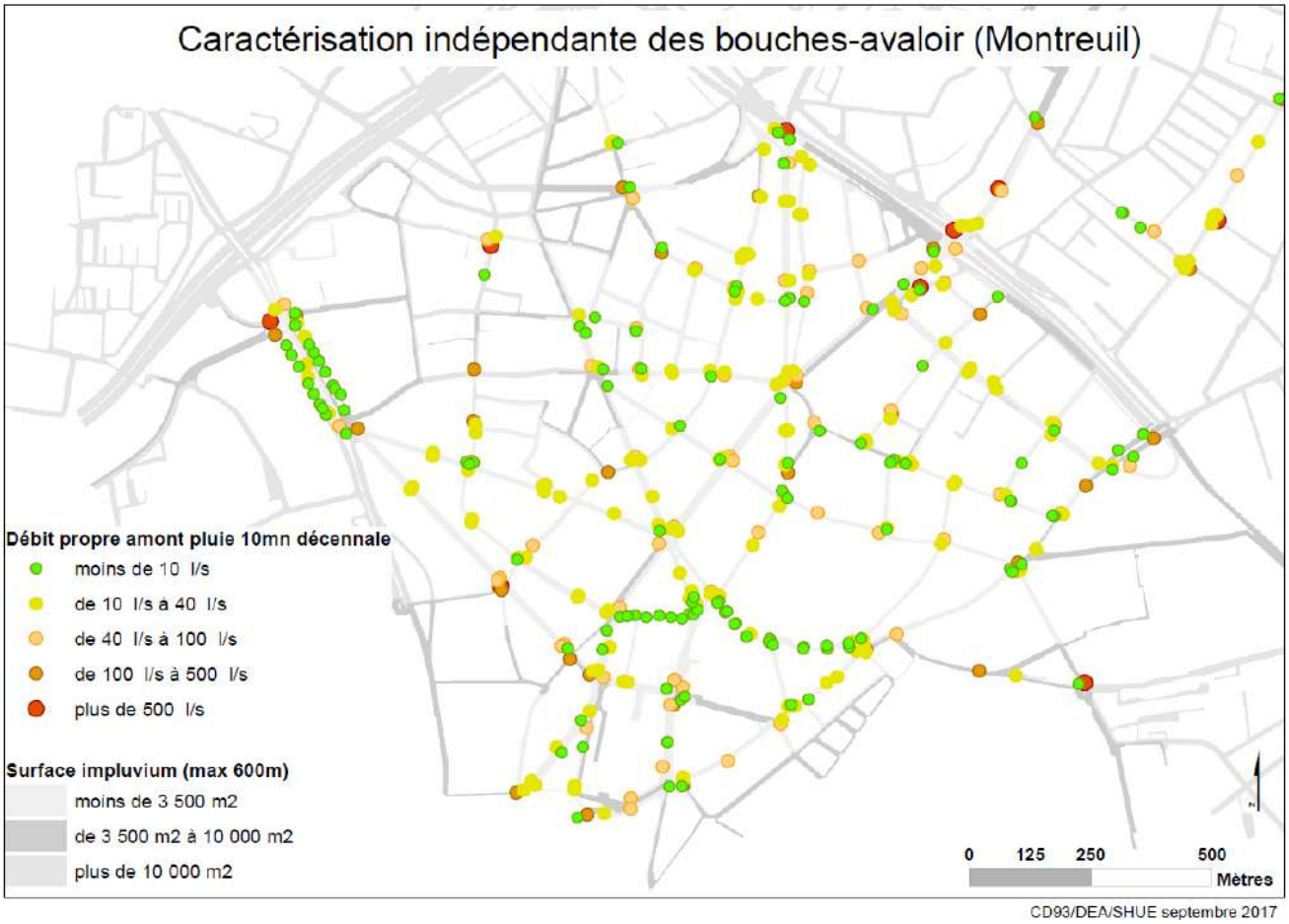


fig 5: Caractérisation des BA en fonction du débit amont pour une pluie décennale de 10 minutes

En comparant les analyses faites pour des pluies décennales de durée différentes, on remarque que le maximum du débit d'une pluie décennale parvenant à une BA n'est pas forcément atteint pour les plus grandes durées. Si le BV associé à une BA est petit par rapport à la vitesse d'écoulement en surface, cette BA saturée pour une pluie décennale 5 minutes peut ne pas l'être pour une pluie décennale 10 minutes. Comme la pente n'est pas homogène, on détermine la pente moyenne par tranche d 'éloignement de la BA (50 m, 100 m, etc.) (fig 4)

Etude au niveau des bouches-avaloir des accumulations de débits non engouffrés

Dans notre approche chaque BA est caractérisée par des limites de capacité
Une valeur en deçà de laquelle tout est engouffré (ex 10 l /s) *SEUIL dans fig fig,*
Une valeur au-delà de laquelle rien de supplémentaire n'est engouffré (ex 40 l/s) *Q_MAX dans fig fig,*
Entre ces deux bornes une efficacité d'engouffrement (ex 85%) *COEFF dans fig fig,*
Les flux non engouffrés par une BA sont reportés sur la BA située en aval *Aval dans fig fig,*
L'accumulation des flux non engouffrés peut contribuer aux inondations en aval

Pour chaque pluie, durée et intensité on fait tourner un programme récursif Python qui calcule le débit rejeté en aval de chacune des BA. Plus la pluie est longue, plus le débit rejeté en aval d'une BA a le temps de s'ajouter au débit amont de la BA aval. C'est cette accumulation de débits non engouffrés qui peut provoquer des ruissellements de surface, malgré la présence de BA capables d'engouffrer l'apport de leur surface contributive propre.

La pluie prise en compte est homogène sur l'ensemble de la zone étudiée. La sous-capacité déterminée pour une BA ne prend pas en compte une sous-capacité éventuelle du réseau de collecte.

Structure du programme d'analyse des accumulations

Pour chaque BA, les caractéristiques de surface de rue drainée, de distance à vol d'oiseau de la BA aval, de pentes moyennes en amont dans des cercles de taille croissante, sont calculées par des traitements SIG (système d'information géographique). Chaque BA est en outre dotée de caractéristiques de capacité, seuil et efficacité.

2.

BA	SRF_P_RUE	Aval	Q_MAX	COEFF	SEUIL	distance	pente_amt_50m	pente_amt_100m	pente_amt_150m	pente_amt_200m
BA_027	107	BA_028	0,04	0,85	0,01	198,245	1,422	1,215	1,385	1,297
BA_029	63	BA_041	0,04	0,85	0,01	204,268	1,312	1,74	1,044	1,542
BA_030	1082	BA_040	0,04	0,85	0,01	225,439	1,236	3,086	1,059	1,317
BA_031	111380	BA_032	100	1	0,01	324,515	1,023	2,313	1,447	1,33
BA_032	30	BA_033	0,04	0,85	0,01	184,637	0,935	1,942	1,272	1,439

Tableau 2 Exemple de données caractérisant les BA

Dans le Tableau 2 encadré en rouge , l'adaptation des caractéristiques des BA dont on veut soustraire l'influence (coefficient d'efficacité de 100 %, capacité maximum de 100 m³/s), en particulier quand il s'agit d'une tête de réseau (on transforme ces BA en gouffre pour ne pas masquer ce qui se passe en aval).

Lr programme récursif calcule alors pour chaque BA, le flux qui l'atteint pendant le temps donné en paramètre. Si le temps est suffisant pour que le flux non engouffré par une BA amont l'atteigne, ce flux est ajouté au ruissellement propre à la BA. Le flux non engouffré de la BA amont est calculé à partir du temps restant. Ce processus itératif se poursuit pour toutes les BA amont de la BA traitée tant que le temps initial n'est pas écoulé. Les distances à prendre en compte sont calculées en se basant sur une vitesse de propagation des flux obtenue à partir de la pente dans un caniveau théorique rectangulaire de 20 cm sur 5 cm avec un coefficient de Strickler de 60.

Les distances entre BA sont les distances à vol d'oiseau et la saturation éventuelle du réseau de collecte n'est pas prise en compte

Simulation d'obstruction de BA, ou de création de nouvelle BA

Pour tester l'incidence de l'obstruction d'une BA sur le ruissellement, il suffit de basculer ses caractéristiques d'engouffrement. Q_MAX = 0.0 et SEUIL = 0.0 suffisent à soustraire la BA des engouffrements du système. Bien que cela nécessite une actualisation du calcul des BV, il est également possible de tester l'influence de l'ajout d'une BA

Conclusion et perspectives

Même sans prendre en compte la dynamique des écoulements, cette approche a permis de vérifier la pertinence de cette analyse des ruissellements. Les constats d'inondations disponibles coïncident très correctement avec les BA en sous-capacité mises en évidence.

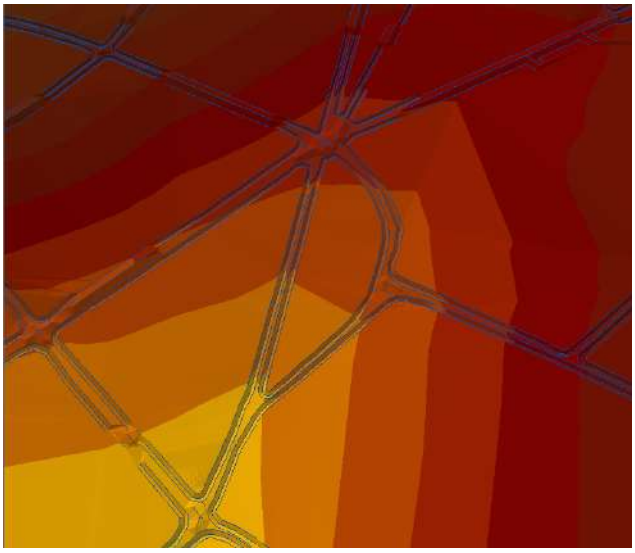
Le couplage avec un modèle hydraulique d'écoulement en réseau d'assainissement pourrait être envisagé. La limitation de la capacité d'engouffrement des BA serait alors influencée par la saturation éventuelle du réseau de collecte. De même, en cas de débordement de ce réseau, l'introduction de débits négatifs permettrait de prendre en compte cette saturation.

Il serait également possible de distribuer la lame d'eau précipitée sur chacune des BA avec des variations dans le temps. Ceci pourrait être fait en extrayant les valeurs de pluie de matrices de pluie géoréférencées,

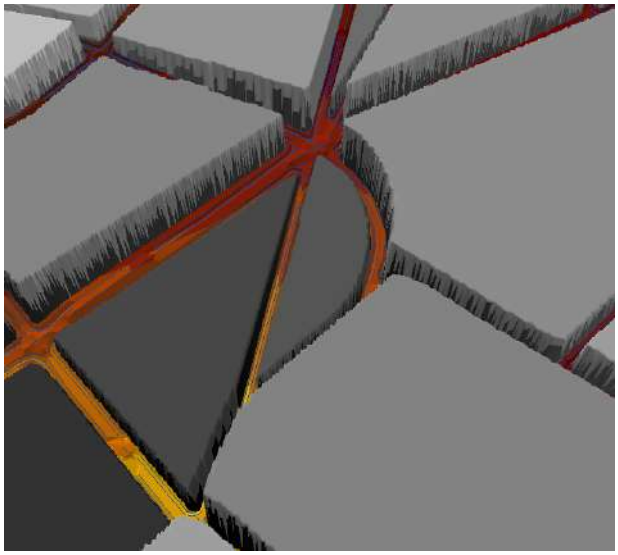
comme les lames radar. Cela permettrait de traiter une pluie convective très localisée en intégrant son déplacement, en particulier pour un déplacement vers l'exutoire du système des BA.
Enfin les distances entre BA, pourraient être remplacées par l'abscisse curviligne le long du talweg réunissant les deux BA et se substituerait à la distance à vol d'oiseau.

Annexes

Construction de la surface de ruissellement



TIN construit sur les lignes obtenues à partir des axes de rues (visualisé dans le module ArcScene de ESRI)



Assemblage de la surface obtenue à partir des rues et des « boites » construites à l'intérieur des îlots bâtis

Prise en compte de la forme du BV

Adaptation de la vitesse suivant la morphologie du BV

Name	Shape_Le_2	Shape_Area
342	339,162631	591,208175

La surface de rue pour ce BV est de 591 m². Si ce polygone était un rectangle de 100 m de long, sa largeur serait de 5,9 m. La résolution des équations S=SL*l et Périmètre=2*(L+l), où L est la longueur du rectangle (ici en vert) et l sa largeur, permet de calculer la longueur du rectangle vert déplié soit 166 m. Parcourir 166 m à 0,94 m/s (vitesses déduite de la pente) prend le même temps que parcourir 100 m à 0,57 m/s. On modifie par conséquent la vitesse moyenne du BV figurant en vert à cette valeur.

En bleu le disque de 100 m de diamètre centré sur la BA. En vert le BV propre à la BA contenu dans le disque.

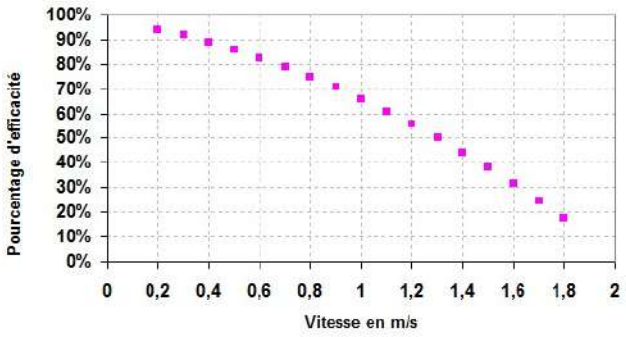
BA	V_050	V_100	V_150	V_200	nom_aval
BA_342	1,07	0,94	0,97	0,88	BA_344

Ce raisonnement est évidemment moins pertinent quand le BV considéré comporte des embranchements. Il amène alors à sous estimer la vitesse de l'eau dans les caniveaux et sous estime par conséquent le flux convergent vers la BA en un temps donné.

Pondération de l'efficacité des BA en fonction de la pente de la rue

Les pentes des rues constituent un facteur important pour la capacité d'engouffrement des BA. Si la pente en amont immédiat de la BA est forte, le flux est rapide est sera moins capté par la BA.

Pour tenir compte de ce facteur, on fait varier le coefficient d'efficacité des BA en fonction de la pente moyenne du BV amont sur 50 m. On applique une loi polynomiale de degré 2 (l'énergie variant comme le carré de la vitesse) arbitraire.



Les vitesses moyennes calculées sur le premier segment des BV (la zone du BV contenue dans un disque de 50 m centré sur la BA) vont de 0.213 m/s à 1,723 m/s.

La variation du coefficient n'est donc testée que pour cet intervalle de valeur

La prise en compte de la variation du coefficient d'efficacité liée à la vitesse en amont de la BA, a peu d'influence sur le résultat des accumulations. Cela peut être dû au fait que ce coefficient n'a d'influence que sur la partie du volume engouffré compris entre le seuil et la capacité maximum d'engouffrement (10 l/s et 40 l/s respectivement pour les choix qui ont été faits)

Réferences

ArcMap de ESRI nécessitant les extensions Spatial Analyst et 3DAnalyst et le module ArcHydro

QGIS (https://www.qgis.org/fr/site/)

Etude sur les durées de retour de précipitations calculées à partir du réseau pluviométrique du CG93 Météo France (avril 2016) (CD93)

L'expérience de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Pas-de-Calais dans l'évaluation, la cartographie et la prévention des risques de ruissellement (Doussière *et al.*)

L'expérience de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Pas-de-Calais dans l'évaluation, la cartographie et la prévention des risques de ruissellement

Fabien DOUSSIERE[1], Valérie ZIOLKOWSKI[2], Laurent LATURELLE[2], Marc DELBEC[1]

[1] Prolog Ingénierie, 3-5, rue de Metz 75010 Paris, France, prolog@prolog-ingenierie.fr

[2] Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Pas-de-Calais, 100, Avenue Winston Churchill - SP7 - 62022 ARRAS Cedex, ddtm-sde-risques@pas-de-calais.gouv.fr

Plusieurs événements pluvieux récents ont touché le Pas-de-Calais ces dernières années et ont entraîné des phénomènes de ruissellement intense, notamment sur des zones urbanisées. Face à ce constat, les services de l'État dans le Pas-de-Calais mènent une politique très active de prévention et de prise en compte des risques dans l'urbanisme et l'aménagement des territoires. Prolog Ingénierie accompagne depuis 2014 la Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Pas-de-Calais (DDTM62) sur plusieurs démarches d'élaboration de Plans de Prévention des Risques d'Inondations, incluant le ruissellement.

L'approche voulue par la DDTM62 laisse une grande place à la concertation avec les acteurs locaux, sous la forme d'actions de communication, de réunions techniques, d'ateliers participatifs, de réunions de concertation ou réunions publiques, tout au long des phases d'élaboration des PPRI.

Sur l'aléa ruissellement, Prolog Ingénierie a développé depuis 2012 une méthode consistant à appliquer une pluie spatialisée sur un maillage bidimensionnel du bassin versant, en tenant compte de la nature et de l'occupation des sols, de leurs capacités d'infiltration et d'écoulements en surface, puis des différents obstacles susceptibles d'influer sur l'écoulement des eaux de ruissellement.

Ces cartes d'aléa sont ensuite croisées avec les cartes d'enjeux (qui distinguent notamment les zones actuellement urbanisées et les zones naturelles), afin d'établir un zonage réglementaire sur lequel sont définis des objectifs de prévention des risques et des prescriptions adaptées aux particularités des phénomènes de ruissellement.

Mots-clefs : prévention des risques, urbanisme, modélisation, cartographie.

The"Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Pas-de-Calais » experience in the assessment, mapping and prevention of runoff risks

Several rainfall events on the French Pas-de-Calais Department has promoted intensive runoff-phenomena on the lasts years, especially in urban areas. In consequence, local government services lead a very active risks prevention and risk consideration policy on urban planning and regional development.

Since 2014, Prolog Ingénierie provides technical support to the "Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Pas-de-Calais" -DDTM62- for the development of several Flood Risk Prevention Plans (PFRP) including a runoff approach.

The methodology approach of DDTM62 promotes the concertation with local stakeholders during all PFRP phases, via technical meetings, participative workshops, conciliation meetings and public meetings.

Concerning the runoff hazard, Prolog Ingénierie has developed a modeling methodology, which applies a spatial rainfall event over the watershed two-dimensional mesh, taking into account diverse factors as soil type, land use, infiltration capacity, surface flow, and the natural and artificial flow barriers influencing the runoff path.

Detailed maps of runoff hazard are produced, then combined with land use maps (discerning current urban areas and natural areas) establish a regulation zoning with defined risk prevention goals and rules adapted to the local runoff-phenomena.

Key-words : risk prevention, urban planning, modeling, mapping.

INTRODUCTION

Le district de l'Escaut, situé au sein du bassin hydrographique Artois-Picardie dans le nord de la France, est exposé à de nombreux épisodes d'inondations induits le plus souvent par la conjonction de plusieurs phénomènes (submersion marine, débordement de cours d'eau, remontée de nappe, ruissellement), comme en attestent les données sur les principaux évènements hydrométéorologiques, regroupées dans l'Évaluation Préliminaire des Risques d'Inondations en 2011, actualisée en 2018 [DREAL des Hauts-de-France, 2018]. Sur les derniers événements récents, au cours des 10 à 20 dernières années, le phénomène de ruissellement a été de plus en plus marqué, avec parfois une intensité remarquable qui rappelle les inondations du Sud de la France et provoque une mise en danger de la population. Face à cela, les services de l'État dans le Pas-de-Calais ont décidé de mettre en œuvre une politique active de prévention des risques, de réduction de la vulnérabilité des personnes et biens. Cette politique s'appuie sur des études techniques poussées (une modélisation bi-dimensionnelle des phénomènes de ruissellement) et sur une large concertation avec les élus et riverains concernés par ces risques.

1. PRINCIPAUX EVENEMENTS PLUVIEUX RECENTS DANS LE PAS-DE-CALAIS

Plusieurs événements pluvieux récents ont touché le Pas-de-Calais et ont entraîné des ruissellements, notamment sur des zones urbanisées. Parmi les plus emblématiques, on peut citer notamment décembre 1999, novembre 2000, août 2006, novembre 2009, novembre 2012, mai et juin 2016 et novembre 2019. Quelques illustrations sont fournies ci-après sur différents bassins versants du Pas-de-Calais et sont aussi localisées sur la carte générale de la figure 2. Ces phénomènes surviennent soit lors d'épisodes orageux intenses sur les mois de mai à août, soit en automne ou en hiver après de longues pluies ayant déjà saturé les sols.

Figure 1 : Photographies d'inondation par ruissellement sur différents bassins versants du Pas-de-Calais (Sources : (1) Commune de Bajus, (2) et (3) SDIS62, (4) La Voix du Nord, (5) DDTM62, (6) Commune du Wast)

(1) Bajus le 7 juin 2016 (Lawe)

(2) Souchez le 7 juin 2016 (Souchez)

(3) Pas-en-Artois le 7 juin 2016 (Authie)

(4) Rodelinghem en août 2006 (pieds de coteaux des Wateringues)

(5) Saint-Etienne-au-Mont le 5 novembre 2019 (Liane)

(6) Le Wast en novembre 2000 (Wimereux)

À titre d'exemple, l'épisode du 7 juin 2016 a été particulièrement marquant, notamment sur les bassins versants de l'Authie, de la Lawe et de la Souchez (voir les photos précédentes sur les communes de Bajus, Souchez et Pas-en-Artois). Lors de cet orage, les stations pluviométriques de Bajus et Mondicourt ont relevé respectivement 60 mm et 92 mm (cumul journalier). Les données RADAR ont même montré, au niveau de l'épicentre, des cumuls exceptionnels supérieurs à 100 mm en à peine une heure. Les précipitations sur le nord du bassin versant de la Lawe ont été telles qu'elles ont engendré une montée des eaux extrêmement rapide (20 minutes) de la Lawe amont.

2. POLITIQUE DE PREVENTION DES RISQUES D'INONDATIONS DANS L'URBANISME ET L'AMENAGEMENT DES TERRITOIRES

2.1 PPRI approuvés et en cours

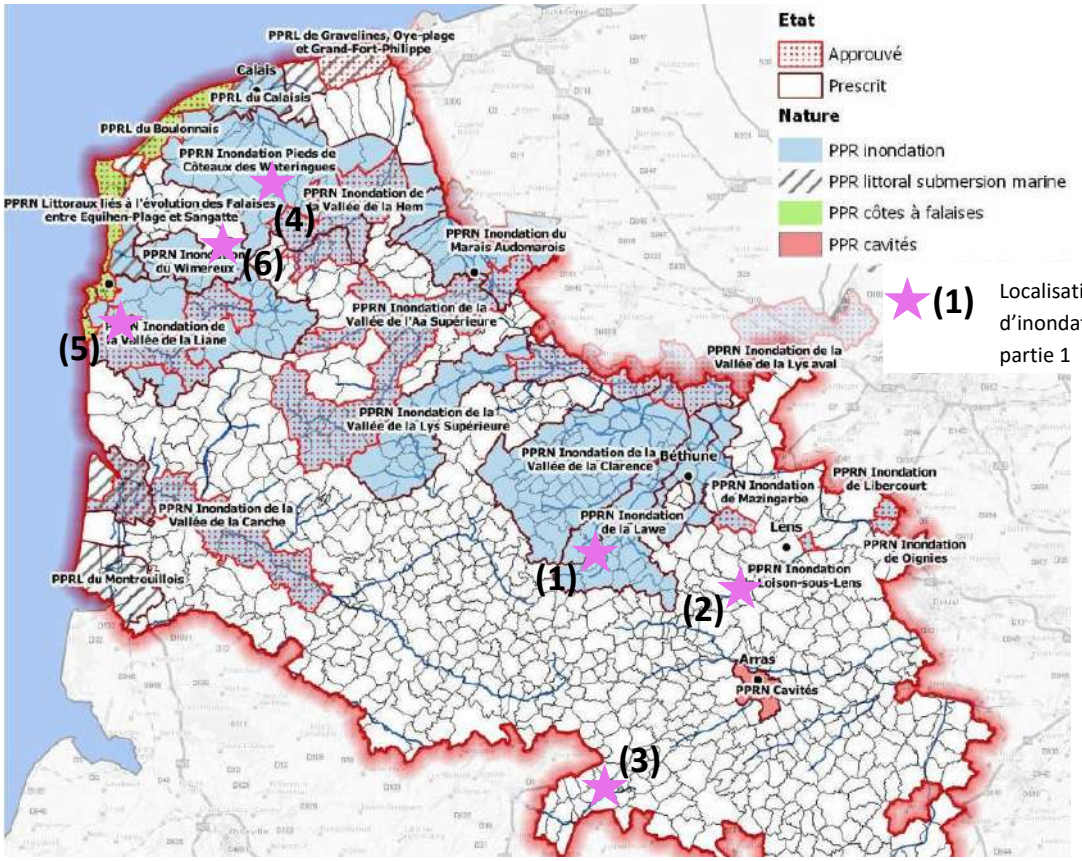
Face à ce constat, i.e des ruissellements récurrents pouvant être très violents et touchant des zones urbanisées, les services de l'État dans le Pas-de-Calais mènent une politique très active de prévention et de prise en compte des risques dans l'urbanisme et l'aménagement des territoires, qui se traduit dans l'élaboration et l'approbation de plusieurs Plans de Prévention des Risques d'Inondations, intégrant ces différents phénomènes. Dans le seul département du Pas-de-Calais, 9 PPRNi ont été approuvés entre 2003 et 2017 et 7 sont actuellement prescrits et pour certains en cours d'élaboration.

Prolog Ingénierie accompagne depuis 2014 la Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Pas-de-Calais sur plusieurs démarches PPRI multi-risques incluant le ruissellement (pieds de coteaux des Wateringues, Liane et Wimereux sur le territoire du Boulonnais, la Lawe, la Souchez et l'Authie en collaboration avec la DDTM de la Somme) [DDTM du Pas-de-Calais, 2019].

Le PPRN constitue en tout premier lieu, un outil de sensibilisation à la culture du risque de la population résidentielle. Il informe sur les risques encourus et sur les moyens de s'en prémunir en apportant une meilleure connaissance des phénomènes et de leurs incidences. De plus, à travers le respect de prescriptions dans les zones à risques, il permet d'orienter les choix d'aménagement sur les secteurs non ou peu exposés pour réduire les dommages aux personnes et aux biens.

En tant qu'outil de prévention, le PPRN ne constitue pas un programme de travaux, ni un protocole de gestion de crise. Le PPRN n'annule en rien le risque, mais a pour vocation d'en limiter les conséquences sur les biens et activités humaines. Il est complémentaire par exemple aux Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) portés par les communes, intercommunalités et leurs groupements.

Figure 2 : PPRI approuvés et en cours sur le Pas-de-Calais (Source : DDTM62, 2019)



2.2 Concertation avec les acteurs locaux

Tout au long de chaque procédure PPRI, la DDTM62 porte une attention particulière à l'intégration du processus de concertation auprès des collectivités présentes sur le territoire du PPR, élus et riverains. Cette concertation se traduit par l'association des acteurs locaux et des communes aux choix techniques et à leur validation, par le biais de deux instances :

- le **comité technique**, composé de représentants institutionnels, invités en fonction de leur connaissance propre du territoire (les services de l'État - DDTM, Sous-Préfecture, DREAL, les communautés de communes, les agences de l'urbanisme, le Conseil Départemental du Pas-de-Calais, l'Agence de l'eau, le syndicat de bassin référent, VNF, le parc naturel régional des caps et marais d'Opale ou des acteurs techniques spécifiques au bassin versant …) ;
- le **comité de concertation**, constitué d'élus locaux et d'acteurs de l'aménagement concernés par le périmètre de l'étude du PPR (l'ensemble des membres du comité technique et des collectivités territoriales du périmètre de prescription, la chambre d'agriculture, la chambre des métiers, la chambre de commerce et d'industrie, le SDIS, et le Conseil Régional).

Cette concertation avec les acteurs prend la forme de réunions techniques, d'ateliers participatifs, d'actions de communication (flyer, plaquette, documents pédagogiques), de réunions de concertation, de réunions publiques, qui rythment les différentes phases d'élaboration des PPRI (historique des inondations, aléas, enjeux, zonage et règlement).

La concertation avec les collectivités permet :

- d'informer sur l'avancée de l'étude et sur les dispositifs de gestion du risque ;
- de présenter et d'échanger sur les hypothèses de travail ;
- de présenter et d'échanger sur les résultats obtenus ;
- de valider in fine l'étape avant de passer à la suivante.

La concertation avec la population permet :

- d'informer sur l'avancée de l'étude et sur les dispositifs de gestion du risque ;
- de répondre aux interrogations formulées ;
- d'améliorer in fine la culture du risque.

Figure 3 : Flyer d'information à destination de la population (Source : PPRI de la Liane et du Wimereux, DDTM62, Prolog Ingénierie, 2018)

3. CARACTERISATION ET CARTOGRAPHIE DES PHENOMENES DE RUISSELLEMENT

3.1 Modélisation hydrologique et hydraulique

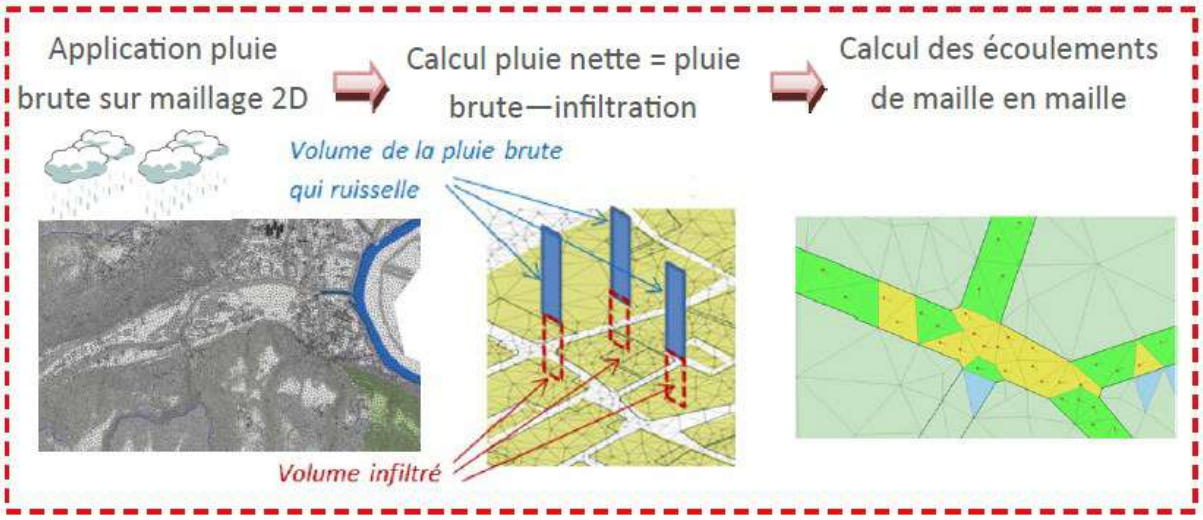
Afin de caractériser l'aléa ruissellement, l'approche technique mise en œuvre permet de représenter la transformation de la pluie en écoulement à la surface du terrain. Le phénomène est naturel (la pluie qui tombe au sol) et aléatoire (elle peut être plus ou moins abondante, localisée ou généralisée, etc.).

Pour cela, un modèle numérique s'appuyant sur des équations mathématiques représentant les phénomènes physiques suivants est élaboré sur l'ensemble du territoire sur lequel on souhaite caractériser les risques de ruissellement. Il représente :

- la transformation d'un certain volume de précipitations (c'est-à-dire une hauteur de pluie en mm sur une certaine surface en m²) en un volume d'eau « disponible » pour le ruissellement, c'est le volet « hydrologique » du modèle ;
- l'écoulement de ce volume d'eau à la surface du terrain naturel en fonction de la topographie et des différents obstacles, c'est le volet « hydraulique » du modèle.

Le modèle mis en œuvre est « bidimensionnel » (ou 2D). Cela signifie que le territoire complet étudié est découpé en tous petits éléments (des « mailles ») dont la taille s'ajuste aux variations de la topographie (Modèle Numérique de Terrain ou MNT de résolution allant de 1 m à 2 m selon les secteurs), afin de bien représenter les obstacles, les variations de terrain, etc. La pluie est appliquée sur chaque maille de calcul, une partie de l'eau s'y infiltre, une autre partie s'écoule ou s'accumule. Chaque maille peut échanger (recevoir/transmettre) son eau avec ses mailles voisines, dans 2 directions (2D).

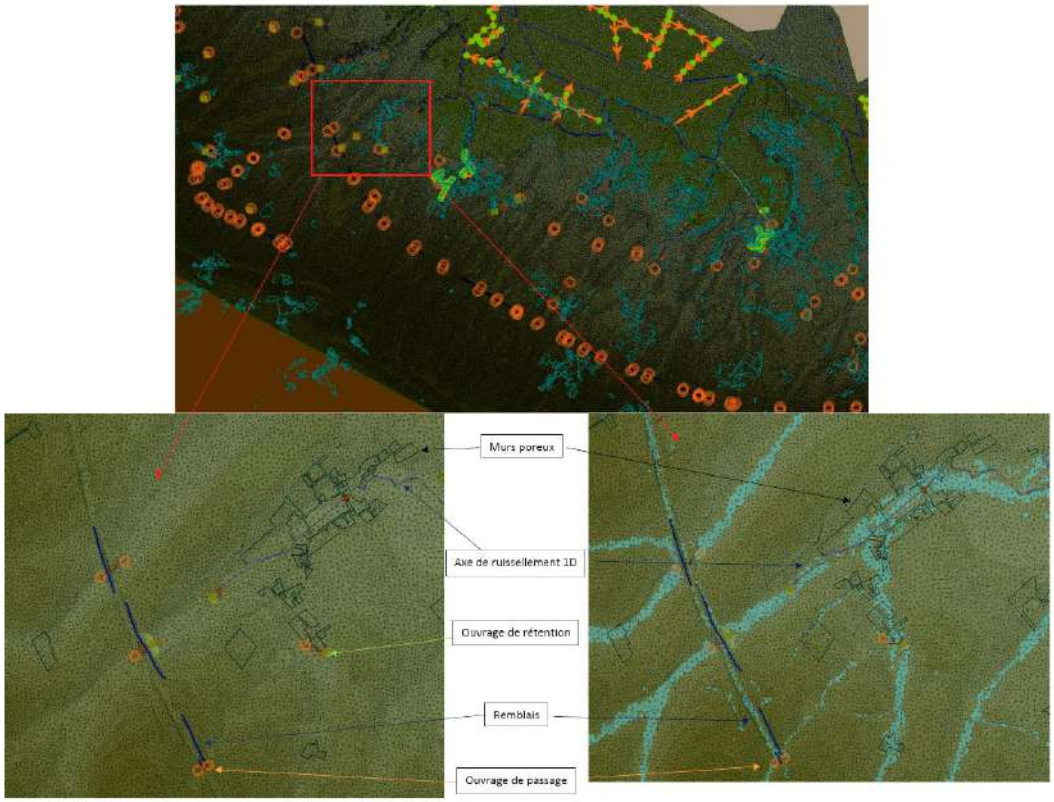
Figure 4 : Le principe de la méthode ruissellement 2D mise au point par Prolog Ingénierie (Source : guide pédagogique « caractériser, cartographier et réglementer les risques de ruissellement », Métropole de Lyon, Prolog Ingénierie, avril 2018)



Cette méthode a déjà été éprouvée dans le cadre de l'élaboration des cartes de risques sur les PLU intercommunaux des métropoles de Lyon [Sibeud, 2016] et Nantes [Vadaine, 2018], et se traduit par une cartographie des phénomènes de ruissellement distinguant zones de production, zones et axes préférentiels d'écoulement, zones d'accumulation (voir paragraphe 3.2 ci-après).

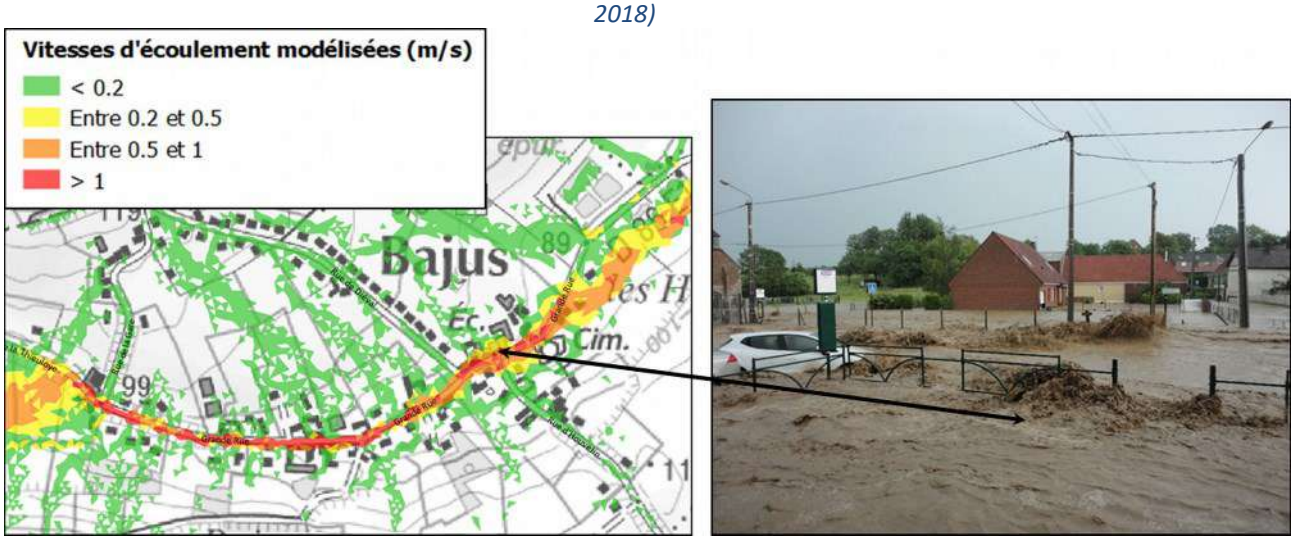
La validation du modèle hydraulique de ruissellement repose sur une vérification de la cohérence globale de son fonctionnement et notamment de sa capacité à reproduire les zones historiquement inondées, sur la base des témoignages passés, recensés lors des échanges et rencontres avec les élus et acteurs locaux. Il s'agit donc principalement d'une validation qualitative qui ne peut que très rarement être quantitative dans le cas du ruissellement, par manque de relevés précis sur les hauteurs atteintes (type « laisses de crues »).

Figure 5 : Vues du modèle mis en œuvre pour la caractérisation des phénomènes de ruissellement sur le territoire des pieds de coteaux des Wateringues : vue globale et éléments structurants du maillage de calcul (Source : PPRI des pieds de coteaux des Wateringues, DDTM62, Prolog Ingénierie, 2017)



La méthodologie globale de validation du modèle « ruissellement » repose ainsi sur une analyse de la corrélation géographique entre les témoignages d'inondation et les résultats du modèle. Concrètement, il s'agit d'évaluer le nombre de témoignages (ponctuels ou linéaires) qui est bien « touché » par les eaux dans les résultats de simulation. La figure ci-après illustre ces propos.

Figure 6 : Exemple de validation d'un modèle ruissellement (Source : PPRI de la Lawe, DDTM62, Prolog Ingénierie, 2018)



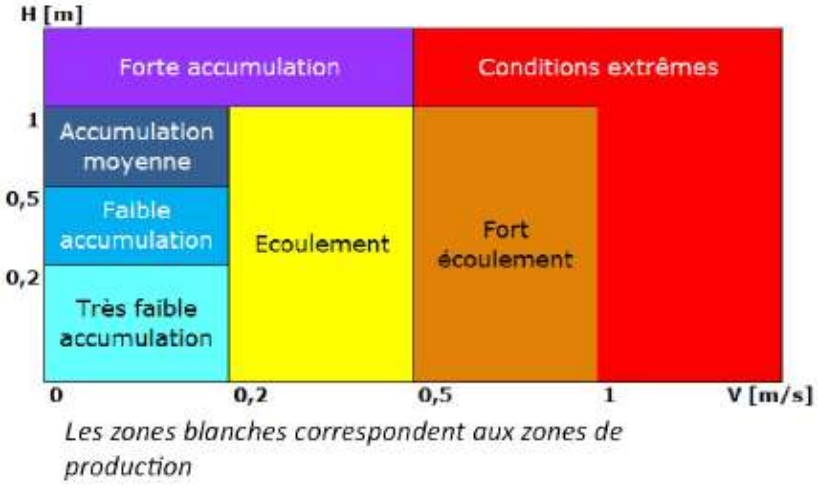
3.2 Cartographies

Une réflexion sur la façon de cartographier l'aléa ruissellement a été menée et a abouti à une représentation distinguant les zones fonctionnelles du ruissellement :

- production : correspondant aux zones non touchées par l'aléa mais qui peuvent l'aggraver ;
- écoulement : correspondant aux axes qui concentrent les eaux et qui voient se former des écoulements avec des vitesses potentiellement importantes, représentant un risque pour les populations et les équipements (voiries notamment) ;
- accumulation : correspondant aux zones de point bas, où les phénomènes de stockage prédominent. Le risque proviendra principalement de fortes hauteurs d'eau et de durées de submersion relativement longues.

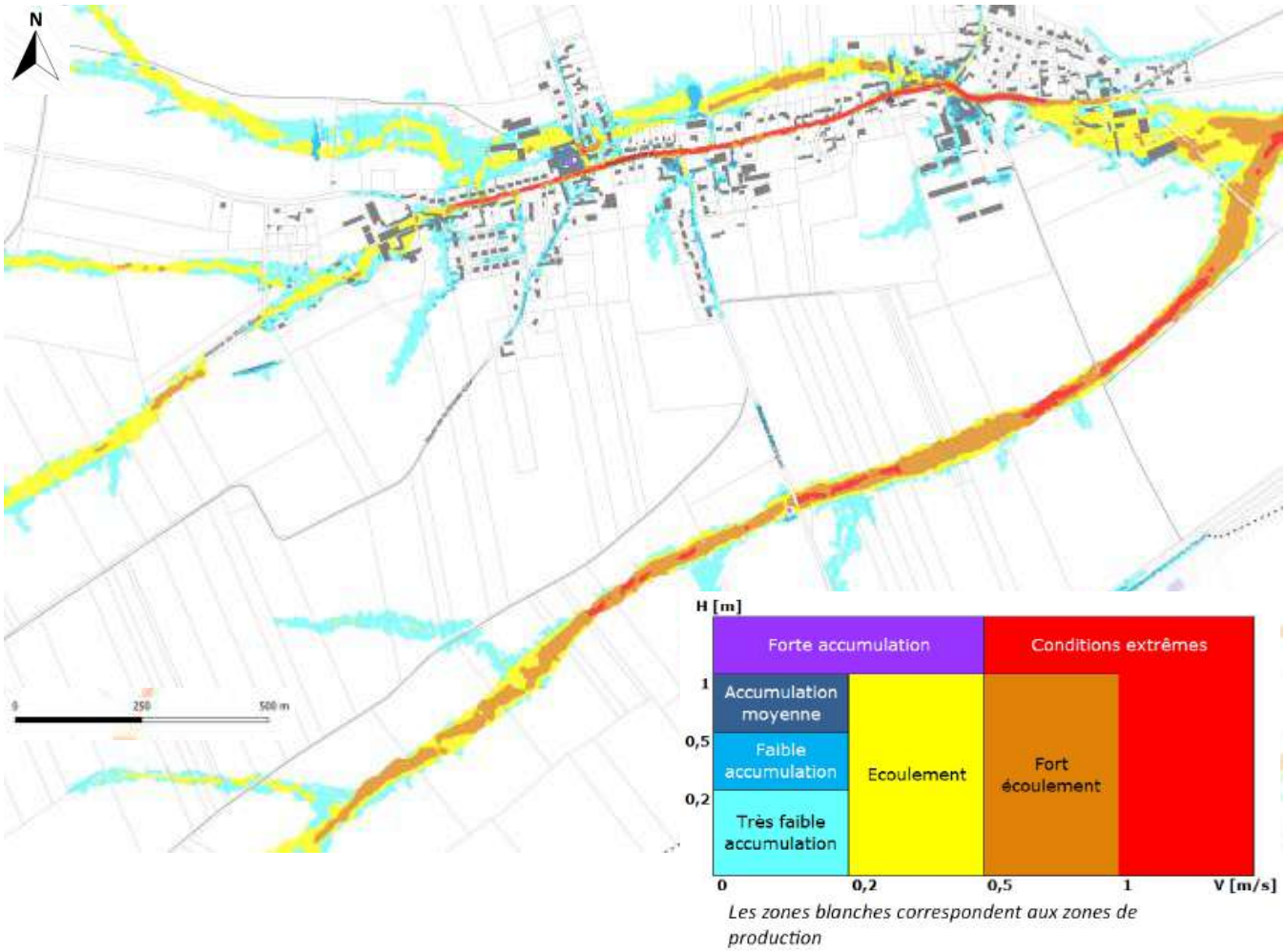
La figure ci-après montre un exemple de grille d'aléa retenue.

Figure 7 : Exemple de grille d'aléa « fonctionnel » (Source : PPRI des pieds de coteaux des Wateringues, DDTM62, Prolog Ingénierie, 2017)



À partir des résultats bruts du modèle en hauteurs de submersion et de vitesses d'écoulement sur chaque maille de calcul, on procède à un certain nombre de traitements géomatiques de croisement et de filtrage, pour obtenir la carte de l'aléa « ruissellement », comme illustré ci-après.

Figure 8 : Exemple de carte d'aléa sur la commune de Peuplingues (Source : PPRI des pieds de coteaux des Wateringues, DDTM62, Prolog Ingénierie, 2017)



La procédure de traitement géomatique consiste à construire un Modèle Numérique de Surface Libre en Eau (MNSLE) à partir des résultats du modèle hydraulique, puis à soustraire le MNT à ce MNSLE, afin d'évaluer sur tout le domaine étudié les hauteurs d'eau en chaque maille. Puis plusieurs critères de filtrage des résultats ont été définis en concertation avec la DDTM62 : un critère de hauteur d'eau minimum pour filtrer les zones non significatives et un critère de surface inondée minimum pour filtrer les zones de connexion ou d'accumulation de petite taille, isolées et présentant de faibles hauteurs d'eau.

4. ZONAGE REGLEMENTAIRE ET OBJECTIFS DE PREVENTION

Dans le cadre de l'élaboration des PPRI, les enjeux (personnes, biens, infrastructures, etc.) sont caractérisés sous l'angle de l'usage actuel des sols sur chaque commune exposée au risque. La carte des enjeux a pour objet de délimiter au sein de la zone inondable couverte par l'aléa sur chaque commune :

- les **Espaces dits Urbanisés (EU)**, qui représentent les parties incluses au sein d'un périmètre urbain d'ores et déjà établi, et qui se définit comme un espace structuré, cohérent, et suffisamment important (centre-ville, quartier résidentiel, etc.) ; les projets autorisés avant le lancement du PPR sont également pris en compte en vue de la continuité de l'urbanisation en cours ;
- les **Espaces dits Non Urbanisés (ENU)**, qui représentent des secteurs non ou peu bâtis comme les hameaux et les habitats isolés, les espaces verts, les terrains agricoles, les zones boisées, les terrains de sports, les parkings, les friches, ...

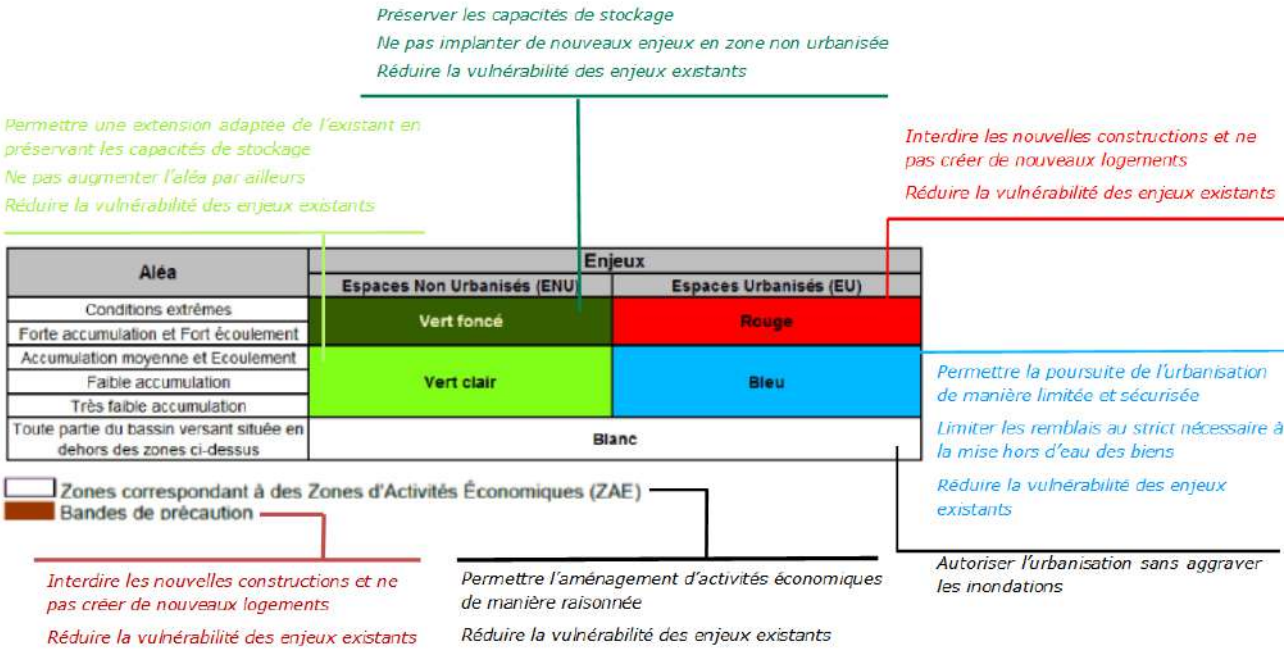
Les grands objectifs du PPRI sont alors de préserver l'espace nécessaire à l'expansion naturelle des eaux, de réduire la vulnérabilité des biens et des personnes et de réglementer l'urbanisation des zones historiquement et actuellement bâties.

Le dossier réglementaire du futur PPRI s'appuie ainsi sur une carte dite de « zonage réglementaire » associée à un règlement qui fixe des prescriptions et recommandations en termes d'urbanisme, en réponse à des grands objectifs de prévention.

La carte de zonage réglementaire est élaborée en croisant la carte des aléas pour l'événement de référence à celle des enjeux sur la seule emprise des zones inondées pour cet événement. Selon la doctrine nationale, cet événement de référence sur chaque bassin versant doit être d'occurrence minimale 100 ans (un risque de se produire chaque année de 1/100), il peut s'agir de préférence d'un événement historique réel, connu et documenté, s'il est démontré qu'il est bien au moins centennal, ou sinon d'un événement « de projet » représentatif.

Le croisement des deux cartes conduit alors à délimiter le territoire exposé au risque inondation en plusieurs zones, auxquelles sont associés des objectifs en termes de prévention, adaptés aux particularités des risques de ruissellement et au contexte local, comme illustré sur la figure ci-après. Des prescriptions (obligatoires) et recommandations (facultatives) permettant d'orienter et de réglementer les autorisations d'urbanisme sont alors définies au sein de chaque zone.

Figure 9 : Exemple de grille de zonage (Source : PPRI de la Lawe, DDTM62, Prolog Ingénierie, 2019)



CONCLUSIONS

Cet article présente l'approche de prévention des risques de ruissellement portée par les services de l'État dans le département du Pas-de-Calais. Celle-ci s'appuie sur la collecte et la prise en compte des observations et constats faits lors de plusieurs événements récents, sur la mise en œuvre de méthodes avancées d'évaluation et de cartographie des phénomènes de ruissellement, sur la définition d'objectifs de prévention et de prescriptions adaptées à chaque territoire, et sur une large association des parties prenantes. Cette démarche a aussi été utilisée dans le cadre de PPRI dans le département du Nord (Nord-Ouest Lille, Rhonelle) et des PLU intercommunaux des métropoles de Lyon et Nantes.

Cette démarche ambitieuse a pour objectif de sensibiliser et d'informer les élus et riverains sur leur exposition aux risques, d'empêcher d'exposer de nouveaux biens et personnes à ces phénomènes dangereux et dommageables, et de mieux préparer chaque territoire à la survenue de tels épisodes certes exceptionnels dans leur intensité, mais récurrents.

Cette démarche de prévention est complémentaire avec d'autres politiques et démarches à mettre en œuvre, par exemple dans le cadre de Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI), telles que la

gestion des ruissellements à la source, la surveillance et la prévision des épisodes météorologiques extrêmes, l'organisation et la gestion de crise, etc.

Une des pistes d'amélioration de la modélisation bi-dimensionnelle du ruissellement concerne la prise en compte des réseaux d'assainissement en zone urbaine sur des événements fréquents (de période de retour de 10 à 30 ans voire moins), car ces réseaux ont une influence non négligeable sur ces événements à la différence d'un événement de référence du PPRI, qui est a minima centennal.

REFERENCES

DDTM du Pas-de-Calais, Prolog Ingénierie (2019). – Note de présentation. *PPRI du bassin versant du Wimereux.*

DDTM du Pas-de-Calais, Prolog Ingénierie (2019). – Règlement. *PPRI du bassin versant du Wimereux.*

DDTM du Pas-de-Calais, Prolog Ingénierie (2019). – Note de présentation. *PPRI du bassin versant de la Liane.*

DDTM du Pas-de-Calais, Prolog Ingénierie (2019). – Règlement. *PPRI du bassin versant de la Liane.*

DDTM du Pas-de-Calais, Prolog Ingénierie (2019). – Note de présentation. *PPRI du bassin versant de la Lawe.*

DDTM du Pas-de-Calais, Prolog Ingénierie (2019). – Règlement. *PPRI du bassin versant de la Lawe.*

DDTM du Pas-de-Calais, Prolog Ingénierie (2019). – Note de présentation. *PPRI du bassin versant des pieds de coteaux des Wateringues.*

DDTM du Pas-de-Calais, Prolog Ingénierie (2019). – Règlement. *PPRI du bassin versant des pieds de coteaux des Wateringues.*

DREAL des Hauts-de-France (2018). – *Addendum à l'évaluation préliminaire des risques d'inondation 2011 Bassin Artois-Picardie.*

Sibeud E. (Métropole de Lyon), Delbec M. (2016). Zonage prévention des risques de ruissellement et protection des milieux aquatiques. *NOVATECH 2016, 9ème conférence international, 28 juin – 1 juillet 2016, Lyon.*

Vadaine E. (Nantes Métropole), Delbec M. (2018) - Modéliser le ruissellement pluvial urbain pour mieux se préparer aux événements climatiques tels que l'orage du 9 juillet 2017. *97ème congrès de l'ASTEE, 5-8 juin 2018, Marseille.*

Utilisation de l'approche hydrogéomorphologique pour cartographier les zones inondables par ruissellement et l'intégration réglementaire dans les PLU : retours d'expériences dans le sud de la France (Montané *et al.*)

Utilisation de l'approche hydrogéomorphologique pour cartographier les zones inondables par ruissellement et l'intégration réglementaire dans les PLU : retours d'expériences dans le sud de la France

Antonin MONTANÉ[1], Patrick BUQUET[2], Fabien CHRISTIN[3], Gauthier LERICHE[4]

[1] Cereg – 260 avenue du col de l'Ange, 13420 Gémenos – a.montane@cereg.com

[2] Cereg – 589 rue Favre de Saint-Castor, 34080 Montpellier– p.buquet@cereg.com

[3] Cereg – 260 avenue du col de l'Ange, 13420 Gémenos – f.christin@cereg.com

[4] Cereg – 260 avenue du col de l'Ange, 13420 Gémenos – g.leriche @cereg.com

Face au risque de ruissellement, la méthode hydrogéomorphologique est aujourd'hui appliquée à l'échelle de communes ou d'intercommunalité, dans la perspective d'une intégration réglementaire de cet aléa dans le PLU. Cereg participe au développement de cette approche, notamment dans les départements du Gard et des Bouches-du-Rhône, en s'appuyant sur des doctrines méthodologiques produites par les services de l'État.

L'application de cette méthode, initialement appliquée aux débordements de cours d'eau reste, peu connue, tant par les communes, que par beaucoup de services de l'état. Celle-ci peut constituer une première étape utile pour la compréhension des phénomènes de ruissellement à l'échelle d'une commune.

Mots-clefs : Ruissellement, Cartographie, Hydrogéomorphologique, PLU,

Use of the hydrogeomorphological approach to map areas flooded by runoff and regulatory integration in urban planning: feedback from experiences in the South of France

Faced with the risk of runoff, the hydrogeomorphological method (HGM) is now applied at the scale of municipalities, with a view to regulatory integration of this hazard in local urban planning. Cereg participates in the development of this approach, particularly in the departments of Gard and Bouches-du-Rhône, relying on methodological doctrines produced by some Environment Ministry decentralized units (DDT).

The application of this method, initially applied to overflow floods remains little known, both by the municipalities, and by many state services. This can be a useful first step for understanding the runoff phenomena at the scale of a municipality. In order to be widely used, this method could need to be tested in different kinds of regions, and also to get a methodological guide.

Keywords : Runoff, Hydrogeomorphological, mapping, urban planning

INTRODUCTION

Depuis plus de 30 ans, la méthode hydrogéomorphologique est largement utilisée en France pour cartographier les zones inondables. Elle est aujourd'hui essentiellement utilisée pour l'aléa débordement de cours d'eau [Goutx, 2014; Masson et al., 1996; Montané et al., 2015].

Face au risque de ruissellement, la méthode hydrogéomorphologique est maintenant appliquée à l'échelle de communes ou d'intercommunalités, dans la perspective d'une intégration réglementaire de cet aléa dans le PLU. Cereg participe au développement de cette approche, en s'appuyant notamment sur des doctrines méthodologiques produites par les services de l'État.

La mise en place de cette méthode pose des questions d'ordre technique et réglementaire. Elle amène également une communication différente autour des zones inondables auprès des communes.

ÉMERGENCE DE LA DEMANDE DE CARTOGRAPHIE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE DES ZONES DE RUISSELLEMENT

UN INTERET POUR LES PHENOMENES DE PLUS EN PLUS RARES

La connaissance et la cartographie de l'aléa inondation apparait comme une nécessité dans des sociétés où les inondations deviennent une préoccupation croissante. Les phénomènes étudiés et pris en compte dans les documents réglementaires sont de plus en plus rares et de plus en plus fins. En France avant 1982, les cartes relatives aux zones inondables se limitaient aux PSS (Plan de Surface Submersible) qui représentaient, sur les principaux cours d'eau français, des crues de récurrence variable, mais souvent plus fréquentes que la crue centennale. Aujourd'hui, avec l'analyse de l'aléa ruissellement, l'objectif est d'étudier des inondations relatives à des superficies drainées de quelques hectares, associées à des périodes de retour centennales, voire supérieures. Cet intérêt pour les phénomènes de plus en plus rares est à mettre en relation avec le fait que sociétés humaines acceptent plus difficilement la fatalité liée aux catastrophes naturelles, en lien avec le phénomène de rationalisation du risque [Beck, 2001], mais aussi avec l'augmentation des enjeux en zone inondable [CGDD-SOeS, 2009]. Cette tendance s'explique aussi par les évolutions technologiques qui contribuent à identifier ces zones de ruissellement (LiDAR, modélisation hydraulique 2D).

DES RUISSELLEMENTS MEURTRIERS, MOTEURS DES EVOLUTIONS REGLEMENTAIRES

La problématique du ruissellement urbain n'est pas un phénomène nouveau en France. En revanche, la volonté de la prendre en compte dans les documents d'urbanisme est plus récente. Parmi les phénomènes marquants de ces dernières années, nous pouvons citer Nîmes en 1988, ou encore Draguignan en 2010. Mais ce sont les ruissellements meurtriers survenus sur la Côte d'Azur en octobre 2015 qui ont entrainé une véritable prise en conscience. L'instruction du gouvernement du 31/12/2015[1] insiste notamment sur la nécessité de prise en compte des phénomènes de ruissellement, notamment dans les documents d'urbanisme et les PLU (Plan Local d'Urbanisme), sans pour autant en préciser les contours méthodologiques. Dans le sillage de cette circulaire, les initiatives n'ont pas tardé. La mission interrégionale ArcMed[2] a permis de nombreux échanges entre les acteurs de l'Arc méditerranéen, avec un focus particulier sur le ruissellement.

Dans le département du Gard, les évènements des dernières années (2002, 2014, 2015…) ont montré que bon nombre de communes étaient exposées aux crues torrentielles, mais aussi au ruissellement. Afin d'orienter les communes sur la manière de prendre en compte le risque de ruissellement sur leur territoire, la DDTM30 a mandaté Cereg en 2016 pour la production d'un guide méthodologique [Cereg, 2016]. Ce guide aborde l'usage de la méthode hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones de ruissellement. Ce guide introduit notamment la distinction entre ruissellement et débordement de cours d'eau sur la base d'un seuil de superficie drainée de 1 km². Ce seuil entre ruissellement et débordement de cours d'eau demeure arbitraire, mais il a le mérite d'exister et il s'avère malgré tout pertinent sur le terrain. Une comparaison plus méthodique entre superficie drainée et type d'aléa inondation serait utile, d'autant que ces seuils doivent certainement varier d'un contexte physique à l'autre. Ce document précise les modalités de mise en œuvre technique dans le cas du ruissellement et suivant les spécificités géomorphologiques du département du Gard. Il décline les outils à disposition des collectivités pour la prise en compte du risque de ruissellement dans leur document d'urbanisme.

À la suite de la rédaction de ce guide, la DDTM30 a poursuivi le déploiement des études en lien avec le ruissellement en complétant ce travail par une note de cadrage méthodologique à l'intention des élus (mai 2018). Dans le cas où une donnée de type « hauteurs / vitesses » d'écoulement serait disponible, sur la base d'une modélisation hydraulique de la crue de référence, celle-ci primerait sur les autres. Si aucune modélisation hydraulique du ruissellement n'est disponible, l'emprise des zones de ruissellement issues d'une cartographie hydrogéomorphologique peut être utilisée. Enfin si aucune des deux données citées n'est disponible, c'est la donnée EXZECO[3][Pons et al., 2010], qui sera utilisée.

Faisant suite à ces travaux et à cette nouvelle doctrine, en mai 2018, la préfecture du Gard a incité les collectivités locales, à travers un courrier, à prendre en compte le risque de ruissellement à l'occasion de

[1] https://aida.ineris.fr/consultation_document/36971
[2] http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/inondations-arc-mediterraneen-r2225.html
[3] https://www.cerema.fr/fr/actualites/modelisation-du-ruissellement-bassins-versants-methode

l'élaboration ou de la révision de leur PLU. Bien qu'il n'existe aujourd'hui pas de guide méthodologique spécifique pour les Bouches du Rhône, la DDTM13 s'inscrit dans la même démarche vis-à-vis des communes qui révisent ou élaborent leur PLU.

Notons par ailleurs que la méthode hydrogéomorphologique a pour la première fois été inscrite dans un texte de loi français. Elle figure à l'article R. 562-11-3 du Décret n°2019-715 du 5 juillet 2019 relatif aux plans de prévention des risques concernant les « aléas débordement de cours d'eau et submersion marine »[4]. Le décret précise que « (…) sur certains secteurs à faibles ou sans enjeux, l'approche hydrogéomorphologique peut être utilisée pour déterminer l'aléa de référence ». En ce sens, elle conforte la pertinence de cette approche et entérine indirectement la possibilité d'utiliser cette approche hors PPRI.

REALISATION D'UNE CARTOGRAPHIE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE DU RUISSELLEMENT

QUELS TYPES DE COMMUNES CONCERNEES

La demande pour l'analyse du ruissellement par une approche hydrogéomorphologique intervient le plus souvent à l'occasion de la réalisation d'un PLU. Les communes concernées peuvent disposer d'un PPRI approuvé, auquel cas la cartographie hydrogéomorphologique du ruissellement complètera le PPRI. Si la commune ne possède pas de PPRI, les cartes hydrogéomorphologiques produites seront réalisées dans l'ensemble de la commune et celle-ci pourra si elle le souhaite réaliser une modélisation hydraulique de la crue de référence sur les secteurs à enjeux.

Malheureusement, très souvent, les réflexions sur les problématiques de ruissellement arrivent en toute fin du processus d'élaboration des PLU. Le projet de nouveau zonage est déjà établi, les OAP sont localisées précisément, tout comme les zones AU. Dans cette configuration, les cartes hydrogéomorphologiques produites peuvent venir impacter les projets communaux en identifiant un risque plus ou moins élevé de risque de ruissellement. Cela peut donc amener dans certains cas à revoir profondément le PLU, dans d'autres cas, il peut s'agir d'ajustement à la marge. Il y a donc une réelle nécessité d'engager au plus tôt cette approche, de manière à intégrer au mieux la problématique du ruissellement (au même titre que les autres risques naturels, ce qui est très largement le cas par les communes pour leur PLU), et éviter l'étirement des délais d'approbation des documents d'urbanisme.

ADAPTATION A L'ALEA RUISSELLEMENT

La grande différence entre la cartographie hydrogéomorphologique des débordements de cours d'eau et du ruissellement tient avant tout aux guides méthodologiques qui encadrent la réalisation de ces cartes. Même si la méthode n'a été que très récemment intégrée dans un texte de loi (Décret n°2019-715 du 5 juillet 2019) sa définition méthodologique [DIREN PACA, 2007; Masson et al., 1996; MEDD, 2001] et son utilisation réglementaire n'ont cessé de croitre au cours des années 2000, notamment dans les PPRI du pourtour méditerranéen [Garry et al., 2002; Montané et al., 2015]. En revanche, le ruissellement ne dispose pas d'un cadre méthodologique, tant pour la délimitation des zones inondables que pour leur représentation cartographique. Chaque bureau d'étude qui réalise ce type d'étude semble avoir défini sa propre légende.

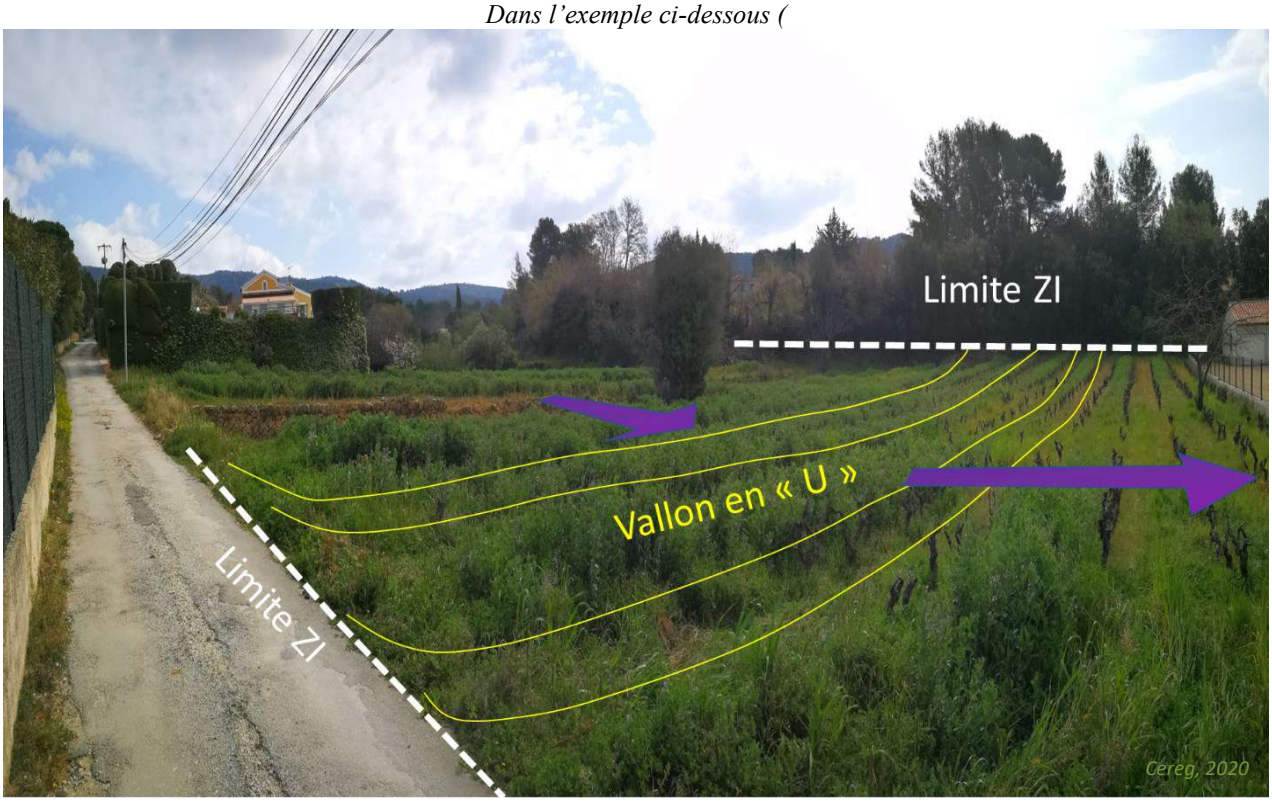
Du point de vue de l'identification des zones inondables, le ruissellement suit la même logique que le débordement de cours d'eau. Les zones inondables correspondent à des zones sub-horizontales qui longent le thalweg et qui se distinguent plus ou moins nettement des formations de l'encaissant (versant, terrasses alluviales, colluvions). La distinction entre ces zones de ruissellement et les zones non affectées est plus ténue que pour la zone inondable dans le cas de plaine alluviale. Elle implique une attention forte sur la sédimentologie, les modalités de raccordements souvent estompées entre les zones ruissellement et leurs flancs, les processus d'érosion, de transport et d'accumulation sur ces surfaces, etc.

Deux types de zones de ruissellement peuvent être distinguées du point de vue géomorphologique.

Le ruissellement concentré (Figure 1) correspond à des zones inondables aux limites marquées par un talus net, confrontées aux dynamiques de ruissellement les plus significatives (hauteurs et vitesses des écoulements plus fortes).

[4] https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000038730822&categorieLien=id

Dans l'exemple ci-dessous (



- Figure 3), on constate que la zone de ruissellement est délimitée par une route, légèrement remblayée et par un talus plus net en arrière-plan. La commune concernée a confirmé que cette zone était régulièrement inondée lors de fortes pluies.
- Les zones de ruissellement diffus (Figure 2) correspondent à des dynamiques moindres. Lors d'évènements pluvieux importants, les parties amont des bassins versants présentent du ruissellement diffus, avant de se concentrer. Cependant, du point de vue morphologique ces ruissellements diffus ne sont pas identifiables et surtout, ils peuvent correspondre à des versants entiers. En représentant un versant entier en zone de ruissellement, nous perdons la priorisation de l'aléa créée par une zone de ruissellement concentrée. Dans nos cartographies, les seules zones de ruissellement diffus identifiées sont celles situées à l'aval de ruissellements concentrés, sous la forme de cônes alluviaux ou de glacis d'épandage, qui entrainent des écoulements divergents. Ce sont des formes de raccordement entre un vallon et une plaine alluviale plus large, avec un profil en travers « en toit ».

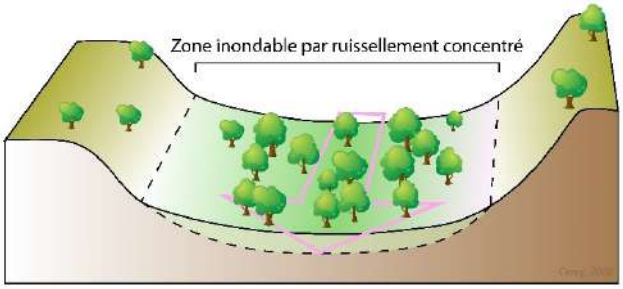


Figure 1 : Zone inondable par ruissellement concentré

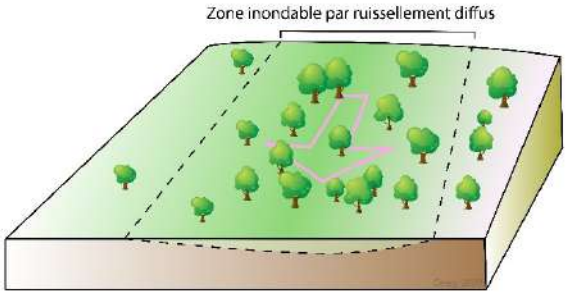


Figure 2 : Zone inondable par ruissellement diffus

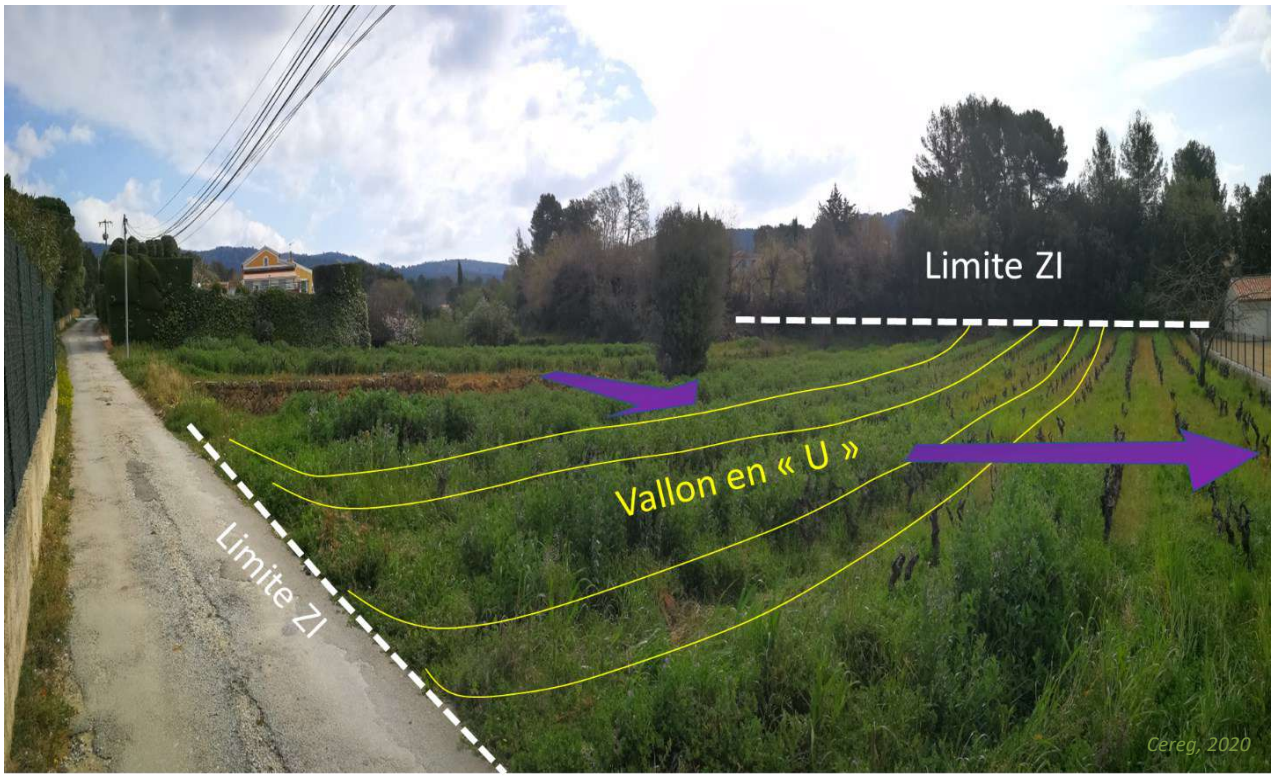


Figure 3 : Exemple d'une zone de ruissellement concentré

Aujourd'hui avec le développement des outils de cartographiques informatiques, l'approche hydrogéomorphologique se dote d'outils complémentaires qui permettent dans certains cas à la fois d'affiner l'analyse de terrain, la photo-interprétation hydrogéomorphologique des photographies aériennes, et d'automatiser certaines tâches. Parmi ces outils, nous pouvons citer le calcul de thalweg, par exemple avec l'algorithme D8 [O'Callaghan & Mark, 1984] ou encore la méthode EXZECO, dont l'application sur un MNT de résolution 5 m améliore grandement son utilisation pour l'analyse du ruissellement[5]. À elles seules, ces approches ne sont pas suffisantes dans la mesure où elles s'appuient strictement sur l'analyse topographique à un instant « T » dans un contexte topographique le plus souvent fortement perturbé par les activités humaines : terrassements agricoles, remblais d'infrastructures, urbanisation, etc. Par rapport à des méthodes automatisées, l'approche hydrogéomorphologique apporte une validation de terrain, des zones inondables, mais aussi une confrontation avec les connaissances des communes.

Par association avec les Atlas de Zones Inondables (AZI), l'approche hydrogéomorphologique est encore considérée comme une méthode uniquement adaptée à l'identification des zones inondables de cours d'eau. Cette limitation au débordement de cours d'eau ne relève pas des limites intrinsèques de la méthode, mais simplement de son domaine d'application par le passé.

Une des limites citées pour l'approche hydrogéomorphologique sur le débordement de cours d'eau est la modification du terrain naturel par l'urbanisation [Garry et al., 2002; Masson et al., 1996]. Néanmoins, cette limite trouve une contradiction par le fait que la méthode hydrogéomorphologique se veut naturaliste et ne prend pas en compte l'anthropisation. Dans un contexte d'urbanisation intense, les différents réseaux pluviaux, les remblais et autre construction ont nécessairement un impact sur les ruissellements. Cependant, dans une optique de cartographie des zones maximales de ruissellement, l'approche hydrogéomorphologique reste applicable, même en contexte urbain. En effet, dans le cas d'une pluie extrême, les réseaux pluviaux seront saturés et les écoulements retrouvent souvent leurs zones inondables naturelles. En cas de modifications massives du terrain naturel (remblais d'infrastructure notamment) et de nombreux enjeux en zone inondable, la modélisation hydraulique reste la seule méthode fiable pour représenter cet aléa, qui s'éloigne de ses formes géomorphologiques originelles. L'hydrogéomorphologie en tant qu'approche préalable permet de son côté de couvrir rapidement un vaste espace, d'identifier les secteurs sur lesquels les problématiques de ruissellement

[5] https://www.cerema.fr/fr/actualites/modelisation-du-ruissellement-bassins-versants-methode

sont importantes et donc de cibler les secteurs pour lesquels une modélisation hydraulique est indispensable pour quantifier l'aléa.

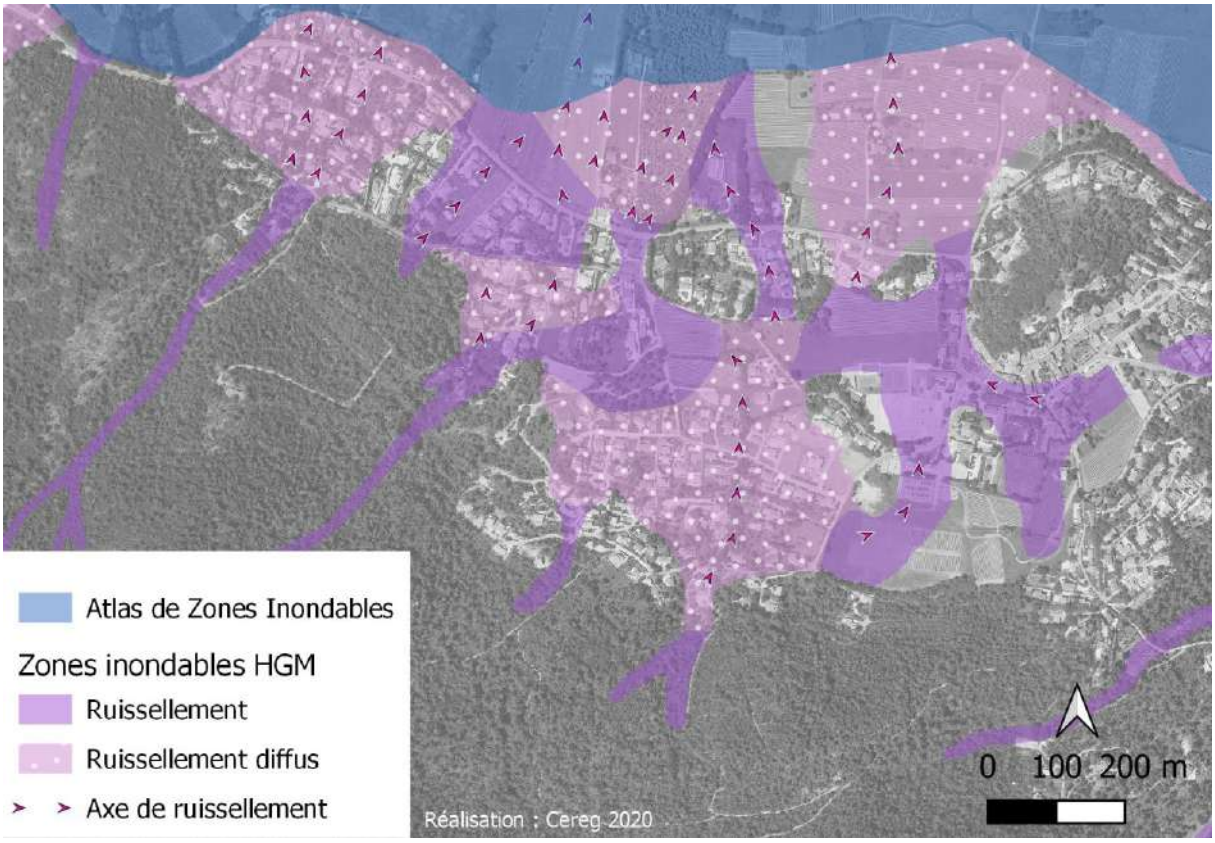


Figure 4 : Exemple de cartographie hydrogéomorphologique du ruissellement

DES ECHANGES CONSTRUCTIFS AVEC LES COMMUNES

La cartographie de zones inondables par débordement de cours d'eau et surtout leur réglementation au travers des PPRI, constitue une situation souvent conflictuelle, opposant les communes aux services de l'État. Les cartes d'aléa produites peuvent être vivement critiquées. Par leur ampleur, les cartographies hydrogéomorphologiques sont encore plus remises en question, d'autant plus si aucune crue extrême n'est survenue durant les dernières décennies.

Cette configuration n'est plus la même avec le risque de ruissellement. Les débordements de cours d'eau constituent un aléa qui nécessite une vision à l'échelle de bassin versant pour être correctement compris. En revanche, le ruissellement est beaucoup mieux connu par les communes, tant par les élus que les services techniques notamment au regard des événements pluviaux fréquents qui surviennent et pour lesquels ils sont fortement sollicités par la population.

La cartographie hydrogéomorphologique du risque du ruissellement nécessite des échanges et des visites de terrain avec les services techniques et les élus et sont souvent l'occasion d'expliquer l'approche, sa pertinence, mais aussi ses limites. Cela permet dans bien des cas d'éviter ou du moins d'estomper les conflits pour l'établissement du PLU par exemple. L'approche permet d'expliquer les processus et les conditions d'écoulement du ruissellement sur leur commune et souvent les éclaire sur les problèmes qu'ils rencontrent fréquemment. Ces échanges facilitent l'appropriation des résultats et la justification de zone pour laquelle une modélisation hydraulique semble judicieuse d'être engagée.

OU « S'ARRETE LE RUISSELLEMENT » ?

Derrière cette question se cache un constat issu de l'accompagnement de plus de 50 communes sur la cartographie hydrogéomorphologique du ruissellement. La réalisation de zones inondables et les échanges avec des collectivités et des riverains touchés montrent que des ruissellements peuvent causer des dégâts à partir de superficies drainées très réduites (1 ha – 2 ha). Ce constat est d'autant plus vrai en contexte urbain, où la microtopographie liée aux voiries et aux remblais/déblais peut accentuer les phénomènes. Dans ces

configurations de ruissellement omniprésent, la question de « faire remonter » la zone inondable jusqu'à des superficies drainées très faibles peut se poser. Néanmoins, pour les cartographies hydrogéomorphologiques, nous nous limitons aux zones de ruissellement morphologiquement identifiables sur le terrain (concentré ou diffus) et qui peuvent représenter des zones d'accumulation d'eau. Pour le reste des zones, le fait d'agir directement sur les enjeux serait peut-être une logique plus efficace. Le rehaussement systématique de nouveaux logements sur vide sanitaire et la mise hors d'eau de l'entrée des parkings sous-terrain sont autant de mesures de bon sens qui devraient être appliquées, surtout en contexte méditerranéen.

INTEGRATION REGLEMENTAIRE

Cette intégration règlementaire du risque de ruissellement dans les documents d'urbanisme s'appuyant sur une approche hydrogéomorphologique s'appuie sur les travaux réalisés par le Groupe d'Échange Risque Inondation (GERI) dans le département du Gard associant la DDTM30, le CR Occitanie, la DREAL Occitanie, le Département du Gard et pour lequel Cereg est venu en appui technique lors de séances de travail.

Le zonage réglementaire produit est issu du croisement entre la cartographie hydrogéomorphologique du ruissellement et d'une distinction des zones urbanisées et non urbanisées. Pour le ruissellement, ce zonage est, dans le département du Gard, composé de deux zones (Tableau 1).

Tableau 1 : Zonage réglementaire issu de l'analyse hydrogéomorphologique du ruissellement

Urbanisé - **U**	Non urbanisé - **NU**
RuU	**RuNU**
- Constructible avec calage à TN+80 cm - Pas d'établissement stratégique ou accueillant des populations vulnérables - Adaptations possibles en centre urbain	- Inconstructibles sauf les bâtiments agricoles sous conditions - Extensions limitées des bâtiments existants sous conditions

Le zonage réglementaire produit peut être annexé au PLU sous la forme d'une « annexe inondation » ou « annexe ruissellement », voire être affiché dans les documents graphiques du PLU. En lien avec l'article R123-11B du code de l'urbanisme[6], le règlement du PLU peut contenir des dispositions particulières relatives aux risques naturels. C'est dans cette section que la commune précise la constructibilité de ses différentes zones de ruissellement. Cette annexe ruissellement est régulièrement confondue avec le zonage pluvial. Or, le zonage pluvial vise à la mise en place de mesures de gestion et d'aménagement pour garantir la bonne gestion des eaux usées et pluviales (alinéas 3° et 4° de l'article L.2224-10 du CGCT[7]). Le zonage pluvial envisage le ruissellement comme une nuisance, avec une approche aléa-centrée. En revanche, l'annexe inondation du PLU conçoit le ruissellement comme un risque majeur, sur lequel agir grâce à l'exposition des enjeux.

CONCLUSION

La cartographie du ruissellement par approche hydrogéomorphologique permet de traiter rapidement l'ensemble d'un territoire communal. En amont de modélisations hydrauliques, elle permet un premier échange avec les communes, dans une logique de co-construction du zonage. L'approche hydrogéomorphologique peut couvrir un vaste territoire communal à moindre coût et dans un délai parfaitement compatible avec l'élaboration d'un PLU. Elle sera d'autant plus pertinente qu'elle sera engagée le plus tôt possible permettant ainsi d'orienter les acteurs du territoire rapidement dans leur projet de développement, de concentrer le travail des hydrauliciens et les modélisations sur les secteurs à enjeux les plus forts, d'assurer les services de l'état sur une prise en compte globale de ce risque par la commune dans le cadre de son PLU.

Les résultats produits permettent d'orienter les besoins en modélisation hydraulique sur les secteurs à enjeux, mais aussi être intégrés dans les PLU. Les cartes sont également utiles dans le cadre de Schémas Directeurs des Eaux Pluviales (SDEP).

[6]https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000025430337&cidTexte=LEGITEXT000006074075&dateTexte=20120303

[7]https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000022483286&cidTexte=LEGITEXT000006070633&dateTexte=20100714

L'approche repose sur l'expertise de bureaux d'étude qui ont travaillé par le passé sur les AZI. Il lui manque aujourd'hui un cadre méthodologique clair, mais aussi une visibilité de la part des principaux acteurs du ruissellement, à savoir les communes et les intercommunalités. Sa visibilité repose encore très largement sur les quelques services déconcentrés de l'État qui recommandent son utilisation, mais aussi sur les bureaux d'études, lorsqu'ils sont consultés par les maitres d'ouvrage. Le travail méthodologique et réglementaire réalisé par la DDTM30 et la DDTM13 constitue un premier socle, qui mériterait d'être nourri par des retours d'expérience de cartographie de zone de ruissellement par approche hydrogéomorphologique. On peut donc espérer qu'à moyen terme, suite à la multiplication des études engagées, un guide soit réalisé, au même titre que celui pour les PPRI ou pour l'approche hydrogéomorphologique des zones inondables. Ce guide permettrait ainsi progressivement d'étendre ce type d'approche sur l'ensemble du territoire national et qu'elle ne soit plus uniquement cantonnée à quelques départements du sud de la France et à certains services de l'État et acteurs de l'aménagement du territoire convaincus par l'intérêt de cette approche.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Beck, U. (2001). *La société du risque. Sur la voie d'une autre modernité* (Éditions Aubier).

Cereg. (2016). *Cahier des charges sur les modalités de prise en compte du ruissellement pluvial dans les PLU du Gard* (p. 56). DDTM30.

CGDD-SOeS. (2009). Croissance du nombre de logements en zones inondables. *Le point sur*, *6*, 5.

DIREN PACA. (2007). *L'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens. Une méthode de détermination des zones inondables* (p. 66).

Garry, G., Ballais, J.-L., & Masson, M. (2002). La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, *8*(1), 5-15. https://doi.org/10.3406/morfo.2002.1124

Goutx, D. (2014). Les leçons de l'incorporation de l'expertise hydrogéomorphologique dans la doctrine française de prévention des risques d'inondation. *[VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement*, *14*(2).

Masson, M., Garry, G., & Ballais, J.-L. (1996). *Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique* (p. 100). Ministère de l'Equipement, des Transports et du Tourisme.

MEDD. (2001). *Termes de référence d'un CCTP des Atlas des Zones Inondables* (p. 104). Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

Montané, A., Vinet, F., Buffin-Béranger, T., Vento, O., & Masson, M. (2015). Cartographie hydrogéomorphologique : Émergence d'utilisations règlementaires en France. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, *Volume 9*, 37–60.

O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Grphics, and Image Processing*, *28*, 323-344.

Pons, F., Delgado, J.-L., Guero, P., & Berthier, E. (2010). EXZECO : A GIS and DEM based method for pre-determination of flood risk related to direct runoff and flash floods. *9th International Conference on Hydroinformatics, Tianjin, CHINA*, *25*.

Méthode de cartographie de l'aléa inondation par ruissellement : Application du modèle WaterSed sur le bassin de la Lézarde (France) (Landemaine *et al.*)

Méthode de cartographie de l'aléa inondation par ruissellement : Application du modèle WaterSed sur le bassin de la Lézarde (France).

Valentin LANDEMAINE[1], Olivier CERDAN[1], Thomas GRANGEON[1], Rosalie VANDROMME[1], Edouard PATAULT[2], Jérôme LEDUN[3], Arnaud SOULIGNAC[4], Matthieu FOURNIER[2], Jean-François OUVRY[3], Benoit LAIGNEL[4]

[1]BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP6009, F-45060 Orléans Cedex 2, France

[2]Normandie UNIV, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C, FED-SCALE, Rouen, France

[3]AREAS, 2 avenue Foch, F-76460 Saint-Valéry-en-Caux, France

[4]BRGM, 1039 rue de Pinville, F-34000 Montpellier, France

Contrairement aux inondations par débordement de cours d'eau, contraintes spatialement aux limites morphologiques de la plaine d'inondation, la cartographie des inondations par ruissellement reste complexe à réaliser. Le ruissellement est un écoulement temporaire diffus ou concentré, observable sur l'ensemble du bassin versant.
Dès lors, la cartographie de l'aléa inondation par ruissellement implique l'emploi d'outils de modélisation, simulant le phénomène de manière distribuée sur l'ensemble du bassin versant. Par ailleurs, l'intérêt de ces outils est également de pouvoir tester des scénarios d'aménagement du territoire, dans l'optique de guider les gestionnaires dans leur politique de prévention et de gestion du risque.
Dans cette étude, l'aléa inondation est étudié sur le bassin de la Lézarde (Haute-Normandie, 206 km²) pour différents scénarios d'aménagement à l'aide du modèle WaterSed. Le modèle a été calibré et validé sur des crues historiques, puis appliqué à quatre scénarios d'aménagement du territoire: (1) aménagement d'hydraulique douce actuel, (2) aménagement d'hydraulique douce actuel et futur, (3) retournement de 33% des prairies et (4) amélioration des pratiques culturales sur 50% des parcelles agricoles actuelles. Les résultats montrent que les leviers d'action les plus efficaces pour réduire l'aléa ruissellement relèvent des systèmes de cultures, où la modification des pratiques culturales permet de réduire le ruissellement à la source et ainsi limitée l'extension des inondations à l'aval.

Mots-clefs : ruissellement, inondation, WaterSed, cartographie.

Overland flow hazard mapping: Application of WaterSed model on the Lézarde catchment (France).

Overland flow mapping is a challenging objective. While river flooding is contained within the river valley, runoff is a diffuse or concentrated temporary flow visible over the entire watershed.
Runoff mapping can be achieved using distributed numerical models. In addition, models enable the study of different use planning scenarios. Hence, they proved to be helpful tools for land managers, especially for designing prevention and risk management plans.
This communication presents runoff hazard mapping using the WaterSed model. It was performed on the Lézarde basin (Haute-Normandie, 206 km²). The model was calibrated and validated on historic floods, and different development scenarios were studied: (1) current fascines, (2) future fascines, (3) ploughing up of 33% meadowland and (4) improvement of farming practices on 50% of current agricultural plots. The results confirm that the most effective levers for reducing the hazard lie in the cropping systems, where the modification of cropping practices makes it possible to reduce runoff and thus limits the extent of flooding downstream.

Key words: runoff, flood, WaterSed, mapping.

INTRODUCTION

Le coût des dommages engendrés par les inondations par ruissellement est très important sur les territoires exposés : 235 M€ en Haute-Normandie entre 1998 et 2016 (Patault et al., 2019), ou encore 74 millions d'euros en Alsace entre 1984 et 2006 (Cerdan et al., 2009). Cette situation risque de se dégrader à l'horizon 2050 si l'on suit les tendances actuelles en termes de changement climatique (CCR, 2018), d'imperméabilisation des sols, et de diminution des surfaces en herbe. Par conséquent, il est indispensable que les politiques publiques puissent disposer d'outils de prévision, afin de cibler les espaces à risques, préconiser des programmes de mesures adaptés, et garantir la protection des enjeux environnementaux, sociétaux et économiques.

Contrairement aux inondations par débordement de cours d'eau, contraintes spatialement aux limites morphologiques de la plaine d'inondation, la cartographie des inondations par ruissellement reste complexe à réaliser. Le ruissellement est un écoulement temporaire diffus ou concentré, observable sur l'ensemble du bassin versant.

Dès lors, la cartographie de l'aléa inondation par ruissellement implique l'emploi d'outils de modélisation, simulant le phénomène de manière distribuée sur l'ensemble du bassin versant. La présente communication a pour objectif de démontrer le potentiel du modèle WaterSed [Landemaine, 2016] pour répondre à ce besoin. Un cas d'étude est présenté sur le bassin de la Lézarde (206 km²). Sur ce bassin, la cartographie de l'aléa a été effectuée pour quatre scénarios et pour trois pluies de projet dans le but d'alimenter une analyse coût-bénéfice du programme d'actions présenté dans ce colloque par [Patault et al., 2020].

MATERIELS ET METHODES

Le bassin versant de la Lézarde est localisé en Seine-Maritime (76), à l'ouest du Pays de Caux. Le cours d'eau draine une superficie de 206 km² et se jette en rive droite de la Seine. L'aval du bassin versant, fortement urbanisé avec la ville du Havre, contraste avec l'amont, dédié à la grande culture (Figure 1).

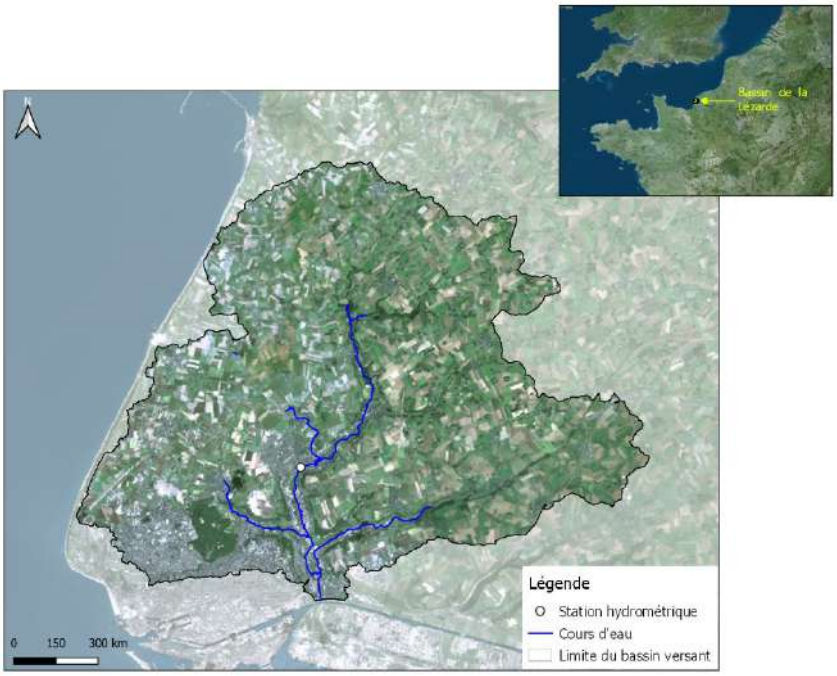


Figure 1 : Localisation du bassin de la Lézarde.

Le modèle WaterSed est un modèle non-dynamique distribué simulant le ruissellement et l'érosion des sols depuis l'échelle de la parcelle à celle du bassin versant pour un évènement de pluie donné. Le modèle calcule des bilans intégrés à l'échelle de l'évènement pluvieux (volume de ruissellement, masse de terre érodée, hauteur de pluie nette, hauteur de pluie infiltrée, etc.). Cet outil permet notamment d'évaluer l'impact de mesures préventives et curatives (aménagements d'hydraulique douce, mares, etc.) ou encore de prévoir les conséquences de scénarios futurs d'occupation des sols et de changements climatiques. Les étapes de mise en œuvre du modèle pour répondre aux objectifs de cette étude ont été les suivantes :

- ✓ Correction du Modèle Numérique de Terrain selon les axes de ruissellement anthropiques et les ouvrages existants,
- ✓ Mise en œuvre du modèle WaterSed ; paramétrisation des unités sol – occupation du sol ; production des données d'entrée du modèle,
- ✓ Calibration du modèle de ruissellement sur un évènement historique,
- ✓ Validation du modèle sur un second évènement historique ;
- ✓ Développement et ajout d'une méthode de cartographie de l'aléa inondation,
- ✓ Application du modèle pour différents scénarios; préparation des données, modélisation, cartographie et analyse des résultats.

Correction du Modèle Numérique de Terrain

La topographie du bassin versant de la Lézarde est issue du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de l'IGN de résolution 5 m (RGE ALTI 1m rééchantilloné à 5m). Ce MNT présente toutefois des artefacts (cuvettes et pics), non visibles sur le terrain et susceptibles de bloquer l'écoulement des eaux lors de l'étape de modélisation. Un travail de correction des altitudes est donc réalisé sur ce MNT « brut » afin de (1) garantir un gradient de pente continu depuis la ligne de partage des eaux jusqu'aux axes de ruissellement et (2) reproduire les écoulements selon les axes de ruissellement anthropiques (fossés, routes, etc.). L'ensemble des axes de ruissellement anthropique a donc été digitalisé (253 km d'axes de ruissellement) et le MNT a été « creusé » selon ces axes. Les ouvrages de gestion des eaux de ruissellement (barrages, mares, bassins, etc.) ont également été inventoriés, sur la base des données de la BD CASTOR[1] et de Le Havre Métropole. Le nombre d'ouvrages s'élèvent à 247 pour une capacité de stockage totale de 1 477 000 m^3 (Figure 2). La cartographie des axes de ruissellement a été contrainte de façon à garantir une interconnexion de tous les ouvrages. Les aménagements d'hydraulique douce existants ont également été recensés avec 57 fascines, 46 haies et 1 aménagement de bétoire.

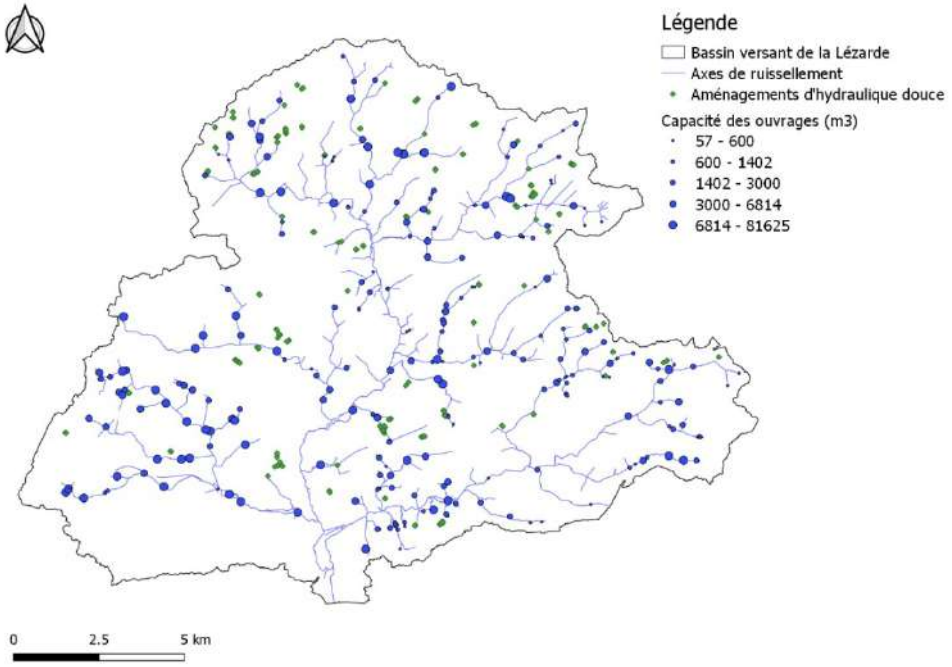


Figure 2 : Axes de ruissellement, ouvrages de gestion des eaux de ruissellement et aménagements d'hydraulique douce sur le bassin de la Lézarde.

[1] BD CASTOR : http://bdcastor.fr/

Sol et occupation des sols

Une cartographie de l'occupation des sols 2016 a été construite pour les besoins de l'étude, basée sur la cartographie de l'Observatoire des Sols à l'échelle Communale (OSCOM) de 2016 et le Registre Parcellaire Graphique (RPG) de 2016. La combinaison des deux cartographies permet d'aboutir à une nomenclature en 14 classes, détaillant notamment la saisonnalité des cultures.

La cartographie des sols a été obtenue auprès du Référentiel Pédologique Régional de Haute-Normandie (RRP HN). Cette cartographie représente les Unités Cartographiques de Sol (UCS), ou pédopaysages de l'ex-région Haute-Normandie à une échelle 1/250 000ème. Partant de cette cartographie, la texture dominante de chaque UCS a été extraite. Trois classes de texture de sol sont rencontrées sur le bassin de la Lézarde : limoneuse (LM), limono-sableuse (LMS) et limono-sablo-argileuse (LSA).

Paramétrisation des propriétés hydrodynamiques et érosives

Associé à l'occupation du sol et à l'historique climatique, l'extraction des textures a pour objectif de déduire les caractéristiques hydrodynamiques et sédimentaires de la surface du sol selon des règles de pédo-transfert et des tables de règles expertes dont le principe est illustré sur la Figure 3.

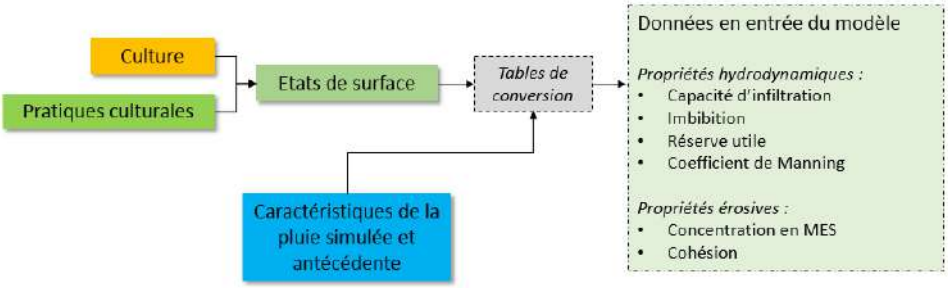


Figure 3 : Principe général de paramétrisation du modèle WaterSed.

Pour une grande partie des sols cultivés à texture limoneuse, limono-argileuse ou limono-sableuse, l'érosion hydrique des sols résulte du ruissellement lié à la diminution de l'infiltrabilité consécutive à la dégradation structurale superficielle sous l'action de la pluie. La conséquence est une évolution au cours du cycle cultural, depuis le semi jusqu'à la récolte, des propriétés hydrodynamiques et érosives de chaque type de culture. A partir de très nombreuses observations réalisées sur les sols cultivés du Nord de la France [Cerdan et al., 2002, 2001; Evrard et al., 2010; Le Bissonnais et al., 2005], trois facteurs majeurs furent identifiés : le couvert végétal, le faciès sédimentaire (état de dégradation structural) et la rugosité (travail du sol). Ils caractérisent l'état de surface du sol à un temps donné.

Un calendrier mensuel des états de surface des sols a été établi pour chaque type de culture et pour chaque type de texture. Ainsi, pour chaque pluie modélisée, les états de surface des sols du mois associé sont extraits. A l'issue de l'étape de paramétrisation, les propriétés hydrodynamiques et érosives de chaque couple « occupation des sols / sol » sont décrites dans le modèle suivant cinq couches raster :

- ✓ Capacité d'infiltration (mm/h) : infiltration de l'eau au sein de la porosité du sol ;
- ✓ Capacité de stockage (mm) : capacité de rétention maximale en eau du sol ;
- ✓ Coefficient de Manning ($m^{-1/3}$ s): coefficient de rugosité ;
- ✓ Erodibilité (-) : coefficient adimensionnel variant entre 0 et 1 et décrivant la sensibilité du sol à l'arrachement en cas de ruissellement concentré ;
- ✓ Concentration en MES (g/l) : concentration en MES dans les eaux de ruissellement suite à l'érosion des sols par « effet splash ».

Ces cinq couches raster sont créés pour chaque mois de l'année. A cela viennent s'ajouter trois couches raster climatiques, variant en fonction des caractéristiques de l'évènement de pluie modélisé :

- ✓ Hauteur de pluie (mm) : lame d'eau précipitée ;
- ✓ Durée effective (min) : durée avec une intensité de pluie supérieure à 0 mm/h ;
- ✓ Imbibition (mm) : perte initiale correspondant à l'humectation du sol et à l'interception de la pluie par la végétation ; dépendant notamment de l'antécédent pluvieux;

Deux couches raster sont communes quel que soit l'évènement de pluie modélisé :

- ✓ Le Modèle Numérique de Terrain (m NGF) : altimétrie discrétisée en maille de 5m et corrigée hydrologiquement (« brulage » du MNT à partir du réseau de circulation du ruissellement décrit sur le terrain) ;
- ✓ La largeur de plein bord des axes de ruissellement (m).

Intégration des aménagements

Les aménagements d'hydrauliques douces et les ouvrages de gestion des eaux pluviales sont caractérisés selon les 5 couches raster suivantes.

- ✓ Identifiant : 1 (fascine), 2 (haie), 3 (bande enherbée) ou 4 (mare, bassin)
- ✓ Largeur (m) : largeur de l'aménagement (hors bassin)
- ✓ Infiltration (mm/h) : capacité d'infiltration
- ✓ Manning (-) : coefficient de Manning
- ✓ Volume (m^3) : volume de stockage (seulement pour les bassins, digues)

Calibration / Validation

L'étape de calibration consiste à identifier les valeurs des paramètres des modules hydrologique et sédimentaire. La calibration a été réalisée sur une crue historique, mesurée au droit d'une station hydrométrique de Montivilliers (Figure 1) : la crue du 21 au 24 janvier 2018, provoquée par une pluie de 36 mm tombée sur trois jours entre le 20 et le 22 janvier (moyenne des postes Météo-France de Octeville et de Criquetot l'Esneval). L'exploitation des mesures de débit a permis de caractériser la crue en terme de volume de ruissellement et de débit de pointe. Ces deux variables ont alors été utilisée pour calibrer le modèle. Différents jeux de paramètres ont testé et seul celui qui minimise l'erreur entre les valeurs observées et les valeurs prédites (de volume de ruissellement et de débit de pointe) par le modèle est retenu.

La robustesse des paramètres calibrés a été testée sur une crue de validation : la crue du 1er juin 2003. Cet évènement historique, de période de retour estimée à 100 ans, a été engendrée par un violent orage avec 87 mm tombé en 5 heures.

Cartographie de l'aléa inondation

Pour une pluie donnée, une cartographie de la hauteur d'eau, mais aussi du débit de pointe et de la vitesse de l'écoulement est simulée. Cependant, en raison d'une conception volontairement simplifiée des processus, les écoulements prédits par le modèle sont simulés dans le sens de la plus grande pente. Autrement dit, le modèle ne permet pas de simuler « l'étalement » d'une crue dans le fond d'un talweg.

Un post-traitement a donc été mis en place pour cartographier les hauteurs d'eau en cas de débordement, en réalisant un couplage entre les cartographies du débit de pointe, des vitesses d'écoulement et la géométrie des talwegs (Figure 4). La géométrie des talwegs a été déterminée par des profils en travers, tracés de manière automatique tous les 5 m et centrés sur le réseau d'axe de ruissellement. La longueur de chaque profil en travers est de 150 m (longueur optimale retenue après plusieurs essais). Au total, 42 589 profils en travers ont été tracés sur le réseau. Pour chaque profil, le débit de pointe et la vitesse des écoulements simulés ont été extraits.

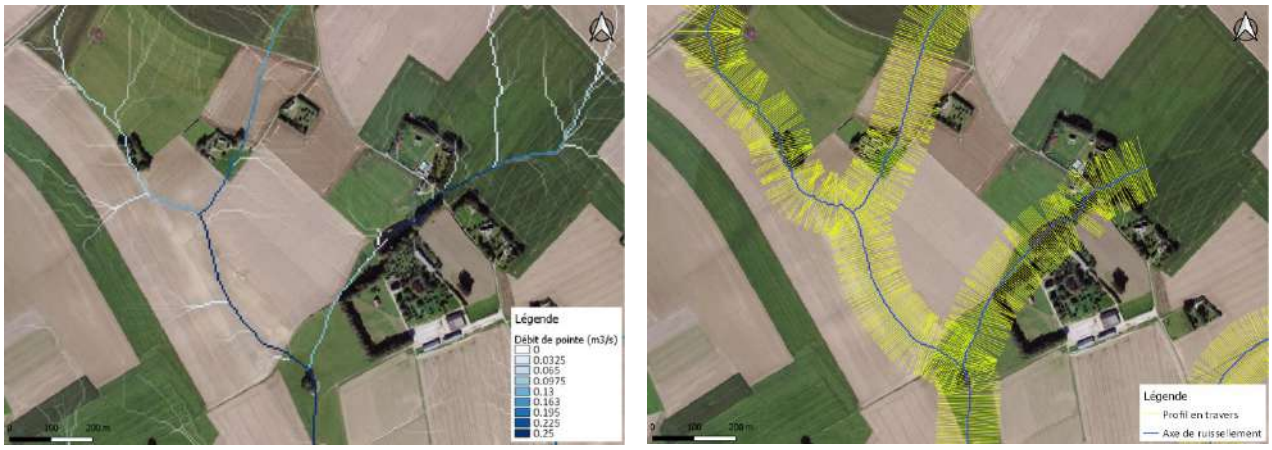


Figure 4 : (Gauche) Exemple de cartographie des débits de pointe en sortie du modèle WaterSed ; (Droite) Réalisation de profils en travers pour extraire la géométrie des talwegs

Une relation section mouillée – hauteur a été construite en chaque point du profil (Figure 25). La hauteur d'un point correspond à la différence d'altitude entre l'altitude minimum du profil (centre du profil) et l'altitude du point considéré.

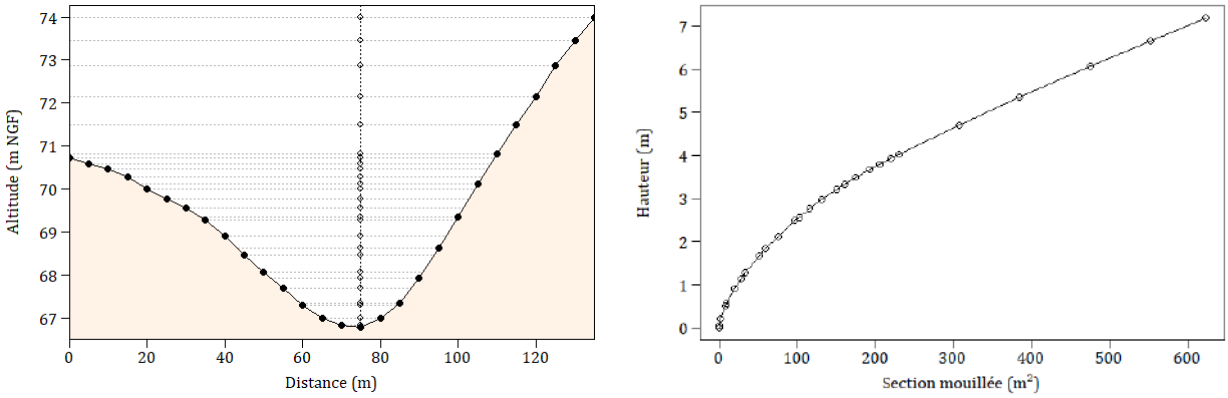


Figure 5 : (Gauche) Méthode de calcul de la section mouillée pour chaque point du profil ; (Droite) Exemple de relation section mouillée – hauteur.

Une fois cette relation établie, la hauteur d'eau sur le profil est déterminée connaissant la section mouillée, calculée à partir du débit de pointe et de la vitesse d'écoulement. L'altitude de la ligne d'eau est interpolée entre les profils. La cartographie des hauteurs d'eau est finalement obtenue en réalisant une différence entre la cartographie de la côte d'eau et la cartographie de l'altitude du sol (Figure 6).

Figure 6 : Exemple de cartographie des hauteurs d'eau.

Application à différents scénarios

Après avoir calibré et validé le modèle, cinq scénarios (Tableau 1) ont été étudiés et soumis à 3 pluies de projet (Tableau 2), dans l'optique d'alimenter l'analyse cout-bénéfice détaillée par [Patault et al., 2020].

Tableau 1 : Caractéristiques des cinq scénarios étudiés

Scénario	Description
Ref1	Scénario de référence avec ouvrage hydraulique structurante, sans hydraulique douce
Actu	Scénario avec ouvrages structurants et aménagements d'hydraulique douce actuels (0,5 aménagements/km²) mis en œuvre entre 2000 et 2018 puis maintenus à l'identique jusqu'en 2050
Amb	Scénario avec aménagements actuels mis en œuvre entre 2000 et 2018 puis développement du programme aménagement ambitieux d'hydraulique douce (5,5 aménagements/km² + 182 ha zones enherbées) entre 2018 et 2041 puis statut quo jusqu'en 2050
Herb	Scénario avec aménagements actuels mis en œuvre entre 2000 et 2018 + retournement d'un tiers des prairies en surfaces cultivées entre 2018 et 2050
Agr	Scénario avec aménagements actuels mis en œuvre entre 2000 et 2018 + amélioration des pratiques culturales (techniques d'agriculture de conservation) basées sur la réduction du travail du sol et maintien de la couverture végétale. Ce postulat se traduit par une augmentation de 15% de la capacité d'infiltration (hypothèse basse)

Tableau 2 : Caractéristiques des trois pluies de projet.

Période de retour (années)	Cumul (mm)	Durée (min)	Intensité maximale à 6 min (mm/h)	Antécédent pluvieux à 48h
10	51,9	179	45	0
50	74,7	258	45	0
100	87	300	45	0

RESULTATS ET DISCUSSION

Calibration / validation du modèle

Les caractéristiques des crues de janvier 2018 (calibration) et de juin 2003 (validation) sont détaillées sur le Tableau 13, ainsi que les volumes de ruissellement et les débits de pointe prédits par le modèle pour chacune des deux crues.

Tableau 3 : Caractéristiques de la crue de janvier 2018 et de juin 2003 utilisées respectivement pour la calibration et la validation du modèle WaterSed. Le débit de pointe et le volume de ruissellement simulé par le modèle pour ces deux crues sont également indiqués.

	Crue Janvier 2018		**Crue Juin 2003**	
Cumul total (mm)	36		87	
Durée effective (min)	197		300	
Antécédent pluvieux (mm)	> 40		0	
	Observé	**Prédit**	**Observé**	**Prédit**
Volume d'écoulement total (m^3)	552 592	-	1 162 080	-
Volume d'écoulement de base (m^3)	358 591	-	330 489	-
Volume de ruissellement (m^3)	**194 001**	**195 712 (+0,9%)**	**831 590**	**561 363 (-32,5%)**
Débit de pointe total (m^3/s)	4,00	-	12,10	-
Débit de pointe de ruissellement (m^3/s)	**2,77**	**2,85 (+3,1%)**	**11,05**	**11,01 (-0,4%)**

Le modèle prédit des débits et volumes satisfaisants pour les deux évènements à forts cumuls pluviométriques, le premier intervenant sur un sol humide et le second sur un sol sec.

Impact des différents scénarios

L'impact de chaque scénario a été évalué au droit de la station hydrométrique de Montivilliers, en comparant le débit de pointe et le volume de ruissellement de chaque scénario par rapport au scénario de référence (« ref1 »). Seuls les résultats sur les débits de pointe (Figure 7) et la pluie de période de retour 50 ans (P50ans) sont présentés dans le cadre de cet article. La superficie inondée par scénario a également été déterminée sur l'ensemble du bassin de la Lézarde (Figure 8).

Le scénario « actu » considère l'ensemble des aménagements d'hydraulique douce recensés en 2017 sur le bassin de la Lézarde. La comparaison des débits de pointe entre ce scénario et la référence indique que ces aménagements ont très peu d'impact : 5,6 m^3/s pour « ref1 » et 5,5 m^3/s pour « actu » pour P50ans. La superficie inondée est identique dans les deux scénarios (640 ha).

Ces aménagements ont vocation à « freiner » le ruissellement, empêcher l'apparition de formes d'érosion concentrée et favoriser la sédimentation des agrégats de sol. Ils sont complémentaires aux ouvrages structurants, dont le rôle est de tamponner les volumes de ruissellement et écrêter le débit de pointe. Bien que la paramétrisation de la capacité d'infiltration de ces aménagements soit forte (200 mm/h pour les fascines, 400 mm/h pour les haies), leur emprise totale au sol est très faible au regard de la superficie du bassin versant. Enfin, dans ce scénario, la densité d'aménagement est très faible : 104 aménagements sur 210 km² soit 0,5 aménagements au km².

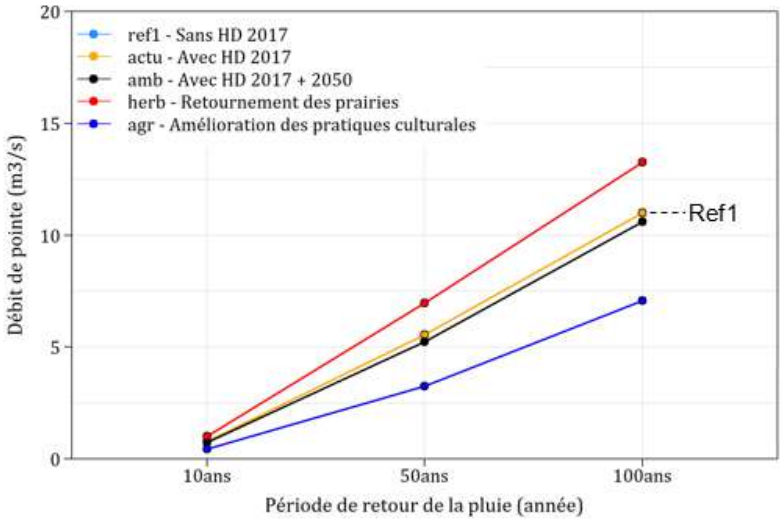


Figure 7 : Débit de pointe à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet..

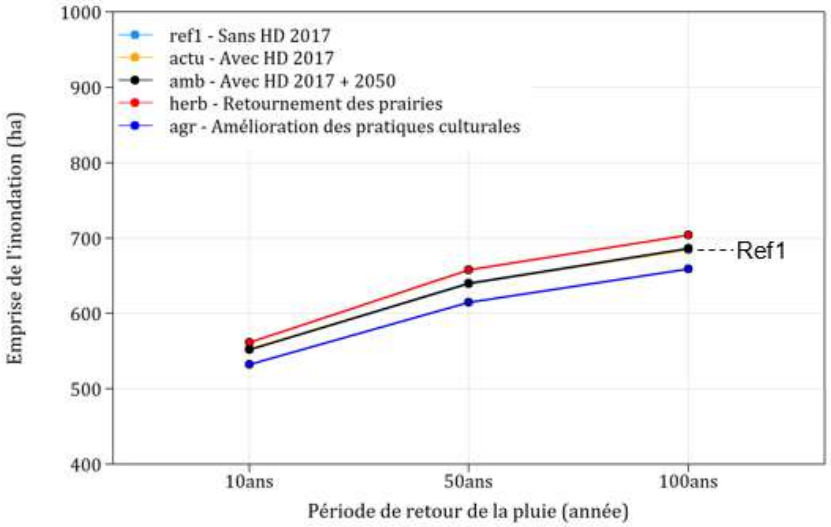


Figure 8 : Emprise de l'inondation pour chaque scénario et pour chaque pluie de projet sur le bassin de la Lézarde.

Dans le scénario « amb », la densité d'aménagement est multipliée par 10 (passe de 0,5 à 5,5 aménagements/km²) et 182 ha de terres agricoles sont à nouveau enherbées. L'impact sur le débit de pointe est plus important, avec une réduction du débit de pointe de 6% pour P50ans. L'emprise de l'inondation reste cependant identique par rapport à « ref1 », avec 640 ha inondé.

Le scénario « herb » traduit un retournement de 31% (1 064 ha) des prairies actuelles à l'horizon 2050. Les modélisations indiquent une augmentation de 25% du débit de pointe pour P50ans et une augmentation des surfaces inondées de +3%.

La mise en place de pratiques culturales « améliorées » dans le scénario « agr » s'avère particulièrement efficace, avec une réduction de -42% sur les débits de pointe par rapport à « ref1 » pour P50ans. L'intérêt de mettre en place des mesures agronomiques est de piéger à la source le ruissellement et l'érosion des sols. Les effets sont bénéfiques à toutes les échelles du bassin versant, depuis la parcelle agricole jusqu'à l'exutoire. La conséquence est également une diminution de la surface inondée, avec une réduction de -4%.

Ces augmentations et ces diminutions de surfaces inondées restent toutefois limitées. La cartographie des inondations par ruissellement reste un exercice complexe. En remontant les talwegs, la topographie devient de moins en moins marquée ce qui rend difficile la délimitation de l'emprise d'inondation. Arrivé sur les plateaux, ce n'est plus la morphologie du fond de talweg qui limite l'emprise de l'inondation mais bien des objets anthropiques comme les routes, les fossés, les chemins agricoles, etc. Dès lors, la qualité de prédiction de l'emprise de l'inondation sera grandement dépendante de la qualité des données topographiques utilisées.

Dans cette étude, un MNT LIDAR d'une résolution de 5m a été utilisé pour réaliser ces cartographies. Cette résolution est pertinente pour cartographier les inondations dans les principaux fonds de talweg mais montre ses limites aux extrémités du réseau d'axe de ruissellement, pour les raisons évoquées précédemment. A ce titre, il serait intéressant d'explorer l'influence de la résolution du MNT sur l'emprise de l'inondation par ruissellement.

Une analyse des erreurs de prédiction sur l'emprise de l'inondation aurait été intéressante. La cartographie de l'emprise d'inondation (par drone ou par images satellites) suite à un évènement majeur semble maintenant réalisable pour identifier les limites et les pistes d'amélioration de la méthode de cartographie des inondations par ruissellement. Enfin, le développement d'une version dynamique et 2D du modèle WaterSed fait actuellement partie des orientations de recherche pour encore améliorer la précision des cartographies produites.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'étudier l'aléa inondation par ruissellement selon quatre scénarios d'aménagement sur le bassin versant de la Lézarde : (1) aménagement d'hydraulique douce actuel, (2) aménagement d'hydraulique douce actuel et futur, (3) retournement de 33% des prairies et (4) amélioration des pratiques culturales sur 50% des parcelles agricoles. Le modèle WaterSed a ainsi été utilisé, couplé à une méthode de post-traitement des sorties de modélisation afin de produire une cartographie de hauteur d'eau par scénario. Les résultats confirment que les leviers d'action les plus efficaces pour réduire l'aléa relèvent des systèmes de cultures, où la modification des pratiques culturales permet de réduire le ruissellement à la source et ainsi limitée l'extension des inondations à l'aval. L'amélioration des pratiques sur 50% des parcelles actuelles permet ainsi de réduire de 42% les débits de pointe et de 4% la surface inondée. A l'inverse, le retournement des prairies provoquerait une augmentation moyenne de +25% des débits de pointe et de +3% des surfaces inondées. Comme prévu, les aménagements d'hydraulique douce (haies, fascines, etc.) ont très peu d'impact sur l'aléa inondation. Ces aménagements ont surtout vocation à protéger les infrastructures et le bâti des dépôts de boues, ou encore protéger la ressource en eau souterraine (limiter le transfert direct des sédiments dans le karst via les bétoires). Les contrastes de surfaces inondées sont faibles malgré l'utilisation d'un modèle numérique de terrain à haute résolution (5 m). Cependant, la largeur réelle du ruissellement est souvent en deçà de la résolution utilisée. Des contrastes plus marqués pourraient être observés avec une résolution métrique, notamment aux extrémités du réseau d'axe de ruissellement. A ce titre, des recherches sont menées pour étudier l'influence de la résolution du modèle numérique de terrain sur l'emprise de l'inondation déterminée et améliorer la méthodologie développée dans cette étude. Pour davantage de détail, le lecteur est invité à consulter le rapport d'étude associé [Landemaine et al., 2020].

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet EVAPORE « EVAluation de l'efficacité des POlitiques publiques pour les actions visant à REduire les impacts du ruissellement ». Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement l'Université de Rouen-Normandie, l'AREAS, le BRGM, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, les départements de l'Eure et de la Seine-Maritime qui ont co-financé ce projet.

REFERENCES

Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Saby, N., 2002. Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. *Hydrol. Process*. 3226, 3215–3226. https://doi.org/10.1002/hyp.1098

Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A., Le Bissonnais, Y., 2001. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. *Catena* 46, 189–205. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00166-7

Cerdan, O., Auzet, AV., Bouzit, M., Van Dijk, P., Guyonnet, J., Moquet, JS., Cruz-Mermy, D., Heitz, C. 2009. Enjeux économiques liés à l'aléa d'érosion des sols : étude pilote de faisabilité d'une évaluation des coûts dans une région française (Alsace). Rapport BRGM/RP56932. 62p.

CCR. 2018.Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à l'horizon 2050. 32 p.

Evrard, O., Nord, G., Cerdan, O., Souchère, V., Le Bissonnais, Y., Bonté, P., 2010. Modelling the impact of land use change and rainfall seasonality on sediment export from an agricultural catchment of the northwestern European loess belt. *Agric. Ecosyst. Environ*. 138, 83–94. https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.04.003

Landemaine, V., 2016. Érosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. Thèse de doctorat. Université de Rouen-Normandie.

Landemaine, V., 2020. Analyse coût-bénéfice des actions de lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols sur le bassin de la Lézarde. Rapport final. BRGM/RP-69650-FR, 142 p.

Le Bissonnais, Y., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchère, V., Martin, P., 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena* 62, 111–124. https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.05.001

Patault, E., Soulignac, A., Landemaine, V., Ledun, J., Allard, E., Fournier, M., Ouvry, J.-F., Cerdan, O., Laignel, B., (2020). Analyse coût-bénéfice du programme d'actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie : évaluation des actions passées et projections futures sur le bassin versant de la Lézarde. Colloque Risque ruissellement – Diagnostique et solution. SHF ANEB 2020.

Patault, E., Ledun, J., Landemaine, V., Soulignac, A., Richet, J-B., Ramaekers, F., Cikowski, N., Cabaz, B., Fournier, M., Ouvry, J-F., Rinaudo, J-D., Cerdan, O., Laignel, B. 2019. Coupled modeling of hydro-sedimentary transfer processes and socio-economic dynamics evaluating public policies to control runoff and erosion: case study in Normandy (France). AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA. https://doi.org/10.1002/essoar.10501408.1

Potentiel de l'imagerie satellitaire à très haute résolution pour évaluer et cartographier les dommages causés par le ruissellement intense (Breil *et al.*)

Potentiel de l'imagerie satellitaire à très haute résolution pour évaluer et cartographier les dommages causés par le ruissellement intense

Pascal BREIL[1], Axelle FAVRO[1], Laure ROUPIOZ[2], Xavier BRIOTTET[2], Gwendoline BLANCHET[3], Jean-Marc DELVIT[3]

[1] INRAE, UR RIVERLY, 5 rue de la Doua 69625, France, nom.prenom@inrae.fr
[2] ONERA, 2 Ave. E Belin, 31000 Toulouse, France, nom.prenom@onera.fr
[3] CNES, eo-lab, 18 Av. E Belin, 31400 Toulouse, France, niom.prenom@cnes.fr

Les images satellites très haute résolution et haute fréquence couvrent des surfaces de 400 km2. Le potentiel de ces images pour évaluer et cartographier les dommages causés par le ruissellement intense est jusqu'à présent peu étudié. L'idée est donc d'établir une méthode pour détecter, de la manière la plus exhaustive possible ces dommages à partir de données satellitaires THR acquises le plus près possible, avant et après un événement de pluie intense. Pour ce faire, nous avons utilisé les images Pléiades (0.7 m) et Sentinel-2 (10 m) acquises au-dessus de la région de l'Aude (France) qui a été fortement touchée par des pluies intenses en octobre 2018.

Plusieurs indices et filtres spectraux ont été appliqués sur un jeu d'images sélectionnées. Notre intérêt a porté sur les zones agricoles qui ont fait l'objet de 1119 demandes d'indemnisation en calamités agricoles pour l'événement d'octobre 2018. Ce travail exploratoire effectué en 2019 a révélé que certains types de dommages agricoles étaient bien détectés alors que d'autres, même s'ils étaient clairement visibles sur les images Pléiades, n'étaient pas correctement détectés avec les indices et filtres sélectionnés.

L'information spectrale seule ne suffit pas pour détecter les dommages causés par un ruissellement intense. Ces travaux préliminaires ouvrent la voie à d'autres basés sur le développement de nouveaux indices et filtres ainsi que sur l'intelligence artificielle. Ces pistes seront poursuivies dans un travail de thèse à partir de 2020, co-piloté par le CNES, l'ONERA et l'INRAE.

Mots-clefs : télédétection, érosion, dépôt.

Potential of very high-resolution satellite imagery to assess and map damage caused by intense runoff

The very high-resolution, high-frequency satellite images cover an area of 400 km2. The potential of these images to assess and map damage caused by intense runoff has so far been little studied. The idea is therefore to establish a method for detecting this damage as exhaustively as possible from THR satellite data acquired as close as possible, before and after an intense rainfall event. To do so, we used Pléiades (0.7 m) and Sentinel-2 (10 m) images acquired over the Aude region (France) which was heavily affected by intense rainfall in October 2018.

Several indices and spectral filters were applied to a set of selected images. Our interest focused on the agricultural areas that were the subject of 1119 agricultural disaster claims for the October 2018 event. This exploratory work carried out in 2019 revealed that certain types of agricultural damage were well detected while others, although clearly visible on the Pleiades images, were not correctly detected with the selected indices and filters.

Spectral information alone is not sufficient to detect damage caused by intense runoff. This preliminary work paves the way for further work based on the development of new clues and filters as well as artificial intelligence. These avenues will be pursued in a thesis work from 2020, co-piloted by CNES, ONERA and INRAE.

Keywords: remote sensing, erosion, deposition.

INTRODUCTION

De nos jours, le ruissellement intense représente un problème environnemental et sociétal majeur. Depuis 2010, l'IRSTEA développe un modèle prédictif pour cartographier les risques liés au ruissellement intense (érosion, coulées de boue, dépôts, etc.) en utilisant la méthode IRIP ©. L'évaluation de ces cartes est actuellement réalisée sur la base d'observations de terrain telles que les déclarations de calamités agricoles, les déclarations individuelles de catastrophes naturelles, les bases de données d'incidents sur les réseaux linéaires (DDTM, SNCF). Cependant, ces données ou déclarations ne fournissent qu'une vue partielle des zones qui ont réellement été touchées car elles concernent pour l'essentiel des zones à enjeux économiques (dommages aux infrastructures, aux biens ou aux personnes). L'évaluation des cartes de prédiction du ruissellement générées par le modèle IRIP, ou tout autre modèle de ruissellement intense, est donc biaisée par un manque de

données sur les zones sans enjeux, cela sans compter que le système déclaratif n'est pas utilisée de manière systématique pour de multiples raisons.

La montée en puissance de la donnée satellite de ces dernières années à très haute résolution (THR) et haute fréquence (HF) met à disposition de la communauté scientifique de nouveaux moyens d'investigations sur l'analyse des phénomènes au sol. Des centres d'expertise scientifique (CES) se sont développés à cet effet autour de la plateforme THEIA[1] qui vise à produire des applications dédiées avec les chercheurs pour ensuite les mettre en production. Les raisons en sont que les volumes d'information et les prétraitements requis des images font appel à des moyens et compétences spécifiques. Il est donc nécessaire de s'associer à des « professionnels » pour utiliser ces nouvelles sources de données.

La problématique du ruissellement intense est abordable du fait des fréquences de passage et finesse de résolution disponibles depuis quelques années seulement. L'utilisation des données satellites Pléiades à haute résolution spatiale (0.5 m) et haute fréquence temporelle (de 1 à quelques jours selon la programmation), couvrant des aires de 20 X 20 km², offre des perspectives intéressantes pour inventorier les conséquences du ruissellement intense après un événement météorologique majeur. Ces données sont d'ailleurs utilisées via des campagnes d'acquisition spécifiques par « l'Emergency Management Service – Mapping de Copernicus »[2] pour délimiter les zones touchées en période de crise durant des catastrophes naturelles, cela en appui aux services de secours.

Mais peu nombreuses sont les études menées sur la détection du ruissellement de surface par la télédétection. Le phénomène de ruissellement étant mal connu et c'est souvent les débordements et crues [Hostache et al., 2007] ou encore l'érosion et les glissements de terrain que l'on cherche à détecter avec ces nouvelles données. Il ressort de l'état de l'art une utilisation majoritaire d'images Landsat pour la détection des aléas issus du ruissellement pluvial. L'apport complémentaire de la haute fréquence temporelle ainsi que d'images aériennes et de données terrain représente un atout non négligeable. La réalisation de classification pour caractériser l'occupation du sol semble également pertinente. L'utilisation d'indices spectraux tels que : NDVI, NDWI, IB, RIBS, PIDS, SAVI donne des résultats intéressants mais sur des cas d'étude souvent limités dans l'espace, liés à un « calage local » et donc sans réelle perspective de généralisation. Les auteurs d'une revue bibliographique récente sur l'application de la télédétection pour suivre l'érosion des sols [Sepura et al., 2018] indiquent que l'utilisation de l'information à haute résolution spectrale est limitée en raison de son coût d'acquisition. Les processus de détection des dépôts et coulées de boue sont également peu mentionnés dans la littérature. C'est pourtant une manifestation des aléas liés au ruissellement intense.

Dans ce travail nous émettons l'hypothèse que les données satellites THR-HF-HS de nouvelle génération sont à même de déceler les désordres produits aux sols sur les espaces cultivés.

Pour évaluer cette hypothèse, différents indices et filtres de la télédétection sont confrontés à des « vérités terrain » qui sont des parcelles endommagées ayant fait l'objet de déclaration en calamités agricoles. Cela implique de disposer sur un territoire des images satellites au plus près, avant et après, un événement de pluie majeur ainsi que des données de déclaration.

METHODE ET DONNEES

Le 15 octobre 2018, le département de l'Aude a été touché par des crues particulièrement intenses sur une courte durée. Selon Météo-France, plus de 300 mm de pluie ont été enregistrés près de Carcassonne, dont environ 200 mm en 6h [Lebouc et al., 2019]. Etant donné l'état de saturation des sols, ces pluies ont engendré d'importantes crues : à la fois par débordements et par ruissellements intenses. Ce territoire représente donc un bon candidat pour la détection du ruissellement intense, un tel évènement ayant laissé des marques bien visibles sur le paysage. Après la catastrophe d'octobre 2018, 204 communes ont été déclarées sinistrées par les inondations. La chambre de l'agriculture a reçu 1200 appels, 1100 vérifications ont été effectuées et 900 dossiers constitués (source : Boyer Bernard DDTM11 - Unité Investissement et Développement Rural).

Dans un premier temps, une consultation des déclarations de dommage de calamités agricoles (CalamNat) a été réalisée à l'occasion de la rencontre avec quelques membres de la DDTM11. Ce type de déclaration est déposé en cas de pertes de production agricole occasionnée par des évènements météorologiques d'importance exceptionnelle et concerne uniquement les productions et biens non assurables (Ministère chargé de

[1] https://theia.cnes.fr/atdistrib/rocket/#/home
[2] https://www.efas.eu/

l'agriculture, 2019). Elle permet aux exploitants agricoles de déposer des demandes d'indemnisation auprès de fonds de garantie des calamités agricoles (FNGRA : Fonds National de Gestion des Risques en Agriculture) et ainsi de calculer les montants des pertes et d'indemnisation. Pour cela, il leur est demandé de remplir des déclarations dans lesquelles les numéros de parcelles endommagées ainsi que le degré de dégâts (de 1 à 5) sont renseignés, grâce à l'appui d'un expert. Ce degré correspond à une portion de surface impactée avec le degré 1 pour signifier moins de 10% et le degré 5 pour plus de 90% en moyenne. Sont distinguées les vignes et autres cultures qualifiées indistinctement de « fonds » car les vignes ont un poids économique certain au niveau régional. Les pertes en fonds sont relatives à des mouvements de sol en érosion comme en dépôt. Pour les dommages non évalués en degrés (chemins, talus, fossés, digues, clôtures, murets, …) des linéaires sont mentionnés le plus souvent. Nous avons alors, dans notre étude, attribué forfaitairement un degré « 0 » qui signifie la présence d'un dommage NON évalué à ne pas confondre avec l'absence de dommage.

En tout 1359 parcelles ont fait l'objet d'une déclaration de calamités agricoles. Pour l'étude nous en retenons 1119 qui sont situées dans l'emprise de deux images Pleiades. Ce sous ensemble est composé de 907 parcelles avec un degré d'impact qui varie de 1 à 5 pour les fonds et les vignes et de 212 parcelles classées en degré « 0 ».

Les travaux menés sur ce sujet étant exploratoires, ils se sont appuyés sur les images disponibles pour cet évènement, provenant de deux capteurs différents : des images issues de Sentinel-2 (haute résolution spatiale, temporelle et spectrale) et des images issues de Pléiades (très haute résolution spatiale et faible résolution spectrale et temporelle). Ainsi, deux images Pléiades datées du 03/11/2018 et du 22/02/2019, acquises sur le département de l'Aude ont été fournies par le CNES tandis que les images Sentinel-2 (satellite 2A – niveau de traitement 2A[3] – tuiles : T31TDH et T31TDJ) ont été téléchargées sur la plateforme Théia du CNES (accès libre et gratuit), puis décompressées par l'intermédiaire du logiciel PEPS Downloader. Après quoi, une zone d'étude pour laquelle les données des incidents liés au ruissellement intense étaient géoréférencées et datées a été sélectionnée. Pour cela, l'image Pléiades, plus résolue spatialement que les images Sentinel-2, acquise au plus proche de l'évènement (03/11/2019) a été analysée par photo-interprétation dans le but d'identifier un maximum d'aléas sur un périmètre 'test' de 22 km². L'idée était de définir une zone restreinte sur laquelle tester les méthodes avant de les appliquer à un territoire plus étendu (2100 km²) afin de limiter les temps de calcul dans un premier temps.

Au total trois aléas ont été identifiés par photo-interprétation (cf. Fig. 1) :

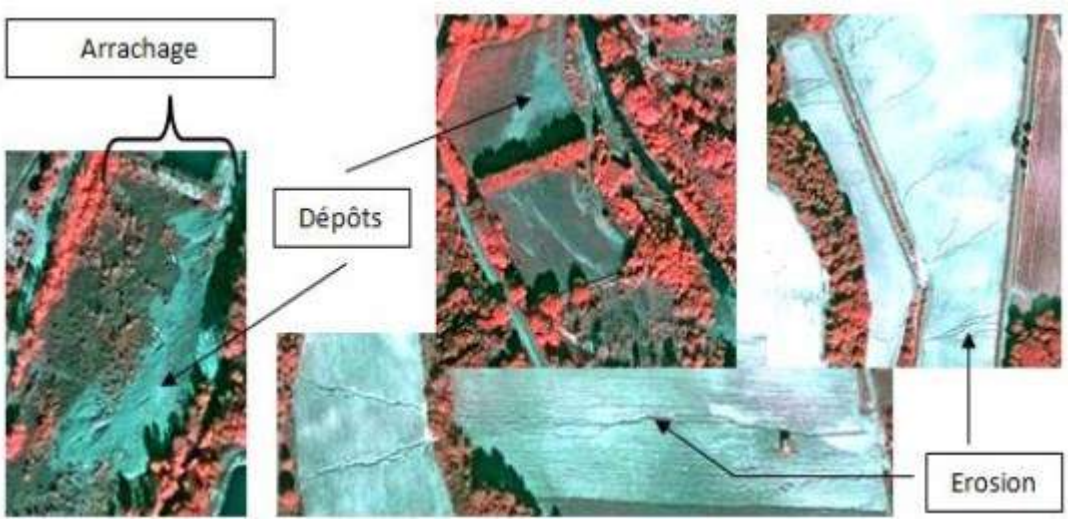


Figure 1: Photographie d'aléas identifiés par photo-interprétation à partir d'images Pléiades en « fausses couleurs » (Composition colorée R : bande proche infrarouge, G : bande rouge, B : bande verte). Permet de mettre en évidence la végétation qui apparaît en rouge sur l'image.

[3] Les images de niveau 2A sont orthorectifiées, exprimées en réflectance de surface et sont accompagnées d'un masque de nuage *[Hagolle, 2014].*

- « Érosion » : grandes rigoles (ravines) creusant le sol de surface (Norman et al., 2008-2012), principalement visible sur parcelles agricoles en sol nu;
- « Dépôts » : de boue ou de sédiments, en aval de zone d'érosion et parfois de plusieurs mètres d'épaisseur (Négrel et Rigollet, 2011), visible sous forme de traînées blanches par photo-interprétation;
- « Arrachage » : zone dépourvue de végétation suite à un arrachage par le courant et les coulées de boue.

TESTS DES INDICES ET DES FILTRES RELEVES DANS LA LITTERATURE

La capacité des différents indices et filtres proposés dans la littérature à détecter chacun des types d'aléas observés sur la zone d'étude pour les données Pléiades et Sentinel-2 acquises au plus proche de l'évènement a été testée. Pour cela, les indices ont été codés en python puis appliqués aux images. Le filtre Sobel a quant à lui été calculé à l'aide de l'application open-source Orfeo Toolbox (OTB). La liste des différents indices et filtres testés dans cette étude est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Présentation des différents indices [Gao, 1996] ; [Deng et al., 2015] ; [OTB-Team, CNES, 2018a, 2018b] ; [Qiu et al., 2017] ; [Hanane, 2012] exploités dans cette étude.

INDICES	INTERPRETATION
NDVI : *Normalized Difference Vegetation Index* -1<NDVI< 1	NDVI < 0 : Eau NDVI [0 ; 0.3] : Sol nu NDVI > 0.3 : Végétation
NDWI : *Normalized Difference Water Index* -1<NDWI< 1	NDWI > 0.,5 : plan d'eau NDWI<0 : végétation sèche ou sol nu NDWI < 0 : végétation verte, bonne couverture végétale
IB : *Indice de brillance*	Bâti + sol = surfaces réfléchissantes Eau+sols très humides = surfaces absorbantes
SAVI : *Soil Adjusted Vegetation Index* -1<SAVI< 1	Plus la valeur est faible, plus la couverture végétale est faible.
PIDS : Product Index for Dark Soil	Valeur faible : sol foncé.
FILTRES	INTERPRETATION
Sobel	Détection des contours d'une image.

Plusieurs images ont été utilisées pour calculer les indices, ceci pour compenser des effets induits par les nuages ou encore des artefacts liés aux chaines de traitement complexes appliquées entre la donnée brute et le calcul de l'indice. Les images Pléiades ont une résolution native de 0.5m et les images Sentinel-2 de 10m. Les premières ne sont pas systématiquement bancarisée, c.a.d qu'elles sont écrasées par un passage suivant du satellite au même endroit. Les secondes bénéficient d'une fréquence de stockage au moins mensuelle.

Tableau 2 : Dates et natures des images utilisées pour le calcul des métriques de télédétection

Images Sentinel-2							
Dates des images satellites	27/07/2018	16/08/2018	25/09/2018	05/10/2018	25/10/2018	24/11/2018	03/01/2019
Périodes pour calcul des moyennes	avant	avant	avant	avant	après	après	après
Images Pléiades							
Dates des images satellites	03/11/2018	01/02/2019					
Périodes pour calcul des moyennes	après	après					

STATISTIQUES ZONALES

Des statistiques de zones ont été calculées sur toutes les parcelles déclarées sinistrées et exploitables sur la tuile satellite d'intérêt. La création au préalable d'un « masque nuage » pour chaque image a été nécessaire

afin de ne retenir que les parcelles sans nuage. Pour chacune des parcelles considérées, la moyenne, la médiane, l'écart-type, la différence de valeurs min. et max. ainsi que la variance ont été calculés à partir des valeurs de chacun des pixels contenus dans chacune des parcelles. Ensuite, pour chaque statistique, la moyenne de la différence relative (cf. Éq. 1, aussi appelée taux d'évolution entre deux états) obtenue sur l'ensemble des parcelles correspondant à un même aléa a été calculée afin de tester la capacité de chacun des indices et filtres à détecter cet aléa. Finalement, un autre indicateur appelé « Pente » entre les valeurs des images avant et après évènement a été déterminé afin de mettre en évidence un possible changement induit par la présence d'un aléa (cf. Éq. 2). La normalisation de cet indicateur par la somme des valeurs d'état dans une même parcelle, avant et après l'événement perturbateur (pluies d'octobre 2018) permet de réduire le « bruit ». C'est le principe utilisé pour les indices NDVI et NDWI par exemple.

$$\text{Différence relative} = \frac{\text{Ap} - \text{Av}}{Av} \tag{1}$$

$$« \, Pente \, » \; = \frac{(Av - Ap)}{(Av + Ap)} \tag{2}$$

Ces 2 métriques ont été appliquées à 3 statistiques (moyenne, écart-type et différence entre minimum et maximum) des indices calculés dans les parcelles agricoles. Le tableau 3 résume les combinaisons qui ont été évaluées.

Tableau 3 : Métriques appliquées aux différents indices et filtres évalués

Indices de télédétection (voir def. Tab. 2)	NDVI	NDWI	IB	SAVI	PID	SOBEL
Variables statistiques calculées par parcelle						
moyenne	x	x	x	x	x	x
écart-type	x	x	x	x	x	x
diff Max-Min	x	x				x
Métriques calculées entre dates						
Pente (entre 25/10/2018 & 05/10/2018)	x	x	x	x	x	x
Diff. Relative (entre 25/10/2018 & 05/10/2018)	x	x	x	x	x	x
Pente (entre dates avant et dates après)	x	x	x	x	x	x
Diff. relative (entre dates avant et dates après)	x	x	x	x	x	x

JEU DE DONNEES TEST

Un jeu de données de 130 parcelles agricoles a été constitué pour accéder à des tendances statistiques. Il est composé de parcelles distribuées comme indiqué dans le Tableau 2. Les 32 parcelles avec aucun aléa ont été sélectionnée après croisement de leur occupation du sol (culture et ou vigne) et de l'absence de déclaration en calamités agricoles. Il peut y avoir plusieurs types d'aléas dans une même parcelle. Il ainsi été retenu 12 parcelles avec aléas combinés dépôt et arrachage. Le tableau 2 indique aussi le nombre de parcelles par degré, cette notion étant présente dans les déclarations de calamités agricoles pour exprimer le pourcentage de surface impacté dans une parcelle (de < à 10 % à 100%). Le « deg00 » correspond aux parcelles non impactées sélectionnées par nos soins.

Tableau 2 : Types d'aléas et degré d'impact en calamités agricoles des parcelles sélectionnées

Type aléa	aucun aléa	érosion	dépôt	arrachage	dépôt&arrachage		Total
	32	36	28	22	12		130
Degré dommage	deg00	deg1	deg2	deg3	deg4	deg5	Total
	32	0	13	18	31	36	130

Un test non-paramétrique de comparaison (test de Wilcoxon Mann & Withney) est utilisé pour tenir compte des différences d'effectifs et de formes des distributions des métriques calculées pour chacun des indices

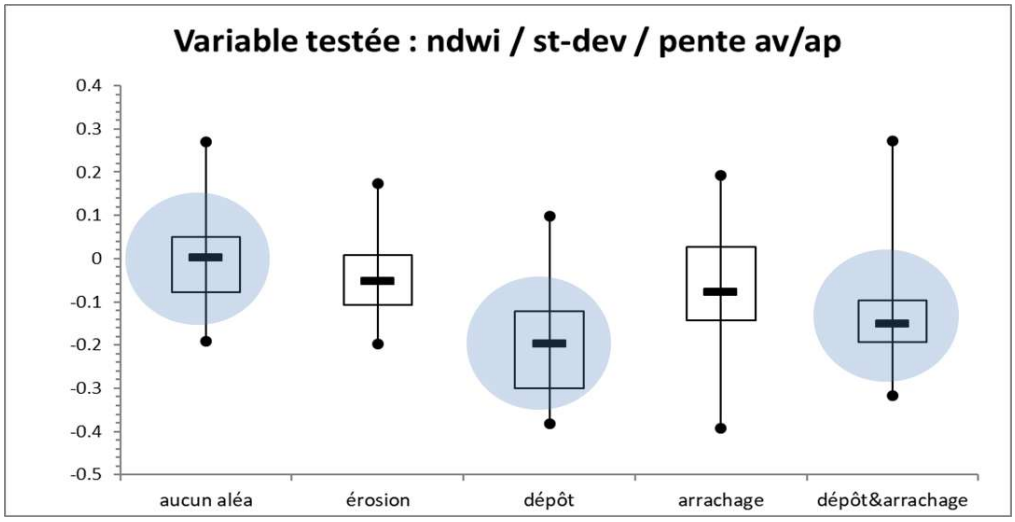
utilisés. Le principe consiste alors à calculer la probabilité que les distributions comparées deux à deux soient similaires. Pour les valeurs inférieures ou proches de 5% il est considéré que les distributions sont significativement différentes. On peut ainsi évaluer la capacité d'une métrique d'indice de la télédétection à différencier une parcelle avec aléa d'une parcelle sans aléa mais aussi à distinguer des types d'aléas entre eux le cas échéant.

RESULTATS

Le filtre SOBEL a été calculé pour une date donnée, au plus proche après l'évènement (cf. Tab. 2). La démarche est illustrée pour une parcelle reconnue par visite de terrain. Les aléas d'érosion étant essentiellement caractérisés par un changement d'intensité spectral et des structures longilignes, le filtre SOBEL, dont l'objectif est la détection des contours, a été appliqué afin de détecter les lignes engendrées par l'érosion. Les résultats de SOBEL pour l'image Sentinel-2 mettent en avant quelques pics sur les profils spatiaux (non présentés ici), mais ne traduisent pas la présence de l'aléa. La résolution des images Sentinel-2 s'est avérée trop faible pour un aléa si finement marqué. Pour l'image Pléiades, l'analyse visuelle montre une détection claire des contours des ravines (cf. Fig. 2), mais ce ne sont cependant pas les seuls éléments détectés. Sur cette image à très haute résolution, le filtre détecte toutes les irrégularités de la surface. Ces irrégularités peuvent s'expliquer par une occupation du sol hétérogène ou encore les caractéristiques du sol particulières (texture, rugosité, etc…).

Figure 2 : Image Pléiades (03/11/2018) en « vraie couleur » (gauche), photo terrain (centre) et résultat filtre SOBEL associé (droite).

La Figure 3 illustre sous forme graphique les distributions d'échantillons d'une métrique du Tableau 3 et par types d'aléas. La table associée synthétise les probabilités que les distributions comparées deux à deux soient similaires. A titre d'exemple ici, il est testé la capacité de la pente de l'écart type de l'indice NDWI.



Variable testée : ndwi / st-dev / pente av/ap au seuil bilatéral = 0.05					
	aucun aléa	érosion	dépôt	arrachage	dépôt&arrachage
aucun aléa		0.073	0.000	0.102	0.008
érosion			0.005	0.736	0.082
dépôt				0.020	0.250
arrachage					0.207
dépôt&arrachage					

Figure 3 : Distributions d'échantillons de la métrique pente de l'écart type de l'indice ndwi selon les différents types d'aléas (à partir d'images Sentinel-2) et table du test de Wilcoxon Mann & Withney.

La table associée à la Figure 3 nous indique qu'au seuil de 5%, il existe trois comparaisons dont les différences sont significatives deux à deux (chiffres en rouge) : ainsi il est possible de distinguer l'aléa « dépôt » et l'aléa « dépôt&arrachage » de l'absence d'aléa entre les parcelles concernées. Il en va de même entre les aléas « dépôt » et « érosion » ainsi que « dépôt » et « arrachage ». Par contre « dépôt&arrachage » et « dépôt » ne sont pas distingués, pour ce jeu de données.

La Figure 4 contient les tables pour lesquelles les indices sensibles aux différents aléas ont été identifiés. La table 4.1 montre qu'une autre métrique de l'indice NDWI est capable de distinguer cette fois les parcelles avec l'aléa « érosion », ou l'aléa « arrachage » ou encore l'aléa « dépôt&arrachage », des parcelles sans aléa. De même cette métrique permet de distinguer l'aléa érosion de l'aléa dépôt. Il faut noter dans ce cas que la métrique utilise 4 images avant et 3 images après l'événement des pluies intenses.

table 4.1

Variable testée : ndwi / mean / pente (moyennée) au seuil bilatéral = 0.05					
	aucun aléa	érosion	dépôt	arrachage	dépôt&arrachage
aucun aléa		0.000	0.351	0.007	0.033
érosion			0.045	0.183	0.490
dépôt				0.148	0.226
arrachage					0.773
dépôt&arrachage					

table 4.2

Variable testée : ndwi / mean / err relative (moyennée) au seuil bilatéral = 0.05					
	aucun aléa	érosion	dépôt	arrachage	dépôt&arrachage
aucun aléa		0.397	0.009	0.000	0.000
érosion			0.151	0.003	0.009
dépôt				0.118	0.006
arrachage					0.040
dépôt&arrachage					

table 4.3

Variable testée : ndvi / mean / pente av/ap au seuil bilatéral = 0.05					
	aucun aléa	érosion	dépôt	arrachage	dépôt&arrachage
aucun aléa		0.476	0.013	0.000	0.000
érosion			0.005	0.000	0.000
dépôt				0.233	0.010
arrachage					0.031
dépôt&arrachage					

table 4.4

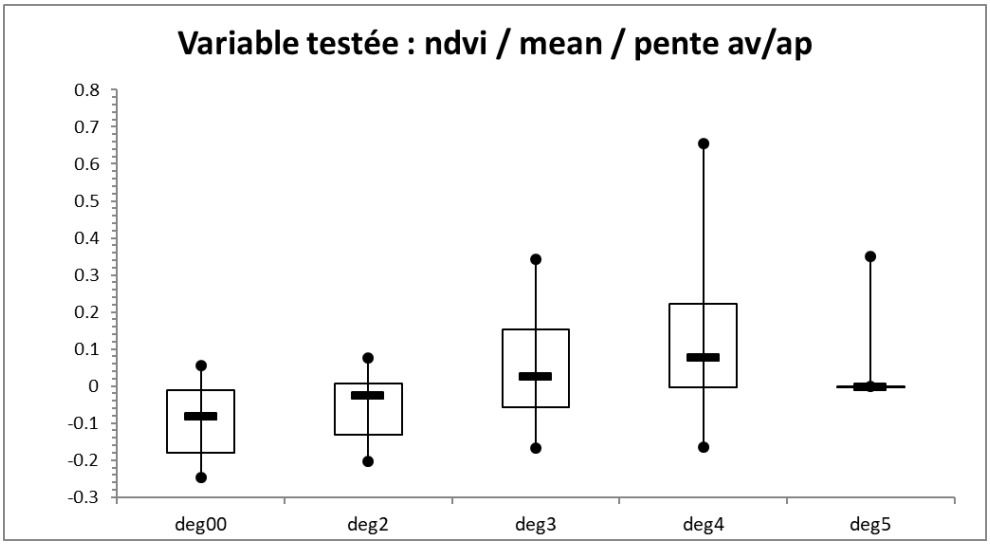
Variable testée : ib / st-dev / err relative (moyennée) au seuil bilatéral = 0.05					
	aucun aléa	érosion	dépôt	arrachage	dépôt&arrachage
aucun aléa		0.971	0.248	0.819	0.008
érosion			0.007	0.597	0.004
dépôt				0.137	0.039
arrachage					0.011
dépôt&arrachage					

Figure 4. (1, 2, 3, 4) : Principaux résultats des tests de comparaisons des métriques de télédétection entre parcelles agricoles, avec et sans aléas de ruissellement intense.

La table 4.2 indique la possibilité de distinguer les parcelles contenant les aléas « dépôt », « arrachage » et « dépôt&arrachage » des parcelles sans aléa. Il faut aussi noter qu'avec cette métrique l'aléa « dépôt&arrachage » se distingue de tous les autres type d'aléas. La table 4.3 montre une métrique de l'indice

NDVI qui apporte la même capacité de discrimination que celle de la table 4.2. Cependant elle n'utilise qu'une image avant et une image après l'événement des pluies intenses. Elle semble être plus sensible. La table 4 .4 montre une capacité de l'indice IB à différencier dépôt et arrachage avec une probabilité de 1% de se tromper. Les autres métriques d'intérêt portent sur les indices SAVI et PIDS pour différencier 3 types d'aléas parmi les 4 types identifiés.

On peut se poser la question de l'influence du degré de dommage sur les indices. Ce degré varie de 1 à 5 pour les vignes et les pertes de fonds dans les déclarations de calamités agricoles. La métrique de la moyenne de la pente pour l'indice NDVI semble pouvoir discriminer les proportions de surfaces impactées dans les parcelles agricoles. Cela prend la forme d'une évolution quasi proportionnelle (cf Fig.5), ici croissante de la distribution de la variable, sauf pour le degré 5. Les différences entre échantillons sont toutes significatives (au seuil de 5%) sauf entre les degrés 3 et 4.



Variable testée : ndvi / mean / pente av/ap	au seuil bilatéral = 0.05				
	aucun aléa	deg2	deg3	deg4	deg5
aucun aléa		0.220	0.002	0.000	0.000
deg2			0.050	0.002	0.008
deg3				0.237	0.000
deg4					0.003
deg5					

Figure 5 : Graphique illustrant la pente de la moyenne de l'indice NDVI avant/après évènement en fonction du degré de dégradation (à partir d'images Sentinel-2).

CONCLUSIONS

Ces premiers résultats sont tout à fait encourageant car ils démontrent la sensibilité des indices et filtres utilisés à différencier, selon les métriques de ces indices, les parcelles déclarées avec un ou plusieurs aléas, des parcelles sans aléa, ou tout du moins non déclarées. Seulement 130 parcelles ont été exploitées dans cette analyse sur les 1119 parcelles qui sont déclarées impactées dans la couverture satellite disponible pour l'événement d'octobre 2018 dans l'Aude. Deux campagnes de terrain ont permis de vérifier des interprétations faites sur images THR et d'affiner la démarche d'analyse.

Bien que plus faiblement résolues spatialement que les images Pléiades, les données Sentinel-2 ont une fréquence de revisite plus élevée, ce qui permet la réalisation des séries temporelles. Néanmoins, la disponibilité de ces données s'est révélée limitée (acquisition d'environ une image par mois dans le meilleur des cas) compte tenu de la présence conséquente de nuage sur la période donnée. A cela s'ajoute la contrainte de sélectionner des images issues d'un même satellite, sans quoi du bruit est introduit dans les données et se répercute sur les séries temporelles. Ici, le choix s'est porté sur des images issues de Sentinel 2A présente en plus grand nombre.

Les images Pléiades ont quant à elles montré l'intérêt de la très haute résolution spatiale qui permet d'identifier les aléas par photo-interprétation. Néanmoins, leur faible résolution spectrale a grandement limité les analyses, notamment dans l'utilisation d'indices spectraux (non présentés ici). De plus, l'absence de bande SWIR (Short-Wave Infrared) représente un fort désavantage dans la détection de l'aléa « dépôt ». A cela s'ajoute l'absence d'images pré-évènement qui a restreint les analyses à un instant donné. Une approche multi-temporelle à partir d'images à très haute résolution spatiale serait grandement bénéfique.

Les filtres morphologiques de type filtre de SOBEL semblent intéressants à exploiter, quelle que soit la résolution spatiale de l'imagerie employée (très haute résolution spatiale et haute résolution spatiale couplée à de la temporalité). Ils nécessiteraient cependant de réaliser une approche au cas par cas, en fonction de l'occupation du sol, afin de comprendre le contexte et ainsi filtrer les fausses alarmes lors de la détection. Par exemple, l'application de masque de végétation permettrait de limiter les zones de recherche des aléas étant donnée l'incapacité de la télédétection spatiale à détecter un signal sous couvert.

Une autre piste émerge qui est celle de l'intelligence artificielle ou réseau de neurones basée sur des méthodes d'apprentissage de types probabiliste. L'objectif est d'automatiser le principe de l'expertise humaine d'où la nécessité d'un très grand nombre de données pour constituer la base d'apprentissage (WikiStat). Largement utilisé, cet outil permet aussi bien de détecter les contours linéaires que curvilignes. Les réseaux de neurones peuvent être utilisés en télédétection dans l'analyse d'images multi-spectrales pour extraire des informations spécifiques, réaliser des classifications et faire de la reconnaissance de forme. Ainsi, l'emploi de filtres morphologiques curvilignes et le recours à l'intelligence artificielle sont deux pistes exploitables dans le cadre d'un projet de recherche.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont bénéficié du soutien du Ministère chargé de l'environnement, de l'énergie et de la mer par décision de subvention n°21367400.

L'accès aux données de télédétection et aux capacités de traitement du CNES et de l'ONERA a fait l'objet d'une convention d'accueil avec IRSTEA (devenu INRAE au °1/01/2020) pour le stage de master de A. Favro qui a servi de support à cette étude de 6 mois. Un accord cadre INRAE-CNES est supposé faciliter la poursuite de ce travail. Une thèse co-financée par le CNES et l'ONERA, avec l'appui demandé de la DGPR pour les missions de terrain, démarre en octobre 2020 pour poursuivre ce premier travail.

REFERENCES

Deng, Y., Wu, C., Li, M., Chen, R., (2015). RNDSI : A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments [en ligne]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 39, pp.40-48. (Consulté le : 29/04/2019) Disponible sur : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243415000422

Gao, B.C., (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [en ligne]. Remote Sensing of Environment, vol. 58, 3, pp.257-266. (Consulté le : 31/07/2019) Disponible sur : https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425796000673

Hanane, A., (2012). Estimation des variables biophysiques des cultures et étude de l'effet du chan-gement d'échelle sur leur variabilité spatiale [en ligne]. Mémoire Master : Ressources Re-nouvelables. Chicoutimi : Université du Québec, 128p. (Consulté le : 06/08/2019) Disponible sur : https://constellation.uqac.ca/2523/

Hostache, R., Puech, C., Raclot, D., (2007). Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR [en ligne]. Cybergeo : European Journal of Geography. DOI : 10.4000/cybergeo.7722. ISSN: 1278-3366 (Consulté le : 02/08/2019) https://journals.openedition.org/cybergeo/772

Hagolle, O., (2014). Séries Temporelles. CESBIO. Consulté le : 28/03/2019. Disponible sur : http://www.cesbio.ups-tlse.fr/multitemp/?p=2766

Lebouc, L., Payrastre, O., Bourgin, F., (2019). Reconstitution des débits de pointe des crues du 15 octobre 2018 dans le bassin de l'Aude. Convention DGPR-Ifsttar 2018 n°2201132931 du 22 Mai 2018 - Action 7 appui au SCHAPI. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 14p. ffhal-02110612f (Consulté le : 05/06/2019) Disponible sur : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02110612/document

OTB-Team, CNES, (2018a). OTB CookBook. EdgeExtraction – Edge Feature Extraction. Consulté le : 26/04/2019. https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/Applications/app_EdgeExtraction.html

OTB-Team, CNES, (2018b). OTB CookBook. LineSegmentDetection – Line segment detection. Consulté le : 06/05/2019. https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/Applications/app_LineSegmentDetection.html

Qiu, B., Zhang, K., Tang, Z., Chen, C., Wang, Z., (2017). Developing soil indices based on brightness, darkness, and greenness to improve land surface mapping accuracy. GIScience & Remote Sensing. DOI: 10.1080/15481603.2017.1328758. https://www.researchgate.net/publication/317751461_Developing_soil_indices_based_on_brightness_darkness_and_greenness_to_improve_land_surface_mapping_accuracy

Sepurua, T.K., Dubeb, T. (2018). Understanding the spatial distribution of eroded areas in the former rural homelands of South Africa: Comparative evidence from two new noncommercial multispectral sensors. Int J Appl Earth Obs Geoinformation 69 (2018) 119–132. http://repository.uwc.ac.za/xmlui/handle/10566/3582

Contexte pédoclimatique et ruissellement intense (Breil *et al.*)

Contexte pédoclimatique et ruissellement intense

Pascal BREIL[1], Hélène ABEKHZER[1], Tristan GALLY[1]

[1] INRAE, UR RIVERLY, 5 rue de la Doua 69625, Villeurbanne, France

Les Hydro-Eco-Régions (ou HER) répondent à une demande de la Directive Cadre Eau de l'Europe. Les HER constituent des entités pédoclimatiques dont nous testons ici l'hypothèse qu'elles conditionnent les processus d'érosion et de dépôt liés au ruissellement intense. La confirmation de cette hypothèse permettrait de proposer au niveau national un pré-calage des cartographies de ruissellement produites par la méthode IRIP. Dans ce travail mené sur 4 années, des zones test de 8 HER parmi 21 que compte la France métropolitaine ont pu être testées. Pour cela les cartographies IRIP du potentiel de ruissellement intense ont été confrontées à divers jeux de données considérés comme représentatifs des conséquences du ruissellement intense. La méthode de comparaison entre les HER a utilisé un critère d'efficacité opérationnelle : il a été retenu les niveaux de potentiel qui permettaient de détecter a minima 80% des incidents sur a maxima 20% du bassin versant. Les combinaisons des niveaux de potentiel pour les aléas transfert-érosion et inondation-dépôt diffèrent selon les HER. Cette première tentative de pré-calage régional des seuils de potentiels significatifs selon les HER fait sens. Il faudrait cependant disposer de plus de données terrain au sein d'une même HER pour s'assurer de l'homogénéité interne et des différences entre HER.

Mots-clefs : hydroécorégions, ruissellement intense, régionalisation

Pedo-climatic context and intense runoff

The Hydro-Eco-Regions (or HERs) respond to a request of the European Water Framework Directive. HERs are soil-climatic entities whose hypothesis we test here that they condition erosion and deposition processes linked to intense runoff. Confirmation of this hypothesis would make it possible to propose at the national level a pre-calibration of the runoff maps produced by the IRIP method. In this work carried out over 4 years, test zones from 8 HERs out of 21 in metropolitan France were tested. For this purpose, the IRIP maps of intense runoff potential were compared with various data sets considered to be representative of the consequences of intense runoff. The comparison method between HERs used an operational efficiency criterion: the potential levels were chosen to detect at least 80% of incidents over a maximum of 20% of the catchment area. The combinations of potential levels for transfer-erosion and flood-deposit hazards differ according to the HER. This first attempt at a regional pre-calibration of significant potential thresholds according to the HER makes sense. However, more field data should be available within the same HER to ensure internal homogeneity and differences between HERs.

Key words : hydro-eco-regions, intense runoff, regionalization

INTRODUCTION

D'après la base de données des arrêtés de catastrophes naturelles [GASPAR, 2020], les inondations représentent 67% des 171 000 arrêtés publiés entre 1982 et 2020. Les deux types principaux d'inondation sont le débordement de cours d'eau et le ruissellement qui est associé aux coulées de boue dans la base GASPAR. Ces dernières sont présentes dans 69% des déclarations. Les coûts d'indemnisation engendrés par les deux types d'inondation sont estimés équivalents [Moncoulon *et al.,* 2014]. Les déclarations sont répertoriées au niveau communal et il est possible de regarder le nombre de déclarations pour « Inondations et coulées de boue » à l'échelle de la France métropolitaine (Figure 1a). Cette cartographie nous informe que très peu de communes sur les 34 839 que compte le territoire n'ont jamais déclaré ce type de catastrophe. Le nombre de déclarations augmente de fait dans les zones où la densité de population et d'activité est la plus forte, comme les grands centres urbains. Il augmente aussi avec l'intensité des pluies en bordure de Méditerranée. Cependant l'occurrence dans le Nord de la France est liée à des pluies moins intenses. Dans ce cas la nature du sol, son état hydrique moyen et les usages qui affectent les propriétés de surface, sont aussi des facteurs connus pour influencer l'apparition du ruissellement [Dehotin et Breil, 2011]. Ces facteurs sont hérités de grands ensembles géologiques et climatiques dont les distributions spatiales forment des régions pédo-climatiques qui pourraient s'avérer contrôler la production du ruissellement.

Pour un découpage régional pertinent, il a été retenu le concept d'Hydro-Ecorégion développé en France [Wasson *et al.,* 2004] pour répondre à la demande de la Directive Cadre Eau de l'Europe de délimiter des ensembles écologiques régionaux des écosystèmes d'eau courantes : « …..L'approche par Hydro-EcoRégions (HER), basée sur la géologie, le relief et le climat, système fonctionnel régionalisé et hiérarchisé, permet de

délimiter des entités géographiques dans lesquelles les écosystèmes d'eau courante présentent des caractéristiques communes. »[1]

A l'échelle de la France métropolitaine il est identifié 21 HER de niveau 1 (Fig.1b). Les HER testées avec la méthode IRIP sont signalées en rouge dans la figure 2.

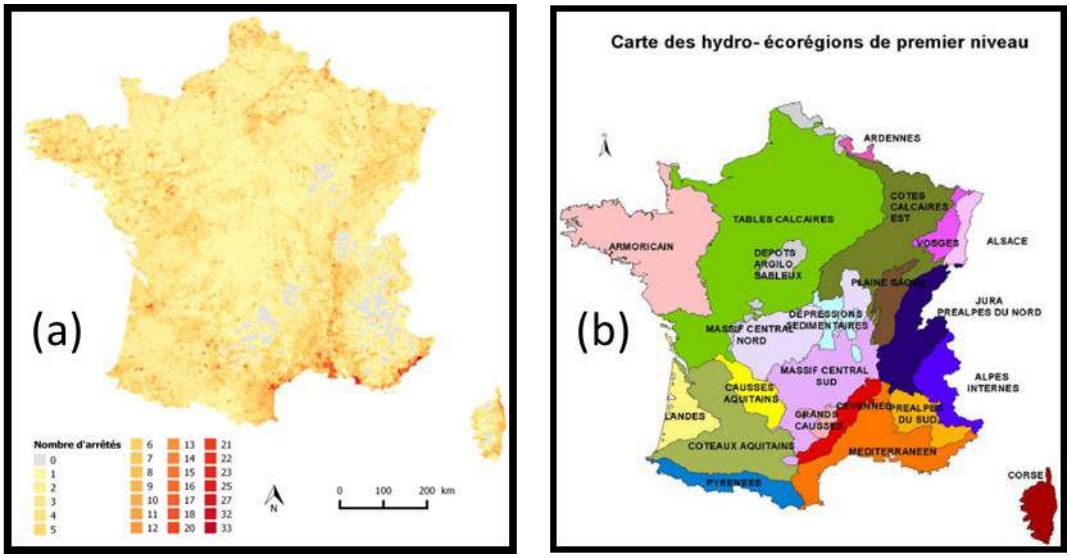


Figure 1: (a) Illustration du nombre d'arrêtés en catastrophes naturelles de la catégorie « inondations et coulées de boue » de 1982 à 2020, et (b) découpage de la France métropolitaine en HER de niveau 1.

Le terme « inondations par ruissellement » recouvre en fait des processus d'érosion, d'arrachage et de dépôt qui sont la conséquence d'un ruissellement intense qui interagit avec le sol. L'inondation peut se produire par effet d'accumulation dans les ruptures de pente concaves, la rencontre d'obstacles. Elle est souvent liée à un processus d'érosion en amont dans les ruptures de pente convexes, là où le ruissellement acquiert de la vitesse. Les coulées de boue se forment alors. Il ne faut pas non plus négliger l'effet des débris végétaux et ligneux flottés depuis de larges zones à faible pente et qui vont souvent concourir à créer des embâcles et boucher des ouvrages de gestion hydraulique. La charge solide véhiculée est à l'origine de la divagation des écoulements sur les versants, cela y compris dans les talwegs peu marqués. Les étapes de production du ruissellement, suivies de l'érosion par les flux concentrés et d'accumulation ou même de diffusion sur de large zones peuvent s'enchainer dans les versants. Ce sont là différentes formes d'aléas associés et il parait plus à propos de parler de « ruissellement intense » que d'inondation par ruissellement, le terme étant assez équivoque quand on aborde le milieu urbain, capable de s'auto-inonder au-delà de la période de retour de 10 ans pour les pluies, quand cette période n'est pas un facteur de perturbation majeur en milieu rural. L'expérience tend à monter que les dommages d'ampleur se manifestent à partir d'une pluie de période de retour de 30 ans. Nous considérons dans ce qui suit comme descripteurs des aléas : les cartes de transfert, dont les valeurs fortes sont souvent associées sur le terrain aux processus d'érosion, et les cartes d'accumulation dont les valeurs fortes sont souvent associées aux processus de dépôt en eau, minéraux et végétaux.

Par ses multiples aspects le processus de ruissellement intense est un phénomène complexe dans les étapes de sa formation comme de ses conséquences. Il n'existe pas de mesure de ces flux complexes dont les seules données exploitables sont les désordres ou stigmates laissés après l'événement. Le terme anglo-saxon de « proxy » est utilisé pour désigner ce type de données. Des documents visuels existent en particulier pour ce qui concerne les coulées de boue qui traverse des routes ou des zones habitées. Ce sont là des manifestions abouties des étapes qui se sont succédé. L'objectif de la cartographie des étapes du ruissellement intense est alors bien de développer des actions préventives ou encore d'anticipation dans le cas de projets nouveaux. Cette cartographie doit cependant être confrontée aux désordres recensés pour en évaluer la pertinence et le caractère opérationnel.

[1] https://www.irstea.fr/fr/les-hydro-ecoregions-une-approche-fonctionnelle-de-la-typologie-des-rivieres

L'objectif de ce travail est de vérifier si des seuils de susceptibilité au ruissellement sont associés à des caractéristiques pédo-climatiques qui permettraient de dédifférencier de grands territoires. C'est en effet un point d'entrée à une pré-calibration de la méthode IRIP au niveau national. Il ne s'agit pas d'un calage au sens de l'optimisation des paramètres d'un modèle. En effet aucune action n'est réalisée sur l'optimisation de la pondération des facteurs du ruissellement. La méthode IRIP calcule trois cartes avec chacune 6 niveaux de sensibilités compris entre 0 et 5 du fait de la somme des valeurs de 5 facteurs binaires (valeur de 0 ou 1) pour chaque carte. Plus le score atteint est fort plus la susceptibilité de la maille raster où est réalisé le calcul est considérée favorable au ruissellement. Il faut comprendre que toutes les mailles d'un bassin versant reçoivent un score mais que la surface concernée du bassin versant couverte diminue plus l'on considère un seuil de susceptibilité élevé. Le « calage » ou plutôt l'étalonnage consiste alors à rechercher s'il existe un seuil de susceptibilité plus approprié qu'un autre quand l'on se trouve dans une région qui diffère par ses caractéristiques pédo-climatiques. A noter que dans ce qui suit, un seuil de sensibilité signifie tous les scores égaux ou supérieurs à ce seuil.

METHODE ET DONNEES

Nous le verrons, les données d'incidents ou proxy sont de natures diverses et le principe d'évaluation associé fait l'objet de choix dont il faut pouvoir tester l'influence sur l'évaluation du caractère prédictif des cartographies IRIP. La méthode est présentée dans d'autres publications [Braud et al., 2020 ; Lagadec et al., 2018 ; Dehotin et al., 2015 ; Dehotin & Breil, 2011] et nous rappelons seulement ici son principe. Le modèle utilise une méthode de score pour évaluer la capacité d'une maille raster développer un aspect du ruissellement intense que l'on distingue en zones de production, de transfert ou d'accumulation. Ces processus sont fonction des facteurs topographiques, pédologiques et d'usage du sol qui caractérisent la maille de calcul, et sous condition des caractéristiques de l'aire drainée que cette maille collecte. Le modèle utilise ici en entrée les données topographiques IGN à la maille raster de 25m, l'occupation du sol OSO-2017 proposée par le CES-BIO à la maille de 20m et les caractéristiques hydrodynamiques du sol supérieur (0 à 30 cm de profondeur) proposées par l'ESDAC à la maille de 250m. La maille de restitution des cartes de production, transfert et accumulation est celle du MNT qui est le moteur gravitaire des écoulements en surface.

Au cours d'un événement de ruissellement intense il est possible d'avoir une réaction des talwegs et des cours d'eaux qui vont déborder, sans que cela soit systématique. La distinction entre les dégâts causés par le ruissellement intense et des dégâts provoqués par le débordement n'est pas toujours évidente et seule les données de description locales et l'analyse de la topographie amènent un éclairage. Ce n'est cependant pas toujours possible à faire avec les données anciennes. D'une manière simplifiée il est alors possible de séparer ce qui relève des dommages liés aux inondations par débordement et par ruissellement en utilisant «l' Enveloppes Approchées d'Inondations Potentielles (EAIP) ». Cette donnée a été cartographiée et fianlisée par le Cerema et les DREAL de Bassin sous couvert de la DGPR à l'échelle de la France en 2011[2]. Elle est utilisée dans le traitement pour séparer les données de terrain en dégâts liés au ruissellement intense et en dégâts liés au débordement de cours d'eau. Il est cependant important de tester l'ensemble du jeu de données car l'EAIP, comme son nom l'indique est une enveloppe approchée, voire maximaliste qui ne représente pas un événement en particulier. Par ailleurs l'expérience de terrain nous a montré que sur de petits bassins versants, jusqu'à 10 km^2, les inondations par ruissellement pouvaient frapper des habitations « par le haut » avant que le débordement de la rivière n'inonde « par le bas ».

Un rapport d'efficacité de la détection des incidents a été proposé [Breil et al., 2017] pour comparer les résultats entre les bassins versants des différentes HER où des données d'incidents de natures différentes, et liées au ruissellement intense étaient disponibles. Il consiste à faire le rapport du pourcentage d'incidents détectés sur le pourcentage de surface du bassin versant cartographié en aléas forts. L'objectif opérationnel consiste alors à maximiser le pourcentage d'incidents détectés tout en minimisant le pourcentage de surface du bassin versant en aléas forts. Pour cette étude nous avons validé les conditions suivantes : détecter *a minima* 80% d'incidents avec *a maxima* 20% du bassin versant en aléas forts, soit un rapport de 4 ou plus. Ces contraintes ont permis d'évaluer pour chaque HER testée les seuils d'aléas forts à conserver pour atteindre l'objectif opérationnel, le cas échéant.

Pour cette étude, des données d'incident liées au ruissellement ont été collectées, après analyse critique, depuis des bases de données ou encore à partir de campagnes de terrain. Elles sont résumées dans le Tableau1. Il est à noter la diversité de nature des données entre les coupures de route, les points incidents liés aux

[2] https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/EPRI-Principaux-resultats_120712.pdf

déclarations individuelles de catastrophes naturelles, les emprises spatiales liées à des coulées de boue, glissements de terrain et autres formes de réponses au ruissellement intense.

Un cas d'étude particulier a été ajouté à cette analyse : celui du Territoire à Risque important d'Inondation de Nantes (TRI). Il contribue à l'étude de l'HER « Armoricain ». Sur ce territoire c'est la donnée « zones humides » qui a été traitée comme un élément de la gestion du ruissellement intense. La méthode IRIP est utilisée ici pour évaluer la capacité de détection des zones humides par la cartographie des zones d'accumulation. Une validation réalisée sur les zones humides recensées permet de retrouver des zones humides asséchées ou comblées dont la réhabilitation pourrait entrer dans la gestion du ruissellement intense.

Afin de vérifier une différence d'intérêt entre les HER de niveau 1 pour la production du ruissellement intense, il a aussi été collecté les données « Top soils hydraulic characteristics »[3] de la base LUCAS du « European Soil Data Centre ». Ces données sont fournies sous forme raster à la maille de 250m mais elles présentent l'avantage d'une information homogène en granularité à l'échelle de l'Europe.

Tableau 1 : Sources et nature des données par HER

HER	Nature de l'incident géolocalisé	Source	nombre
Table calcaires	coupure de route	CODAH	36
Table calcaires	points incidents	SMBVAS	459
Massif central sud	points incidents	Com. Costaros	36
Méditerranéen	Coulées de boue, zone inondable	Com. Biot	9
Méditerranéen	points incidents	Com. Vallauris	30
Plaine de Saône	points incidents	Grand Chalon	56
Coteaux Aquitains	coupure de route	DDT 32	36
Pyrénées	GT,I,CT,R*	ONF	143
PréAlpes du Sud	GT,I,CT,R*	ONF	99
Armoricain	zones humides	SAGE Loire	13995
(*) Glissement terrain, Inondation, Crue torrentielle, Ravinements			

La méthode IRIP intègre aussi l'influence de la pluie pour produire du ruissellement par saturation et du ruissellement par dépassement de la vitesse d'infiltration. Les données de pluies sont tirées des lames d'eau radar fournies par Météo-France à la maille kilométrique. Ces données ont fait l'objet d'une analyse par géostatistique pour en calculer les quantiles de pluie [Breil et al., 2017]. Cette étape est réalisée en comparant les valeurs de conductivité hydraulique à saturation et la capacité de rétention en eau à saturation dans les 30 premiers centimètres du sol (horizon racinaire moyen) avec les pluies de 1 heure et de 24 heures, pour la période de retour 30 ans. A titre d'exemple, quand le cumul de pluie horaire dépasse la quantité d'eau qui peut s'infiltrer en 1 heure le ruissellement Hortonien est considéré actif et la maille raster de 250m est mise à 1, sinon à 0.

RESULTATS

La figure 2 représente le pourcentage de surface ruisselante par HER de niveau 1. On observe que le pourcentage de ruissellement peut varier de 50 à 80% sous les conditions locales des pluies trentennales. De manière logique l'HER des Landes infiltre beaucoup alors que les coteaux aquitains, situé juste à côté, sont très favorables au ruissellement, sans doute du fait de sols battants comme cela est aussi observé dans l'HER des tables calcaires. Le massif central est peu ruisselant du fait d'une géologie propice à la porosité de fracturation, en particulier au niveau des couches de laves. L'hypothèse de travail consiste à dire que les HER les plus favorables au ruissellement devraient avoir de bons taux de détection des incidents liés au ruissellement intense pour les valeurs hautes de seuil de sensibilité.

[3] https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/soil-hydraulic-properties

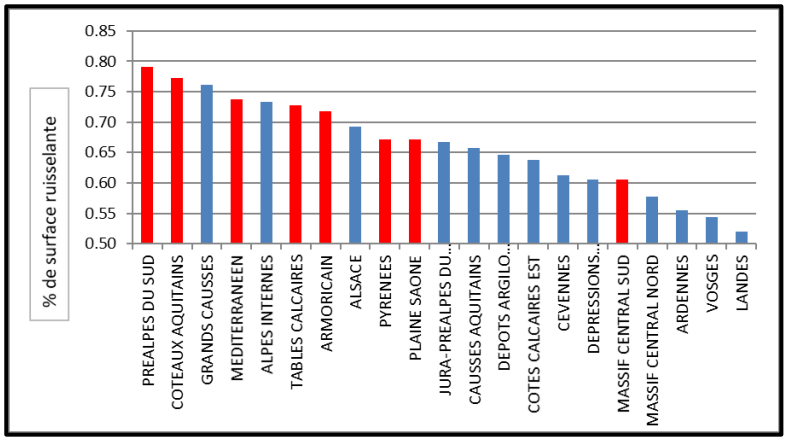


Figure 2 : La figure représente le pourcentage de mailles ruisselantes dans chaque HER pour une pluie de période de retour de 30 ans et d'une durée de 1 heure.

Les détails des résultats et des conditions d'évaluation sont reportés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Résultats par HER

HER	Seuils d'aléa accumulation	Seuils d'aléa transfert	Largeur tampon m	% aléa fort dans tampon	% détection par IRIP	% aléa fort dans surface bv	Taux efficacité
Table calcaires	4	4	25	7	81	4	20.3
Table calcaires	3	3	50	7	90	18	5.0
Massif central sud	5	4	50	7	72	21	3.4
Méditerranéen	4	3	50	7	100	16	6.3
Méditerranéen	4	4	50	7	72	18	4.0
Plaine de Saône	4	4	50	7	81	6	13.5
Coteaux Aquitains	4	4	25	7	82	12	6.8
Pyrénées	5	5	50	22	88	12	7.3
PréAlpes du Sud	5	4	50	7	79	18	4.4
Armoricain	5	1	0	65	88	24	3.7

On notera dans ce tableau 2 les largeurs des tampons autour des incidents. Pour l'HER « Armoricain » qui concerne les zones humides, c'est l'emprise cartographiée par le SAGE Loire qui est retenue. Dans ce cas le pourcentage d'aléas forts minimum de validation est de 65% car il ne s'agit pas de détecter la présence de quelques mailles en aléas forts de ruissellement mais bien de caractériser une zone d'accumulation.

Les résultats commentés par HER

Le tableau 2 peut être visualisé par les figures 3a et 3b.

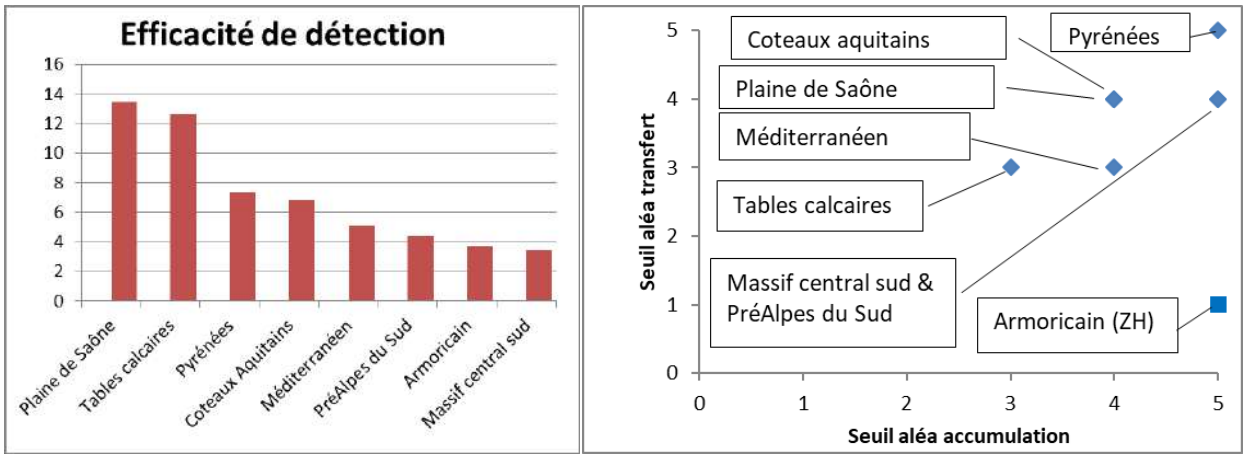


Figure 3 : (a) Rapports d'efficacité des détections par HER; (b) Scores des aléas transfert et accumulation retenus pour atteindre ou dépasser le rapport d'efficacité de 4. Les rapports pour les HER Armoricain et Massif Central Sud sont légèrement inférieurs à 4.

HER « Tables calcaires »

Sur le bassin de la Lézarde, suite à l'événement orageux du 13 octobre 2013, les 36 coupures de routes sont comparées aux aléas forts ainsi que des coupures du réseau ferré. Un tiers du bassin a été concerné par l'orage et ce secteur est donc retenu pour l'évaluation. Les coupures sont détectées à 81% avec un seuil de 4 en accumulation et transfert qui représente 4% de la surface du bassin versant. La plupart des routes non coupées mais prédites par la carte d'accumulation IRIP se sont avérées être protégées par un ou plusieurs des 45 ouvrages de rétention temporaires existant. C'est l'illustration d'une action de prévention efficace.

Sur le bassin de l'Austreberthe le choix du seuil = 3 donne un taux de détection de 90% des incidents recensés sur moins de 18% du territoire. Il s'agit d'incidents compilés par le syndicat mixte de bassin depuis les années 90. La base contient 1017 incidents dont 459 sont situés en dehors de l'EAIP et que l'on considère alors relever des inondations par ruissellement intense.

HER « Massif Central Sud »

Evénement du 13 juin 2017 avec 220 mm en 3 h, localement 400 mm sur images radar. Sur les trois bassins contiguës de la zone d'étude 72 incidents ont été compilés depuis les données des media, visite terrain et contacts avec les services techniques (Mairies, DDT). Le choix du seuil 5 pour l'accumulation et 4 pour le transfert donne un taux de détection de 72% des 36 incidents recensés hors l'EAIP-Ce et cela avec 21% du territoire en aléa fort.

HER « Méditerranéen »

Evénement du 3 octobre 2015 avec 120mm en 3 heures qui ont suivi 80mm de pluie le jour précédent. Visite terrain réalisée les 27 et 28 octobre.

Commune de Biot : 8 coulées de boue répertoriées et inondation pluviale localisée à partir d'une vidéo prise pendant l'événement. 8 incidents liés à l'érosion avec 100% de détection pour l'aléa transfert au seuil = 3. L'incident lié à l'accumulation d'eau avec 100% de détection pour l'aléa accumulation au seuil = 4. Les aléas forts cités représentent 16% du bassin versant.

Commune de Vallauris : 30 incidents avec 73% de détection pour un seuil = 4 en transfert et (ou) accumulation avec 18% du bassin versant en mailles à aléa fort.

HER « Armoricain »

Dans les bassins versants du TRI de Nantes la carte d'accumulation a été post-traitée pour détecter les zones humides (ZH) de l'inventaire du SAGE Loire. Il s'agissait d'évaluer la capacité de la carte d'accumulation IRIP à reproduire cette information dans des zones non renseignées avec l'idée d'utiliser les ZH dans une stratégie de gestion du ruissellement intense. Après calage du post-traitement sur une sous zone, la cartographie des zones humides potentielles est évaluée sur le jeu des 13 995 ZH délimitées dans le SAGE Loire. On observe que 88% des ZH sont détectées avec un taux moyen de 65% de mailles favorables à la présence de zones humides dans les zones humides observées. La proportion de territoire en zones humides observées dans les bassins versants du TRI de Nantes est de 21% contre 24% « vu » par la méthode IRIP. Des zones asséchées ou remblayées pour construire des lotissements ont ainsi été confirmées par une campagne de terrain sur la commune de Vertou (44).

HER « Plaine de Saône »

Territoire du Grand Chalon : événements du 4/11/2014 ; 13/05/2016 et 25/06/2016. Ce territoire dispose de 56 points d'incidents déclarés par des particuliers dans le cadre d'une déclaration CAtNat.

Hors de l'EAIP : En tout 20 points incidents sont situés hors de l'EAIP-CE. Le modèle IRIP permet de détecter 90% de ces 20 points au seuil de niveau 4 avec une emprise spatiale de 6% pour les mailles en aléa fort en accumulation et (ou) transfert.

Dans l'EAIP : 97% des 36 points situés dans l'EAIP sont détectés au seuil de niveau 4 avec une emprise spatiale de 27% pour les mailles en aléa fort en accumulation et (ou) transfert.

HER « Coteaux Aquitains »

Trois bassins versants du Gers suite à orage de mai et juin 2018. La DDT a fourni les coordonnées délimitant 36 tronçons de route impactés par des phénomènes de ruissellement intense. La surface cumulée des trois bassins versant est de 1656 km2.

Avec un tampon de 25m de part et d'autre des tronçons de route, 82% des routes impactées sont détectées au seuil de niveau 4 en transfert et (ou) accumulation, cela en considérant un minimum de 7% de mailles en aléa dans la zone tampon. Pour ce seuil, 12% de la surface totale des trois bassins sont en aléas forts.

L'étude comparée des % en aléas forts dans les zones tampons indique que pour les routes impactées ils varient de 3 à 27% contre 0 à 62% pour les routes non impactées. Cela semble indiquer que nombre de routes sont bien protégées par des dispositifs hydrauliques efficaces. Cela indique aussi que les routes sans aléas forts ne sont pas impactées.

HER « Pyrénées »

Hors de l'EAIP : Pour cette HER il a été isolé un bassin versant de 692 km2 contenant 87 incidents de la base ONF, survenus après 1999 et classés en 42 glissements de terrain, 1 inondation et 44 crues torrentielles. Il est considéré un tampon de 50m autour des zones d'incidents qui dans la base ONF prennent des formes diverses d'emprises. Le taux de détection est de 80% des incidents au seuil IRIP 5 en accumulation et (ou) 5 en transfert. Avec ces seuils, 12% du territoire est en aléas forts. Les incidents sont détectés avec au minimum 5% de mailles en aléas forts dans les emprises avec tampon.

Dans l'EAIP : 56 incidents de la base ONF, survenus après 1999 et classés en 22 glissements de terrain et 34 crues torrentielles. Il est considéré un tampon de 50m autour des zones d'incidents qui dans la base ONF prennent des formes d'emprises diverses. Le taux de détection est de 88% des incidents au seuil IRIP 5 en accumulation et 5 en transfert. Avec ces seuils, 12% du territoire est en aléa fort. Les incidents sont détectés avec au minimum 22% de mailles en aléa fort dans les emprises avec tampon.

Les incidents « ravinements » sont traités à part car non datés pour l'essentiel, ce qui laisse supposer des événements anciens, parfois historiques (années 1700, 1800). Le taux de détection est de 69% avec au minimum 5% de mailles en aléa fort dans les emprises avec tampon, toujours avec les aléas transfert et (ou) accumulation au seuil de 5. Ce type d'incident semble être le plus complexe à décrire, parfois sous forme de zones étendues, parfois de linéaires, parfois de points. L'évaluation précise de ce type d'incident nécessitera de se rapprocher des services de l'ONF.

HER « PréAlpes du Sud »

Hors de l'EAIP : Pour cette HER il a été isolé un bassin versant de 789 km2 contenant 58 incidents de la base ONF, survenus après 1999 et classés en 28 glissements de terrain, 1 ravinement et 29 crues torrentielles. Il est considéré un tampon de 50m autour des zones d'incidents qui dans la base ONF prennent des formes d'emprises diverses. Le taux de détection est de 79% des incidents au seuil IRIP 5 en accumulation et en transfert. Avec ces seuils, 18% du territoire est en aléas forts. Les incidents sont détectés avec au minimum 7% de mailles en aléas forts dans les emprises avec tampon.

Dans L'EAIP : 41 incidents de la base ONF, survenus après 1999 et classés en 14 glissements de terrain et 21 crues torrentielles. Il est considéré un tampon de 50m autour des zones d'incidents qui dans la base ONF prennent des formes diverses d'emprises. Le taux de détection est de 86% des incidents au seuil IRIP 5 en accumulation et (ou) 4 en transfert. Avec ces seuils, 18% du territoire est en aléas forts. Les incidents sont détectés avec au minimum 25% de mailles en aléa fort dans les emprises avec tampon.

DISCUSSION

L'HER « Pyrénées » est selon ce premier test la plus sensible au processus de ruissellement intense car les seuils de 5 en transfert et(ou) en accumulation sont retenus. Les HER « massif central sud » et « PréAlpes du Sud » présentent des seuils identiques avec niveau 5 en accumulation et (ou) 4 en transfert. L'HER des tables calcaires nécessite de partir du seuil 3. Les trois autres HER se situent entre ces extrêmes avec des variantes en accumulation ou en transfert. Il est possible de proposer un premier gradient de sensibilité au ruissellement du plus faible au plus fort : Tables Calcaires -> Méditerranéen –> Plaine de Saône et Coteaux Aquitains –> Massif Central Sud et PréAlpes du Sud –> Pyrénées.

Par contre, il est intéressant de regarder le rapport d'efficacité de la détection qui est donné par le % de détection sur le % de surface du bassin versant en mailles IRIP « aléas forts ». Ce rapport donne une information opérationnelle car plus il est grand pour des % de détection ici supérieur à 80 %, moins il y a de surface de bassin concerné par les aléas liés au ruissellement intense. D'après la figure 3b, les HER « Plaine de Saône » et « Tables calcaires » donnent ici les meilleurs résultats alors que le massif central est le moins bon, ce qui est cohérent pour ce dernier avec sa relative faible capacité à ruisseler.

On ne trouve cependant pas de tendance bien établie du taux d'efficacité avec le classement des HER selon leur capacité à produire du ruissellement pour la pluie trentennale (Fig.4).

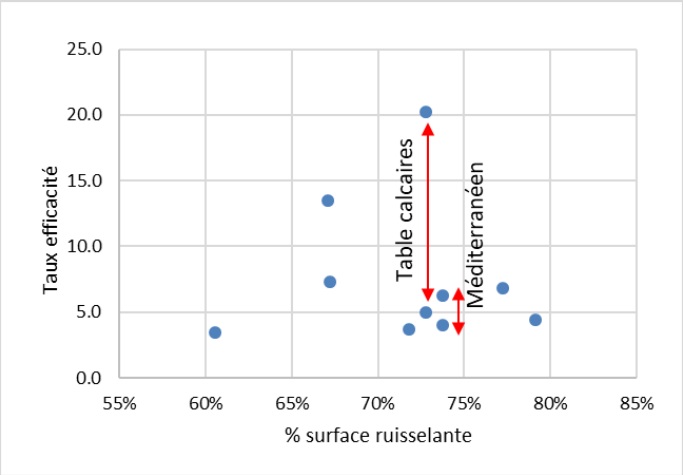


Figure 4 : Lien entre pourcent de surface ruisselante et taux d'efficacité à détecter le ruissellement.

En particulier les deux HER pour lesquelles nous disposons de deux jeux de données d'incidents séparés ne permettent pas de trancher sur l'homogénéité d'une HER au sens du taux d'efficacité car l'écart est important pour l'HER « tables calcaires » et réduit pour l'HER « Méditerranéen ». Plusieurs autres facteurs peuvent jouer comme la distance géographique entre sites qui peut expliquer des différences microclimatiques (Le bassin de la Lézarde est côtier de la Manche), le nombre de données et surtout leur nature.

CONCLUSIONS

Il s'agit d'une première synthèse qui devra s'enrichir d'autres études. Ainsi 10 zones d'études réparties dans 8 HER sur 22 au total que compte la France ont pu faire l'objet d'une évaluation, soit à partir de données liées à des événements datés, soit à partir de données collectées par les services de l'Etat comme la DTTM du Gers ou l'ONF. Il est observé une différence entre les seuils nécessaires dans les cartes IRIP selon les HER considérées. Le critère posé en préambule était d'atteindre au minimum 80% de détection des incidents liés au ruissellement intense, cela avec moins de 20% de la surface de bassin versant concernée par des mailles en aléas forts au sens des seuils fournis par IRIP. Selon les régions ces seuils sont soit supérieurs ou égaux à 3, 4 ou 5 sur une échelle qui va de 0 à 5. On s'appuie ici sur des nombres d'incidents qui varient de 25 à 459 selon les cas étudiés (les zones humides n'étant pas comptabilisées en incidents).

Les déclarations relatives aux arrêtés de catastrophes naturelles par inondation [GASPAR, 2020] ne concernent pas toutes les formes de pertes. Ainsi les dommages aux cultures et aux ouvrages, et les pertes de sol sont indemnisés dans le cadre des déclarations de calamités agricoles. Il n'existe pas de base nationale consultable librement dans ce cas mais deux exemples traités dans le sud de la France pour des événements de pluies intenses (Pyrénées orientales en 2014 et Aude en 2018) montrent plus de 1000 déclarations dans chaque département. En utilisant ici aussi l'EAIP pour ne conserver, *a priori*, que les parcelles impactées par du ruissellement, nous découvrons que de nombreuses parcelles agricoles sont concernées. C'est une autre source de données en cours d'exploitation. Elle sera par ailleurs combinée à une utilisation des données satellites très haute résolution (Pléiade) sur des territoires comme l'Aude (inondations d'octobre 2018) ou l'île de la Réunion (pluie cycloniques) en partenariat avec le CNES et l'ONERA pour étudier la possibilité de détecter « automatiquement » des éléments de désordre au sol consécutifs à un ruissellement intense.

Pour la suite, il convient d'enrichir la base de données comme précisé ci-avant et de tester les HER de niveau 2 [LEGIFRANCE, 2010] qui au nombre de 120 pour la France métropolitaine apportent beaucoup plus de nuances dans les facteurs pédo-climatiques.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont bénéficié à l'origine du soutien de la Région Rhône-Alpes et du Ministère chargé de l'environnement, de l'énergie et de la mer par sa décision de subvention n°21367400.

Le choix des hydro-écorégions de travail a été conditionné par la disponibilité de données d'incidents au sol. Ces données ont été trouvées auprès de différentes structures :

-la communauté de communes du Grand Chalon (Saône-et-Loire, en région Bourgogne-Franche-Comté) qui a subi en 2016 des dégâts importants par ruissellement intense des terres situées en périphérie ;

-La DDTM du Gers (région Occitanie) qui a fourni une base de coupures de routes liées à des orages intenses;

-L'ONF : Cette base contient des données qui remontent au 17em siècle ainsi que des données contemporaines ;

-Le Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Austreberthe et du Saffimbec (SMBVAS) en Seine-Maritime :

-Les données ont aussi été obtenues par des visites de terrain et la collecte d'information via les media et riverains après des événements de ruissellement intense comme à Biot et Vallauris (Var) en Octobre 2015, Lucheux (Somme) en Juin 2016 et Costaros (Haute Loire) en Juin 2017 ;

- Le SAGE Loire pour la partie inventaire des zones humides.

REFERENCES

Braud I., Lagadec L.R., Moulin L., Chazelle B., Breil P. (2020) Evaluation of a model for mapping intense pluvial runoff hazard using proxy data of runoff-related impacts. Application to the railway context. Special Issue: Natural hazard impacts on technological systems and infrastructures; Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 20, 947–966, 2020; https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/20/947/2020/nhess-20-947-2020.pdf

Breil P., Leblois E., Ekoko Safi A. (2017) Cartographies des risques liés aux inondations par Ruissellement Intense Pluvial (IRIP). PROGRAMME MEEM (DGPR / SRNH) - IRSTEA 2017 78 p. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02960502

Dehotin, J., Breil, P., Braud, I., de Lavenne, A., Lagouy, M., Sarrazin, B. (2015). Detecting surface runoff location in a small catchment using distributed and simple observation method. J. Hydrology, 525, 113–129. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415001638

Dehotin J., Breil P. (2011) Projet IRIP : Rapport bibliographique sur la cartographie de l'aléa inondation par ruissellement. *Irstea*. pp.34. https://hal.inrae.fr/hal-02595953/document

Lagadec Lilly-Rose, Moulin L., Braud I., Chazelle B., Pascal Breil P. (2018) A surface runoff mapping method for optimizing risk analysis on railways. Safety Science - Special issue: Railway Safety. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01549762/document - 10.1016/j.ssci.2018.05.014

GASPAR (2020) Base nationale de Gestion ASsistée des Procédures Administratives relatives aux Risques. https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/base-gaspar

LEGIFRANCE Arrêté du 12 janvier 2010 relatif aux méthodes et aux critères à mettre en œuvre pour délimiter et classer les masses d'eau et dresser l'état des lieux prévu à l'article R. 212-3 du code de l'environnement. https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2010/1/12/DEVO1000661A/jo/texte

Moncoulon, D., Labat, D., Ardon, J., Leblois, E., Onfroy, T., Poulard, C., Aji, S., Rémy, A., Quantin, A., (2014). Analysis of the French insurance market exposure to floods: a stochastic model combining river overflow and surface runoff. *Natural Hazards and Earth System Sciences, European Geosciences Union*, n° 14, p. 2469 -2485, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01070525

Wasson J.G, Chandesris A., Pella H, Blanc L. (2004) Les hydro-écorégions: une approche fonctionnellede la typologie des rivières pour la Directive cadre européenne sur l'eau. Ingénieries eau-agriculture-territoires, *Lavoisier; IRSTEA; CEMAGREF*, 2004, p. 3-10. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00475620/document

Modélisation du ruissellement : approches, outils et perspectives (Araud *et al.*)

Modélisation du ruissellement : approches, outils et perspectives

Araud Quentin [1], Tricoire Sophie [1], Lepelletier Thierry[2]

(1) Setec hydratec, 13, quai Kléber, Strasbourg, France
(2) Setec hydratec, 42, Quai de la Rapée Paris, France

La modélisation des phénomènes de ruissellement couvre des domaines d'investigation très différents selon la nature d'occupation des sols et les échelles spatiales considérées. L'accroissement de la puissance des outils de calcul favorise la modélisation hydraulique de ces phénomènes. Pour autant des questions importantes subsistent sur les niveaux de précision offerts par les logiciels disponibles sur le marché. Cet article examine tout d'abord les différentes approches du problème du ruissellement. Il traite ensuite un exemple test des lois de l'hydraulique à la modélisation du ruissellement sur des bassins versants ruraux et discute de la nécessité de valider les outils de calculsur des données de terrains correctement renseignées. Il décrit enfin les applications en cours de modélisation du ruissellement dans les mieux urbains. Hydra/Qgis figure parmi les logiciels permettant ces modélisations. L'article illustre les possibilités offertes par ce logiciel au travers des exemples traités.

Mots clés : ruissellement, modélisation, bassins ruraux, milieux urbains, Hydra/Qgis.

Drainage modelling covers a wide variety of domains depending on land use and spatial scale. The development of hydro computing software favors hydraulic modelling in this area of investigation. However important questions arise on the accuracy provided by existing commercial softwares. This paper discusses the various approaches to assess modelling of the drainage problem. Hydraulics modelling of drainage on a rural catchment is discussed in some details and the need for relevant on field data is emphasized. This paper presents also ongoing development on drainage modelling in urban areas. Modeling capacities of Hydra/Qgis software are discussed for both rural and urban drainage applications.

Key words : drainage, hydraulic modelling, rural and urban sub catchments, Hydra/Qgis software.

REVUE DES DIFFERENTES APPROCHES

La modélisation du ruissellement et la quantification des risques engendrés par le ruissellement ont connu un essor important depuis une quinzaine d'années avec le développement de deux principaux facteurs : les analyses spatiales à l'aide d'outils SIG et les progrès accomplis par les outils de modélisation numérique des écoulements, combinés à la disponibilité grandissante des données MNT issues de levés LIDAR. Il importe pour autant de bien cadrer les hypothèses attachées à ces différentes approches et la pertinence des conclusions que l'on peut tirer des résultats obtenus, en raison d'une part de la nature complexe des processus à l'œuvre dans la genèse du ruissellement et d'autre part des approximations faites dans la modélisation hydraulique du ruissellement.

L'article [1] de C. Cosandey (1990) illustre bien la richesse et la complexité des processus intervenant dans la transformation d'une lame d'eau brute précipitée en lame d'eau nette pour les bassins naturels ou peu anthropisés : leur modélisation doit tenir compte d'un grand nombre de facteurs physiques et sera différente selon l'échelle géographique du bassin versant considéré. Des progrès ont été accomplis depuis 1990 dans la connaissance et la modélisation de ces phénomènes de genèse mais au final, et pour les besoins pratiques d'ingénierie, on a généralement recours à des modèles globaux de production, dépendant d'un nombre limité de paramètres, que l'on cale sur la zone d'étude à l'aide de mesures de terrain pour s'assurer de la robustesse des calculs. Les modèles les plus utilisés sont basées sur la méthode SCS ou l'équation de Holtan pour les sols hortoniens.

Dans le cas de bassins versants fortement urbanisés le calcul de production du ruissellement est calé sur des lois classiques d'hydrologie urbaine : coefficient de ruissellement constant ou modèle intégrant des pertes initiales, tel que le modèle Horner.

Dans les secteurs périurbains les deux groupes de lois sont panachés selon les natures et les modes d'occupation des sols attachés aux différents bassins versants.

Une fois la pluie nette calculée il convient de la transformer en ruissellement ; plusieurs approches sont possibles :

1. Approche hydrologique : l'hydrogramme aval du bassin versant est calculé à l'aide de fonction de transfert dépendant généralement d'un ou deux paramètres au maximum. C'est le cas de la fonction de transfert de Socose, caractérisée par un temps de concentration ou de la méthode du réservoir linéaire associé au temps de réponse K. La méthode Socose s'applique aux bassins ruraux, elle a été calée sur de nombreux sites expérimentaux. La méthode du réservoir linéaire s'applique aux bassins versants urbains, le paramètre K est calculé par une équation dépendant des caractéristiques physiques du bassin. Les expressions pour K ont été proposées par plusieurs auteurs, dont Desbordes et Chocat. Citons également les méthodes globales de transformation pluie-brute-pluie nette-ruissellement basées sur des modèles à réservoirs tels que la famille de modèles GR4 développée par l'Irstea. Tous ces modèles sont d'une grande utilité pratique mais ils ne donnent aucune information sur les caractéristiques des écoulements à l'intérieur des bassins versants et donc des désordres qu'ils sont susceptibles de générer
2. Approche hydraulique 1D : dans cette approche le bassin versant est découpé en surfaces d'apport élémentaires dont les exutoires sont connectés aux thalwegs sillonnant le bassin versant. Les hydrogrammes à l'aval de chaque bassin élémentaire sont calculés à l'aide de modèles hydrologiques classiques couplant les deux fonctions de production et de ruissellement. Pour les bassins ruraux cette méthode permet de quantifier les vitesses le long des thalwegs et donc les risques d'érosion et coulées de boues le long de ces axes privilégiés d'écoulement. Elle nécessite en contrepartie un découpage fin du périmètre en bassins élémentaires et la caractérisation des paramètres hydrographiques de chaque parcelle, avec le risque de sortir des domaines d'application des lois hydrauliques utilisées. Dans les secteurs urbanisés la modélisation hydraulique 1D se révèle efficace lorsqu'elle est combinée avec l'approche hydrologique : les hydrogrammes en provenance des bassins versants amont sont calculés avec les lois hydrologiques classiques et servent de point d'entrée au modèle découlement le long des ruisseaux et thalwegs qui traversent le milieu généralement urbanisé de l'aval.
3. Approche hydraulique 2D : le domaine d'étude est entièrement maillé et la lame d'eau de la pluie nette est appliquée sur chaque maille. Les échanges entre les mailles sont régis par les lois classiques de l'hydraulique. Cette approche évite la lourdeur de l'analyse topographique de l'approche 1D pour la qualification et la paramétrage des bassins versants élémentaires mais elle présente un risque et un inconvénient : les lois de l'hydraulique doivent être adaptées au cas de lames d'eau ruisselées de très faible épaisseur (quelques millimètres hors des zones de thalwegs) car on encourt sinon le risque de fausser le calcul des temps de réponse, et donc des débits de pointe le long des axes privilégiés d'écoulement. Par ailleurs la bonne représentation des écoulements le long et à proximité des thalwegs nécessite de resserrer fortement le maillage, alourdissant ainsi le modèle. Les logiciels de calcul Mike Flood, PC-SWMM, Info Works ICM et Télémac2D fonctionnent selon ce principe. De plus les trois premiers logiciels cités intègrent une fonction de production à l'intérieur de chaque maille et permettent également des connecter des bassins extérieurs sur les mailles de bordure du domaine.
4. Approche hydraulique 1D-2D : les thalwegs sont modélisés comme des entités filaires, le reste du domaine est modélisé avec un maillage 2D dont les contours viennent s'appuyer sur les lignes de contraintes formées par les berges et talus des thalwegs. Cette approche requiert une analyse topographique préliminaire pour tracer les lignes de thalwegs, mais en contrepartie elle ne nécessite pas de resserrer le maillage pour modéliser les écoulements le long des thalwegs. Le logiciel

Hydra/Qgis [2] est conçu pour privilégier cette approche et permet ~~de plus~~ en sus d'intégrer les fonctionnalités de couplage hydrologiques décrites pour les logiciels ci-dessus.

Citons également :

- le logiciel STREAM [3] : modèle fin de calcul du ruissellement et de l'érosion sur un terrain agricole. L'exploitation de ce logiciel nécessite une bonne expertise dans le domaine agronomique et pédologique.
- méthode ExZEco mise au point par le CEREMA [4] : méthode simple, qui permet à partir de la topographie d'obtenir des emprises potentiellement inondables sur de petits bassins versants. L'exploitation de cette méthode est utile en amont de la modélisation pour dessiner les thalwegs et la structure topographique du bassin versant à modéliser.

Cette rapide revue permet d'apprécier la diversité des approches et des outils disponibles actuellement pour modéliser le ruissellement. Les approches hydrauliques 2D et 1D-2D sont appelées à se développer via les logiciels disponibles sur le marché, mais il ne faut pas perdre de vue les questionnements sur la précision ou même la pertinence des résultats fournis. Les algorithmes sous-jacents sont généralement peu décrits dans les manuel utilisateur des logiciels et on manque surtout de procédures de validation comprenant la confrontation des résultats de calcul avec les données de sites d'expérimentation instrumentés.

MODELISATION HYDRAULIQUE DU RUISSELLEMENT SUR UNE ZONE TEST

Pour illustrer les niveaux de précision inhérents à la modélisation hydraulique du ruissellement on a testé un bassin versant rural du plateau lorrain, délimité comme suit :

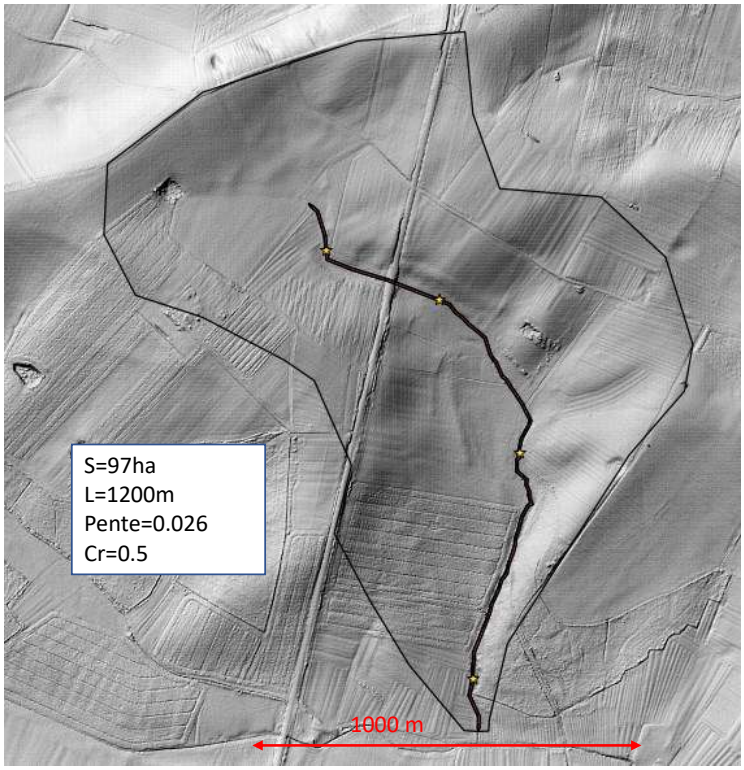


Figure 1 : définition du bassin versant témoin

Ce bassin comprend un fossé sec qui reçoit les apports ruisselés des pentes latérales, les concentre et les véhicule jusqu'à l'exutoire aval.

On souhaite tester le comportement du module de calcul hydraulique de ruissellement en calculant l'hydrogramme à l'exutoire aval selon deux approches :

- Un calcul hydrologique classique

- Une modélisation hydraulique explicite des écoulements à l'intérieur du bassin versant.

Dans cette modélisation on s'intéresse exclusivement au comportement du modèle après injection de la pluie nette. Dans cette étude la lame d'eau brute est transformée en lame d'eau nette en appliquant un coefficient de ruissellement constant dans chaque maille, égal à 0.3.

Trois pluies de forme triangulaire sont sélectionnées. Ce sont des pluies Montana de période de retour 10 ans et de durée : 2h, 4h et 8h respectivement. Les hyétogrammes correspondants sont reportés sur la figure suivante :

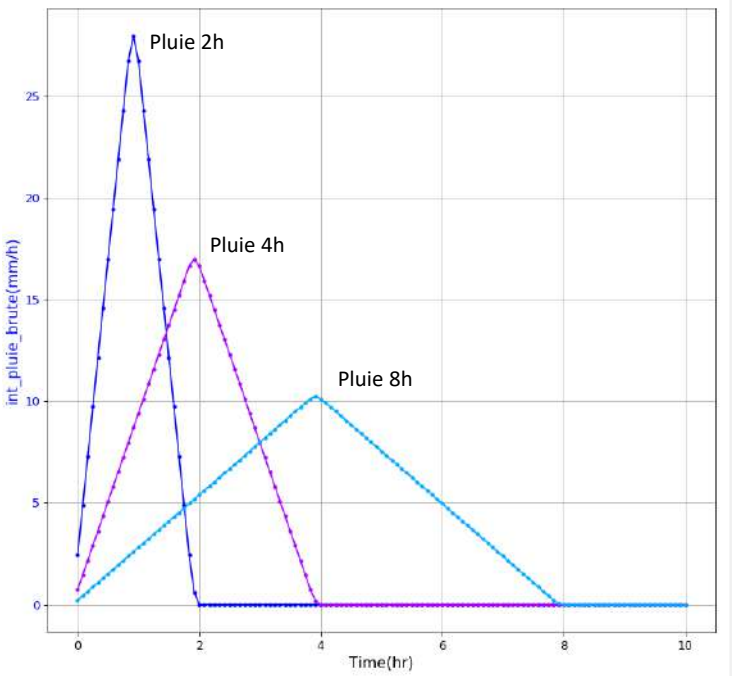


Figure 2 : définition des hyétogrammes des pluies de projet sélectionnées.

Calcul hydrologique

L'hydrogramme à l'exutoire aval est tout d'abord calculé en appliquant la fonction de transfert de Socose.

Le tableau suivant fournit le temps de concentration du bassin versant en appliquant les formules usuelles valides pour le type de bassin testé :

loi	Tc (mn)
Passini	40
Cemagref	41
ventura	46
Mockus	39

On retient la valeur moyenne de 40 mn pour les calculs hydrologiques.

Modélisation hydraulique – formulation de base

La modélisation est réalisée avec le logiciel Hydra/Qgis. Le fossé sec est schématisé comme un axe filaire. Le maillage 2D est généré avec le mailleur GMSH et vient s'appuyer sur les berges du thalweg. Ce maillage est resserré le long des lignes de contraintes schématisant les contours du thalweg. Les tailles moyennes des mailles sont de 50 m, elles descendent à 10m le long du thalweg. Les connexions entre le thalweg et les mailles 2D en bordure sont schématisées par des liaisons de type « overflow ».

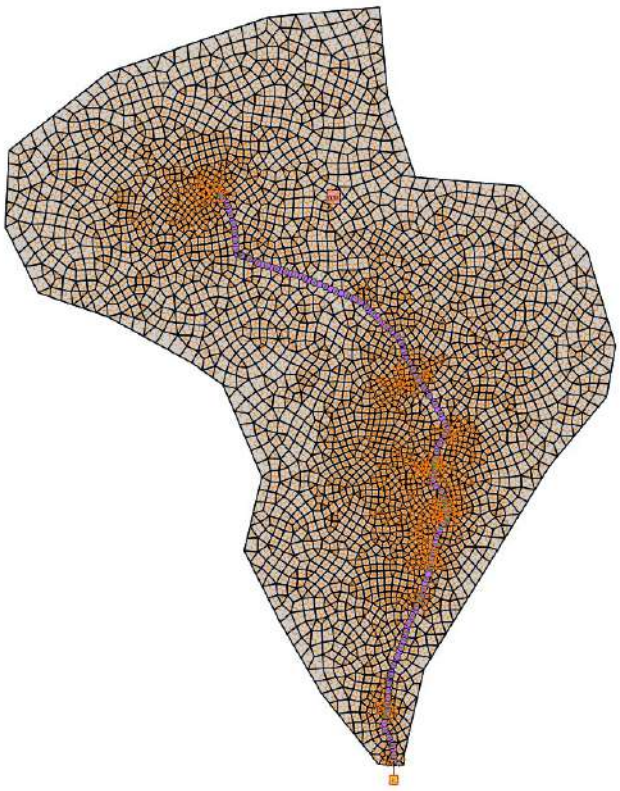


Figure 3 : maillage 1D-2D du bassin versant

Le maillage 1D-2D d'une modèle Hydra est très largement automatisé. Il est régi par les concepts de « lignes de contraintes » et de « coverage » décrits dans l'article [5] : les lignes de contraintes sont tracées tout d'abord à l'aide de polylignes qui délimitent des contours polygonaux. La surface de chaque contour est ensuite maillée automatiquement, la densité du maillage étant réglé par le pas d'espace de discrétisation imposé sur chaque poly ligne.

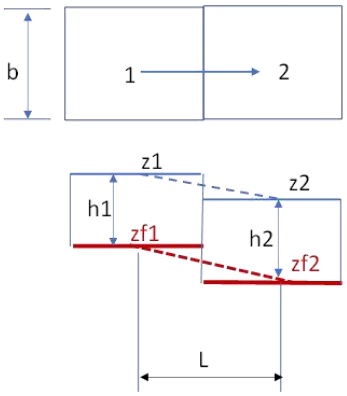
La modélisation hydraulique du ruissellement repose sur l'application des équations de St Venant simplifiées (termes convectifs négligés) et sur l'utilisation de la formule de Strickler pour la modélisation du frottement sur le fond.

A la différence des applications de modélisation hydraulique classique en 2D, le ruissellement met en œuvre des hauteurs d'écoulement très faibles, généralement inférieures à 10mm en dehors des axes des thalwegs. Pour cette classe de hauteurs le terme de frottement défini par la formule de Strickler peut se révéler inapproprié, en raison du fait que l'écoulement n'est pas régulier sur la surface de la maille de calcul, mais est contrôlé par les aspérités de terrain : celles-ci induisent des écoulements en une multitude de sillons, la hauteur d'eau dans chaque sillon pouvant dépassant 10 mm. Par conséquent la vitesse des écoulements et les débits d'échange entre deux mailles contigües peuvent être supérieurs aux valeurs données par l'application stricte de la formule de Strickler. La formulation classique tend en conséquence à surévaluer le terme de frottement, et donc fausser la dynamique du ruissellement.

Le débit d'échange entre deux casiers contigus est calculé comme suit en supposant $z_1 > z_2$:

$$q_{12} = cKb(h_{12})^{\frac{5}{3}}\sqrt{\frac{z_1 - z_2}{L}} \quad \text{où} \quad h_{12} = \frac{1}{2}(h_1 + h_2) \qquad (1)$$

Les variables sont définies dans le schéma ci-dessous :



K est le coefficient de Strickler. Le coefficient « c » est un paramètre de relaxation numérique qui est ajusté pour temporiser la variation temporelle du terme de pente hydraulique $\frac{z_1 - z_2}{L}$ dans le cas où z_2 est inférieur à zf_1. Compte tenu des faibles hauteurs de lame d'eau dans les mailles, la pente hydraulique s'apparente le plus souvent à la pente du fond. Toutefois, en cas d'influence aval, le débit d'échange est influencé par la cote z_2 et peut même s'inverser si z_2 devient supérieur à z_1.

En appliquant cet algorithme on obtient la comparaison suivante entre les deux approches pour l'hydrogramme aval :

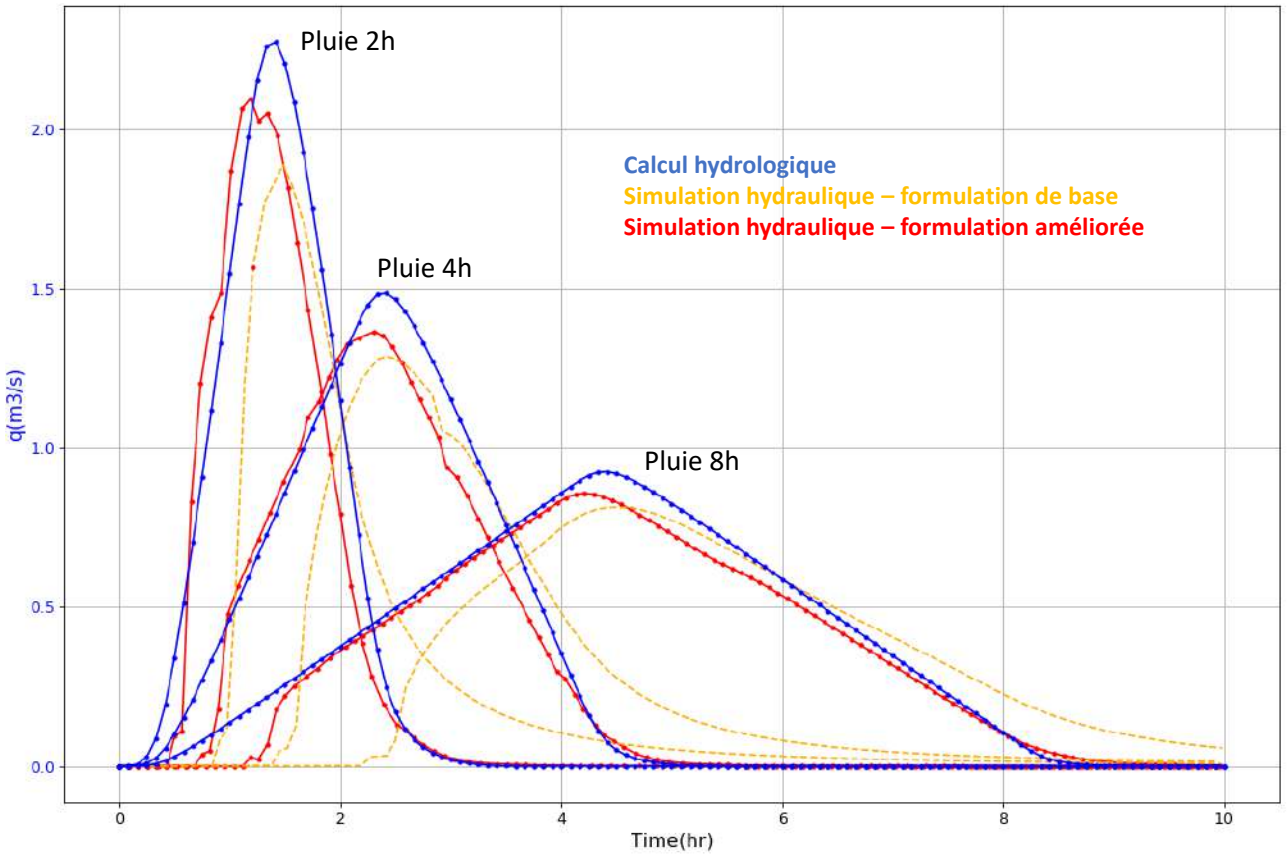


Figure 4 : hydrogrammes calculés à l'exutoire aval du bassin versant.

Les hydrogrammes en couleur bleue sont issus du calcul hydrologique. Les hydrogrammes en jaune pointillé résultent de la simulation hydraulique. Ces derniers exhibent tous un retard au démarrage de la crue, ce retard augmente avec la durée de l'épisode pluvieux. Il est compensé par un rattrapage dans la phase de montée de l'hydrogramme, les pointes de crues sont synchrones avec celles du calcul hydrologique. En fin de crue ces hydrogramme exhibent un ressuyage beaucoup plus important que ceux du calcul hydrologique.

Ces distorsions constatées pour la simulation hydraulique sont provoquées par une surestimation du frottement pour les faibles hauteurs d'eau, comme discuté plus haut. Afin de corriger ce biais une amélioration consiste à moduler la valeur du coefficient de Strickler pour les faibles lames d'eau :

L'équation (1) est modifiée comme suit :

$$q_{12} = cKbf(h_{12})\sqrt{\frac{z_1 - z_2}{L}} \quad \text{où} \quad h_{12} = \frac{1}{2}(h_1 + h_2) \qquad (2)$$

La fonction f est linéarisée comme suit pour les faibles hauteurs de lame d'eau h_{12} :

- si h12 > 0.02m : $f = (h_{12})^{\frac{5}{3}}$ (3)
- si h12 < 0.02m : $f = (h_{12})^{\frac{2}{3}}\, x\, (0.02)$

Cette correction permet d'augmenter significativement le débit d'échange entre deux casiers lorsque la lame d'eau devient inférieure à 2cm, ce qui est le cas usuel sur les zones de ruissellement en dehors des points de concentration. Par exemple pour une lame d'eau de 5mm le rapport de débit entre la formule de base Strickler et la formule simplifiée (4) est égal à :

$$\frac{(0.005)^{\frac{2}{3}} x\ (0.02)}{(0.005)^{\frac{5}{3}}} = 4.0$$

Le temps de réponse est diminué dans le rapport inverse de cette quantité.

La hauteur de coupure de 2cm a été ajustée pour coller au mieux avec les temps de réponse donnés avec les formules de calcul hydrologique.

En appliquant cette correction additionnelle on obtient les hydrogrammes en couleur rouge sur la figure 3 : la forme des courbes est en meilleur accord avec l'approche hydrologique ; les déformations des hydrogrammes en début et en fin de crue sont beaucoup moins marquées et les débits de pointe sont plus élevés, surtout pour les épisodes pluvieux de courte durée. On observe néanmoins avec cette correction un léger déphasage des pointes de crue avec celles du calcul hydrologique : cet écart traduit en fait un déficit de volume ruisselé qui est dû à des remplissages de mailles présentant localement des poches d'accumulation.

Des tests de sensibilité ont été menés sur différents paramètres du modèle hydraulique :

- un resserrement du maillage résorbe partiellement, mais pas totalement, le déficit de volume ruisselé aval constaté sur la figure 4,
- les hydrogrammes aval sont peu sensibles au choix du coefficient de Strickler K. La valeur sélectionnée par défaut est égale à 12. Une augmentation ou une diminution de cette valeur de 50% change très peu l'allure des hydrogrammes aval.
- La fonction de correction (3) pourrait être optimisée pour totalement supprimer le biais constaté en début de montée de crue. Ce travail reste à finaliser.

On a testé une pluie synthétique de période de retour 200 ans. La carte ci-après restitue les hauteurs d'eau et vitesses maximales atteintes au cours de cet épisodes, à l'échelle de représentation du maillage. Ces résultats peuvent être exploités pour préciser les risques de coulées de boue et d'érosion dans les zones à forte vitesses.

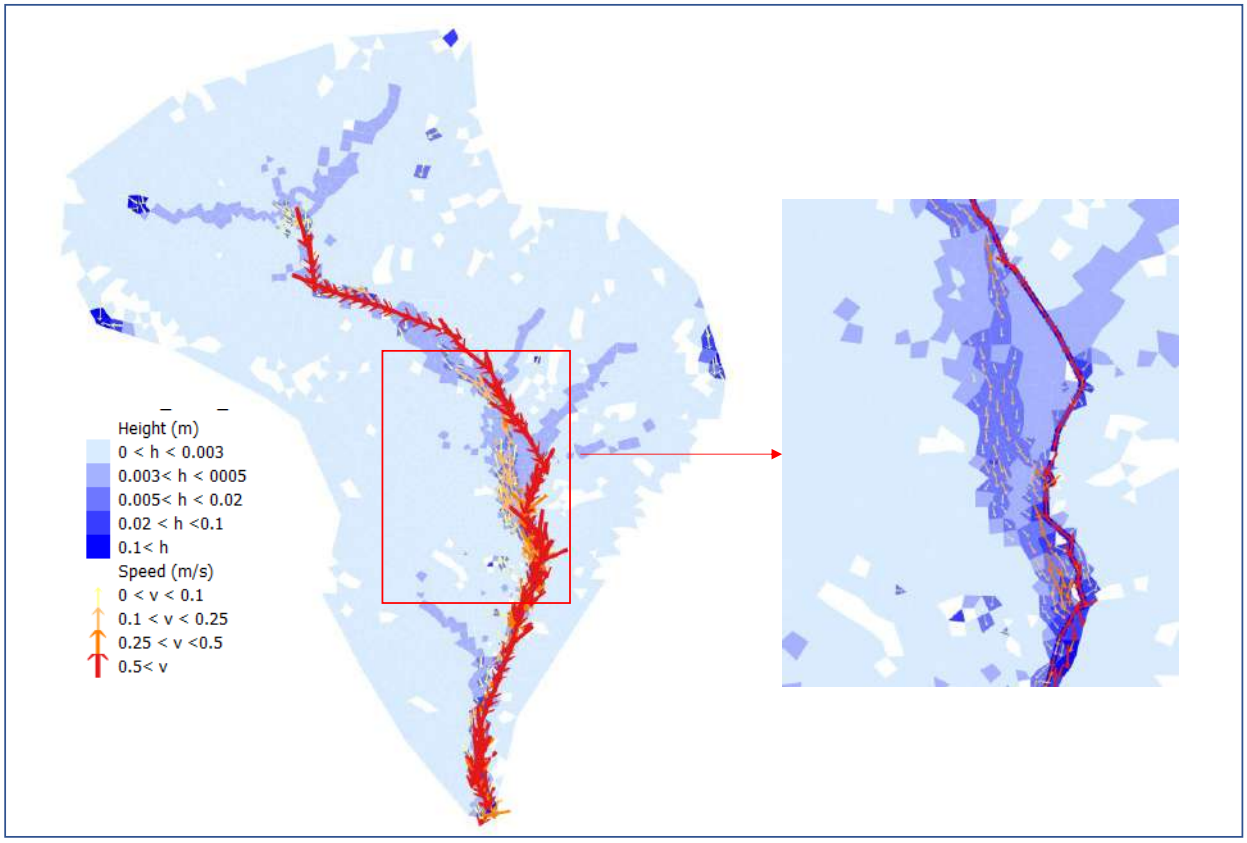


Figure 5 : carte des hauteurs et des vitesses maximales pour une pluies 200 ans.

PROGRAMME DE VALIDATION DE L'APPROCHE HYDRAULIQUE SUR DES BASSINS EXPERIMENTAUX

La formulation exposée ci-dessus ne constitue qu'une étape de la validation de l'approche hydraulique pour fiabiliser la modélisation du ruissellement sur des petits bassins versants ruraux :

- il reste à élargir le panel de tests sur des configurations de bassins versants contrastés en forme géométrique et en pente et avec des pluies de durées diverses.
- Il est surtout important de confronter les résultats des simulations avec des données de terrains sur des bassins versants expérimentaux, en intégrant le calage de la fonction de production de la pluie nette.

Il était initialement prévu, dans le cadre d'élaboration de cet article, d'exploiter les données du bassin expérimental de Bourville depuis 1995 (Seine maritime), instrumenté par l'AREAS [6]. Ce travail n'a pu aboutir dans les temps impartis. Il est néanmoins prévu de le réaliser dans les prochains mois en collaboration avec l'AREAS.

Le bassin versant de Bourville (BRVL) couvre 10,45 km² à l'amont du bassin versant du Dun, petit fleuve côtier du pays de Caux, en Normandie. Il ne présente pas d'écoulement permanent. L'hydrométrie y est suivie depuis 1995. Le suivi a été renforcé en 2007 pour la qualité des eaux, et une station hydrométrique a été construite sur un sous-bassin versant appelée FDTL en 2011.

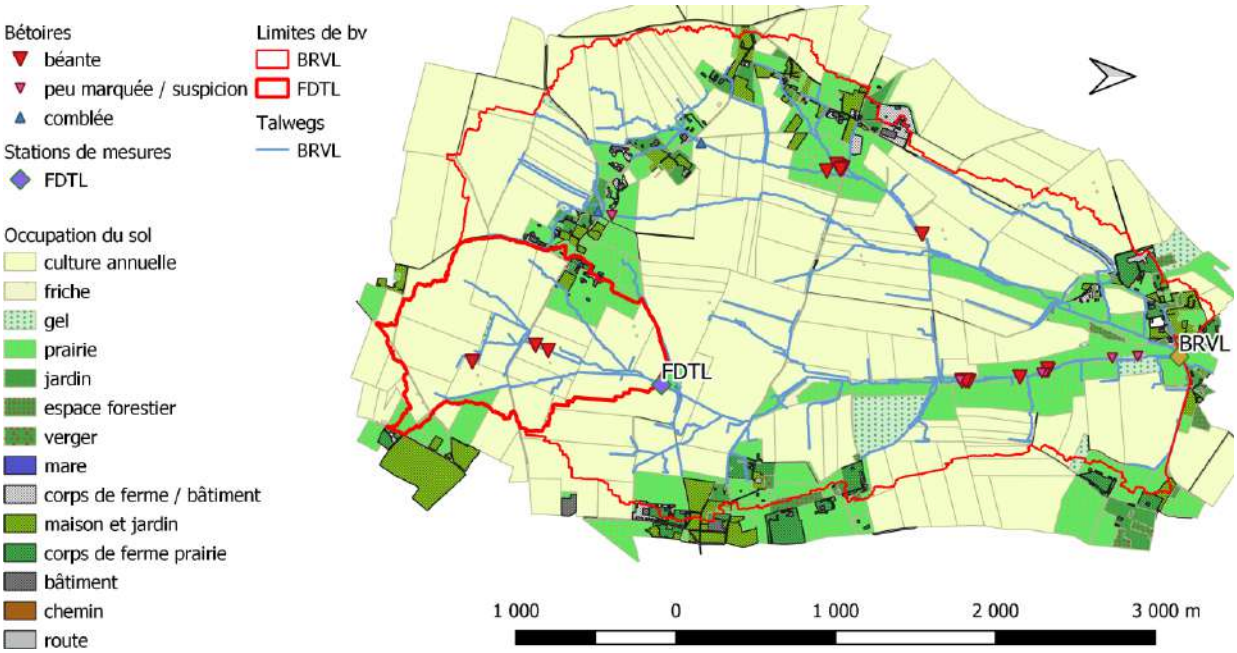


Figure 6 : bassin versant expérimental de Bouville (Seine Maritime) – source AREAS

L'AREAS a réalisé un important travail hydrologique consistant à caler le paramètre CN (curve number) de la méthode SCS sur les mesures réalisées aux deux stations hydrométriques FDTL et BRVL localisées ci-dessus.

Il est également prévu d'exploiter les données de terrain du site expérimental du Strengbach de l'OHGE (université de Strasbourg). Ce site est localisé dans le massif vosgien entre 800 et 1100m d'altitude où sont suivies en continues les données météorologiques et hydrologiques depuis 1986.

Le travail de développement visé consiste à modéliser ces bassins versants à l'aide de schématisations 1D-2D sous le logiciel Hydra/Qgis et à caler ces modèles sur la chronique longue durée. Les résultats obtenus permettront de clarifier le niveau de précision apportée par la modélisation hydraulique détaillée, ainsi que les conclusions concernant l'application de cette approche à des typologies variées des bassins versants ruraux.

APPLICATION DE L'APPROCHE HYDRAULIQUE AU MILIEU URBAIN

La principale difficulté de la modélisation du ruissellement en milieu urbain tient au fait que ce milieu est très fortement anthropisé : les écoulements sont contraints par le bâti, les voieries jouant souvent le rôle de thalweg d'écoulement en cas de débordement sur chaussée. Par ailleurs les écoulements de surface interfèrent avec le réseau d'assainissement sous-jacent via les échanges par les bouches avaloirs.

Une modélisation réaliste du ruissellement à l'échelle d'une agglomération nécessite d'intégrer ces différents facteurs sans pour autant alourdir indument la taille du modèle et son exploitation. Le logiciel Hydra/Qgis a été conçu pour traiter toutes ces interactions : il permet de modéliser sept différents schémas de modélisation interconnectés à l'intérieur d'un même modèle, via des liaisons hydrauliques de différents types selon la nature physique de la connexion.

Le domaine « rue-ilot » est particulièrement adapté à la modélisation du ruissellement dans les centres urbains : il comprend un assemblage de rues schématisées en tronçons filaires et d'îlots urbains représentés par des casiers hydrauliques de faible porosité. Pour les modélisations locales très détaillées une rue peut également être schématisée par un maillage 2D.

Le schéma suivant illustre la diversité des interactions entre les différents domaines qui peuvent être schématisés avec Hydra/Qgis dans le cas d'un milieu urbain :

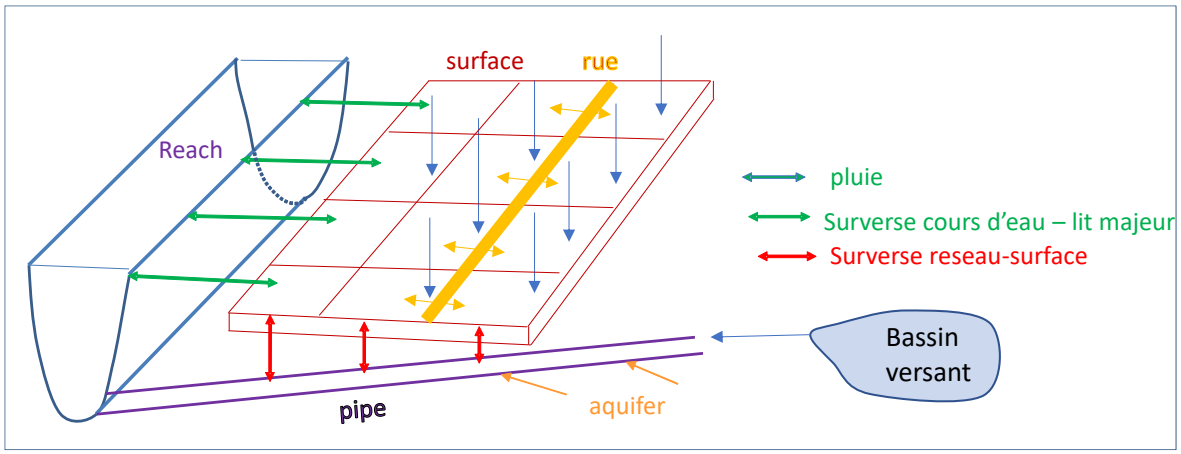


Figure 7 : schéma des interactions disponibles au sein d'un même modèle avec Hydra/Qgis.

Le choix de l'agencement optimal est sélectionné par le modélisateur en fonction de l'échelle géographique de son étude, des objectifs visés et des contraintes d'exploitation du modèle.

En pratique et dans le cas de gros modèles, le système à modéliser est décomposé en sous modèles distincts, par exemple un sous modèle réseau et un sous modèle de surface. Les sous-modèles sont ensuite combinés en un modèle global. Les liaisons inter-modèles sont générées automatiquement par le logiciel. Un exemple de couplage est donné sur la figure suivante :

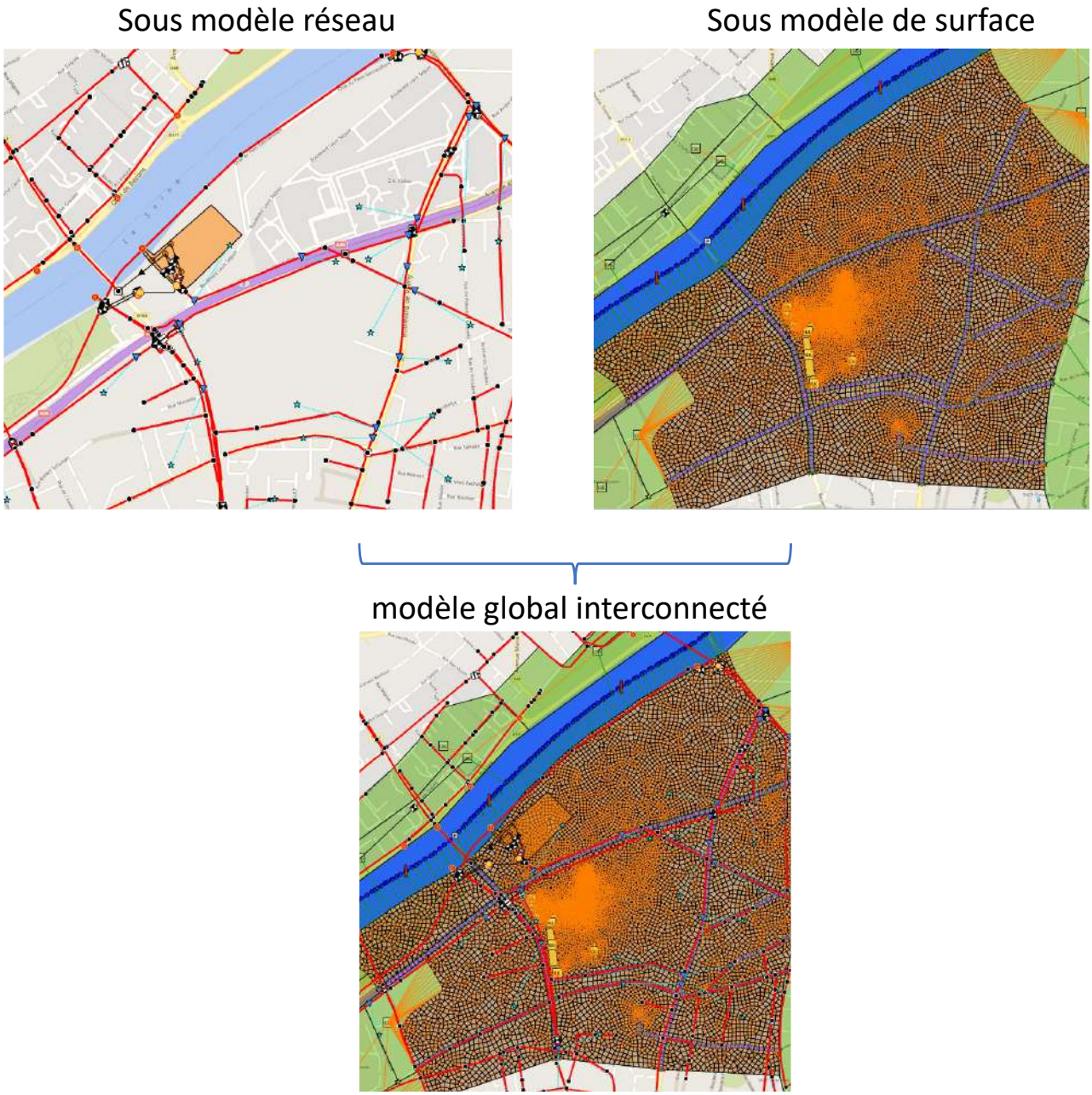


Figure 8 : exemple de couplage entre un modèle de réseau et un modèle de surface avec Hydra/Qgis

Dans cette application, les deux sous-modèles de réseau et de surface sont développés de façon indépendante par deux équipes distinctes. Ils sont ensuite assemblés dans un même projet. Les liaisons réseau-surface sont générées automatiquement via les regards d'accès et les bouches avaloirs, les deux modèles sont parfaitement superposés. Pour des raisons de lisibilité, ils sont stockés dans des couches différentes, activées ou désactivées selon les besoins d'analyse du modélisateur.

La référence [7] décrit une application à grande échelle de ce type de couplage : il s'agit d'un modèle couvrant la totalité de l'agglomération parisienne dans le but d'analyser la vulnérabilité de la structure d'assainissement à une crue majeure de la Seine. Le modèle global est constitué de 9 sous modèles interconnectés : 4 sous modèles de réseau et 5 sous modèles de surface. Le nombre total de nœuds de calcul a pu être limité à 100 000 en tirant parti des possibilités de schématisation offertes par Hydra/Qgis. Le temps de calcul pour simuler une crue de la Seine sur 30 jours est d'environ 4h avec un ordinateur classique de bureau, ce qui reste tout à fait raisonnable.

CONCLUSIONS

La puissance de calcul offerte par les ordinateurs ouvre des perspectives ambitieuses pour les modélisations centrées sur les problèmes de ruissellement. Les outils de calculs ne doivent pas cependant occulter les approximations faites dans les formulations internes de chaque logiciel et les conséquences sur la représentativité des résultats fournis.

Il apparait prioritaire d'engager un programme de validation des logiciels disponibles sur le marché en confrontant les résultats de calcul à des données expérimentales de terrain, afin de préciser les limites de validité des modélisations et d'exercer un jugement sur les conclusions tirées des calculs.

Le modélisateur doit garder à l'esprit les échelles de représentation des phénomènes et l'adéquation du modèle à l'échelle considérée : la modélisation du ruissellent sur un bassin versant rural de quelques dizaines d'hectares a nécessité une formulation adaptée des équations classiques de l'hydraulique pour restituer la dynamique du ruissellement. A l'inverse, la schématisation du ruissellement à grande échelle peut mettre en œuvre des formulations plus classiques car les approximations de calcul n'entachent pas de façon significative les bilans obtenus à l'échelle globale de la zone d'étude.

En fin de compte, c'est bien l'expertise de l'ingénieur qui compte le plus. Elle est nécessaire pour juger de la pertinence des choix de modélisation en fonction de l'échelle géographique et de l'objectif de modélisation visé. L'ingénieur doit pour cela posséder une vision critique des qualités et des limitations du logiciel utilisé de façon à être en mesure de l'exploiter en pleine connaissance de cause.

REFERENCES

[1] C. Cosandey (1990) : *L'origine des crues dans les bassins versants élémentaires : du ruissellement sur les versants à l'écoulement de crue*. Annales de géographie N°556 novembre 1990.

[2] logiciel Hydra/Qgis : présentation sur le site http://hydra-software.net/

[3] modèle STREAM – fiche de présentation INRA (consultable sur internet)

[4] Ruissellement sur l'Arc méditerranéen. Application de la méthode ExZEco. CEREMA (consultable sur internet)

[5] C Duran : *development of a hydraulic modelling platform within an open source environment.t.* Congrès SimHydro 2017.

[6] JB Richet : *quantification des ruissellements sur les petits bassins limoneux et karstiques de Normandie*. Colloque SHF : « ruissellement, Lyon novembre 2020 »

[7] Th Lepelletier : *Coupling methods for large scale hydraulic modelling in for urban areas.* . Congrès SimHydro 2019.

La modélisation du ruissellement pluvial : Aléa CCR à 25 mètres de résolution (Onfroy *et al.*)

La modélisation du ruissellement pluvial : Aléa CCR à 25 mètres de résolution

Thomas ONFROY [1], David MONCOULON [1]

[1] Caisse Centrale de Réassurance – 157 boulevard Hausmann – tonfroy@ccr.fr, dmoncoulon@ccr.fr

La modélisation des inondations est au cœur des activités R&D de CCR depuis plus dix ans. Cette expérience a démontré qu'une part significative des sinistres consécutifs inondations n'était pas uniquement due aux débordements se produisant dans le lit majeur des cours d'eau mais à imputer au ruissellement pluvial. CCR dispose d'un modèle d'estimation des impacts économiques, mis à jour régulièrement et utilisé pour estimer les dommages aux biens assurés lors de la survenance d'inondations en France. Ce modèle opérationnel est calibré sur une sélection d'événements historiques survenus en France depuis 1999. Pour la simulation des événements déterministes, les données de précipitation et d'évapotranspiration sont acquises depuis la Publithèque de Météo-France. Pour la modélisation probabiliste, les événements sont tirés d'un catalogue d'un millier d'événements fictifs répartis sur 400 années de précipitations du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. D'un point de vue hydrologique, le modèle de ruissellement simule les écoulements des eaux de surface en tout point du territoire lorsque l'intensité des précipitations dépasse l'infiltration et la capacité de rétention en eau des sols, en prenant en compte les différents modes d'occupation du sol. Cela est effectué dans tous les sous bassins versants hydrologiques et pour tous les cours d'eau non jaugés. Les écoulements simulés en surface sont distribués sur les pentes d'un Modèle Numérique de Terrain à 25 mètres de résolution. Le modèle d'aléa inondation, incluant également la modélisation du débordement et des hauteurs d'eau au sein du lit majeur des principaux cours d'eau, permet d'effectuer une estimation du coût des événements et de mesurer l'exposition de l'État, de CCR et des sociétés d'assurance au risque d'inondation. Enfin, le modèle est utilisé dans le cadre d'études portant sur l'impact du changement climatique, à l'exemple de l'étude réalisée en partenariat avec Météo-France en 2018 pour la France métropolitaine et sur les Antilles et la Réunion en 2019.Des travaux restent à mener pour modéliser les inondations dues à la saturation du réseau pluvial et aux remontées des réseaux d'assainissements se produisant lors d'intempéries intenses notamment dans les secteurs les plus imperméabilisés.

Mots-clefs : ruissellement ; modélisation ; précipitations ; événements ;

Rain runoff modelling: CCR hazard at 25 meters resolution

Flood modelling is at the heart of CCR R&D activities since more than ten years. The CCR experience has demonstrated that a significant share of flood claims are not only due to overflowing in the rivers floodplains but had to be allocated to rain-induced runoff. CCR masters a model to estimate economic impacts, regularly updated and used to estimate flood damage for events occurring in France. This operational model is calibrated on historical flood events that occurred in France since 1999. For the deterministic events simulation, the precipitations and evapotranspiration data are acquired on Météo-France's Publithèque platform. For the probabilistic modelling, the hazard outputs are gathered from a thousand fictive rainfall events catalog. Those events are disseminated on 400 years of precipitations of the Météo-France ARPEGE-Climat model. From a hydrological point of view, the runoff model allows to simulate surface water flows at any point of the territory where the precipitations intensity exceeds the infiltration and the water retention capacity of the soils, taking into account the different land cover types. This process is done for all the hydrological sub watersheds, where the simulated water surface flows are distributed on the slopes of a 25 meters Digital Terrain Model, for all the ungauged rivers. The flood hazard model, that include as well overflowing and water levels modelling on the major rivers floodplain, allows to estimate the major flood events losses for CCR, all the insurance societies (clients of CCR) and to measure the French State exposure at flood risk. Finally, the model is used in climate change impact studies, for instance the study carried out in 2018 in partnership with Météo-France for mainland France and for Out seas territories (Antilles and La Réunion) in 2019. Work is remaining for modelling the floods related to the pluvial network saturation the sanitation systems upwelling that can be triggered during intense rainfall events, notably in the most impervious urban areas.

Key words: runoff; modelling; precipitations; events;

INTRODUCTION

La modélisation des inondations par débordement et des phénomènes de ruissellement est au cœur des activités R&D de CCR depuis plus de dix ans. Un modèle d'aléa inondation opérationnel permet de caractériser le péril et de simuler les événements survenus. Ce modèle, régulièrement mis à jour, est calibré sur une sélection d'événements historiques survenus en France depuis 1999. Pour les événements non survenus mais néanmoins probables, un modèle probabiliste reposant sur un catalogue d'un millier d'événements fictifs a été développé afin de mesurer l'exposition financière de l'État, de CCR et des assureurs aux inondations. De par les nombreux événements simulés depuis la mise en place du modèle et grâce à une mise à jour régulière de ce dernier, CCR a acquis une expertise dans la simulation des dommages liés aux inondations. Cette connaissance de l'impact financier des risques hydrologiques a permis de démontrer qu'une part significative de la sinistralité due aux inondations n'est pas uniquement liée au débordement des cours d'eau mais également liée aux phénomènes de ruissellement pluvial [Moncoulon et al. 2014].

En 2019 et 2020, le modèle inondation été utilisé à plusieurs reprises dans le cadre de la veille événementielle inondation, notamment lors d'événements survenus en 2019 entre les mois d'octobre, novembre et décembre en Occitanie, dans le Sud-Est et dans le Sud-Ouest de la France. En 2020, les inondations survenues dans l'Aude et les Pyrénées Orientales ont également été simulées. Le modèle à est régulièrement mis en application en cas d'études sur l'exposition au risque des assureurs, au cours de projets de recherche tels que l'ANR (PICS) et H2020 (NAIAD). Afin de renforcer les mesures de prévention et la connaissance du risque de ruissellement, des études spécifiques sont menés, comme l'étude réalisée sur le bassin versant de la Bièvre en partenariat avec l'Institut Paris Région ou pour le compte de collectivités territoriales telles que l'EPTB Seine Grands Lacs et l'Entente Oise-Aisne.

METHODOLOGIE ADOPTEE POUR LA MODELISATION DE L'ALEA

Le modèle d'aléa ruissellement mis au point permet de simuler les écoulements des eaux de surface en tout point du territoire lorsque l'intensité des précipitations dépasse l'infiltration et la capacité de rétention en eau des sols. Cela est effectué pour tous les cours d'eau non jaugés de France et les sous bassins versants correspondants, crées à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT de l'IGN à 25 mètres de résolution) et de traitements géomatiques dédiés à l'hydrologie tels que les outils ArcGIS ArcHydro [Zhong, 2014].

Lorsque la pluie efficace est mesurée par a fonction d'infiltration des eaux de pluie implémentée dans le modèle, les écoulements de surface sont distribués sur les pentes du MNT et en fonction des différentes directions empruntées par les écoulements préférentiels. Ce routage des débits au sein de chaque sous bassin est facilité par un algorithme de direction des flux intégré dans le modèle en addition du MNT. Outre les données météorologiques et topographiques, des données d'entrée telles que les différents modes d'occupation du sol alimentent le modèle de ruissellement (Figure1).

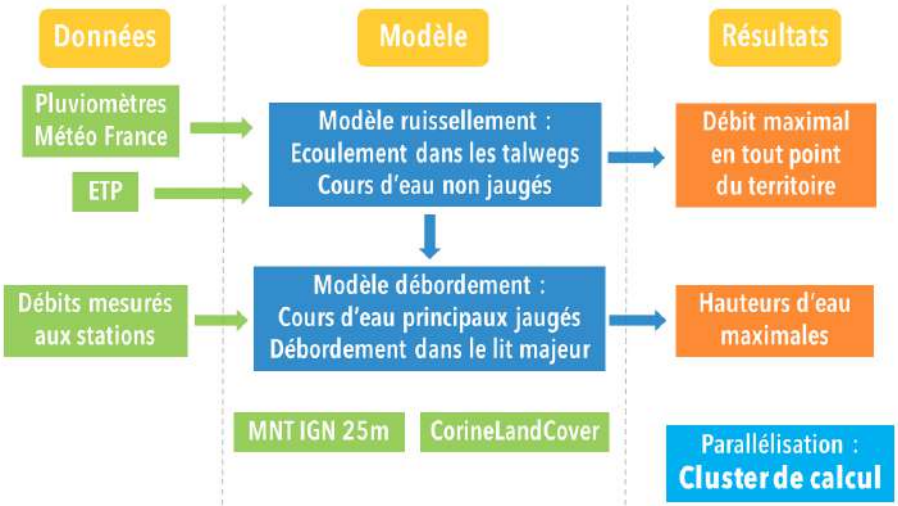


Figure 1 : Schéma fonctionnel du modèle inondation (CCR, 2019)

Pour la simulation des événements réels, les précipitations sont acquises depuis la Publithèque de Météo-France pour toutes les stations pluviométriques de la région étudiée en fonction des données disponibles au lendemain de l'événement (pluies journalières, horaires et Evapotranspiration Potentielle). Quant au modèle de ruissellement probabiliste, celui-ci est constitué d'un catalogue d'un millier d'événements fictifs simulés à partir de 400 années de précipitations issues du modèle climatique ARPEGE-Climat de Météo-France [Moncoulon, Veysseire, 2018].

Les modes d'occupation du sol de Corine Land Cover à 250 mètres de résolution sont utilisés dans la production de l'aléa puisque ces derniers permettent d'appliquer un coefficient de Manning-Strickler, en renseignant la variation des valeurs de rugosité en surface, en fonction des différents types d'occupation du sol. Ces valeurs de rugosité de surface sont alors affectées pour chaque type d'occupation du sol [Moncoulon, 2014)]. Comme évoqué précédemment, les pluies efficaces sont distinguées des pluies infiltrées en fonction des types d'occupation du sol de Corine Land Cover dans la fonction d'infiltration implémentée dans le modèle.

Au-delà de son utilisation lors de la survenance d'événements, le modèle de ruissellement peut-être adapté pour la réalisation d'études et d'analyses d'exposition aux risques hydrologiques à échelles plus fines, sur le territoire d'une commune ou de petits bassins versants, avec une utilisation de données d'entrée (précipitations , MNT, occupation du sol, …) plus précises lorsque celles-ci sont disponibles.

Cela à été le cas pour l'étude expérimentale sur le risque inondation dans le bassin versant de la Bièvre (Val-de-Marne et Hauts-de-Seine) menée en partenariat avec l'Institut Paris Région (IPR). Dans le cadre de projet, des données d'occupation du sol détaillées de l'Institut Paris Région (le MOS : Mode d'Occupation des Sols) et des données sur les réseaux d'assainissement (tracé du réseau et dimensionnement des conduites d'évacuation des eaux pluviales) fournies par la DSEA 94 (Direction des Services de l'Environnement et de l'Assainissement du Val-de-Marne) ont été intégrées dans le modèle inondation et utilisées pour simuler l'aléa sur le bassin versant de la Bièvre [Onfroy et al. 2019].

Le modèle pluie-débits de CCR est également valorisé dans le cadre de projets de recherche appliquée, à l'exemple de l'étude portant sur l'impact du changement climatique en France réalisée en 2018 pour la France métropolitaine et en 2019 sur les DOM en partenariat avec Météo-France et la société Risk Weather Tech [CCR, 2019]. A l'occasion de cette étude, le modèle de ruissellement a été transposé aux Outre-Mer pour pouvoir être utilisé d'une manière analogue à son application sur le territoire métropolitain. De nouvelles données d'entrée ont été intégrées incluant le MNT à 25 mètres de résolution de l'IGN disponible sur les territoires ultramarins, un découpage des îles en sous bassins versants ainsi que des données d'occupation occupation du sol. Des évènements tirés d'un catalogue de précipitations fictives ont été simulés, permettant de cartographier l'intensité des débits du ruissellement à différentes périodes de retour sur les Antilles françaises (Martinique, Guadeloupe, Saint-Martin et Saint Barthélemy) et pour l'île de la Réunion (figure 2).

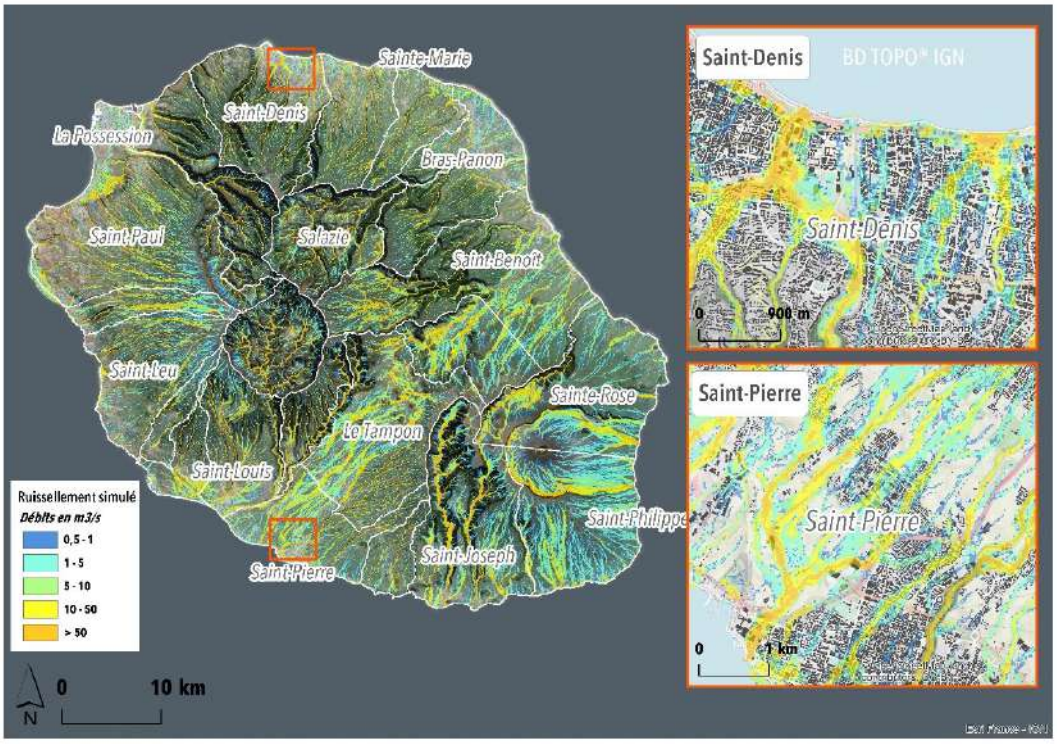


Figure 2 – Débits de ruissellement modélisés pour un événement fictifs sur l'île de la Réunion (CCR, 2019)

RESULTATS ET APPLICATIONS DU MODELE D'ALEA RUISSELLEMENT

Le modèle de ruissellement permet ainsi de simuler les écoulements des eaux de surface pour chaque sous bassin versant en tout point du territoire en cas de survenance d'un événement pluvieux et pour la simulation d'un millier d'événements fictifs pour l'alimentation d'un catalogue d'aléa probabiliste.

Lorsqu'un événement pluvieux intense se produit sur un territoire donné, le modèle de ruissellement reproduit les écoulements en surface à partir des données de précipitation avec en sortie, pour chaque maille du MNT et pour tous les cours d'eau non jaugés, une valeur correspondant au débit maximal atteint au cours

de l'événement. Le routage des débits implémenté dans le modèle permet aux écoulements distribués sur les pentes du MNT de converger en aval, vers les talwegs.

Ces résultats opérationnels issus du suivi des événements climatiques sont présentés sous forme de cartographie de l'aléa modélisé à 25 mètres de résolution. A l'exemple du résultat de la simulation des crues torrentielles survenues en décembre 2019 dans le Sud-Ouest de la France dans la commune de Bielle (Pyrénées-Atlantiques) (Figure 3). Afin de fournir sous 5 à 7 jours une estimation des dommages aux biens assurés aux assureurs et à l'Etat, cet aléa est validé en fonction des remontées de la presse et du terrain, puis croisé avec les données de vulnérabilité disponibles dans les bases de données de CCR. Il s'agit notamment de données relatives aux risques de particuliers et de professionnels géo localisés fournies par les assureurs et régulièrement mis à jour par CCR.

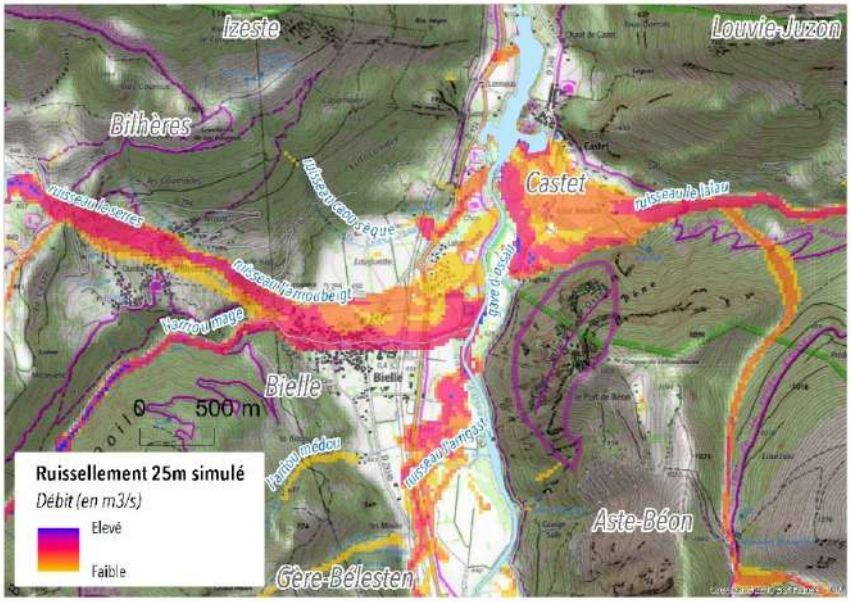


Figure 3 - Crue torrentielle survenue en décembre 2019 à Bielle - Pyrénées Atlantiques (CCR, 2019)

En ce qui concerne la simulation probabiliste, le catalogue d'événements produit une distribution du débit maximum de ruissellement pour chaque maille de 25 mètres sur l'ensemble du pays pour cinq périodes de retour de l'aléa (de inférieure à 10 ans jusqu'à supérieure à 200 ans). L'intensité de l'aléa est ainsi estimée en tout point du territoire pour une période de retour donnée. Du fait de la fonction d'infiltration et de la prise en compte des modes d'occupation du sol, l'étalement des phénomènes de ruissellement pluvial apparaît plus prononcé sur les secteurs imperméabilises que dans les zones végétalisées (Figure 4).

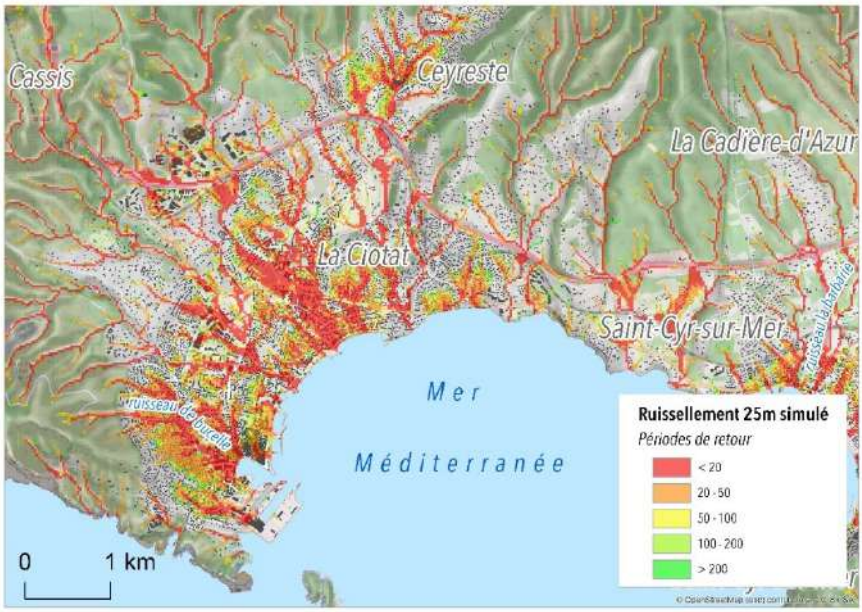
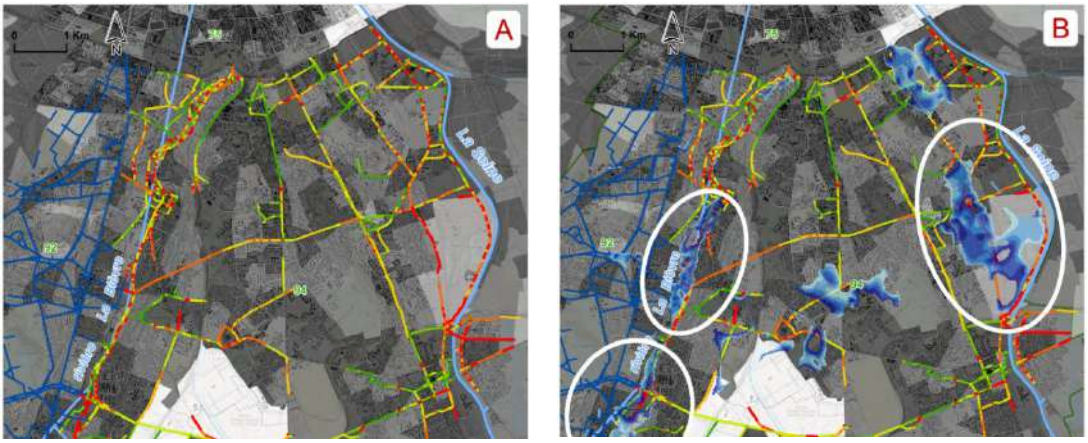


Figure 4 - Aléa ruissellement probabiliste dans le secteur de la Ciotat - Bouches-Du-Rhône (CCR, 2019)

L'étude réalisée sur le bassin versant de la Bièvre en partenariat avec l'Institut Paris Région en 2018, reposant sur le croisement de données d'entrée à haute résolution telles que le MOS (Mode d'Occupation des Sols) et les données relatives aux réseaux d'assainissement du Val de Marne et des Hauts-de-Seine, a permis d'élaborer un indicateur d'exposition infra-communal au risques hydrologiques combinant risque d'inondation par ruissellement pluvial et risque d'inondation par saturation et remontées du réseau d'évacuation des eaux pluviales. La localisation précise des réseaux d'assainissement urbains, lorsque celle-ci est connue, permet de caractériser le risque de remontée de ces réseaux en cas de saturation de ces derniers en fonction de la pente, de la section mouillée, du rayon hydraulique et du coefficient de rugosité de chaque conduite du réseau. Ces attributs, lorsqu'ils sont renseignés, permettent de calculer un débit à partir duquel la conduite sera saturée et produira, le cas échéant, un débordement par résurgence du réseau. Ainsi, une cartographie des conduites avec un indice de saturation des ouvrages a été réalisée dans le cadre de l'étude sur la Bièvre (figure 5).



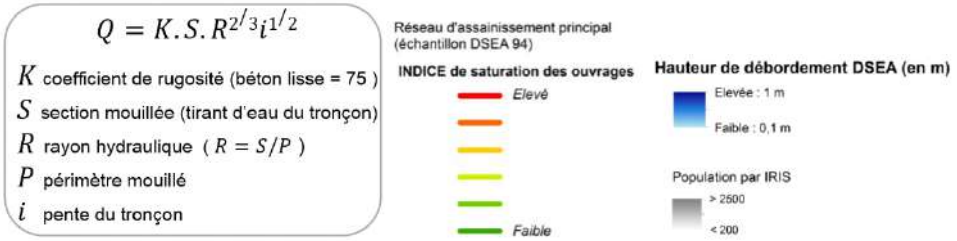


Figure 5 - Débit à saturation calculé sur le réseau de la DSEA 94 (A) et débordement des réseaux en juillet 2001 (B) (CCR - 2018)

Les ouvrages dont l'indice de saturation est élevé (A) correspondent généralement aux zones de débordement par résurgence du réseau relevées suite à l'orage de juillet 2001 (B).

Sur la base de ces travaux, il a été choisi de considérer tout secteur situé dans un rayon de 150 m des principaux réseaux d'assainissement comme zone exposé aux remontée des réseaux. L'indicateur de l'indicateur qualitatif de l'étude sur la bassin versant de la Bièvre a été établi grâce à la superposition de deux facteurs constitutifs des risques hydrologiques existants dans le bassin versant de la Bièvre : la présence de réseaux d'assainissement (des zones tampon de 150 m ont été constituées autour du réseau d'assainissement principal DSEA du 94 et du réseau Open Data du 92) et l'aléa ruissellement causé par l'orage de juillet 2001 simulé à partir des pluies de l'événement, du MOS de l'IAU et du MNT à 25m de l'IGN. Ces deux éléments ont été superposés sous SIG via une analyse spatiale de superposition. Cela a permis de produire l'indicateur d'exposition aux risques hydrologiques dans la partie la plus urbanisée du bassin. Le résultat est représenté sous forme de mailles à une résolution de 250m (figure 6). Pour chaque maille de 250m, la surface occupée par les deux éléments a été calculée et un indicateur d'exposition (de 0 à 100 % d'exposition) a été établi. A titre d'exemple, une maille considérée comme exposée à 100 % aux risques hydrologiques - en violet - est entièrement occupée par la superposition de l'aléa ruissellement et des réseaux d'assainissement. Les deux éléments occupent donc chacun la totalité de la maille : cela équivaut à un indicateur d'exposition au « score » maximal de 100 %. Un score d'exposition de 60 % correspond à une maille dont la surface est occupée à la fois par la totalité de l'un des éléments et par 1/10ème du second élément. La surface d'une maille à exposition élevée (en rouge) est remplie en totalité par un seul des deux éléments ou une proportion variable des deux éléments. Une maille considérée comme modérément exposée (en orange) est à moitié occupée par un seul des deux éléments ou une proportion variable des deux éléments. Enfin, une maille à exposition faible (en jaune) est remplie sur le quart de sa surface par un seul des deux éléments ou une proportion variable de ces derniers

L'indicateur final a été produit à 250 mètres de résolution et permet de localiser les zones les plus exposées à ces risques hydrologiques au sein des communes, situées au sud de Paris en amont de la confluence entre la Bièvre et la Seine (Figure 6). La validation a été effectuée pour chaque maille avec les données de sinistralité d'événements inondations historiques, notamment les sinistres géo localisés de l'orage intense survenu en juillet 2001 sur l'agglomération parisienne. La localisation des sinistres est cohérente avec l'indicateur proposé. En effet, plus de 70 % des sinistres ont été été comptés dans la classe identifiée en risque « Elevé » et « Très Elevé ».

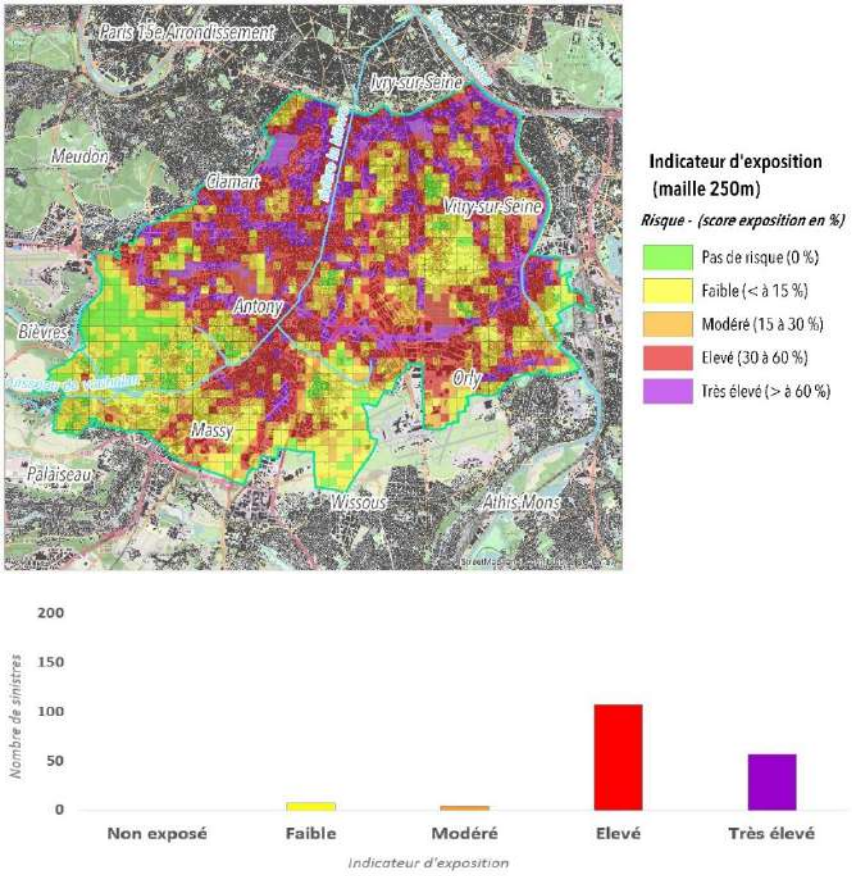


Figure 6 - Indicateur d'exposition aux risques hydrologiques agrégé à la maille 250m et sinistres de l'orage de juillet 2001 comptés dans chaque classe d'exposition (Bassin versant de la Bièvre, Val-de-Marne)

Enfin, les résultats de l'aléa ruissellement probabiliste, sont partagés sous forme de classes d'intensité des débits simulés pour chaque période de retour sont fournis aux assureurs ou en cas de demandes spécifiques de collectivités locales telles que des EPTB, afin qu'ils puissent bénéficier d'une cartographie de l'exposition de leurs risques ou de leur territoires au risque de ruissellement pluvial. Les pertes moyennes annuelles modélisées pour le péril inondation (phénomènes de débordement et de ruissellement) au titre du régime Cat Nat et agrégées à l'échelle communale sont également transmises aux assureurs et aux collectivités en cas de demande.

CONCLUSIONS

Le modèle inondation de CCR permet de simuler les événements survenus et non survenus mais néanmoins probables afin d'estimer le montant des dommages assurantiels dus aux inondations par débordement et ruissellement. Le modèle est utilisé de façon opérationnelle lors de la survenance d'une inondation sur un territoire donné et ses résultats sont fournis lors d'études réalisées dans le cadre de projets de recherche ou en cas de demandes de collectivités territoriales de bassin. A terme, des données d'entrée à plus fine échelle pourront être intégrées dans la chaîne de modélisation afin de réduire les incertitudes liées à la précision des données relatives à la topographie ou à l'occupation des sols par exemple. Enfin, il est important de pouvoir

pérenniser les partenariats déjà constitués avec les collectivités locales et les établissements publics de bassins (tels que les ETPB par exemple) mais également d'en constituer de nouveaux afin d'accéder à des données locales et modéliser l'aléa inondation à l'échelle la plus fine possible sur le territoire français.

NOMENCLATURE

CCR: Caisse Centrale de Réassurance

ANR (PICS): Prévision Immédiate intégrée des Impacts des Crues Soudaines

H2020 (NAIAD): Nature Insurance Value: Assessment and Demonstration

EPTB: Établissement Public Territorial de Bassin

REFERENCES

Moncoulon, D. et al. (2014). - *Analysis of the French insurance market exposure to floods: a stochastic model combining river overflow and surface runoff.* CCR, GET, IRSTEA, Macif. NHESS (Natural Hazards and Earth System Sciences)

Moncoulon, D. Veysseire, M (2018). - *Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050.* CCR

Onfroy, T. Moncoulon, D. Faytre, L (2019). - *Etude expérimentale sur le risque inondation dans le bassin versant de la Bièvre.* Cahiers de l'ONRN; Le partage des données pour une meilleure connaissance des risques naturels; ONRN, 2019; Vol. 3, pp. 35–47

Zhong L. (2014). - *Watershed modeling using arc hydro based on DEMs: a case study in Jackpine watershed.* Environmental Systems Research; 3, 11

SESSION 3 : GESTION DU RISQUE RUISSELLEMENT

Programme oral session 3

La gestion intégrée du risque de ruissellement urbain torrentiel à Nîmes au travers du retour d'expérience du 10 octobre 2014 (Pla *et al.*)

La gestion intégrée du risque de ruissellement urbain torrentiel à Nîmes au travers du retour d'expérience du 10 octobre 2014

Guillaume PLA[1], Luc MARRAGOU[1], Jean-Luc NUEL[2]

[1] Ville de Nîmes, 152 avenue Robert Bompard, 30033 NÎMES – guillaume.pla@ville-nimes.fr et luc.marragou@ville-nimes.fr

[2] Nîmes Métropole, 3 rue du Colisée, 30900 NÎMES – jean-luc.nuel@nimes-metropole.fr

De par sa configuration, le territoire nîmois est fortement exposé au risque inondation par ruissellement urbain torrentiel, associé à une problématique de cours d'eau temporaires appelés « cadereaux ». Le 10 octobre 2014, il a été touché par un épisode pluvio-orageux dont les caractéristiques sont localement comparables à celles de l'événement historique du 3 octobre 1988 (cumul de l'ordre de 400mm, intensité supérieure à 100mm/h).
Le retour d'expérience de la gestion de cet épisode torrentiel, présenté de manière chronologique, permet d'illustrer les actions opérationnelles mises en œuvre avant, pendant et après l'événement. Celui-ci représente une illustration du processus de gestion intégrée du risque d'inondation torrentielle de type crue-éclair au niveau d'un territoire engagé dans une démarche PAPI (Programme d'Actions de Prévention des Inondations).
Si les impacts associés à cet évènement ont été finalement limités grâce notamment aux réalisations menées dans le cadre du PAPI, le retour d'expérience qui en a découlé et la capitalisation associée ont été valorisés pour renforcer les actions de prévention du risque inondation sur le territoire nîmois. Celles-ci se poursuivent aujourd'hui sur le plan technique et financier grâce la continuité d'engagement politique sur la thématique de la prévention des inondations depuis 1988 et à la convergence des interventions des acteurs publics dans le cadre des PAPI.

Mots-clefs : Placer 3 à 4 mots clé. Crues-éclairs urbaines – retour d'expérience – ouvrages hydrauliques – PAPI

The global managing of torrential urban runoff in Nîmes through the return on experience of the 10th October 2014 flood event

The city of Nîmes is a Mediterranean territory seriously exposed to flash floods. This phenome is linked to "cadereaux", which are ditches that collect runoff. Nîmes was impacted by a major storm on 10th October 2014, locally similar to the historic one that happened on 3rd October 1988: cumulative rainfall closed to 400mm and rain intensity higher to 100mm per hour.
The chronological return on experience of the crisis management of this torrential event explains the concrete actions that are deployed before, during and after the flood. This is a concrete case of associated local authorities that are involved in a common project (Programme d'Actions de Prévention des Inondations, or Program of Actions for Flood Prevention) to assume flash flood prevention globally on an urban area exposed to urban runoff risks.
The 10th October 2014 flood was not as impactful as its rain characteristics could let imagine, thanks to projects that have been led during the Program of Actions for Flood Prevention, especially concerning hydraulic structures. Nevertheless, the return on experience of this event has been precious to mature the flood prevention strategy and reinforce the concrete projects on the area of Nîmes. Thanks to a permanent political and financial support concerning flood prevention since 1988 and the collaboration between local partners involved in the program, these actions are still lead in Nîmes to reinforce flood protection strategy.

Key words : Urban flash floods – return on experience – hydraulic structures - Program of Actions for Flood Prevention

I NIMES, UN TERRITOIRE FORTEMENT EXPOSE AUX INONDATIONS

Nîmes est une ville du sud de la France, localisée dans le département du Gard. Ce dernier possède une configuration marquée, avec au sud un pourtour méditerranéen et sur sa partie nord un relief cévenol marqué. Entre ces deux zones clairement identifiées, le territoire nîmois s'étend sur une zone de plaine. Cette situation mêlant climat méditerranéen et relief cévenol est favorable à la structuration de phénomènes pluvieux violents ayant engendré des crues majeures sur la région, notamment en 2002.

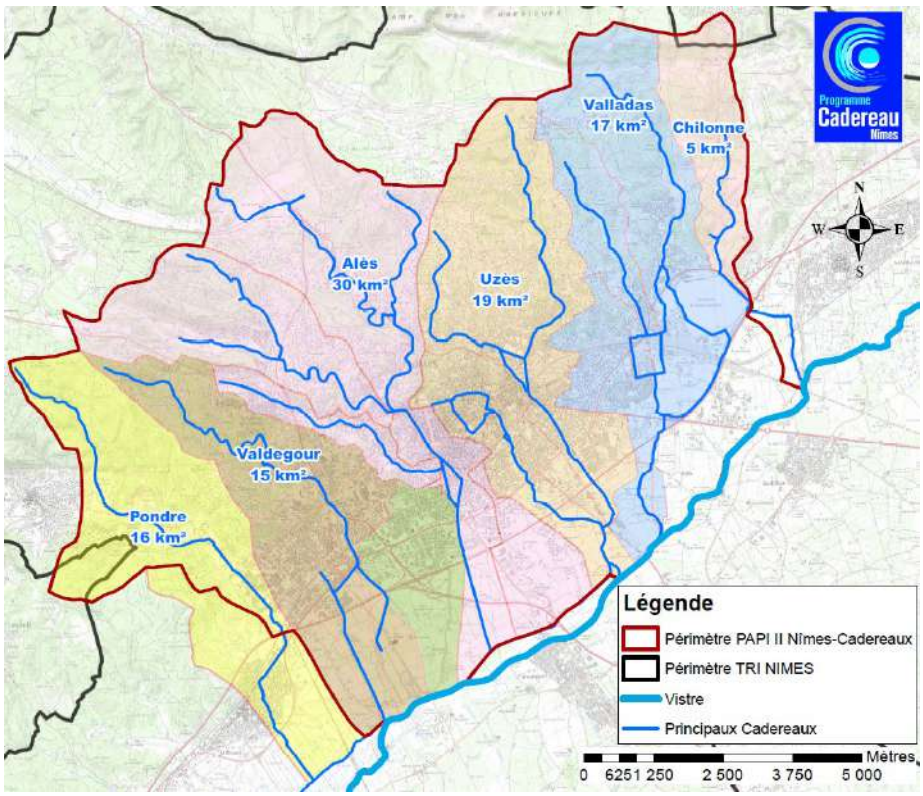


Figure 1 : Bassins versants des cadereaux nîmois

Le territoire nîmois est pour sa très grande partie inclus dans le bassin versant du Vistre, fleuve côtier qui rejoint la mer Méditerranée. Le risque inondation de plaine y est ainsi bien présent et concerne la partie sud de la commune. Les phénomènes les plus impactants pour le territoire sont de type crues éclairs par ruissellement associés aux cadereaux. Ce terme nîmo-nîmois renvoie aux fossés qui drainent les collines karstiques sur la partie nord de la commune, traversent la zone urbaine à forts enjeux (tronçons où le cours d'eau est recouvert) pour finalement rejoindre au sud le Vistre. On dénombre six cadereaux sur le territoire, présentant des caractéristiques générales de même type : bassin versant de petite taille (le plus grand est de l'ordre de 30km²), configuration en piémont avec des pentes relativement prononcées sur les zones karstiques amont avant de rejoindre la plaine du Vistre, traversée de zones urbaines plus ou moins denses, temps de concentration très faibles (moins d'une heure). Ces caractéristiques sont à prendre en considération au regard de la typologie des évènements pluvieux qui impactent le territoire. Ce sont, in fine, quelques 60 000 des 150 000 résidents nîmois, 16 000 logements et 6 000 entreprises qui sont situés en zone inondable.

Dans son histoire, la ville a été frappée par plusieurs évènements majeurs d'inondation, les plus impactants étant associés aux cadereaux. Dans un passé récent, la catastrophe du 3 octobre 1988 a profondément marqué le territoire de par sa violence. Un phénomène pluvieux intense (supérieur à 420mm en 8h) s'abat sur la région nîmoise, engendrant un ruissellement conséquent et des crues majeures des cadereaux : un débit de près de 500 m^3/s est atteint à l'entonnement du principal cadereau de la Ville - dit cadereau d'Alès - soit $25m^3/s/km^2$. Les pertes sont lourdes pour le territoire : 9 décès, 45 000 sinistrés, 4 milliards de francs de dégâts (valeur monétaire de l'époque) (Hémain et Dourlens, 1989 ; Fabre et al., 1994).

Face à ce risque particulièrement présent, le territoire s'est lancé dans une politique globale de prévention des inondations associées aux cadereaux, dite programme CADEREAU. Cette démarche s'est dans un premier temps concrétisée par un Programme de Protection Contre les Inondations (PPCI), puis deux Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) successifs. Chacun des programmes correspond à un montant en investissements supérieur à cent millions d'euros, et ne concerne que les cadereaux du territoire communal nîmois.

L'objet du présent document est de présenter les actions concrètes menées sur le territoire nîmois dans cette thématique en s'appuyant, étape par étape, sur un retour d'expérience sur l'évènement significatif du 10 octobre 2014 ayant généré de forts ruissellements, en se focalisant sur le cadereau d'Alès.

II EN AMONT DE L'EVENEMENT, UN SUIVI PERMANENT DE LA SITUATION

L'automne 2014 a vu de nombreux phénomènes d'inondations impacter le Sud-Est de la France et en particulier le littoral méditerranéen (Paquier, 2015). A l'échelle du seul territoire nîmois, le mois de septembre a vu deux épisodes orageux toucher de façon modérée le territoire avec l'inondation de quelques points bas, respectivement le 18 (désordres constatés associés à la concomitance avec la féria des vendanges) et le 29 septembre (correspondant à l'évènement ayant préalablement plus sérieusement frappé la région montpelliéraine).

Dans le cadre de sa politique de prévention des inondations, la ville de Nîmes s'est dotée de son propre dispositif appelé ESPADA (Evaluation et Suivi des Précipitations en Agglomération pour Devancer l'Alerte) dont l'objectif est de prévoir les débits des cadereaux et le risque associé à échéance 1h30 (Pla et al., 2018). Né en 2005 dans un objectif d'innovation, il a depuis évolué régulièrement au gré des améliorations technologiques.

Le 9 octobre à 16h, Météo France place une nouvelle fois les départements du Gard et de l'Hérault en vigilance orange pour de fortes précipitations et des orages. Des cumuls de l'ordre de 150mm voire localement plus de 200mm sont annoncés, y compris en plaine.

Sur le territoire nîmois, les épisodes pluvieux enregistrés plus tôt dans l'automne ont contribué à saturer partiellement les sols sur les zones rurales des bassins versants des cadereaux. Les nouvelles précipitations attendues sur le territoire pourraient engendrer un ruissellement significatif et rapide.

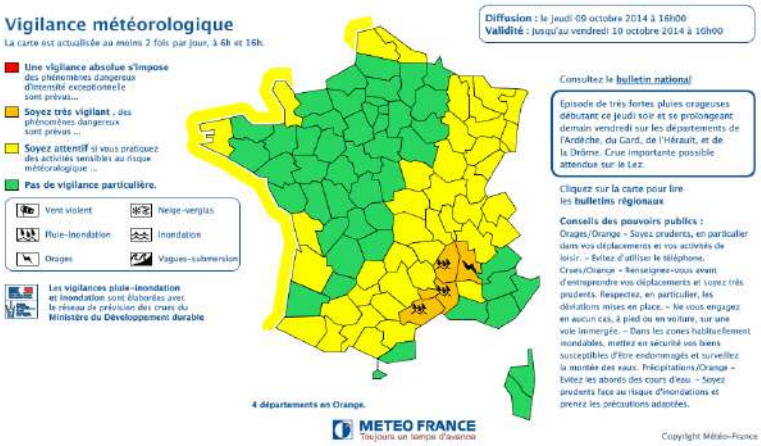


Figure 2 : Vigilance météorologique du 9 octobre 2014 à 16h

Sur la base de ces informations, les prévisionnistes de crue de la Ville proposent une activation du **niveau 1** du dispositif ESPADA : il s'agit d'un niveau de veille visant à pré-mobiliser les moyens internes de la collectivité en vue de potentielles interventions.

Dès les premières heures de la nuit, une structure orageuse s'organise sur le département de l'Hérault, selon un front d'axe Nord-Sud et de déplacement relativement rapide d'Ouest en Est. L'astreinte ESPADA supervise l'évènement, à ce stade avec ses dispositifs de métrologie :

- La première source d'information concerne le réseau de mesures hydrométéorologiques de la Ville. Lancé dès les années 1990, ce parc n'a depuis cessé de se densifier dans le cadre des programmes d'actions sur ce territoire d'une centaine de km² : 27 stations en 2014, 36 en 2020 (incluant 9 capteurs pluviographiques et 34 limnigraphiques). Au-delà de l'implantation de nouveaux points de mesures et dans une logique de fiabilisation de la donnée, les actions menées dans le cadre du PAPI ont conduit en 2013-2014 à la mise en service d'un réseau radio dédié à la collecte de ces mesures hydrométéorologiques, acquises et transmises au pas de temps 5 minutes. A noter que ce réseau assure également la collecte de quelques 20 capteurs pluviographiques du Service de Prévision des Crues du Grand Delta (SPC-GD) dans le cadre de la collaboration entre les deux structures (Pla et al., 2015). Ce réseau a démontré toute sa pertinence au cours de l'évènement avec un taux de collecte proche des 100% (investissement pour la mise en place du réseau radio de l'ordre de 300k€)

- La seconde donnée d'entrée du système concerne un outil radar d'observation et prévision de pluie. La Ville a en effet souhaité développer sa propre lame d'eau spatialisée en travaillant d'une part à l'échelle d'un pixel élémentaire de seulement 500m de côté (donnée brute issue du réseau ARAMIS) afin de s'adapter à la taille des bassins versants supervisés et aux phénomènes orageux localisés caractéristiques du climat méditerranéen, et en valorisant d'autre part la densité des mesures pluviographiques dont elle dispose pour réajuster les estimations produites par l'outil à chacun des pas de temps de 5 minutes (coût du développement de l'outil radar de l'ordre 300k€)

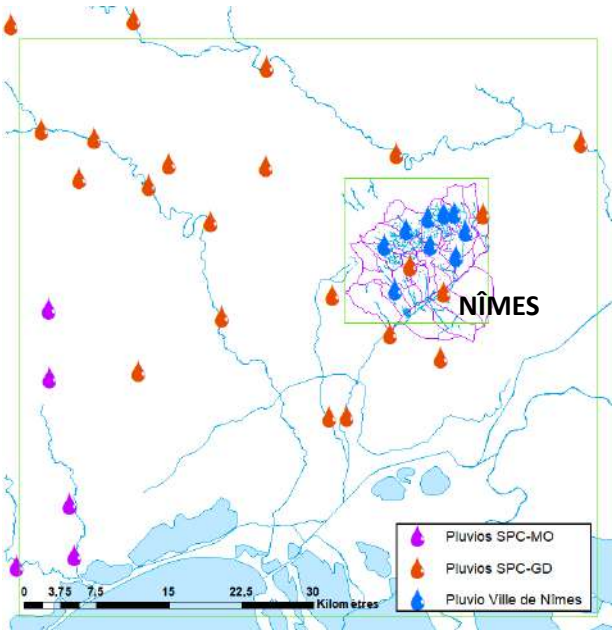


Figure 3 : Postes pluviographiques collectés par la Ville toutes les 5 minutes sur son propre réseau et auprès de ses partenaires Services de Prévision des Crues du Grand Delta et Méditerranée Ouest

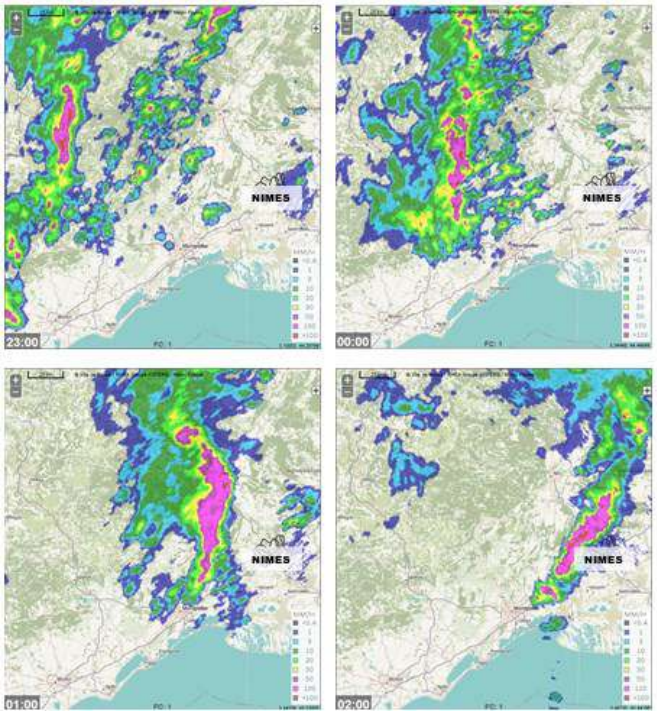


Figure 4 : Lames d'eau radar observées par l'outil de la Ville en amont de l'évènement

III UN EVENEMENT ORAGEUX NOCTURNE VIRULENT ET LOCALISE

Entre 1h et 2h, le front orageux se rapproche rapidement du bassin nîmois. Les intensités évaluées sont conséquentes (supérieure à 50mm/h dans les teintes violettes sur les images de la figure 4), ce qui est confirmé par les mesures effectuées par les postes pluviographiques collectés. Atteignant Nîmes aux alentours de 2h, le front mobile jusque là stoppe son déplacement et demeure statique selon un axe SO-NE. L'évènement ne touche alors que l'extrême Nord-Ouest de la commune (bassins versants ces cadereaux de la Pondre, Valdegour, et Alès) mais ce de façon violente.

Au regard de la structure en approche et sur proposition de la cellule de veille hydrométéorologique, les autorités communales décident d'activer le **niveau 2** du dispositif ESPADA en anticipation, afin d'anticiper le phénomène et mobiliser les moyens ad hoc. Ce niveau renvoie à des inondations localisées associées à un ruissellement urbain important.

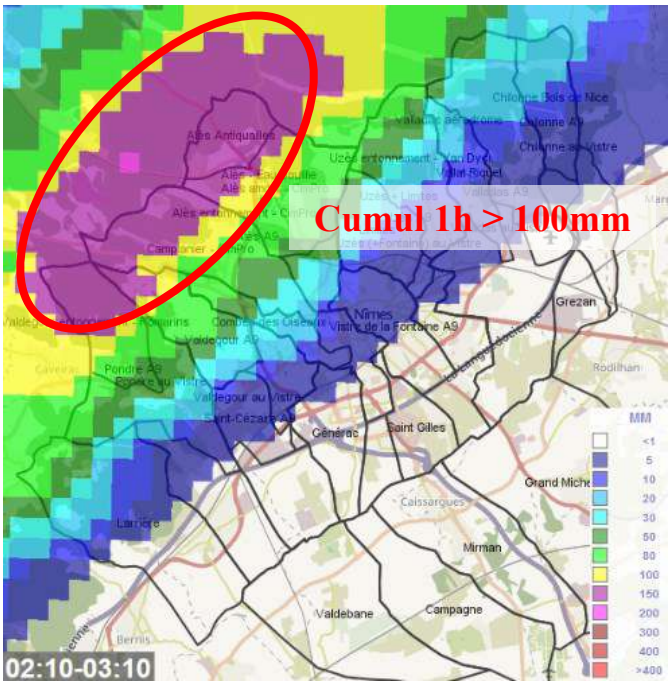


Figure 5 : Cumul radar 1h observé sur Nîmes par l'outil de la Ville en début d'évènement

Figure 6 : Image illustrative d'un barriérage de point bas nîmois (source Midi Libre - 16 septembre 2016)

L'activation de ce niveau entraine de facto le déclenchement des premières actions communales, référencées dans le Plan Communal de Sauvegarde (PCS) de la collectivité qui est en lien étroit avec le dispositif ESPADA concernant la thématique inondation (niveau 2 également à ce stade). Le maire, de par ses pouvoirs de police, est Directeur des Opérations de Secours. Par déclenchement d'un automate d'appels interne à la structure, les services concernés – y compris police municipale - sont mobilisés pour les premières interventions de terrain. Au regard des temps de concentration très courts des bassins versants des cadereaux et plus globalement de la rapidité des ruissellements, cette mobilisation est effectuée avant constatation des désordres afin de permettre aux équipes de se rendre sur site en toute sécurité. A ce stade, il s'agit principalement de barriérage sur quelques points bas ou secteurs fréquemment inondés (d'ailleurs dotés de barrières à demeure) et de l'activation de panneaux lumineux indiquant une voirie inondée, sur indication du prévisionniste ESPADA. La supervision de ces actions de terrain est grandement facilitée par un accès permanent aux quelques 300 caméras de vidéoprotection dont dispose la collectivité, dont certaines spécifiquement implantées pour le suivi des secteurs inondables.

Suite à cette première heure de précipitations, le phénomène pluvieux intense se poursuit avec la même structure orageuse stationnaire. Le ruissellement est considérable en particulier sur la zone urbaine dense qui n'est toutefois pas la plus arrosée par l'épisode, de nombreux débordements du réseau pluvial sont signalés.

Le bassin versant nîmois le plus arrosé est celui du cadereau d'Alès, sur sa partie amont. Pourtant, malgré les quantités de pluie précipitées et un ruissellement fort, les débits enregistrés sur le cadereau lui-même demeurent à ce stade contenus. En effet, dans le cadre des différents programmes de prévention des inondations menés sur le territoire, des actions lourdes ont été mises en œuvre pour réaménager le principal cadereau nîmois, constitués de deux branches dites Alès et Camplanier. Dans un premier temps, les efforts ont porté sur la création de bassins de rétention sur les tronçons amont (plus de 330 000 m3 de capacité de rétention sur près d'un million pour l'ensemble du territoire, 70 000 pour le seul bassin de Roquemaillère sur ce cadereau), en vue d'augmenter le temps de réponse hydrologique à l'entrée de la zone urbaine dense et de ménager un délai supplémentaire d'action en cas de phénomène. Ce sont ainsi 17 barrages de catégorie C qui sont implantés sur la commune (déversoir de sécurité pour 2 fois la crue de 1988). D'autre part, des travaux conséquents ont été menés en zone urbaine dense afin d'augmenter significativement la capacité des ouvrages : sur l'ensemble de sa partie enterrée, la capacité du cadereau d'Alès a été portée de 25 à 120m^3/s (investissement de l'ordre de 40M€). L'ensemble des aménagements réalisés dans le cadre du programme CADEREAU sont amenés à préserver la Ville d'une inondation d'un débit de l'ordre d'une période de retour de 40 ans.

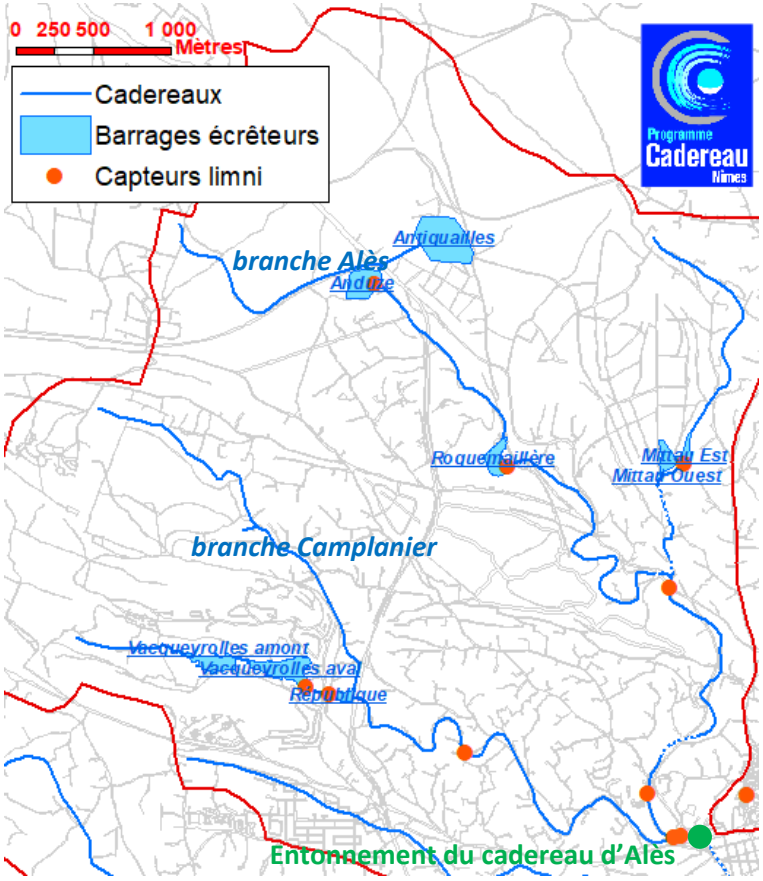


Figure 7 : Synoptique du cadereau d'Alès et représentation des ouvrages hydrauliques

Les ouvrages écrêteurs remplissent ainsi parfaitement leur rôle sur les premières heures de l'évènement. Les pluies diluviennes se poursuivent, leur stockage effectif augmente significativement sur les secteurs les plus arrosés, et ce tout particulièrement sur la branche Camplanier où le bassin du Pont de la République – situé immédiatement en amont de la zone urbaine dense – est en limite de déversement. Celui-ci se produit finalement aux environs de 4h et dure près de 2 heures, avec une pointe vers 5h où l'écoulement associé à ce déversement entraine des désordres importants sur la voirie qui sert de cadereau à l'aval.

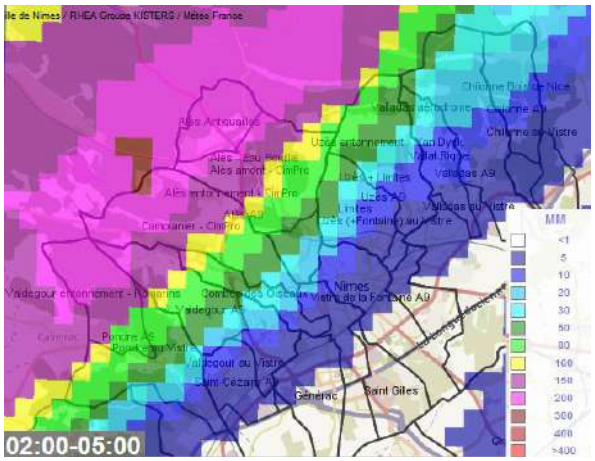


Figure 8 : Cumul radar 3h observés sur Nîmes par l'outil de la Ville (2h-5h)
Les valeurs atteignent localement les 200mm

Figure 9 : déversement du bassin du Pont de la République sur le cadereau de Camplanier (5h24 – source réseau de vidéoprotection)

Conformément aux procédures, une équipe est mobilisée pour surveillance visuelle des barrages écrêteurs. Les consignes associées à ces ouvrages ont depuis été mises en adéquation avec les évolutions successives de la réglementation (articles R214 du Code de l'Environnement, le récent décret n° 2019-985, etc.) sur la thématique avec notamment prise de la compétence associée par l'Etablissement Public de Coopération Intercommunale dans le cadre de la GEMAPI, Nîmes Métropole.

IV UNE COURTE ACCALMIE ET UNE MONTEE EN PUISSANCE DANS LA GESTION DE CRISE

Le déversement du bassin du Pont de la République et les débordements associés sur plusieurs tronçons de cadereaux justifient le déclenchement du **niveau 3** du dispositif ESPADA (niveau 3 PCS), d'autant que la structure ne se délite pas malgré la relative accalmie sur le territoire nîmois à partir de 5-6h selon les secteurs et que de nouvelles précipitations sont attendues. La situation ne peut désormais plus être uniquement gérée par le seul personnel d'astreinte ni qualifiée de courante. La Ville décide de mobiliser massivement ses services, une nouvelle fois via automate d'appels qui cette fois-ci contacte davantage d'entités extérieures à la collectivité : concessionnaires de réseaux, délégataires, Etablissements Recevant du Public (ERP) sensibles, gestionnaires de parkings souterrains pour mise en place de batardeaux, écoles, etc. Le Poste de Commandement Communal (PCC) est constitué, regroupant les différentes composantes de la collectivité et en lien étroit avec les structures extérieures, notamment la Préfecture qui décide également d'ouvrir son Centre Opérationnel Départemental (COD). Le maire conserve toutefois son rôle de DOS. L'information à la population est faite via le site internet de la collectivité et via les antennes radio locales. Un centre de réception des appels est également constitué au sein du PCC.

Cette accalmie relative va permettre à la collectivité de s'organiser et d'utiliser cet apport substantiel de compétences pour d'une part intervenir sur les désordres liés au ruissellement conséquent de la nuit et d'autre part prépositionner les moyens en vue de la suite attendue de l'évènement. Il s'agit dès lors d'enlever les embâcles qui se sont amassés du fait des forts ruissellements et qui pourraient perturber les futurs écoulements attendus, en particulier sur la branche Camplanier où une grosse mobilisation permettra de retirer les plus gros en 2 heures.

Figure 10 : Entonnement du cadereau d'Alès à 7h

Si la première partie de l'évènement s'est déroulée en pleine nuit, l'accalmie enregistrée correspond à la période où une grande partie de la population est en transit notamment pour se rendre au travail ou à l'école. Les structures qui en possèdent ont été invitées dans le message reçu par automate d'appels à activer leur Plan Particulier de Mise en Sûreté (PPMS), les écoles notamment accueillent les enfants et sont en mesure d'assurer leur sécurité.

V UNE DEUXIEME VAGUE BIEN PLUS VIOLENTE

Les précipitations sur le territoire nîmois sont bien moins importantes depuis 5h, mais la structure orageuse reste aux portes de la Ville et s'abat sur les communes voisines. Dès 8h, les précipitations intenses reprennent, de nouveau sur l'extrême amont des bassins versants des cadereaux les plus à l'Ouest. Les barrages écrêteurs avaient atteint un niveau de remplissage élevé, voire avaient déversé : cette accalmie a permis d'évacuer une partie des eaux stockées (vidange par pertuis simple) mais leurs niveaux de remplissage demeurent élevés. Par ailleurs, la première partie de l'évènement a complètement saturé les sols sur les secteurs les plus touchés, leur production serait très importante en cas de nouvelles précipitations.

Si le dispositif ESPADA s'appuie sur les données d'entrée évoquées précédemment (observations), sa vocation est avant tout de prévoir les débits des cadereaux et d'évaluer in fine un niveau d'impact à venir. Pour ce faire, il utilise un modèle hydrologique semi-distribué s'appuyant sur le schéma RERAM en zone urbaine, et surtout sur une structure type GR4H en zone rurale où un réservoir supplémentaire a été intégré pour représenter l'impact très spécifique et hétérogène du karst (Doerfliger et al., 2006 – Fleury et al., 2011). Ce dernier aspect a été défini au terme de sept années d'études avec le BRGM et les Mines d'Alès. Près de 300 bassins versants élémentaires composent ce modèle, dont 178 pour la composante rurale. Une importante phase de modernisation a été menée ces dernières années (budget de l'ordre de 400k€) afin d'améliorer ce modèle : recalage au regard des dernières données d'entrée et évènements vécus, pas de temps de 15 à 5 minutes, fonction assimilation sur les débits, intégration d'un modèle hydraulique pour la propagation, développement d'une interface en ligne type SIG, etc. (Pla et al., 2018)

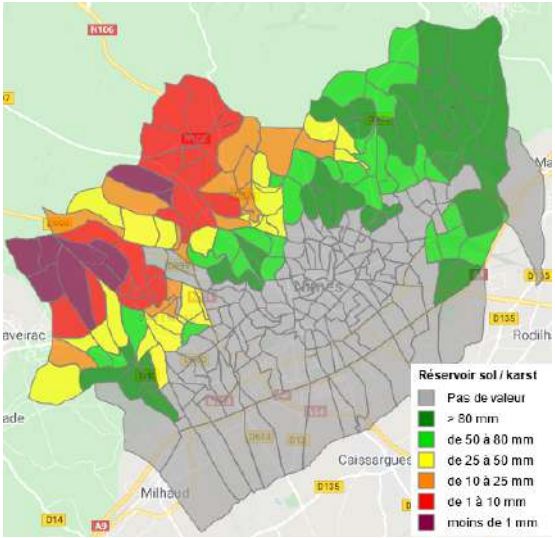


Figure 11 : Représentation d'un indicateur de saturation des réservoirs sol/karst à 8h (source modèle ESPADA)

A l'échelle du cadereau d'Alès, les prévisionnistes identifient des déversements conséquents à venir sur l'ensemble des bassins écrêteurs, occasionnant des débordements significatifs et ce sur les deux branches du cadereau, ce qui se produit dès 9h avec une réaction très violente (Fourchier et al., 2016). La collectivité déclenche le **niveau 4** du PCS et d'ESPADA, soit le niveau le plus haut.

Figure 12 : Déversement du barrage écrêteur de Roquemaillère (débit de pointe de l'ordre de 70m3/s soit environ 7m3/s/km²)

Figure 13 : Photo post-crue d'une habitation sinistrée au cours de l'évènement

Sur les tronçons amont, les opérations de secours sont nombreuses : près de 200 habitations seront sinistrées. Dans le cadre des mesures de réduction de la vulnérabilité et avec l'appui de l'Etat, la Ville avait pu réaliser l'acquisition à l'amiable de plusieurs habitations implantés dans des secteurs qui ont effectivement été fortement impactés au cours de cet évènement.

Les branches Camplanier et Alès voient donc des débordements sur leurs tracés, et se rejoignent près du centre-ville au niveau de l'entonnement du cadereau d'Alès.

Figure 14 : entonnement du cadereau d'Alès à 9h20 (à gauche, débit de l'ordre de 20m^3/s) et à 9h40 (à droite, débit de l'ordre de 100m^3/s)

La réaction est violente et la capacité de l'ouvrage hydraulique – inauguré un an plus tôt – est mobilisée à pleins bords. Fort heureusement, les pointes de crue des deux branches ne sont pas concomitantes. La pointe de crue à l'entonnement est atteinte à 10h, avec une valeur estimée à 110m^3/s pour un ouvrage dont la capacité est de 120m^3/s. Ainsi, le centre-ville a été complètement protégé d'une quelconque inondation par débordement du cadereau, et des problématiques de ruissellement qui se sont produites plus en amont.

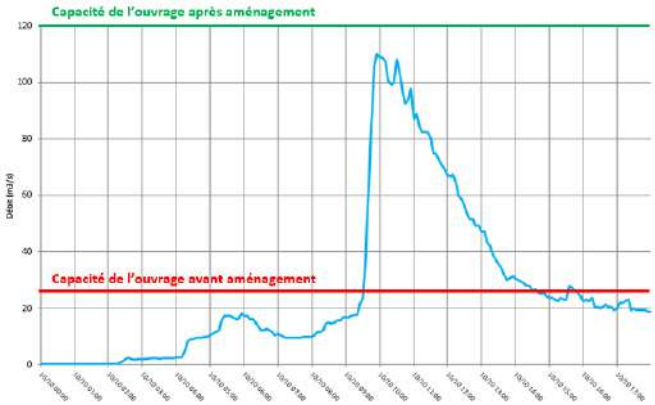
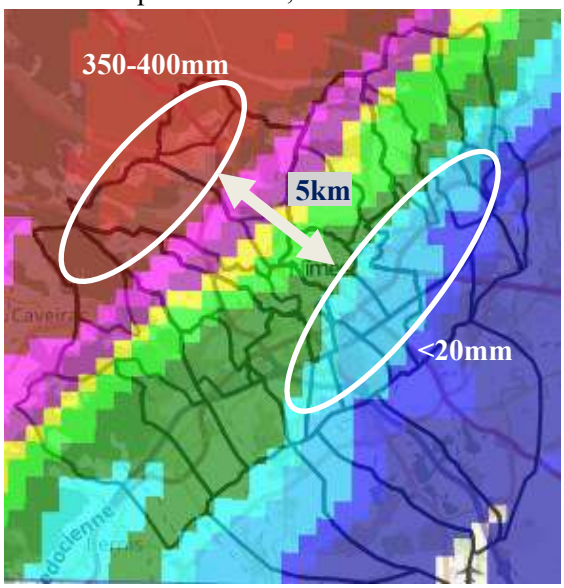


Figure 15 : Hydrogramme à l'entonnement

Après 10h, la prévision est clairement à la baisse, les précipitations sont désormais moins importantes. A 11h05, le Gard est placé en vigilance rouge hydro-orages : si la partie la plus impactante de l'évènement est désormais achevée sur Nîmes, territoire réduit à l'échelle du département, ce n'est pas le cas pour certaines communes plus au Nord, d'où le besoin souvent émis d'une vigilance infra-départementale (Belin et al., 2015).



Les précipitations s'estompent finalement aux alentours de 12h, la décrue est sérieusement amorcée sur l'ensemble des cadereaux. Des échanges téléphoniques ont eu lieu avec le SPC Grand Delta afin d'évaluer au mieux les apports des cadereaux au Vistre, intégré à la vigilance Vigicrues. L'analyse des cumuls permet de faire plusieurs constats :

- seule une fraction du territoire a été véritablement arrosée, avec des caractéristiques semblables à celles de l'évènement du 3 octobre 1988. Un recentrage de l'épicentre de l'épisode pluvieux aurait eu un impact bien supérieur ;

- le gradient de pluie enregistré à l'échelle du territoire est très conséquent et valide l'intérêt de disposer d'une lame d'eau radar à résolution spatiale affinée.

Figure 16 : Cumul radar observé sur Nîmes par l'outil de la Ville entre 2h et 12h

VI VIGILANCE, INTERVENTIONS LOCALISEES ET SUITES A DONNER

Dans l'après-midi du 10 octobre, les actions de nettoyage et déblaiement reprennent sur le territoire communal. Au-delà d'un pur objectif de remise en état, il s'agit de se préparer au nouvel épisode pluvieux annoncé pour la soirée et la nuit à venir. Par ailleurs, une tournée d'inspection est menée sur l'ensemble des barrages écrêteurs qui ont été sollicités au cours de l'évènement du matin : il en ressort que le déversoir de sécurité d'un des ouvrages ayant déversé est endommagé. Dans le cadre du PCS, une procédure spécifique d'alerte à la population est élaborée, dans le cas où ce barrage serait de nouveau sollicité. Le PCS reste activé à son niveau maximal, le centre d'appels est énormément sollicité par la population.

Dans la nuit du 10 au 11 octobre, la collectivité assure la supervision de l'évènement annoncé qui s'avère finalement moins impactant que craint. Malgré tout, la quasi-totalité du territoire communal sera balayée par un passage orageux momentanément intense avec un cumul de l'ordre de 50mm en 1 heure. Sur des sols déjà saturés, cet épisode engendra ainsi de nouvelles problématiques de points bas et même un débordement de cadereau à l'Est de la Ville cette fois, nécessitant de nouvelles opérations de barriérage, avec quelques incivilités dont des conducteurs contournant le barriérage (figure 17). Le Gard est replacé en vigilance orange pour de fortes précipitations et des orages le 11 octobre à 6h. Le PCS et ESPADA sont repositionnés à un **niveau 2**.

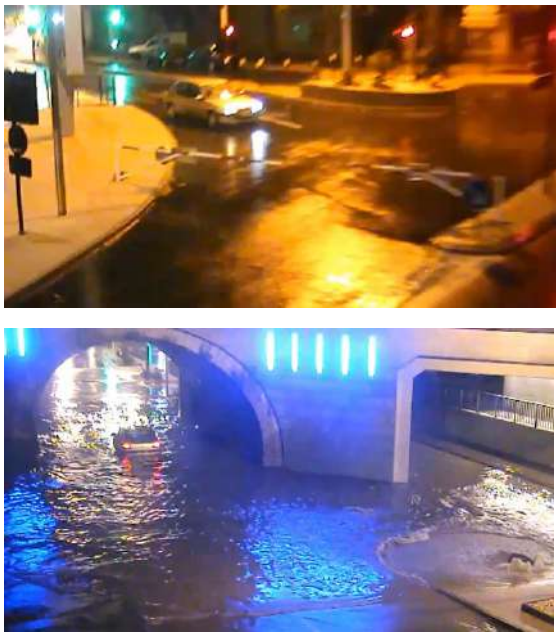


Figure 17 : Quand un non-respect manifeste du barriérage mène à noyer son véhicule…

Figure 18 : … et devient une source d'inspiration pour des films d'animation sur les bons comportements

La vigilance attentive de la situation est maintenue jusqu'au lundi 13 octobre, où le département est replacé en vigilance jaune et les prévisions météorologiques sont bien plus favorables. Les actions auprès de la population se multiplient, notamment via le centre d'action sociale pour aider les sinistrés les plus impactés dans l'attente de pouvoir se reloger ; le centre d'appels restera ouvert plusieurs jours. Une équipe est mobilisée pour relever une opération de marquage de laisses de crue, qui pour certaines s'approchent de celles de 1988 sur la partie amont des bassins versants. Un bureau d'étude agréé est missionné pour expertiser les barrages écrêteurs dont le déversoir de sécurité a été mis à contribution.

Les dégradations relevées sur les barrages écrêteurs sont corrigées dans le cadre de travaux réalisés dans un délai de 6 mois à compter de la tenue l'évènement.

Dans une vision à plus long terme, cet évènement du 10 octobre 2014 a eu un apport significatif dans la stratégie de prévention du risque inondation torrentiel sur le territoire, validant ses points forts et mettant en exergue les axes de progrès à l'orée du PAPI II (période 2015-2021). On pourra notamment relever :

- Les outils de métrologie associés au dispositif ESPADA et modernisés juste avant l'événement ont démontré leur efficacité et leur apport, avec d'une part un taux de collecte proche de 100%

pour les différents capteurs hydrométéorologiques implantés sur le territoire et d'autre part une lame d'eau radar à haute résolution spatiale justifiée par le caractère très localisé de l'épisode pluvieux. La réflexion de modernisation du modèle de prévision était déjà amorcée et programmée, et l'évènement n'a fait que confirmer les optimisations déjà envisagées : modélisation au pas de temps 5 minutes plutôt que 15 minutes, mise en place d'une fonction assimilation pour réajuster le modèle en temps réel sur la base des mesures limnigraphiques et notamment concernant le déversement des bassins écrêteurs, etc. Cet épisode richement documenté (mesures capteurs, lames d'eau radar, relevés de laisses de crue, observations, etc) sert de base de référence pour le calage du modèle ESPADA modernisé.

- Plus globalement, cet épisode est intégré à la base d'évènements de calage des différents projets hydrauliques de la collectivité, notamment dans le cadre du réaménagement de la branche amont du cadereau d'Alès ou la création d'un nouveau barrage écrêteur de crue sur la branche Camplanier. Vu les faibles dégradations des ouvrages de rétention fortement sollicités lors de l'événement (cinq ouvrages avec déclenchement du déversoir de sécurité), le parti-pris de conception est consolidé et peut donc servir de référence aux nouveaux projets de gestion du ruissellement torrentiel.
- Par ailleurs, la non mise en charge du tronçon souterrain du cadereau d'Alès récemment réaménagé (réception des travaux tout juste 1 an avant la crue !) pour un débit estimé proche de celui cible valide les choix et hypothèses retenus dans le dimensionnement, avec des contraintes constructives pourtant complexes (vitesses très importantes et emprise des ouvrages restreinte) au point d'avoir nécessité le développement d'un modèle physique. Il confirme donc la nécessité de poursuivre la restructuration des écoulements torrentiels pour les autres cadereaux.
- Un programme de mesures de réduction de la vulnérabilité, inscrit au PAPI, est lancé en 2015. Il inclut des délocalisations à l'amiable de biens sinistrés au cours de cet évènement, notamment sur la partie amont de la branche Alès où les laisses de crue sont proches de celles de la crue du 3 octobre 1988. Au-delà de cette procédure lourde, la collectivité s'est engagée dans une assistance individuelle personnalisée à grande échelle pour aider chaque propriétaire volontaire à prendre conscience du niveau d'inondable de son bien et à mettre en œuvre des mesures de mitigation adaptées.
- Une modernisation du PCS est engagée dès début 2015, s'appuyant notamment sur le retour d'expérience de cet évènement et l'identification des améliorations organisationnelles et structurelles qui en découle. Elle inclut la création d'un Poste de Commandement Communal dédié à la gestion de crise, mais également l'ajout d'une fonctionnalité d'alerte spatialisée à la population au niveau de l'automate d'appels. L'utilisation des réseaux sociaux devient un vecteur important d'information à la population.
- Les actions d'information préventive se poursuivent, notamment via la création et la diffusion de petits films d'animation sur les bons comportements à adopter en cas de gestion de crise (figure 18) et la poursuite des interventions de sensibilisation en milieu scolaire (environ 70 classes de primaires par an). Un livret pédagogique à l'attention des classes primaires est également créé, s'appuyant notamment sur les nombreux supports visuels issus de cet évènement du 10 octobre 2014, qui correspondent à l'environnement nîmois actuel dans lequel vivent les enfants.

CONCLUSIONS

A travers le retour d'expérience de cet évènement, l'objectif était de présenter une approche locale de gestion globale du risque inondation. L'impact de cet évènement a finalement été contenu au regard du phénomène pluvieux (période de retour estimée à 25 ans pour le débit à l'entonnement du cadereau d'Alès), mais la capitalisation associée à son retour d'expérience constitue une base d'éléments et de réflexions riche dans le cadre des nouveaux projets menés sur le territoire. Ces derniers, intégrés dans un ensemble cohérent au sein du programme CADEREAU, ne sont rendus possibles que par la conjonction d'un engagement politique fort sur cette thématique depuis plus de 30 ans et le soutien technique et économique des acteurs publics dans le cadre de la démarche PAPI.

REFERENCES

Belin P., Moulin C. (2015). – La complexité des dispositifs de vigilance pour les inondations rapides. Constats et évolution possibles – Colloque SHF/AFEPTB « Gestion des risques d'inondation – outils et méthodes pour une approche partenariale », Montreuil 27-28 mai 2015. Disponible sur https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/abs/2016/03/lhb2016023/lhb2016023.html

Doerfliger N., Ladouche B., Maréchal J.C. (2006). - Role of karst system in the genesis of flash flood events at the Nîmes city, in EGU Vienne, Autriche (2-7 avril 2006)

Fleury P., Maréchal J.C., Ladouche B., Raymond M., Dörfliger N. - Modelling of karst aquifer contribution to flash floods. Nîmes city case study – Colloque H2Karst, Besançon 2011

Fourchier C., Mériaux P., Nuel J.L., Pla G., Retailleau E., Royet P. (2016). - Lessons from the autumn 2014 flash floods in the city of Nîmes and its neighborhood (France) : behavior of several mitigation dams and hydrological analysis – Colloque FLOODrisk 2016, Lyon. Disponible sur https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2016/02/e3sconf_flood2016_16002.pdf

Pacquier A. (2015) – Causes des inondations de l'automne 2014 dans le Sud-Est de la France – La Houille Blanche, n° 1, 2015, p. 5-6. Disponible sur https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/2015/01/lhb201501-inondations.pdf

Pla G., Bressand F., Nuel J.L., Valy J.F. (2015). - ESPADA : Un outil pour la gestion en temps réel des crues urbaines en pleine modernisation – Colloque SHF/AFEPTB « Gestion des risques d'inondation – outils et méthodes pour une approche partenariale », Montreuil 27-28 mai 2015

Pla G., Crippa J., Djerboua A., Dobricean O., Dongar F., Eugene A., Raymond M. (2019). – ESPADA : un outil pour la gestion en temps réel des crues éclairs urbaines en pleine modernisation - La Houille Blanche 3-4 : 57-66. Disponible sur https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/abs/2019/03/lhb180028/lhb180028.html

Les phénomènes de ruissellement dans le diagnostic de vulnérabilité du territoire aux inondations (Valy & Gache)

Les phénomènes de ruissellement dans le diagnostic de vulnérabilité du territoire aux inondations

Janique VALY[1], Frédéric GACHE[2]

[1] EPTB Seine Grands Lacs - 28 boulevard Victor Hugo, 10000 Troyes – janique.valy@seinegrandslacs.fr
[2] EPTB Seine Grands Lacs - 12 rue Villiot, 75012 Paris – frederic.gache@seinegrandslacs.fr

À travers ses missions, l'EPTB Seine Grands Lacs facilite l'action publique des collectivités territoriales au sein de son périmètre de reconnaissance. Il a souhaité développer une approche novatrice de diagnostic de la vulnérabilité des territoires aux inondations en intégrant le phénomène de ruissellement. Bref et intense, ce phénomène peut se produire à l'occasion de précipitations orageuses et se situer au-delà des limites géomorphologiques des cours d'eau. Sa localisation varie constamment (mutations de l'occupation du sol) et il a été jusqu'à présent relativement peu appréhendé.
Les communautés d'agglomération du Pays de Meaux et de Marne et Gondoire ont été retenues pour servir de sites pilotes. Elles sont accompagnées par l'EPTB au travers d'une convention partenariale et du PAPI de la Seine et de la Marne franciliennes qui porte les diagnostics. C'est un groupement de deux prestataires qui est en charge de les réaliser.
Pour pallier les difficultés de constitution et/ou d'accès aux données de ruissellement, ainsi que les imprécisions de la modélisation, la méthode développée se base sur des ateliers de concertation réunissant les acteurs locaux intéressés par les risques. Ils ont interagi à partir des cartes de risques réalisées par la Caisse Centrale de Réassurance. Tout en les sensibilisant à ce phénomène, cette méthode a permis de confirmer la localisation et de préciser l'ampleur du phénomène grâce aux témoignages des acteurs.
Suite à cet état des lieux, une liste d'actions hiérarchisées pour réduire le risque d'inondation par ruissellement est décidée collégialement, en insistant particulièrement sur les objectifs à poursuivre en termes d'occupation du sol et d'aménagement de l'espace.

Mots-clefs : ruissellement, diagnostic de vulnérabilité, territoire, ateliers de concertation.

Accounting for surface runoff in territorial flood vulnerability diagnoses

Through its missions, "EPTB Seine Grands lacs" support public territorial collectivities action inside their perimeter. It helped to develop an innovative approach to the vulnerabiliys diagnosis of territories to floods including the runoff phenomenon. Brief and intense, this phenomenon may happen during stormy precipitations and take place outside the geomorphological stream limitations. Its localization is constantly changing (ground occupation mutation) and so far, it has been relatively poorly apprehended.
Municipalities from "Pays de Meaux and Marne et Gondoire" have been chosen to be pilot sites. They have been accompanied by EPTB who conduct diagnoses
To overcome the difficulties to access to runoff data, as well as the modeling inaccuracies, the developed method is based on concertation workshops to gather the knowledge of local actors. Computed risks maps realized by the "Caisse Centrale de Réassurance" where assessed by these local actors. This confirmed the localization and magnitude of the phenomenon.
Following this inventory a hierarchized list of actions to reduce runoff risk have been decided together, while focusing in particular on the objectives to pursued for ground occupation and space layout.

Key words: Runoff, vulnerability diagnosis, territories, concertation workshops

INTRODUCTION

Reconnu Établissement Public Territorial de Bassin (EPTB) depuis 2011, le Syndicat mixte Seine Grands Lacs agit à l'échelle du bassin versant de la Seine en amont de la confluence avec l'Oise. Il facilite et coordonne l'action publique des collectivités territoriales sur l'ensemble du territoire qu'il couvre et il a une double mission historique à travers la gestion de quatre lacs-réservoirs :

- Diminuer les effets des crues de la Seine et de ses principaux affluents, généralement durant l'hiver et au printemps ;
- Assurer des niveaux d'étiage suffisants pour l'alimentation régulière en eau de la région francilienne et pour maintenir les équilibres écologiques de ces rivières, en général l'été et l'automne.

L'EPTB accompagne aussi les collectivités locales qui le souhaitent dans la mise en œuvre des politiques nationales ou européennes en matière de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations. De nouvelles missions sont en développement :

- Mise en cohérence des actions des collectivités territoriales et de leurs groupements en matière d'aménagement durable et de gestion équilibrée de la ressource en eau incluant la gestion des inondations, notamment le portage de PAPI ;
- Rôle de coordination, d'animation, d'information et de conseil tel que défini dans le 3°alinéa de l'article R. 213-49 du code de l'environnement : « *3° Mener des missions de coordination, d'animation, d'information et de conseil à l'échelle du bassin ou du sous-bassin hydrographique* ».

Dans le cadre du PAPI de la Seine et de la Marne Franciliennes dont il est le porteur, et de sa Cellule d'accompagnement[1], l'EPTB Seine Grands Lacs a souhaité développer une approche novatrice de diagnostics de la vulnérabilité aux inondations de territoire en s'appuyant sur le référentiel national de vulnérabilité [CEREMA, 2016], ainsi que sur la méthode REVITER [Ledoux consultant et Contrechamp, 2015]. En effet, au-delà de l'association large des acteurs du territoire, la nouveauté vient de l'intégration des phénomènes de ruissellement aux diagnostics de vulnérabilité aux inondations qui sont traditionnellement plus dévolus aux débordements de cours d'eau et remontées de nappes.

L'EPTB Seine Grands Lacs a lancé en 2019 une consultation pour la réalisation de trois diagnostics sur la vulnérabilité aux inondations du territoire, en intégrant le phénomène de ruissellement. Ces diagnostics portent sur trois intercommunalités du territoire francilien exposées aux inondations et ayant la compétence GEMAPI (Gestion des Eaux, des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations). Un des buts de ces diagnostics territoriaux est d'observer si l'association la plus large possible des acteurs locaux permet d'aboutir à un constat partagé des problèmes et à une décision concertée sur des solutions adaptées à leur territoire à conduire pour les corriger. L'autre but de ce travail est de réaliser, à terme, un guide méthodologique pour les EPCI qui voudraient se lancer dans ce type de diagnostics, préalable nécessaire selon l'EPTB, à toute démarche ultérieure de prévention des inondations à l'échelle d'un territoire exposé.

Pour disposer de l'ensemble des compétences nécessaires à la conduite d'une telle démarche, l'Institut Paris Région (ex Institut d'Aménagement et d'Urbanisme Ile de France), s'est associé au cabinet Contrechamp. Le présent article se base sur les diagnostics territoriaux de vulnérabilité aux inondations en cours de réalisation des Communautés d'Agglomération (CA) du Pays de Meaux et de Marne et Gondoire [Institut Paris Région et Contrechamp, avril 2020 et juin 2020].

1. PRISE EN COMPTE DU PHÉNOMÈNE DE RUISSELLEMENT DANS LES DIAGNOSTICS TERRITORIAUX DE VULNÉRABILITÉ

L'EPTB souhaite pourvoir mesurer l'exposition des communes situées sur son périmètre d'intervention aux risques d'inondation par ruissellement conformément au cahier des charges des Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI).

Les inondations par ruissellement se matérialisent par des écoulements temporaires hors des chemins habituels (réseaux hydrographiques, réseaux et autres systèmes artificiels) dans des zones le plus souvent hors eau ou à faible débit et des accumulations aux points bas des bassins versants. Si elles surviennent

[1] Convention partenariale dont la mission 2 est d'aider à la réalisation de diagnostics de vulnérabilité territoriale aux inondations ainsi qu'à la mise en œuvre du décret digue

principalement en été à l'occasion d'orages importants, ces crues peuvent également se manifester en saison hivernale, même avec un cumul pluviométrique relativement faible, en raison de la saturation des sols ne permettant pas l'absorption des flux de pluies. Ces inondations par ruissellement apparaissent de façon aléatoire : tous les bassins versants, même de faibles superficies, sont potentiellement concernés. Les modes d'occupations des sols du bassin versant (urbanisation, espaces ouverts de grandes cultures…), sont souvent déterminants dans la gravité du phénomène. Sur des territoires très imperméabilisés, en secteurs urbains ou périurbains, ces inondations peuvent se produire par écoulement de volumes d'eau ruisselée, qui n'ont pas été absorbés par les réseaux d'assainissement superficiels ou souterrains et qui se concentrent aux points bas. Elles peuvent causer d'importants dégâts localement : inondation des sous-sols ou des rez-de-chaussée, coupure de réseaux routier… Cependant le caractère localisé et court dans le temps limite les conséquences systémiques de ce type d'évènement. Des événements similaires peuvent se produire en zones rurales, où les pratiques agricoles laissent périodiquement des parcelles à nu entre deux périodes culturales. Lorsque des orages intenses se déclenchent, un fort ruissellement se produit sur les sols agricoles non protégés entrainant une érosion importante des sols et des coulées de boues ? C'est ce qui s'est passé dans des lotissements pavillonnaires construits dans les dernières décennies.

Les territoires de l'étude sont régulièrement soumis à des épisodes pluvieux intenses, donnant lieux à des crues soudaines et localisées par ruissellement, les plus exceptionnelles pouvant ouvrir à des arrêtés de reconnaissance de catastrophes naturelles (arrêtés CatNat). La base de données des arrêtés CatNat (Gaspar, Ministère de l'Écologie) recense plus d'une dizaine d'événements correspondant à des inondations par ruissellement (durée maximum de trois jours) depuis le début des années 1980, notamment en juillet 2001 et plusieurs sur la période récente (juin 2016 et juin2018). Ces évènements impactent généralement une ou deux communes simultanément, ou plus exceptionnellement, quatre ou cinq communes comme en juin 2018. Les tendances climatiques actuelles devraient, selon les modèles, se traduire par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies violentes, exposant le territoire à un accroissement des risques.

Bien que connues et très présentes, les inondations par ruissellements sont relativement peu étudiées et n'ont pas de cartographie officielle comme c'est le cas pour les débordements (notamment celles des PPRi ou des ZIP-ZICH produites par l'État). L'élaboration de cartographies d'aléas du ruissellement pluvial en milieu urbain comme en milieu rural se heurte d'une part à la difficulté de modélisation, et d'autre part aux nombreux paramètres à intégrer : degré d'imperméabilisation, connaissance fine de la topographie, capacité des réseaux d'évacuation d'eau pluviale, inondations par remontées de ces réseaux, phénomènes météorologiques… Ainsi, les collectivités territoriales ne disposent aujourd'hui que de peu d'éléments pour déterminer les zones à risques et orienter les stratégies de prévention dans le cadre des projets d'aménagement urbain.

L'EPTB Seine Grands Lacs a décidé de recourir à l'expertise de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) pour obtenir des données et informations lui permettant de procéder à l'analyse de l'exposition au risque de ruissellement. La CCR exerce une activité de réassurance publique dans le domaine des risques à caractère exceptionnel, notamment les catastrophes naturelles. Elle a élaboré, à l'échelle nationale, une cartographie au 1/25000ème des phénomènes de ruissellement selon plusieurs scenarii de pluies en fonction de quatre périodes de retour depuis la vicennale (1/20) jusqu'à la bi-centennale (1/200). Cette cartographie a été transmise à l'EPTB Seine Grands Lacs dans le cadre de la présente étude, suite à une convention signée en 2019.

Résultant d'un modèle de simulation prenant en compte les pentes naturelles, l'occupation du sol et la pluviométrie, cette cartographie (cf. Figure 1) traduit l'intensité du ruissellement simulé sur une maille de 25 m du Modèle Numérique de Terrain (MNT IGN à 25 m de résolution). Pour chaque période de retour de l'aléa, des classes d'intensités ont été définies, correspondant à des valeurs de débit cumulé de ruissellement.

Le modèle reproduit donc les écoulements sur le relief avec une intensité plus forte dans les zones urbanisées. Cependant, dans un bassin urbanisé, des phénomènes particuliers, non reproduits dans le modèle CCR, peuvent parfois être générateurs de sinistres très localement.

La restitution par maille de 25 m x 25 m conduit à une approche « maximaliste » des zonages d'aléas (extension spatiale). Par ailleurs, issue d'un modèle national, cette cartographie peut présenter localement des incohérences manifestes (au niveau de plans d'eau par exemple). Cependant, même avec des limites, cette cartographie apparait comme un premier outil de connaissance et de sensibilisation aux risques d'inondation par ruissellement très utile sur le territoire.

La carte des aléas produite pas la CCR permet de distinguer deux types de zones :

- Des zones d'accumulation où les pentes sont faibles et les débits relativement faibles (< 1m^3/s) ;
- Des zones d'écoulement qui correspondent à des rus ou des talwegs secs caractérisés par de forts dénivelés et des écoulements pouvant dépasser les 5 m^3/s.

Pour pallier les difficultés de constitution et/ou d'accès aux données, ainsi que les imprécisions de sa modélisation, la méthode développée se base sur des ateliers de concertation qui visent notamment à identifier les axes d'écoulement préférentiels et croiser ceux-ci avec les enjeux exposés.

Les cartes de la CCR, retravaillées par l'Institut Paris Région, ont servi de support dans le cadre des ateliers réalisés avec les acteurs du territoire fin 2019 et début 2020. Ces ateliers viennent soutenir le travail d'état des lieux et de diagnostic opérés essentiellement à partir de données et de modèles numériques. Ils ont permis également d'appréhender la sensibilité des acteurs et de pressentir les enjeux exposés à travers cet aléa.

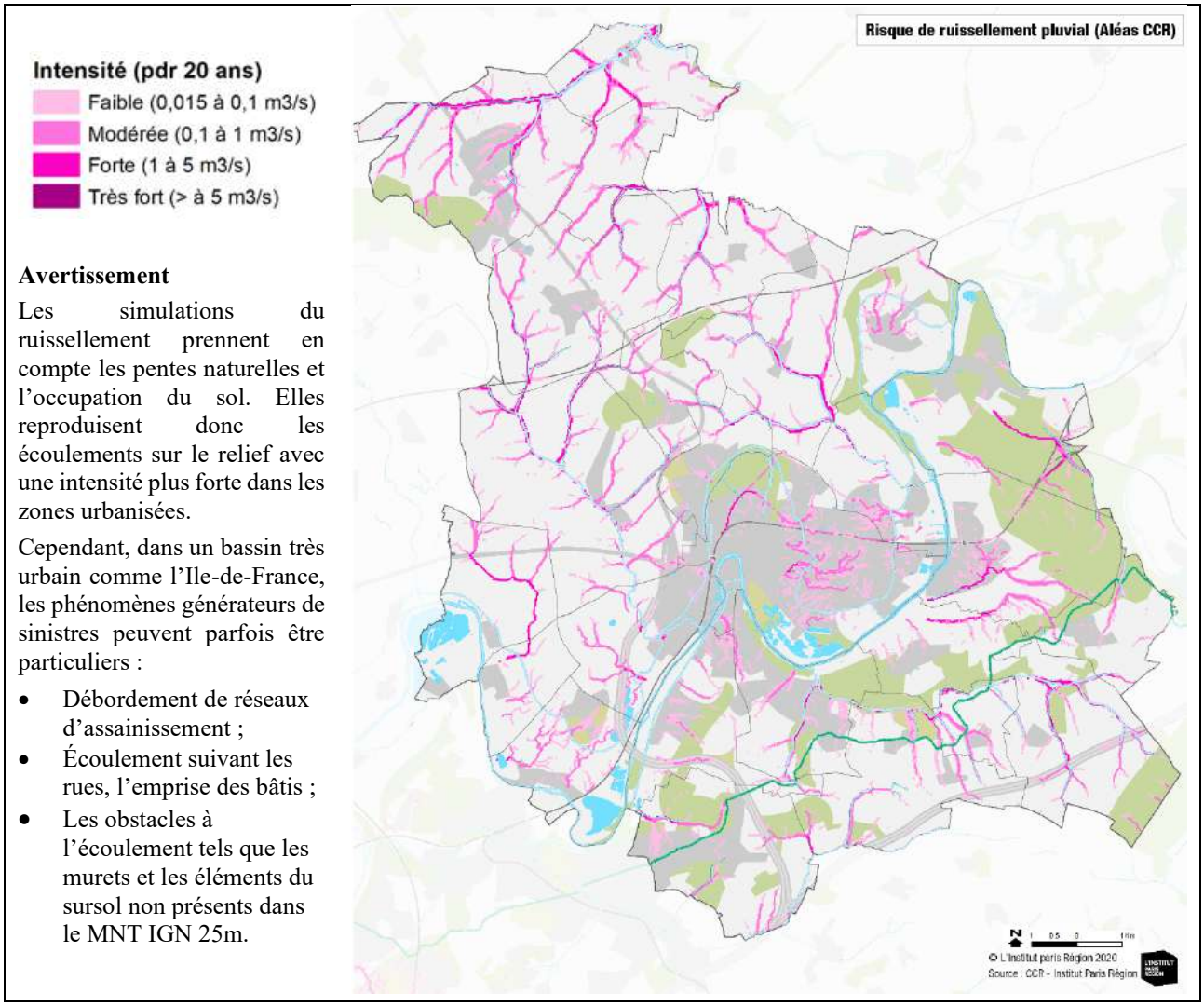


Figure 1 : Cartographie de l'aléa ruissellement pour une période de retour 20 ans sur le territoire de la CA du Pays de Meaux (Sources : CCR, Institut Paris Region)

2. MISE EN PLACE D'ATELIERS

2.1. Méthodologie et réalisation

Comme nous l'avons vu précédemment, les objectifs des ateliers sont multiples :

- Associer l'ensemble des parties prenantes concernées, considérant que c'est en les associant suffisamment tôt qu'il y a le plus de chance que les acteurs du territoire soient effectivement proactifs dans la définition concertée et la mise en œuvre de ces actions ;
- Informer ces acteurs de la tenue de la démarche et les sensibiliser à cette approche centrée sur la vulnérabilité, sachant que nombre d'entre eux restent focalisés prioritairement sur les logiques de protection (ouvrages) qui prévalaient jusqu'à récemment ;
- Accorder à leur connaissance du terrain et/ou à leur expérience une reconnaissance suffisante pour qu'ils estiment pouvoir être acteurs d'une telle démarche.

Chaque atelier dure de 3h00 à 3h30 et se déroule de la manière suivante (cf. Tableau 1) :

Tableau 1 : Déroulement d'une séance "atelier" (source : Institut Paris Région et Contrechamp)

Temps	Séquence
45 min – 1h *(Plénier)*	**Présentation de la démarche** d'ensemble et de l'atelier Vulnérabilité territoriale : de quoi parle-t-on ? Première approche vulnérabilité du site au travers de la présentation des cartes produites par l'Institut Paris Région
1h30 – 2h *(groupes de travail par secteurs hydrographiques)*	Après introduction et tour de table (10 mn), chaque groupe travaille sur la base de 3 temps de travail : • **Repérage et description** sur la carte des sites de débordements constatés et des sinistres associés sur carte A3 (30 mn) par petits groupes associant potentiellement des acteurs issus d'une même commune. Des fiches descriptives des sinistres observés (date, hauteur, types et nombre de biens touchés, types de dégâts, éventuellement coûts des dommages) sont fournies • **Mise en commun** sur la carte A0 de l'ensemble des sites repérés (20 mn) • **Problématisation** : temps d'échange sur les mesures mises en œuvre jusqu'à maintenant pour réduire la vulnérabilité des sites concernés en termes de prévention (réduction et maîtrise ruissellement), de gestion de crise (alerte, secours), de retour à la normale (nettoyage, réparations dommages). Quels moteurs et quels freins si elles existent ? Pourquoi n'existent-elles pas si c'est le cas ? (30 mn)
30 min – 45 min *(Plénier)*	**Retour des groupes** avec présentation des cartes et des mesures évoquées (5/10 mn par groupe) par les rapporteurs et les animateurs **Échanges** (15 à 20 mn)

Durant ces ateliers, les acteurs présents, à partir des cartes de travail réalisées par Institut Paris Région (cf. Figure 2 et Figure 3), ont localisé les sinistres dont ils avaient connaissance et pour lesquels ils ont caractérisé les dommages subis (exemple développé dans la partie 2.2). Ce procédé a donné aux participants l'occasion d'exprimer leurs attentes en matière d'approfondissement de la connaissance sur les cartes (carte des zones humides, repérage des voieries touchées, géologie du sous-sol pour envisager les capacités d'infiltration naturelle, localisation des « sources, étude de la toponymie, …).

Du point de vue de la connaissance, le principal acquis de ces ateliers est d'avoir permis de répertorier une série de points de vigilance sur le territoire, pour lesquels des phénomènes de ruissellement ont affecté différents biens et équipements, ainsi que de caractériser les dommages subis. Ils ont contribué à un réel apport de connaissance portant sur un aléa et un risque patents, mais mal appréhendés.

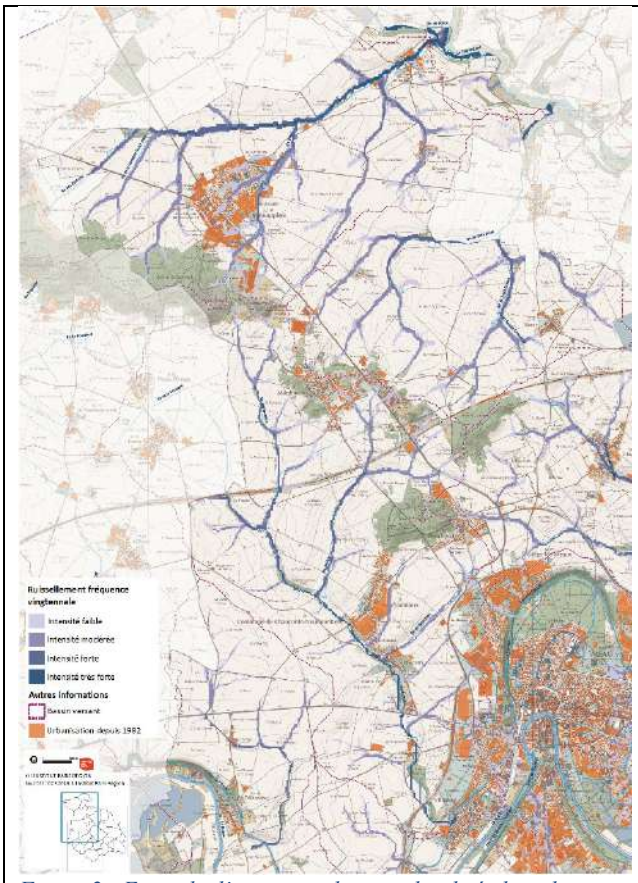


Figure 2 : Exemple d'une carte de travail utilisée lors de l'atelier « Ruissellement » réalisé avec la CA du Pays de Meaux (Source : Institut Paris Région)

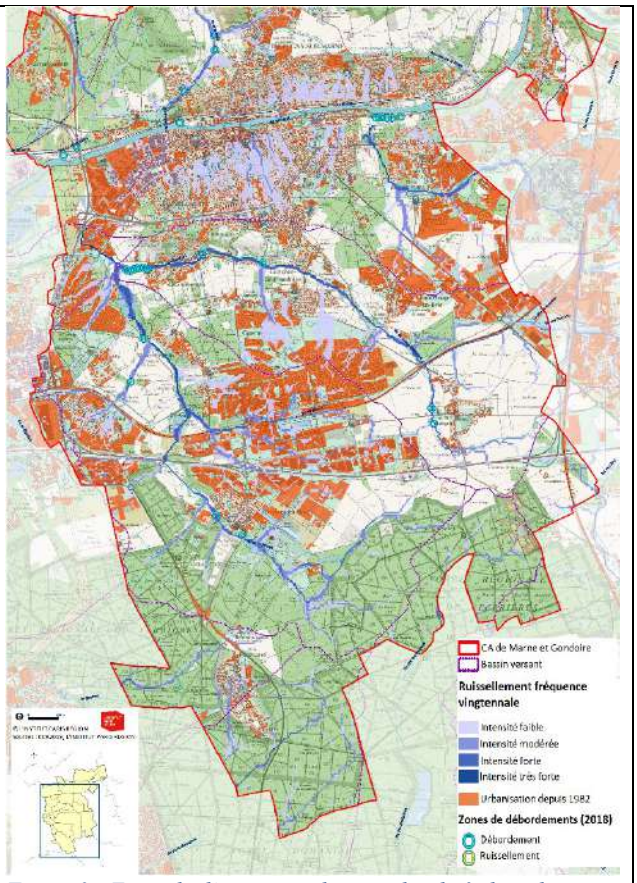


Figure 3 : Exemple d'une carte de travail utilisée lors de l'atelier « Ruissellement » réalisé avec la CA de Marne et Gondoire (Source : Institut Paris Région)

En conclusion, les données de la CCR, associées aux contributions des participants à l'atelier consacré à l'aléa ruissellement, ont permis d'en confirmer l'existence, la localisation, l'ampleur, la récurrence et l'impact sur les enjeux exposés au phénomène. Les cartes de la CCR ont été appréciées et ont contribué à créer une dynamique de participation permettant à la fois de sensibiliser/informer les acteurs présents et de compléter la connaissance du terrain d'étude. Par ailleurs, un point important ressort de l'analyse des deux territoires diagnostiqués. En effet, les zones d'aléa ruissellement représentent environ les 2/3 des zones d'aléas inondations de chaque territoire. La plus grande implication des acteurs locaux sur cet aléa particulier est un premier pas important dans la prise de conscience de l'ampleur de ce phénomène sur le territoire.

Au niveau du ressenti des acteurs, si les phénomènes de ruissellement ont des impacts ponctuels et limités sur le territoire, leur caractère rapide et violent marque fortement les esprits des populations et des élus communaux concernés. En outre, le sentiment de voir ce type de phénomènes se multiplier ces dernières années accroit le souci des élus de voir ces questions prises en compte dans le cadre de cette démarche visant la réduction de la vulnérabilité du territoire aux inondations. À cela s'ajoute le fait que le ruissellement concerne l'ensemble du territoire, alors que le débordement concentre son impact sur les villes riveraines des cours d'eau, ce qui permet également de mettre en valeur le caractère pleinement territorial de cette démarche de diagnostic de vulnérabilité aux risques d'inondation.

2.2. Quelques exemples de résultats pour la CA du Pays de Meaux

Les ateliers ont réuni des acteurs locaux intéressés par les risques (élus, services de l'État et des collectivités, opérateurs de réseaux, chambres consulaires, représentants de la profession agricole, associations, etc.). Il y a eu respectivement une trentaine de participants, avec une forte représentation des communes du territoire, pour la CA de Marne et Gondoire et une quarantaine de personnes pour la CA du Pays de Meaux. Ces ateliers ont donc bénéficié d'une audience globalement satisfaisante, même si la CA du Pays de Meaux a pu déplorer l'absence d'acteurs importants (opérateurs réseaux, industrie, hôpital). Ces acteurs ont cependant fait l'objet de contacts directs suite aux ateliers (ex. ERDF, ENGIE, Hôpital, BASF…).

S'agissant de phénomènes ponctuels et localisés dans l'espace, la connaissance émane essentiellement de l'échelle communale. Par ailleurs, ce phénomène touche principalement des communes rurales ou situées à l'aval des rus, à proximité de leur confluence avec la Marne. Dans certains cas, il peut s'agir de débordements de ces rus.

Sur les 43 points de vigilance signalés lors des ateliers à Meaux (cf. Figure 4) : 20 portaient sur le ruissellement sur des terres agricoles, 15 sur des débordements de petits cours d'eau, 5 sur des dysfonctionnements d'ouvrages ou des engorgements de réseau pluvial et enfin 5 étaient des corrections indiquant que le secteur n'avait pas été inondé.

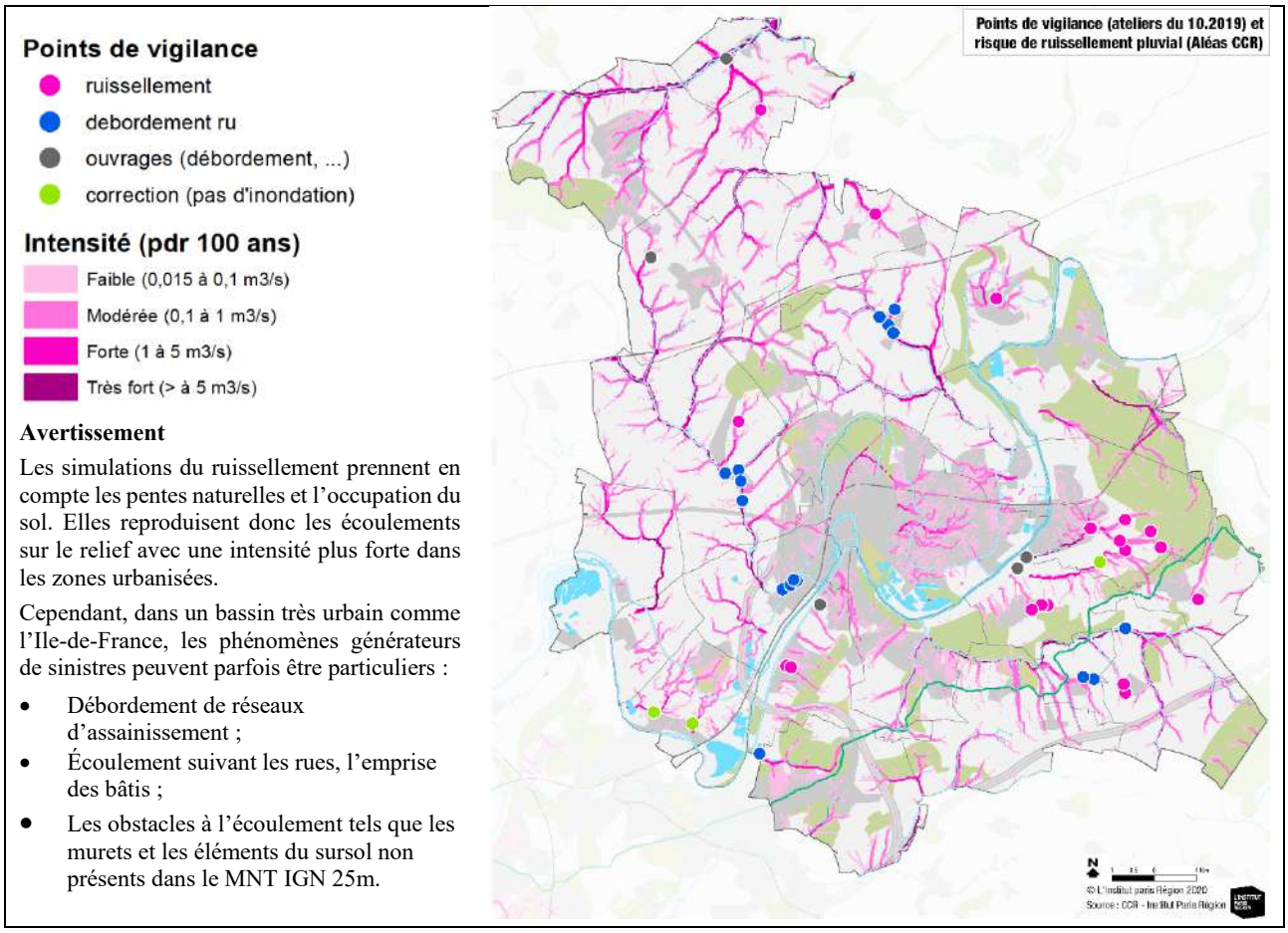


Figure 4 : Exemple de la localisation des points de vigilance recueillis à l'occasion de l'atelier ruissellement sur le territoire de la CA du Pays de Meaux - cartographie de l'aléa ruissellement pour une période de retour 100 ans (Sources : CCR, Institut Paris Region)

La somme des surfaces potentiellement exposées varie selon les scénarii de période de retour de 1 730 ha (PDR 20 ans) à 3 030 ha (PDR 200 ans) (cf. Figure 5). S'agissant d'évènements souvent très localisés, liés à des épisodes de pluies intenses à caractère orageux, l'ensemble de ces surfaces n'est pas concerné simultanément à l'échelle du territoire. Il faut également garder à l'esprit que le mode de calcul et de représentation à la maille de la cartographie d'aléa est par ailleurs majorant. Le niveau de risques, lui, reste globalement faible : 85 % des surfaces sont exposées à des niveaux d'intensité faible (0,015 à 0,1 m^3/s) à modéré (0,1 à 1 m^3/s).

Au total, les surfaces exposées aux risques d'inondation par ruissellement sont sensiblement plus importantes que celle exposées aux inondations par débordement de la Marne pour des occurrences similaires :

- 2 310 ha dans le scénario PDR 50 ans pour 1 350 ha dans le scénario R0.9 (Crue aléa PPRi, occurrence cinquantennale) ;
- 2 610 ha dans le scénario PDR 100 ans pour 1 486 ha dans le scénario R1.0 (crue 1910, occurrence centennale) ;
- 3 030 ha dans le scénario PDR 200 ans pour 1 620 ha dans le scénario R1.15 (crue historique exceptionnelle).

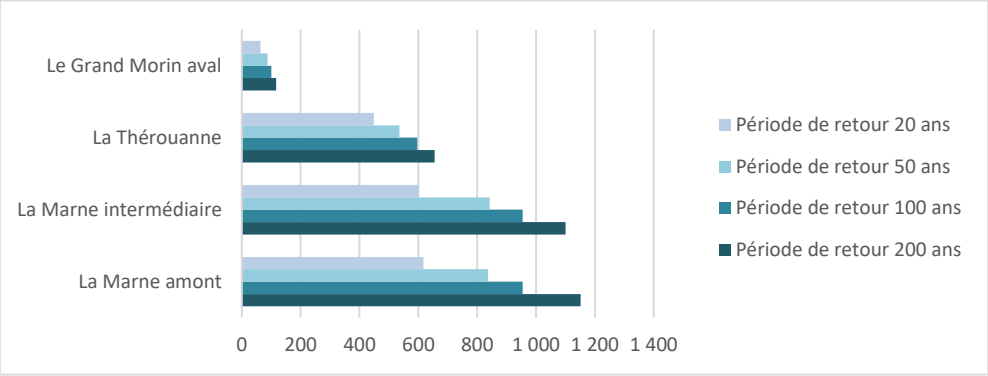


Figure 5 : Exposition du territoire (en ha) en fonction des périodes de retour sur les bassins versants de la CA du Pays de Meaux (Source : CCR, 2019 - Traitement Institut Paris Region)

Le croisement de ces données d'aléas ruissellement avec les données bâtis de la BD Topo (> 10 m²) permet également d'évaluer l'exposition des constructions (cf. Figure 6) : de 3 260 bâtiments intersectés partiellement ou en totalité dans le scénario PDR 20 ans jusqu'à 9 870 bâtiments dans le scénario PDR 200 ans. Le bassin Marne intermédiaire concentre plus de 50 % des enjeux bâtis. Plus de 80 % de ces bâtiments s'inscrivent dans les tissus d'habitat individuel et collectif : immeubles d'habitation, locaux techniques, dépendances, garages... Une nouvelle fois, la restitution du zonage d'aléas à la maille est de nature à majorer le nombre de bâtiments réellement exposés.

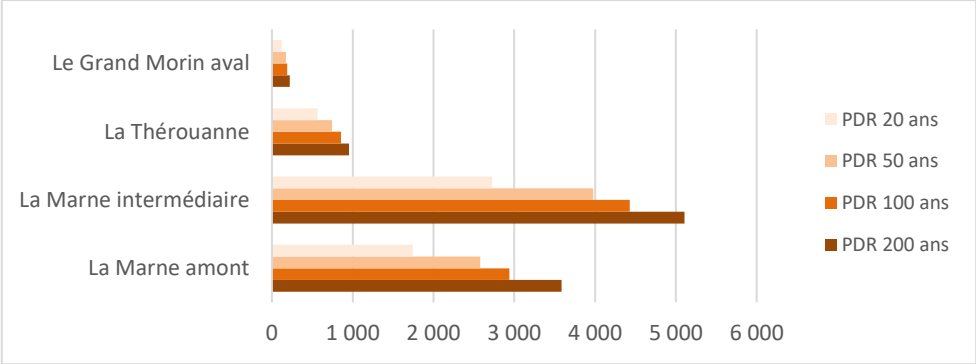


Figure 6 : Exposition enjeux bâtis (Nombre) en fonction des périodes de retour sur les bassins versants de la CA du Pays de Meaux (Source : CCR, 2019 - Traitement Institut Paris Region)

Une fois les indicateurs de l'exposition de la CA du Pays de Meaux aux inondations par ruissellement définis et la cartographie de l'aléa établie, il est possible de connaitre l'exposition potentielle du territoire, et d'amorcer des processus de réflexion sur la diminution de la vulnérabilité liée au ruissellement.

3. RETOUR SUITE AUX ATELIERS DE CONCERTATION

Suite à cet état des lieux, une liste d'actions à mettre en œuvre pour réduire le risque d'inondation par ruissellement est établie, en insistant particulièrement sur les objectifs à poursuivre en termes d'occupation du sol et d'aménagement de l'espace. Le cas échéant, ces objectifs peuvent par exemple être repris par les Schémas de Cohérence Territoriale (SCOT), les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) et les cartes communales.

Les acteurs concernés considèrent que l'accroissement de ce phénomène sur le territoire est fortement lié à la façon dont l'homme intervient sur l'aménagement. Pour eux, les causes humaines d'accroissement du ruissellement sont liées à :

- L'urbanisation : facteur d'artificialisation des sols ;
- L'insuffisance et la déficience des ouvrages de rétention ou d'écoulement des eaux pluviales ;
- L'évolution des pratiques agricoles (accroissement de la taille des parcelles, suppression ou manque d'entretien de fossés ou de talus, déboisement, etc.).

Les acteurs considèrent également que les évolutions climatiques en cours doivent contribuer à la multiplication d'épisodes pluvieux violents. Il leur semble donc nécessaire d'intervenir non pas uniquement sur les conséquences de ces ruissellements mais également sur les causes. Réduire la vulnérabilité du territoire au ruissellement va donc concerner autant la mise en place d'actions destinées à juguler et limiter l'aléa qu'à agir sur l'exposition des enjeux.

La consultation des acteurs a aussi permis de constater que les projets destinés à réduire ou ralentir les flux résultant du ruissellement sur le territoire sont essentiellement portés par des communes. La plupart ont déjà des projets de réduction de l'aléa ruissellement, dont certains sont réalisés ou en voie de réalisation. Ces projets portent sur :

- L'entretien de rus et la recréation de fossés ;
- La création de bassins-tampons ;
- La restauration de zones naturelles d'expansion de crue ;
- L'évolution des pratiques agricoles est plus rarement envisagée, alors que des retours d'expériences, notamment ceux de l'association normande AREAS montrent que les agriculteurs sont les acteurs clés de ces démarches.

Si nous reprenons l'exemple de la CA du Pays de Meaux, le principal acquis de cet atelier est d'avoir permis de répertorier une série de sinistres sur le territoire, pour lesquels des phénomènes de ruissellement ont affecté le patrimoine bâti, ainsi que de caractériser les dommages subis. Même si les enjeux impactés peuvent apparaître comme localement limités, les participants témoignent d'un ressenti marqué à la fois par :

- La soudaineté et l'imprévisibilité de l'aléa dans tous les cas associés à des épisodes de précipitations,
- La violence et la manière très localisée dont il s'exprime ;
- Le constat que ce type de phénomène tend à se multiplier depuis quelques années (moins de 10 ans).

Quant aux causes invoquées, qui font échos aux projets de réduction de l'aléa ruissellement, elles sont attribuées à la fois à :

- Des épisodes pluvieux violents et subis, dont la plupart des participants estiment qu'ils étaient exceptionnels il y a encore quelques années. Ce caractère récent favorise l'idée que l'accroissement des phénomènes de ruissellement est étroitement lié aux évolutions climatiques en cours et qu'ils devraient être de plus en plus fréquents dans les années à venir, tout en demeurant aussi soudain et imprévisible ;
- L'évolution des pratiques agricoles en lien avec l'observation de coulées de boues, témoignant de l'origine des flux. Sont ainsi évoquées l'agrandissement des parcelles cultivées, la suppression et le manque des fossés, les modalités de travail du sol, la proximité des parcelles des zones habitées sans zone tampon ;
- La gestion des écoulements pluviaux sur les communes et les possibles désordres constatés (réseaux d'assainissement) ;
- Le déficit d'entretien de certains fossés associés aux infrastructures routières a pu être regretté.

Avant même d'envisager de nouvelles actions, la dynamique de la démarche territoriale de réduction de vulnérabilité du territoire demande donc d'effectuer un recensement et un examen de ces projets, afin d'en mesurer la pertinence et l'efficacité attendue. Certains de ces projets mériteront d'être intégrés au plan d'actions (PAPI, contrat territorial, etc.), sachant qu'ils seront *a priori* placés sous la maîtrise d'ouvrage des collectivités compétentes sur la GEMAPI (CA de Marne et Gondoire, CA du Pays de Meaux ou syndicats de bassins versants existants). Ceci étant dit, une des inquiétudes exprimées par les élus communaux consultés est justement que le passage à une approche intercommunale, associée à la prise en compte de l'aléa débordement (avec un impact territorial sans commune mesure avec le ruissellement), amène à négliger les projets communaux destinés à réduire l'impact de l'aléa ruissellement sur leur territoire. Les communes rurales craignent également de voir leurs enjeux minimisés au regard d'enjeux plus urbains et sensibles.

Cette approche orientée sur les causes du ruissellement n'interdit cependant en rien d'envisager des mesures destinées à réduire l'exposition ou la vulnérabilité des personnes et des biens concernés, notamment en raison du caractère récurrent du ruissellement en certains points du territoire.

CONCLUSION

Dans le cadre du PAPI de la Seine et de la Marne Franciliennes, l'ETPB Seine Grands Lacs a souhaité développer une approche novatrice de diagnostic de la vulnérabilité des territoires aux inondations, en intégrant le phénomène de ruissellement à la liste des aléas (débordements de cours d'eau et remontée de nappes) à analyser. Ces phénomènes ont la particularité d'entrainer des inondations au-delà des limites géomorphologiques des cours d'eau, notamment dans des talwegs secs et en milieu urbain. Au-delà de l'association large des acteurs du territoire, la nouveauté vient donc de l'intégration de ces phénomènes de ruissellement aux diagnostics de vulnérabilité du territoire aux inondations qui sont traditionnellement plus dévolus aux débordements et remontées de nappes.

Les diagnostics de vulnérabilité territoriale et le guide méthodologique qui en découle sont réalisés par un groupement de deux prestataires (Institut Paris Région et Contrechamp) pour l'EPTB qui est maître d'ouvrage. Les Communautés d'Agglomération du Pays de Meaux et de Marne et Gondoire sont deux des trois territoires pilotes qui se sont portés volontaires pour accueillir la démarche.

Pour pallier aux difficultés de constitution et/ou d'accès aux données de ruissellement, l'EPTB a utilisé les cartes issues du modèle développé par la Caisse Centrale de Réassurance. Ces cartes d'aléas ruissellement ont été présentées aux acteurs locaux (élus, techniciens de l'État, des collectivités, gestionnaires de réseaux, représentants de la profession agricole, associations, etc.) lors d'ateliers de concertation.

Les constats tirés de ces ateliers sont positifs et ils démontrent un intérêt réel à poursuivre cette démarche. Cette méthode a permis, d'une part, de sensibiliser les différents acteurs au phénomène de ruissellement. D'autre part, elle a également confirmé et précisé la localisation et l'ampleur du phénomène grâce aux témoignages de ces acteurs qui ont vécu dans les deux dernières décennies plusieurs phénomènes d'orages intenses soudains et donc de valoriser leur connaissance du terrain.

La démarche, qui est en cours, a pour finalité d'établir une liste d'actions hiérarchisées destinées à réduire le risque d'inondation par ruissellement. Ces actions doivent se décider collégialement, par les acteurs locaux, en fonction des moyens humains et financiers qu'ils peuvent/veulent y consacrer à court et plus long terme, tout en insistant particulièrement sur les objectifs à poursuivre en termes d'occupation du sol et d'aménagement de l'espace. Même si les données de la CCR n'ont pas de portée réglementaire, rien n'empêche de les croiser avec les documents d'urbanisme et de réfléchir à comment diminuer le risque. Le phénomène de ruissellement provoque régulièrement une fracture entre le monde agricole et le monde urbain. Les différents acteurs étant assis autour d'une même table, et d'une même carte, lors de ces ateliers, peut-être que des discussions pourront s'engager également sur des procédures d'aménagement foncier rural qui satisferaient le monde agricole et aiderai, là aussi, à diminuer le risque.

REFERENCES

CEREMA (2016) – *Référentiel national de vulnérabilité aux inondations*. CEPRI et Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

Ledoux consultant et Contrechamp (2015). – *Guide ReViTeR : diagnostic territorial et plan d'actions de réduction de la vulnérabilité aux inondations*. DREAL Rhône-Alpes

Institut Paris Région et Contrechamp (Avril 2020). – *Diagnostic de vulnérabilité aux inondations de la Communauté d'Agglomération du Pays de Meaux : Rapport de diagnostic* (document de travail). ETPB Seine Grands Lacs

Institut Paris Région et Contrechamp (Juin 2020). – *Diagnostic de vulnérabilité aux inondations de la Communauté d'Agglomération de Marne et Gondoire : Rapport de diagnostic* (document de travail). ETPB Seine Grands Lacs

Analyse coût-bénéfice du programme d'actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie : évaluation des actions passées et projections futures sur le bassin versant de la Lézarde (Patault *et al.*)

Analyse coût-bénéfice du programme d'actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie : évaluation des actions passées et projections futures sur le bassin versant de la Lézarde

Edouard PATAULT[1], Arnaud SOULIGNAC[2], Valentin LANDEMAINE[3], Jérôme LEDUN[4], Erwan ALLARD[5], Matthieu FOURNIER[1], Jean-François OUVRY[4], Olivier CERDAN[3], Benoit LAIGNEL[1]

[1] Normandie UNIV, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C, FED-SCALE, Rouen, France ; edouard.patault1@univ-rouen.fr

[2] BRGM, 1039 rue de Pinville, F-34000 Montpellier, France

[3]BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP6009, F-45060 Orléans Cedex 2, France

[4] AREAS, 2 avenue Foch, F-76460 Saint-Valéry-en-Caux, France

[5]DHI, 2/4 rue Edouard Nignon 44300 Nantes

Les départements de Seine-Maritime et de l'Eure sont très sensibles aux ruissellements qui induisent des inondations et coulées boueuses. Des investissements massifs ont été réalisés ces dernières années pour réduire les risques associés à ces processus, à travers le développement d'actions préventives/correctives. Pourtant l'efficacité de cette politique publique n'a toujours pas été évaluée. A l'échelle d'un bassin pilote (la Lézarde ; 212 km²), cette étude originale combine la modélisation en parallèle du ruissellement (MIKE11), des transferts sédimentaires (WaterSed), et une analyse coût-bénéfice selon différents scénarios d'aménagement du territoire (passé, actuel, changement climatique, modification des pratiques agricoles). Ces modélisations ont été réalisées pour trois pluies de projet. Les simulations suggèrent que les ouvrages hydrauliques structurants sont efficaces au regard des dommages aux biens et économiquement efficients (bénéfice/coût ~2). Dans l'hypothèse d'un changement climatique (sur la base des scénarios RCP4.5-8.5 du GIEC), les dommages par inondation vont augmenter tout comme le montant des dommages évités, ce qui justifie d'autant plus la création de ces aménagements et prouve leur efficacité. Les résultats montrent que l'hydraulique douce permet de piéger une quantité significative de sédiments, mais leur efficience économique n'est pas démontrée par nos simulations. L'ensemble des bénéfices apportés par ces ouvrages n'ont toutefois pas pu être intégrés faute de données économiques disponibles et suffisantes. La modification du paysage agricole aura à terme une influence significative sur l'évolution des dommages : (i) en modifiant les pratiques culturales, une réduction significative des dommages est attendue (-250 k€$_{2000}$ an^{-1}), et (ii) en réduisant d'un tiers les surfaces en herbe, une augmentation des dommages sera significative (+400 k€$_{2000}$ an^{-1}). Cette étude montre la pertinence de la modélisation en parallèle pour évaluer l'efficacité et l'efficience économique des actions anti-érosion/ruissellement. Elle montre également qu'il est nécessaire de développer de nouvelles fonctions de dommages associées à ces processus. Enfin, la méthodologie développée dans cette étude pourrait être appliquée sur d'autres territoires afin d'évaluer les stratégies d'interventions publiques de lutte contre l'érosion et le ruissellement.

Mots-clefs : érosion, ruissellement, modélisation, analyse coût-bénéfice.

Cost-benefit analysis of past and future actions in the context of an erosion and surface runoff impacts' mitigation program in Upper-Normandy: The case of the Lezarde watershed

The Seine-Maritime and Eure areas are highly vulnerable to surface runoff impacts, such as floods and mudflows. Recent years saw massive investments in public policies to reduce the risks associated with those hazards, however, such policies' effectiveness has never been done. This original study combines the parallel modelling, at the watershed scale (Lézarde; 212 km²), of runoff (MIKE11) and sediment transfer (WaterSed), with a cost-benefit analysis of mitigation program for different scenarios (past, present, future, and modified agricultural practices scenarios), with three designed storm project simulations for each scenario. The results from the simulations suggest that structural hydraulic structures (i.e. dams and retention ponds) are effective in terms of damage mitigation and economically efficient (benefit / cost ~ 2). In the context of climate change (IPCC RCP4.5 and 8.5 projections), floods' potential damage increases, and so does the damage mitigation, proving the effectiveness of those structures. While soft erosion control measures can trap a significant amount of sediment, the lack of sufficient economic data did not allow us to integrate all the benefits from those measure and thus demonstrate their economic efficiency. The modification of agricultural practices has a large influence on flood's potential damage: (i) a significant reduction of damage is expected by modifying agricultural practices (-250 k€$_{2000}$ yr^{-1}), (ii) a significant decrease of damage is observed by reducing grassland areas by a one third (+400 k€$_{2000}$ yr^{-1}). This study shows the relevance of parallel modelling to assess the effectiveness and economic efficiency of anti-erosion/surface runoff actions. It also shows that it is necessary to develop new damage functions associated with

these processes. Finally, the methodology developed in this study can be applied to other territories to evaluate public intervention strategies for erosion and runoff control.
Key words: erosion, surface runoff, parallel modelling, cost-benefit analysis

INTRODUCTION

Les départements de Seine-Maritime et de l'Eure sont caractérisés par une très forte sensibilité aux ruissellements sur l'ensemble du territoire. La forte densité d'inondations par ruissellements et coulées boueuses au km² classe la région au second rang français [Le Bissonnais et al., 2002]. Au début des années 2000, des inondations de grande ampleur ont notamment causé d'importants dégâts matériels et des pertes humaines sur la région. Par ailleurs, un problème de turbidité aux captages d'eau potable affecte la région, avec 50% des points d'alimentation touchés au moins une fois et un coût estimé à 5M€ depuis les années 1992 [ARS, 2013 ; Patault et al., 2019]. Ces particularités régionales résultent de la conjonction de plusieurs facteurs : nature des sols, types et systèmes d'agriculture, occupation des sols, réduction de l'élevage, nature karstique du sous-sol, forte densité de pertes ou bétoires dans les talwegs, ou encore paysage de grandes cultures. Des stratégies d'actions ont été développées à la fin des années 90 pour lutter contre ces phénomènes d'inondations par ruissellements et de coulées boueuses. Ces stratégies ont fondé la politique régionale conduite depuis le début des années 2000 dans la lutte contre les inondations par ruissellements et coulées de boue. La mise en œuvre et le développement des actions a ainsi été favorisé par la création d'outils d'accompagnement y compris financiers, qui ont évolué au cours des années 2000-2015 pour rendre les politiques plus efficaces ou s'adapter aux évolutions du contexte réglementaire. Mais après plus de 15 années de développement d'actions préventives et correctives sur les bases établies en 2000, se pose la question de la poursuite de ces actions selon quelle direction, quels objectifs, et quels financements ? L'objectif de cette étude est ainsi d'évaluer le programme d'actions publiques mené depuis 2000 visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion, et de proposer des éléments d'aide à la décision pour une éventuelle adaptation et/ou réorientation si besoin de la stratégie d'intervention publique au regard de différentes évolutions possibles des pratiques agricoles et du climat. Pour cela, cette étude propose deux modélisations en parallèle des processus d'inondation par débordement de cours d'eau et de ruissellement par coulées boueuses, et une analyse coût-bénéfice sur un bassin versant pilote de la Seine-Maritime particulièrement exposé à ces risques (bassin versant de la Lézarde). Les modélisations sont réalisées pour trois pluies de projet selon différents scénarios permettant d'évaluer la stratégie d'intervention publique passée et de simuler des évolutions futures probables.

SITE D'ETUDE

Le bassin versant de la Lézarde (212 km²) est situé dans la partie Nord-Ouest du département de Seine-Maritime en France (figure 1). La Lézarde est le dernier affluent en rive droite de la Seine. La Lézarde prend sa source à Saint-Martin-du-Bec (47 m NGF) et rejoint le canal de Tancarville à Gonfreville l'Orcher pour déboucher dans l'estuaire de la Seine (linéaire de 14 km). La pluviométrie moyenne annuelle varie de 750 à 850 mm et la région du Havre est la plus arrosée de Haute-Normandie avec un gradient annuel allant de 700 mm à 1000 mm. La texture du sol est principalement limono-sablo-argileuse dans la partie Est du bassin versant, limono-sableuse dans la partie Ouest, et limoneuse dans les talwegs. Les terres arables représentent 50% du territoire (mixte culture d'hiver, culture précoce/tardive de printemps), les prairies 16%, les espaces urbanisés 12,3%, et les forêts 6,3%. Le reste du territoire est occupé par des espaces industriels, mixtes, des espaces verts artificialisés, et les eaux continentales.

METHODE

L'Analyse Coût-Bénéfice (ACB) nécessite en entrée des cartographies de l'aléa inondation et coulée de boue. En l'état actuel des connaissances, aucun modèle n'est en mesure de simuler à la fois les inondations par débordement de cours d'eau, les inondations par ruissellement et les coulées de boue. Par conséquent, deux modèles complémentaires ont été utilisés sur le bassin versant de la Lézarde. La suite de modèle MIKE, développée par DHI [DHI, 2017], a été utilisée pour modéliser l'aléa inondation par débordement de cours d'eau dans les principales vallées. En complément, le modèle WaterSed, développé par le BRGM [Landemaine, 2016], a été utilisé pour modéliser l'aléa inondation par ruissellement et l'aléa coulée de boue sur les versants. Chaque modèle ayant ainsi son propre périmètre d'application (figure 1).

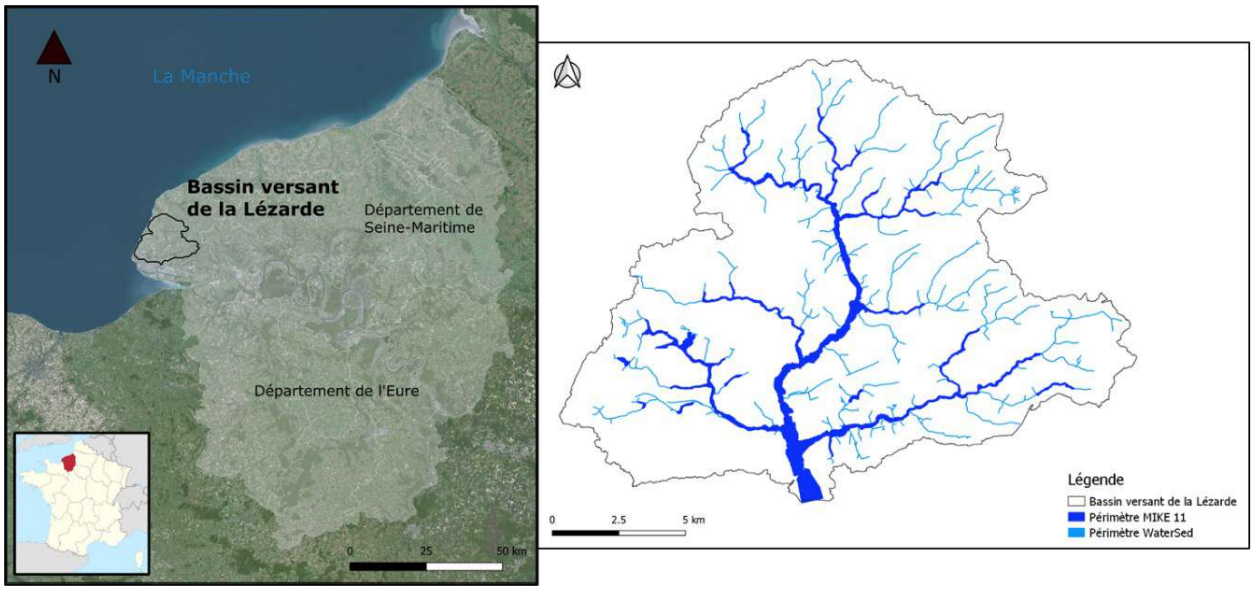


Figure 1 : (Gauche) Carte de localisation du bassin versant de la Lézarde (Seine-Maritime, France) ; (Droite) Axes de ruissellement et emprise de modélisation des modèles MIKE et WaterSed.

Modélisation de l'aléa inondation par débordement de cours d'eau

L'aléa inondation par débordement de cours d'eau sur le bassin versant de la Lézarde est modélisé avec la suite de modèle MIKE [DHI, 2017] qui comprend : (1) la modélisation des ruissellements dans les talwegs secs en amont (Mike Hydro River 2019 utilisé pour la partie hydrologie et hydraulique 1D) et (2) le modèle de rivière (MIKE Flood modèle hydraulique global). Le modèle de rivière, issu d'une étude de 2006 sur la vallée de la Lézarde, a été complété et mis à jour pour prendre en compte les ouvrages de rétention situés dans les talwegs secs en amont de la rivière (bassins et barrages en terre). Le bassin versant de la Lézarde fait l'objet d'un découpage en neuf sous-bassins versants. A chaque bassin versant correspond un modèle hydraulique 1D dont les débits de sortie sont injectés en entrée du modèle « rivière ». La méthode pluie-débit utilisée sur chacun de ces sous bassins versants est la méthode Unit Hydrograph Method (UHM) développée par le Soil Conservation Service [SCS, 1972], adaptée au ruissellement de type hortonien. Elle fait intervenir un paramètre de ruissellement nommé Curve Number (CN), dont les valeurs ont été adaptées à partir d'observation sur le Pays de Caux [AREAS, 2013]. Le CN d'un bassin versant est obtenu par moyenne pondérée de la proportion de chaque occupation du sol. Les données d'occupation du sol proviennent de l'Observatoire des Sols à l'échelle Communale (OSCOM) de 2016. Le fonctionnement de chaque ouvrage est intégré dans la modélisation 1D par un orifice de fuite, un seuil représentant la surverse et la crête, et des profils en travers pour la géométrie de la zone de rétention. Les débits sortants des ouvrages sont ensuite injectés dans le modèle 2D. Seuls les ouvrages de plus de 5 000 m^3 sont pris en compte afin de simplifier la construction du modèle, tout en conservant une bonne représentativité. Le modèle intègre donc 53 ouvrages (sur environ 200 ouvrages recensés), pouvant stocker 950 000 m^3 soit environ 75% du volume total (source bdcastor.fr). L'abattement de la pluie a été calibré en fonction des débits connus sur la Lézarde puis un abattement spécifique à chaque sous-bassin versant a été appliqué. Le modèle est calé sur l'évènement historique de référence, pour lequel le débit mesuré à la station de Montivilliers atteint 12,90 m^3/s, pour une pluie de 90 mm sur 24h (mesurée à la station Météo France du Cap de la Hève). La cartographie de l'aléa inondation est basée sur le relevé altimétrique du Référentiel à Grande Echelle (RGE ALTI® - IGN). Le modèle fournit 4 couches d'aléa pour chaque couple scénario x période de retour : 2 couches d'aléa « hauteur d'eau » (pour la rivière et pour les principaux talwegs secs) et 2 couches d'aléa « vitesse d'écoulement ». A noter que le modèle utilisé ici ne permet pas de représenter les pertes par infiltration des eaux de ruissellement dans les vallées sèches et le karst. C'est une limite des modèles semi-distribués dans le contexte régional.

Modélisation de l'aléa inondation par ruissellement et coulées de boues

Le modèle WaterSed est un modèle non-dynamique distribué simulant le ruissellement et l'érosion des sols depuis l'échelle de la parcelle à celle du bassin versant pour un évènement de pluie donné [Landemaine, 2016]. Calibré et/ou validé dans de nombreux contextes (Normandie, Mayotte, Champagne, Japon, etc.) cet outil permet d'évaluer l'impact de mesures préventives et curatives (aménagements d'hydraulique douce, mares,

etc.) ou encore de prévoir les conséquences de scénarios futurs d'occupation des sols et de changements climatiques. La construction du modèle hydraulique s'est concentrée sur les versants et dans les talwegs, en veillant à respecter les chemins d'écoulement des eaux depuis la ligne de partage des eaux jusqu'aux cours d'eau permanents et à prendre en compte l'ensemble des ouvrages hydrauliques susceptibles de modifier la réponse hydrologique du bassin (barrages, mares, bassins, etc.). La topographie du bassin versant de la Lézarde est issue du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de l'IGN de résolution 1m (RGE ALTI® 1m). Afin d'optimiser le ratio description du paysage/temps de modélisation, ce MNT a été agrégé à une résolution de 5m, ce qui constitue les sorties de la modélisation hydrologique. Les artefacts (pics et cuvettes) ont été corrigés sur ce MNT brut afin de garantir un gradient de pente continu depuis la ligne de partage des eaux jusqu'à l'exutoire du bassin versant et ainsi un écoulement continu du ruissellement. Les axes de ruissellement ont été digitalisés à partir de quatre sources de données (le réseau d'axe de ruissellement existant, les cours d'eau permanents et intermittents de la BD TOPO de l'IGN, le réseau brut calculé à partir du MNT, et les orthophotographies de la BD ORTHO). Les ouvrages de gestion des eaux de ruissellement existants ont été récupérés dans la base de données bdcastor.fr et dans la base de données de la communauté urbaine Le Havre Seine Métropole (LHSM). Les coordonnées de chaque ouvrage ont été vérifiées par photo-interprétation, et la cartographie des axes de ruissellement a été contrainte de façon à garantir une interconnexion de tous les ouvrages. 247 ouvrages ont été inventoriés pour une capacité de stockage totale de 1 477 000 m^3. Les aménagements d'hydraulique douce existants sont également intégrés au modèle hydraulique (57 fascines, 46 haies, 1 aménagement de bétoire). La cartographie de l'occupation des sols 2016 a été construite par intersection géométrique entre la cartographie de l'OSCOM de 2016 et le Registre Parcellaire Graphique (RPG) de 2016. La cartographie des sols a été obtenue auprès du Référentiel Pédologique Régional de Haute-Normandie (RRP HN) à une échelle 1/250 000ème afin d'obtenir une cartographie simplifiée des textures des sols dominantes. L'extraction des textures de sols permet ainsi de déduire un niveau d'érodibilité. La paramétrisation du modèle WaterSed consiste à affecter à chaque couple « sol/occupation du sol » des propriétés hydrodynamiques utilisables par le modèle WaterSed. A partir de nombreuses observations réalisées sur les sols cultivés du Nord de la France, trois facteurs majeurs sont identifiés (couvert végétal, état de dégradation structural, et rugosité ; [Cerdan et al., 2002]). Des règles de décisions, adaptées au contexte local permettent ainsi de déduire, à partir des états de surface des sols, les propriétés physiques des sols. Le modèle nécessite ensuite une première étape de calibration des valeurs des paramètres du moteur hydrologique et sédimentaire, et celle-ci est réalisée sur une crue de référence. Le choix s'est porté sur la station de Montivilliers (17 ans de mesures de débit à pas de temps horaire), et la crue du 21 au 24 janvier 2018 provoquée par 36 mm de pluie tombée sur trois jours. Cette crue est caractéristique d'une crue d'hiver intervenant sur sol saturé et permet de prendre en compte l'ensemble des ouvrages existants. La crue de validation est celle de juin 2003, crue de référence sur le bassin versant de la Lézarde qui avait engendré d'importants dommages sur le territoire. Pour une vision complète des étapes de calibration et de validation du modèle, le lecteur est invité à consulter la publication de [Landemaine, 2020].

Définition des pluies de projet et des scénarios

Chaque scénario est testé selon trois pluies de projet (tableau 1). Chaque pluie de projet correspond à un orage violent estival intervenant sur sol sec, selon les conditions de la crue de validation de juin 2003. Les cumuls de pluies sont identiques pour MIKE et WaterSed. Huit scénarios qui tiennent compte des actions passées sur le bassin versant de la Lézarde et des évolutions futures probables (tableau 2) permettent d'alimenter l'ACB. 3 scénarios de base en situation actuelle avec/sans actions sont utilisés pour évaluer l'efficacité des actions. 1 scénario d'aménagement ambitieux est simulé afin d'évaluer l'efficacité d'un programme d'aménagement hydraulique douce mené à terme. Et 4 scénarios prospectifs avec actions sont simulés pour évaluer leur efficacité dans les contextes futurs possibles.

Tableau 1 : Caractéristiques des pluies de projet utilisées dans le cadre de cette étude.

	Période de retour (années)		
	10	**50**	**100**
Intensité maximale à 6 min (mm/h)	45	45	45
Antécédent pluvieux à 48h (mm)	0	0	0
Cumul (mm)	51,9	74,7	87
Durée (min)	179	258	300

Tableau 2 : Synthèse des scénarios utilisés pour la modélisation des aléas et l'analyse coût-bénéfice.

Scénario	Description
Ref0	Scénario de référence sans aucun ouvrage, ni hydraulique structurante, ni hydraulique douce
Ref1	Scénario de référence avec ouvrages hydrauliques structurants, sans hydraulique douce
Actu	Scénario avec ouvrages structurants et aménagements d'hydraulique douce actuels (0,5 aménagements/km²) mis en œuvre entre 2000 et 2018 puis maintenus à l'identique jusqu'en 2050
Amb	Scénario avec aménagements actuels mis en œuvre entre 2000 et 2018 et maintenus à l'identique jusqu'en 2050 ; + développement du programme aménagement ambitieux d'hydraulique douce (5,5 aménagements/km² + 182 ha zones enherbées) entre 2018 et 2041 puis statut quo jusqu'en 2050
Ccm	Scénario avec aménagements actuels mis en œuvre entre 2000 et 2018 et maintenus à l'identique jusqu'en 2050 ; + augmentation progressive de l'intensité des pluies à partir de 2018 pour arriver en 2050 à une augmentation de 2% (RCP 4.5) [Laignel & Nouaceur, 2018]
Ccf	Scénario avec aménagements actuels mis en œuvre entre 2000 et 2018 et maintenus à l'identique jusqu'en 2050 ; + augmentation progressive de l'intensité des pluies à partir de 2018 pour arriver en 2050 à une augmentation de 5% (RCP 8.5) [Laignel & Nouaceur, 2018]
Herb	Scénario avec aménagements actuels mis en œuvre entre 2000 et 2018 et maintenus à l'identique jusqu'en 2050 ; + conversion d'un tiers des surfaces en herbes en surfaces agricoles entre 2018 et 2050
Agr	Scénario avec aménagements actuels mis en œuvre entre 2000 et 2018 et maintenus à l'identique jusqu'en 2050 ; + amélioration des pratiques culturales (techniques d'agriculture de conservation) basées sur la réduction du travail du sol et maintien de la couverture végétale. Ce postulat se traduit par une augmentation de 15% de la capacité d'infiltration (hypothèse basse) ou une réduction des CN de 2 points sur un grand bassin versant comme la Lézarde [Fiener & Auerswald, 2006]

Analyse coût-bénéfice

L'évaluation économique est réalisée sur le bassin versant de la Lézarde selon un horizon temporel de 50 ans (2000-2050). Le taux d'actualisation est fixé à 2,5% [CGSP, 2013]. Les fonctions de dommages utilisées sont celles proposées dans le guide de référence [CGDD, 2018] exprimées en $€_{2016}$. Ces valeurs ont donc été corrigées de l'inflation. Les montants de dommage aux logements, aux établissements économiques, et aux établissements publics ont été corrigés par un coefficient de 0,67 calculé à partir de l'indice du coût de la construction (ICC). Les montants de dommages aux activités agricoles ont été corrigés par un coefficient de 0,72 calculé à partir de l'indice mensuel des prix agricoles de la production (IPPAP). Le calcul économique est toutefois réalisé en monnaie constante, la valeur en $€_{2000}$ est utilisée pour l'ensemble de l'horizon temporal d'évaluation. L'évaluation des coûts directs a été réalisée en concaténant les enveloppes d'aléa des deux modèles sur lesquelles ont été appliquées les fonctions de dommages surfaciques. Le calcul des dommages (et donc l'application des fonctions de dommages) intègre les paramètres issus des résultats de modélisation suivants : la hauteur de submersion, la vitesse d'écoulement, la durée de submersion, et la saisonnalité de l'évènement. Les coûts indirects ne sont pas évalués. Pour le calcul du Dommage Moyen Annuel (DMA), un aléa de premiers dommages (6 mois) et un aléa d'occurrence extrême ont été considérés (évènement centennale majoré par un coefficient de 1,5 [Eleuterio et al., 2008]). Les enjeux ont été caractérisés à partir de la BD TOPO 2016 fournie par l'IGN et d'après l'emprise spatiale des premiers résultats de modélisation. Des données complémentaires ont été ajoutées à partir d'orthophotos aériennes, de Google Street View, et de visites de terrain. Un nettoyage des faux bâtis et des bâtis non éligibles à l'application des fonctions de dommages a été réalisé. Finalement, ce sont 2 070 bâtis qui sont retenus pour l'ACB. N'ayant pas de fonctions d'endommagement de référence, les dommages aux infrastructures n'ont pas pu être pris en compte, puisque leur évaluation est très incertaine [Hallegatte, 2008 ; Hammond et al., 2015]. Pour les aménagements d'hydraulique structurante, un coût d'investissement et d'entretien moyen a été estimé à partir d'entretiens avec les collectivités locales (tableau 3). Pour les aménagements d'hydraulique douce, les coûts ont été établis à partir de la littérature existante. Ces coûts ont ensuite été corrigés de l'inflation à partir de l'indice du coût

de production des travaux publics (ICP-TP). Le coût de gestion des sédiments retenus dans les ouvrages a pu être pris en compte grâce aux résultats de modélisation de WaterSed. Un forfait de 20€ H.T/m^3 curé et évacué a été établi sur la base des discussions avec les gestionnaires des ouvrages.

Tableau 3 : Synthèse des coûts d'investissements et d'entretiens pour les ouvrages structurants et d'hydrauliques douces considérés dans l'étude.

Type d'ouvrages	Coût d'investissement (CI ; € H.T)	Coût d'entretien annuel	Référence
Barrages	CI = 2,97 x V (m^3) + 205308	6 880€ H.T/ouvrage	[LHSM comm. pers]
Bassins	CI = 19,7 x V (m^3) + 211 944	6 880€ H.T/ouvrage	[LHSM comm. pers]
Mare	40€ H.T/m^3	230€ H.T/mare	[Ramaekers, 2018]
Noues/noues diffusion	73€ H.T/ml	1€ H.T/ml	[Ramaekers, 2018 ; CA Hauts-de-France, 2018]
Bande enherbée	441€ H.T/ha	889€ H.T/ha	[CA Seine-Maritime, 2019]
Fascine	70€ H.T/ml	3€ H.T/ml	[AREAS, 2012]
Haie	20€ H.T/ml	2€ H.T/ml	[AREAS, 2012 ; CA Seine-Maritime, 2019]
Bandes lignocellulosiques	2 600€ H.T/ha	350€ H.T/ha	[CA Seine-Maritime, 2019]

Les coûts forfaitaires utilisés dans le modèle économique correspondent au calcul d'un Coût Total Actualisé (CTA) à 2,5% sur 50 ans. Le CTA est composé de l'investissement (année 0) et de l'entretien (années suivantes) des ouvrages conformément aux coûts de référence présentés. Les CTA sont exprimés en €$_{2000}$. La date exacte de création des ouvrages n'étant pas toujours connue, les CTA de tous les ouvrages intégrés dans les scénarios de niveau d'équipement actuels sont lissés entre l'année 2000 (pas d'ouvrage) et l'année 2018 (situation actuelle). La réduction progressive des dommages est calée au même rythme que celui de création des ouvrages. Les résultats de l'ACB sont analysés selon plusieurs indicateurs synthétiques : le Dommage Moyen Annuel (DMA) pour synthétiser les dommages subis par le territoire selon les différents évènements modélisés ; le Dommage Evité Moyen Annuel (DEMA) qui synthétise les bénéfices monétaires totaux avec les actions d'adaptation. A partir du DEMA et des coûts du projet, la Valeur Actualisée Nette (VAN) est calculée pour mesurer les flux économiques générés par le projet selon l'équation (1).

$$VAN = BTA - CTA = \sum_{i=1}^{n} \frac{DEMA_i}{(1+r)^i} - \sum_{i=1}^{n} \frac{CI_i + CE_i}{(1+r)^i} \qquad (1)$$

Où BTA indique les Bénéfices Totaux Actualisés, CTA les coûts totaux actualisés, DEMA$_i$ les DEMA de l'année i, r le taux d'actualisation, CI$_i$ les coûts d'investissements de l'année i, et CE$_i$ les coûts d'exploitation de l'année i. Le dernier indicateur utilisé est le ratio Bénéfice/Coût (B/C ; soit BTA/CTA) qui permet d'interpréter le retour sur investissement de chaque euro investi dans le projet. Pour plus de détails sur le calcul de ces indicateurs, le lecteur est invité à consulter le guide méthodologique de l'analyse multicritère des projets de prévention des inondations [CGDD, 2018].

RESULTATS ET DISCUSSION

Approche globale

Le montant des dommages causés par les inondations et coulées de boues est très important. Il s'élève à 23 M€$_{2000}$ pour la situation actuelle pour une crue centennale, mais montre un effet positif des actions publiques engagées. En effet, il s'élèverait à 32 M€$_{2000}$ sans aménagement, qu'ils soient structurants ou d'hydraulique douce (Figure 2). De plus, les indicateurs économiques sont positifs, avec un DEMA de 2,2 M€$_{2000}$ et un ratio B/C de 1,55 (Figure 3). Les résultats sont fortement influencés par les modifications agricoles. En effet, un

retournement de 33 % des prairies existantes entraîne une diminution du DEMA à 1,8 M€$_{2000}$, et une diminution du ratio B/C à 1,47. A l'inverse, l'amélioration des pratiques agricoles sur 50 % des terres cultivées entraîne une augmentation du DEMA à 2,5 M€$_{2000}$, ainsi qu'une augmentation du ratio B/C à 1,6. Le scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux proposé obtient des résultats mitigés. En effet, outre une légère augmentation du DEMA de seulement 10 k€$_{2000}$ par rapport au scénario actuel, le ratio B/C chute à 1,34. Il semble que les bénéfices ne soient pas à la hauteur des dépenses. Enfin, en prenant en compte une augmentation des intensités de pluie dans l'hypothèse d'un réchauffement climatique plus ou moins soutenu, l'analyse montre une efficacité et une efficience économique accrue des ouvrages existants avec un DEMA compris entre 2,6 et 3,4 M€$_{2000}$ et un ratio B/C compris entre 1,62 et 1,76.

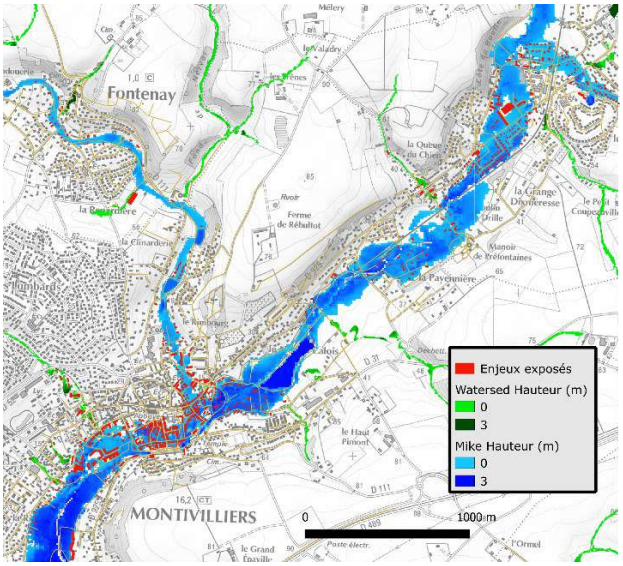


Figure 2 : Illustration des sorties de modèle pour la crue centennale (hauteur d'eau en m ; WaterSed en vert et MIKE en bleu) et des enjeux exposés. Zoom à proximité de la commune de Montivilliers pour le scénario ref0 sans aucun ouvrage.

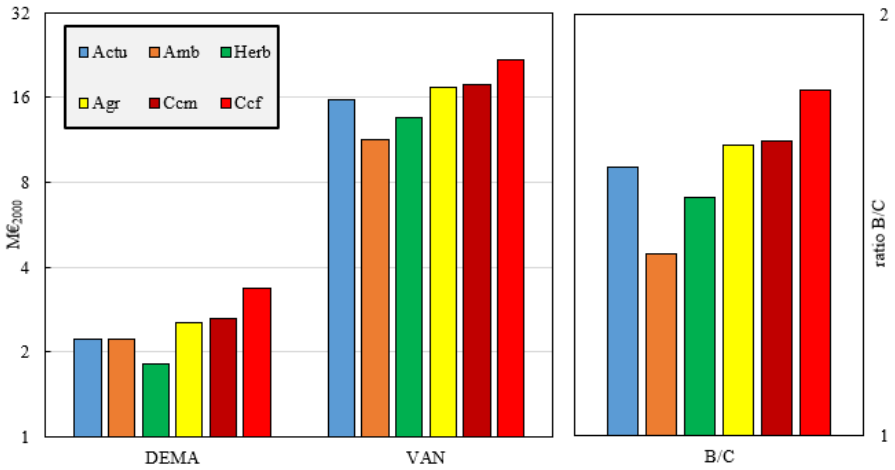


Figure 3 : Indicateurs synthétiques de l'ACB sur le bassin versant de la Lézarde avec les deux modèles.

Zoom sur l'aléa inondation par débordement de cours d'eau

Le montant des dommages causés par les inondations se trouvent être très important pour la situation de référence sans aménagements (Ref0). Les coûts directs relatifs à une pluie décennale, cinquantennale, ou centennale s'élèvent respectivement à 9,4 ; 17,7 ; et 29,4 M€$_{2000}$, avec un DMA à 3,5 M€$_{2000}$ (tableau 4 et 5). Les dommages aux établissements économiques sont les plus importants, et représentent plus de 70 % du montant. Pour les scénarios « Actu », « Herb », et « Agr », le montant des dommages est inférieur à la situation de référence et les DEMA se situent entre 1,8 et 2,4 M€$_{2000}$. On observe une influence significative de la modification des pratiques agricoles. Ainsi, une réduction des surfaces en herbe tend à augmenter l'aléa et de cause à effet, le montant des dommages de 14%, alors qu'une amélioration des pratiques agricoles en faveur de l'infiltration permet de réduire l'intensité des dommages à hauteur de 18%. Le CTA des ouvrages

d'hydraulique structurante pris en compte s'élève à 22,6 M€$_{2000}$. L'efficience du programme d'investissement pour les ouvrages structurants sur le bassin versant de la Lézarde sur les 18 dernières années est avérée avec une VAN à 21,5 M€$_{2000}$ et un ratio B/C qui atteint presque 2. La modification des pratiques agricoles sur les phénomènes d'inondation produit des résultats significatifs malgré une faible sensibilité des indicateurs synthétiques, qui s'explique du fait que les effets sont visibles principalement vers la fin de l'horizon temporel considéré et que l'actualisation au taux de 2,5 % tend à effacer cet effet de long terme. Également, il n'a pas été possible ici de chiffrer le coût des politiques agricoles et des actions associées à l'amélioration des pratiques faute de données existantes à ce sujet. Toutefois, ces résultats montrent bien le potentiel que représente une maîtrise de l'évolution des pratiques agricoles. Les bénéfices des ouvrages structurants sont significativement renforcés dans le cadre des trajectoires climatiques proposées (ratios B/C > 2). Ces résultats s'expliquent par la réduction des périodes de retour, et notamment une influence forte sur les évènements fréquents pour lesquels les ouvrages sont particulièrement efficaces. Selon les hypothèses prises sur l'évolution de l'intensité de pluies en lien avec le changement climatique l'efficience économique des ouvrages structurants est renforcée.

Tableau 4 : Montant des dommages pour l'aléa inondation par débordement de cours d'eau sur le bassin versant de la Lézarde (les coûts sont exprimés en k€$_{2000}$).

Pluies de projet	Montant des dommages par scénarios (k€$_{2000}$)					
	Ref0	*Actu*	*Herb*	*Agr*	*Ccm*	*Ccf*
P_{10}	9 461	5 016	6 222	2 677	Reprise des résultats scénario « Actu » + diminution des périodes de retour	
P_{50}	17 775	11 184	16 740	10 797		
P_{100}	29 415	23 085	23 939	20 789		

*Tableau 5 : Indicateurs synthétiques de l'ACB pour l'aléa inondation par débordement de cours d'eau sur l'horizon temporel 2000-2050. Le DMA, le DEMA, et la VAN sont exprimés en k€$_{2000}$. Le ratio B/C est sans unités. *Dans le cadre des scénarios « Herb » et « Agr », les coûts de mise en œuvre de ces politiques d'adaptation n'ont pas pu être intégrés.*

Indicateurs synthétiques	Valeur des indicateurs de l'ACB par scénarios					
	Ref0	*Actu*	*Herb*	*Agr*	*Ccm*	*Ccf*
DMA	3 585	1 359	1 732	1 091	1 596	1 764
DEMA	/	2 227	1 853	2 495	2 616	3 382
VAN	/	21 500	19 600	22 900	23 500	27 500
B/C	/	1,95	1,86*	2,01*	2,04	2,21

Zoom sur l'aléa inondation par ruissellement et coulées de boue

Le montant des dommages causés par les coulées boueuses est très inférieur à celui des dommages causés par les inondations par débordement de cours d'eau (tableau 6). Les résultats montrent une très faible sensibilité des montants de dommages quel que soit le scénario retenu. Le DEMA maximal obtenu avec le scénario d'amélioration des pratiques agricoles ne s'élève qu'à 48 k€$_{2000}$; et le DMA résiduel reste environ à 2,4 M€$_{2000}$ (tous scénarios confondus ; tableau 7). Réparti dans le temps, le CTA du programme d'aménagement ambitieux d'hydraulique douce s'élève à 4,4 M€$_{2000}$. Dans tous les scénarios, la VAN est extrêmement négative et correspond au CTA des différents scénarios car les BTA ne sont pas à l'échelle des dépenses.

Cette très faible sensibilité rend les effets du changement climatique négligeables. Une des limites de l'analyse économique sur l'aléa inondation par ruissellement et coulées de boue est de ne pas intégrer les coûts de dommages liés au dépôt de sédiments sur la voirie et dans les bâtis. Il est difficile d'estimer les volumes de sédiments laissés dans les bâtis et donc de chiffrer les dommages supplémentaires causés par la charge sédimentaire. A ce jour, il n'existe toujours pas de fonction d'endommagement pour ces aspects, et la collecte de ces données est difficile.

De plus, il est évident que les aménagements d'hydraulique douce n'ont pas été pensés pour être efficaces contre les inondations, mais ils ont démontré leur utilité localement, en protection rapprochée d'enjeux (ex : réduction des transferts de matières en suspensions aux captages d'alimentation en eau potable). Ils peuvent également apporter localement des intérêts complémentaires en termes de biodiversité, de séquestration de

carbone, ou d'emploi, mais qui en l'état des connaissances actuelles n'ont pas été évalués. Également, les coûts relatifs à la mise en place d'une agriculture de conservation (augmentation de la capacité d'infiltration ou réduction du CN) sur le territoire restent difficilement évaluable pour le moment, et les coûts intangibles ne sont pas pris en compte dans l'analyse. L'amélioration des fonctions de coûts constitue donc la principale piste d'amélioration pour les travaux de recherche future, et les gestionnaires pourraient ainsi être encouragés à collecter les données nécessaires.

Tableau 6 : Montant des dommages pour l'aléa inondation par ruissellement et coulées de boue sur le bassin versant de la Lézarde (les coûts sont exprimés en k€$_{2000}$).

Pluies de projet	Montant des dommages par scénarios (k€$_{2000}$)						
	Ref1	*Actu*	*Amb*	*Herb*	*Agr*	*Ccm*	*Ccf*
P_{10}	2 276	2 276	2 268	2 312	2 239	Reprise des résultats scénario « Actu » + diminution des périodes de retour	
P_{50}	2 609	2 608	2 607	2 637	2 392		
P_{100}	2 677	2 676	2 648	2 706	2 630		

*Tableau 7 : Indicateurs synthétiques de l'ACB pour l'aléa inondation par ruissellement et coulées de boue sur l'horizon temporel 2000-2050. Le DMA, le DEMA, et la VAN sont exprimés en k€$_{2000}$. Le ratio B/C est sans unités. *Dans le cadre des scénarios « Herb » et « Agr », les coûts de mise en œuvre de ces politiques d'adaptation n'ont pas pu être intégrés.*

Indicateurs synthétiques	Valeur des indicateurs de l'ACB par scénarios						
	Ref1	*Actu*	*Amb*	*Herb*	*Agr*	*Ccm*	*Ccf*
DMA	2 418	2 417	2 409	2 455	2 370	2 417	2 417
DEMA	/	0,7	9	-37	48	0,8	1
VAN	/	- 5 757	- 10 102	-5 954	-5 513	-5 756	-5 755
B/C	/	0,002	0,007	0,032*	0,045*	0,003	0,003

CONCLUSIONS

L'analyse coût-bénéfice du programme d'action publique mis en œuvre ces dernières années sur le bassin versant de la Lézarde pour réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion, s'appuie sur la mise en œuvre de deux modèles complémentaires (modèle hydrologique/hydraulique Mike11 et modèle de transfert hydro-sédimentaire WaterSed). L'analyse intègre une projection de l'évolution future possible de l'intensité des précipitations et du territoire (programme d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux et modification des pratiques culturales). Elle a été réalisée sur une période comprise entre 2000 et 2050, en suivant la méthodologie proposée dans le guide du CGDD pour l'évaluation des projets de lutte contre les inondations. Les résultats indiquent un effet positif de la stratégie d'action publique passée sur la réduction des dommages moyens annuels selon différentes pluies de projet. Plus spécifiquement, les résultats montrent que les ouvrages structurants de rétention réduisent significativement les surfaces inondées par débordement de rivière, et que ces ouvrages sont efficaces au regard des dommages aux biens et économiquement efficients. Les bénéfices sont environ deux fois plus élevés que les coûts. Toutefois, les aménagements d'hydraulique douce ont un impact peu significatif sur le volume de ruissellement et sur le débit de pointe en rivière, et le dommage évité moyen annuel reste négligeable. Ce résultat pourrait toutefois être différent si les fonctions inhérentes au calcul économique permettaient de saisir l'ensemble des bénéfices apportés par ces ouvrages. En effet, ils permettent avant tout une protection d'enjeux rapprochés et une réduction de la charge sédimentaire des écoulements, mais ces aspects ne sont pas quantifiables économiquement compte tenu des connaissances actuelles. Dans l'hypothèse d'une évolution des intensités de précipitation en lien avec le changement climatique, l'efficacité et l'efficience économique des ouvrages existants est augmentée (+ 0,3-1,1 M€ de dommages évités annuellement), mais d'un autre côté, le montant des dommages résiduels augmente lui aussi. Enfin, la modification des pratiques agricoles aura un impact certain, avec d'une part une augmentation du dommage moyen annuel de +400 k€/an dans le cas d'une réduction d'un tiers des prairies existantes, et de l'autre, une diminution du dommage moyen annuel de -250k €/an dans le cas d'une évolution des pratiques culturales (+15% capacité infiltration ou réduction de 2 points du CN). En perspective, la méthodologie proposée dans

le cadre de cette étude pourrait être dupliquée sur d'autres bassins versants afin de tester sa capacité à généraliser, être comparée avec d'autres modèles existants, et être complétée avec la création de nouvelles fonctions d'endommagements liées au dépôts de sédiments sur les voiries et dans les bâtis.

NOMENCLATURE

ACB : Analyse Coût-Bénéfice ; B/C : Bénéfice/Coût ; BTA : Bénéfices Totaux Actualisés ; CN : Curve Number ; CTA : Coût Totaux Actualisés ; DEMA : Dommage Evité Moyen Annuel ; DMA : Dommage Moyen Annuel ; LHSM : Le Havre Seine Métropole ; MNT : Modèle Numérique de Terrain ; OSCOM : Observatoire des Sols à l'échelle Communale ; RCP : Representative Concentration Pathways ; RPG : Registre Parcellaire Graphique ; VAN : Valeur Actuelle Nette

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet EVAPORE « EVAluation de l'efficacité des POlitiques publiques pour les actions visant à REduire les impacts du ruissellement ». Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement l'Université de Rouen-Normandie, l'AREAS, le BRGM, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, les départements de l'Eure et de la Seine-Maritime qui ont co-financé ce projet. Les auteurs tiennent également à remercier la communauté urbaine LSHM « Le Havre Seine Métropole » pour leur implication dans la fourniture des données.

REFERENCES

AREAS (2012). Les aménagements d'hydraulique douce. La lutte contre les ruissellements, l'érosion, et la turbidité. Réalisation d'aménagements d'hydraulique douce en régie. http://www.areas-asso.fr/ressources

AREAS (2013). Notions de base en hydrologie et modélisation de bassin versant. http://www.areas-asso.fr/images/formations2013/hydrologie_11-06-2013_complet.pdf

Agence Régionale de Santé Normandie (2013). Bilan 2013 de la qualité des eaux destinées à la consummation humaine et la protection des captages en Seine-Maritime. https://www.normandie.ars.sante.fr/sites/default/files/2017-03/bilan_76_qualite_eau_2013.pdf

CA Hauts-de-France (2018). Guide de l'érosion: lutte contre l'érosion. https://hautsdefrance.chambres-agriculture.fr/publications/la-publication-en-detail/actualites/guide-de-lerosion-2018/

CA Seine-Maritime (2019). Indemnisation des servitudes ou conventions. https://seine-maritime.chambres-agriculture.fr/territoires/indemnisations/amenagements-hydrauliques/indemnisation-des-servitudes-ou-conventions/

Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., Martin, P., Lecomte, V. (2002). Sediment concentration in interrill flow: interactions between soil surface conditions, vegetation, and rainfall. Earth. Surf. Process. Landforms, 27, 193-205 pp. https://doi.org/10.1002/esp.314

CGDD (2018). Analyse multicritère des projets de prévention des inondations – Guide méthodologique 2018.

CGSP (2013). L'évaluation socioéconomique des investissements publics, Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective. Rapport de la mission présidée par Emile Quinet.

DHI (2017). MIKE11, a modelling system for rivers and channels. Reference manual. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Water_Resources/Mike_11_ref.pdf

Eleuterio, J., Mosé, R., Rozan, A. (2012). Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations. https://www.fondation-maif.fr/up/pj/engees-rf.pdf

Fiener, P., & Auerswald, K. (2006). Influence of scale and land use pattern on the efficacy of grassed waterways to control runoff. Ecological Engineering, 27, 208-218 pp. doi :10.1016/J.ecoleng.2006.02.005

Hallegatte, S. (2008). An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina. Risk Anal. 28, 779-799 pp. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01046.x

Hammond, M.J., Chen, A.S., Djordevic, S., Butler, D., Mark, O. (2015). Urban flood impact assessment : a state-of-the-art review. Urban water J. 12, 14-29 pp. https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.857421

Laignel, B. & Nouaceur, Z. (2018). Evolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie. Fiche Métropole Rouen. GIEC local. 13 pp.

Landemaine V. (2016). Erosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. Thèse de doctorat de l'Université de Rouen Normandie, 237pp.

Landemaine V. (2020). Méthode de cartographie de l'aléa inondation par ruissellement : Application du modèle WaterSed sur le bassin versant de la Lézarde (France). Colloque Risque ruissellement – Diagnostique et solution. SHF ANEB 2020.

Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C., Daroussin, J. (2002). L'érosion hydrique des sols en France. Ifen, INRA et SIGMAP, 106p. http://prodinra.inra.fr/?locale=fr#!ConsultNotice:69099

Martin, P., Ouvry, J.F., Bockstaller, C. (2010). Adaptation of the curve number approach to runoff estimation for loamy soils over a growing season for winter wheat: comparison with the stream approach. Land Degradation & Development, 21, 376-387 pp.

Patault, E., Ledun, J., Landemaine, V., Soulignac, A., Richet, J-B, Ramaekers, F., Cikowski, N., Cabaz, B., Fournier, M., Ouvry, J-F., Rinaudo, J-D., Cerdan, O., Laignel, B. (2019). Coupled modeling of hydro-sedimentary transfer processes and socio-economic dynamics evaluating public policies to control runoff and erosion: case study in Normandy (France). AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA. https://doi.org/10.1002/essoar.10501408.1

Ramaekers, F. (2018). Etude technico-économique sur les actions et les impacts des inondations par ruissellement en Seine-Maritime sur la période 2000-2017. Master 2 Gestion de l'environnement parcours Gestion Durable des hydrogéosystèmes, Université de Rouen. 81p.

Soil Conservation Service – SCS (1972). National Engineering Handbook, Section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Diagnostic de sites inondés par ruissellement et coulées de boues et propositions d'aménagements à l'échelle du bassin versant : retour d'expérience, le cas de la Wallonie (Le Roi)

Diagnostic de sites inondés par ruissellement et coulées de boues et propositions d'aménagements à l'échelle du bassin versant : retour d'expérience, le cas de la Wallonie

Alain LE ROI[1]

[1] SPW - agriculture ressources naturelles environnement- Direction du Développement rural - Cellule GISER, Avenue Prince de Liège, 7, 5100 Jambes, Belgique, e-mail : alain.leroi@spw.wallonie.be

Chaque année en Wallonie des communes sont impactées par des inondations liées au ruissellement, avec des périodes critiques au printemps et en été. Le phénomène s'amplifie, en raison de l'évolution du climat, des pratiques agricoles mais aussi de l'urbanisation.
La cellule GISER (Gestion Intégrée Sol-Erosion-Ruissellement) a été constituée en 2011 dans l'objectif de contextualiser les raisons des sinistres, d'analyser les réponses techniques disponibles et d'appuyer les pouvoirs locaux dans leur mise en œuvre. La problématique est abordée à l'échelle du bassin versant en proposant des mesures correctrices à l'ensemble des acteurs concernés : agriculteurs, riverains, gestionnaires publics, … Les pratiques et aménagements proposés concilient agronomie, techniques d'hydraulique douce, interventions sur les voiries et infrastructures de temporisation et/ou de conduite depuis l'amont jusqu'à l'exutoire.
Intégrée à l'administration de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement, et spécifiquement dédiée à ces missions, la cellule GISER travaille en étroite collaboration avec les services dédiés à la gestion des cours d'eau et à l'aménagement foncier ruralau sein d'un même département administratif.
Quelques 900 bassins versants ont été étudiés en 9 ans, totalisant plus de 35 000 ha et abordant autant de contextes différents dans plus de la moitié des communes wallonnes La présentation propose un retour d'expériences sur ces missions.

Mots-clefs : Ruissellement, coulées de boues, érosion, gestion du risque.

Diagnosis of sites flooded by mudflows and solution proposals at a watershed scale: experience sharing, the case of Wallonia

Wallonia is severely impacted by flood hazards due to water runoff. Critical periods mainly occur during spring and summer stormwater events. A dedicated unit has been settled by Regional authorities since 2011 with the aim of contextualizing the reasons for the disasters at watershed level, providing technical responses and supporting local authorities in their implementation. The problem is tackled at a watershed scale by proposing corrective measures to all stakeholders involved: farmers, residents, public managers, etc. The proposed practices and developments combine agronomy, water techniques, road system equipment and delay or control infrastructure from upstream to the outlet. Integrated within the administration of Agriculture, Natural Resources and Environment matters, and specifically dedicated to these missions, the unit works in close collaboration with the ones dedicated to the management of watercourses and rural land development, from the same administrative department.
So far, about 900 watersheds case studies have been analysed in support of more than half of the Walloon municipalities impacted by run off and mudflow hazards on the last 9 years, totalling more than 35,000 ha. The presentation offers sharing and feedback on these missions.

Key words: Water run-off, mudflow, erosion, risk management

INTRODUCTION

Chaque année en Wallonie des communes sont impactées par des inondations liées au ruissellement. Les périodes critiques sont le printemps et l' été, au gré des fronts orageux, et plus rarement l'hiver, en raison de longues périodes pluvieuses sur les sols saturés en eau. Le phénomène d'inondatin par ruissellement tend à prendre de l'ampleur, en raison de l'évolution du climat, des pratiques agricoles mais aussi des choix d'urbanisation.

La gestion du risque d'inondation mise en œuvre au niveau régional wallon s'appuie sur plusieurs axes : prévention, protection des biens et des personnes, préparation au risque d'inondation, réparation des dommages

et analyse post-crise**.** Un monitoring en temps réel de l'état des cours d'eau et un système d'alerte de crue complète le dispositif.

LA CELLULE GISER

La cellule GISER (Gestion Intégrée Sol-Erosion-Ruissellement) a été constituée en 2011 dans l'objectif de contextualiser les raisons des sinistres liés au ruissellement (inondations, coulées boueuses), d'analyser les réponses techniques disponibles et d'appuyer les pouvoirs locaux dans leur mise en œuvre. Ces missions comprennent l'analyse de bassin versant, la proposition de solutions, l'accompagnement des autorités communales lors de séances d'information auprès des agriculteurs et/ou riverains, l'appui à la conciliation/médiation, l'assistance et le suivi éventuels de chantier pour la mise en œuvre de techniques d'hydraulique 'douce' préconisées dans le cadre des études de bassin versant (barrages filtrants, haies, fossés à redents, noues, …).

Créée au départ sous la forme d'une convention de recherche avec les facultés universitaires d'agronomie de Gembloux Agro-Bio-Tech (ULiège) et de l'UCLouvain, cette cellule d'expertise a été intégrée au Service Public de Wallonie en 2017 (administration de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement).

Spécifiquement dédiée à ces missions, la cellule complète les champs d'expertise des services dédiés à la gestion des cours d'eau et à l'aménagement foncier rural, avec lesquels elle travaille en étroite collaboration au sein d'un même département administratif.

En moins de 10 années, plus de la moitié des communes wallonnes (144 communes) ont fait appel aux services de cette cellule. Les services d'appui aux communautés locales (mairies) que sont les communes sont intégralement pris en charge par le service public régional (SPW).

APPROCHE PAR BASSIN VERSANT

En matière d'inondation par ruissellement, travailler à la parcelle n'a que peu de sens. Pour être efficaces, les solutions aux inondations par ruissellement doivent idéalement être pensées à l'échelle du bassin versant contributif, , en proposant une série de mesures correctrices intégrées depuis la source de production primaire de ruissellement, en amont (zone SOURCE), en passant par les versants (zone de TRANSFERT) jusqu'à l'exutoire (zone de DEPÔT) (Figure 1).

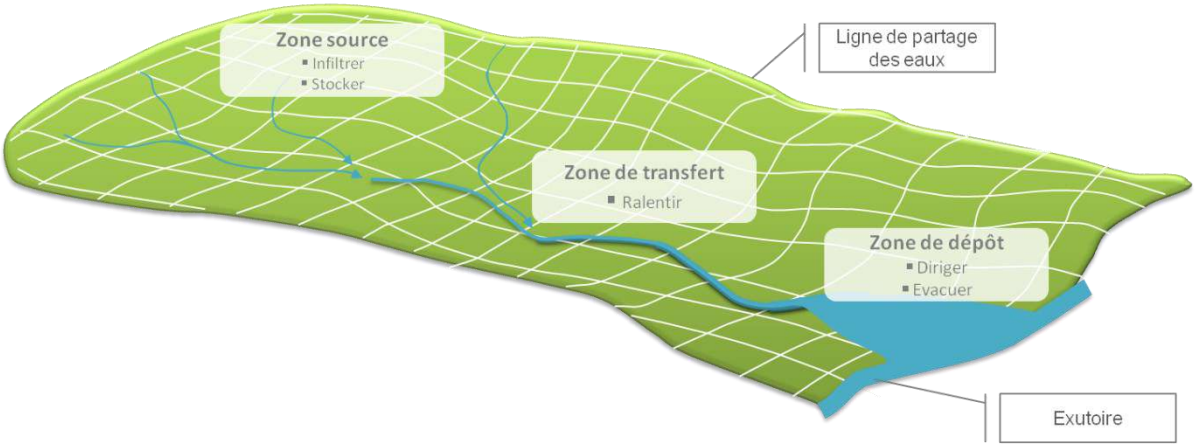


Figure 1 : Gestion intégrée par bassin versant (Cellule GISER).

Concrètement, les écoulements sont étudiés au sein du périmètre du bassin versant sur base de la carte de ruissellement diffus, exprimé par un taux de ruissellement potentiel en réponse à une pluie de référence, fixée en intensité, durée et fréquence (méthode SCS), et de la carte des axes de concentration naturels des eaux de ruissellement établis sur base d'un MNT. La forme du bassin versant et son étendue influencent son comportement hydrologique en réponse à une précipitation donnée. Le temps de concentration des eaux sur le bassin – la durée maximale nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir son chemin jusqu'à l'exutoire – est

par exemple plus élevée dans un bassin de forme allongée que dans un bassin « en fer à cheval ». Des solutions de temporisation des écoulements peuvent être imaginées pour corriger ces effets.

Le relief du bassin versant (pente, longueur de pente, présence de plateaux ou de vallons) influence également le type d'écoulement naturel des eaux, lequel peut être diffus sur de larges surfaces, ou concentré selon un axe ou un chenal d'écoulement. Des techniques appropriées de gestion existent pour chaque type d'écoulement.

Enfin, la nature du sol, l'occupation du sol (forêts, prairies, jardins, cultures, surfaces imperméabilisées, routes), son mode de travail, etc., sont autant de critères modifiant la capacité d'infiltration du bassin versant et sa sensibilité à l'érosion.

MISE EN OEUVRE

L'approche utilisée par la cellule s'appuie sur des outils cartographiques, des visites de terrain en compagnie des services communaux, des rencontres et témoignages d'agriculteurs et de riverains parfois étayés par l'analyses d'images prises lors des événements. Il s'agit au final d'identifier les sources du ruissellement, la sensibilité du site, d'éventuels signes d'érosion ou mesures de protection entreprises par les riverains au niveau des jardins et habitations, les facteurs susceptibles d'aggraver ou de réduire le risque au niveau agricole et au niveau des infrastructures équipant les voiries, …

Les outils cartographiques utilisés, certains créés spécifiquement pour mettre en œuvre cette analyse, reposent sur :

- l'étude des aléas d'inondations par ruissellement
- la localisation des thalwegs ou axes de concentration potentielle du ruissellement (modélisation LIDAXES[1])
- le risque de ruissellement concentré selon le cheminement préférentiel de l'eau dans une zone donnée et le nombre d'hectares de surface drainée qui aboutit à un point donnéet diffus
- la forme et l'étendue du bassin versant
- la carte numérique des sols de Wallonie
- le parcellaire agricole (assolements, rotations, sensibilité à l'érosion, …)
- les atlas des cours d'eau et des chemins vicinaux
- le relief (modèle numérique de terrain, profils altimétriques, la pente)
- l'emplacement des entrées de champs ainsi que la présence de coins de champs en entonnoir
- les éléments mobilisables saturant les réseaux souterrains d'écoulement de l'eau
- …

A l'issue de ces démarches, un rapport d'expertise est présenté à la commune. Celui-ci reprend un diagnostic et des propositions de mesures correctrices ou d'aménagements du bassin versant, depuis l'amont vers l'aval. Ces mesures peuvent concerner les parcelles et pratiques agricoles, le maillage hydraulique (cours d'eau, haies, talus, fossés, voiries, …) mais aussi des actions sur les voiries et au niveau de l'urbanisme. Les pratiques et aménagements proposés se déclinent en choix agronomiques, techniques d'hydraulique douce, interventions sur voiries et infrastructures de temporisation et/ou de conduite depuis l'amont jusqu'à l'exutoire. Elles s'adressent donc à l'ensemble des acteurs concernés de manière à gérer le problème sur la totalité du trajet de l'eau : agriculteurs, riverains, gestionnaires publics, …

A l'issue de ce travail d'analyse et de recommandations, la commune prend l'initiative de la suite du processus avec le support de la cellule GISER lorsque nécessaire : concertation avec les agriculteurs et riverains pour la réalisation d'aménagements sur emprise privée, recherche de financement pour aménagements sur emprise publique, mise en œuvre des aménagements.

Conditions d'intervention

[11] Cf. poster PINEUX N. & DEMARCIN P. (2020) Amélioration des axes de concentration du ruissellement générés sur base du LIDAR 2015 à la résolution de 1m : LIDAXES. Colloque SHF « Ruissellement », Lyon.

La cellule intervient dans le cadre de missions d'intérêt public : dommages par inondation causés sur le domaine public ou ayant une influence sur la sécurité publique. Ce service n'intervient donc pas en cas de litige entre particuliers (p.ex. entre un riverain et un agriculteur).

Il doit s'agir d'une inondation par ruissellement essentiellement « naturel » : la cellule n'intervient pas pour des cas de débordement de cours d'eau (d'autres acteurs sont en charge de cette matière), de refoulement de canalisation, rupture de digue, etc.

L'expertise GISER est gratuite (il s'agit d'un service public).

PROPOSITIONS D'AMENAGEMENTS

Les aménagements proposés visent à limiter le ruissellement, réduire la vitesse des écoulements, conduire les eaux, favoriser l'immersion temporaire et amortir les variations de débit au niveau des cours d'eau faisant office d'exutoires (Figure 2).

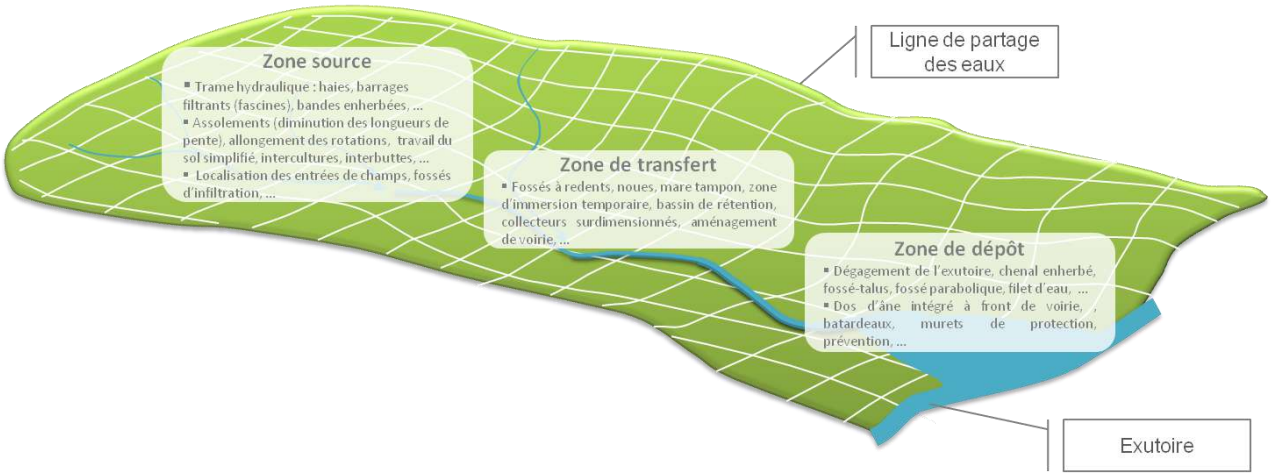


Figure 2 : Exemples de mesures correctrices envisagées selon l'approche Bassin versant (Cellule GISER).

Différents remèdes peuvent contribuer à prévenir les risques liés aux inondations selon leur source Leur sélection dépendra du contexte, de la faisabilité technique, du coût de mise en œuvre, du degré de risque d'inondation, etc.

Au niveau agricole, il s'agit de réduire l'érosion et de maîtriser le ruissellement de manière à limiter la charge en sédiments lorsque les eaux quittent les parcelles : pratiques de conservation du sol, choix et allongement des rotations, réduction des longueurs de pentes au moyen de ruptures d'assolement ou de bandes enherbées, techniques culturales simplifiées, laminage des flux concentrés et temporisation au moyen de barrages filtrants, aménagement de chenaux et thalwegs, déplacement des entrées de champ, …

La cellule peut orienter les agriculteurs auprès de diverses structures d'encadrement spécialisées en conservation du sol, méthodes agro-environnementales, techniques culturales spécifiques (maïs, pomme de terre, miscnathus), etc.

Les pratiques et techniques proposées ont fait l'objet de validations par les universités impliquées dans le projet afin de garantir leur spectre de faisabilité suivant les contextes.

Au sortir des champs et prairies, les aménagements proposés visent à conduire les écoulements de manière maîtrisée pour les habitations jusqu'aux endroits de reprise : chenaux d'écoulements au travers de jardins, réfection de voiries (fossés, filets et revers d'eau), intégration de dos d'âne dans les entrées de garage, adaptation des ouvrages de collecte des eaux équipant celles-ci (dimensionnement des collecteurs, avaloirs, grilles, cassis, dos d'âne, passages sous voirie …), aménagement des exutoires, ...

Lorsqu'en dépit des mesures correctrices proposées, les volumes de ruissellement excèdent la capacité de reprise de l'exutoire avec un risque pour les habitations situées dans la zone 'de dépôt', des ouvrages de temporisation peuvent être envisagés : réouverture de fossés, pose de redents, noues d'infiltration, mare-tampons, surdimensionnement des collecteurs sous voirie, création de zones d'immersion temporaires, prairies

inondables, surélévation de chemins agricoles (digue), aménagement de zones de rétention dans les chemins creux…

La mise en œuvre de certains aménagements peut faire l'objet de conventions d'usage entre l'autorité communale et un acteur privé (agriculteur, riverain). Certains aménagements sur emprise publique peuvent également faire l'objet de financements de la part de l'autorité régionale.

La présentation propose un partage et un retour d'expériences sur ces aspects au départ de bassins versants étudiés.

EN CHIFFRES

Nombre de communes ayant fait appel au SPW ARNE - GISER pour expertise sur sites inondés (depuis 2009) : 144 sur 262

Nombre de bassins versants étudiés : 920

Surface cumulée des sites étudiés : 35 125 ha

Délai moyen entre la réception d'une demande de la commune et la prise de contact de la cellule GISER avec la commune : inférieure à 7 jours calendrier

Délai moyen entre la prise de contact et la première visite sur place : 7 à 30 jours

Délai moyen entre la visite sur place et le rapport d'expertise : 2 à 45 jours

Les seules mesures visant l'infiltration et la désimperméabilisation des sols sont-elles des solutions efficaces pour la lutte contre les inondations par ruissellement en milieu urbain ? (Vignoulle & Costanzo)

Les seules mesures visant l'infiltration et la désimperméabilisation des sols sont-elles des solutions efficaces pour la lutte contre les inondations par ruissellement en milieu urbain?

Olivier VIGNOULLE[1], Jérôme COSTANZO[2]

[1] SCE Aménagement & Environnement - 1120 Route Départementale de Gémenos – Quartier Camp Sarlier – ALTA ROCCA Bat G, 13400 AUBAGNE, France - olivier.vignoulle@sce.fr
[2] SCE Aménagement & Environnement, direction internationale - 4 rue Viviani 44262 Nantes - jerome.costanzo@sce.fr

La nécessité de prévoir dans les projets urbains des mesures de limitation des débits ruisselés vers les réseaux hydrographiques ou pluviaux amène les aménageurs et bureaux d'étude à retenir des solutions favorisant l'infiltration des eaux. Si l'ambition de rendre « la ville plus perméable » procure des avantages en termes de services écosystémiques, certains retours d'expérience montrent que ces solutions ne suffisent pas pour limiter les inondations consécutives aux pluies intenses si elles ne sont pas associées à des mesures de stockage/restitution. Dans un premier temps, cet article rappelle les avantages associés à la « ville perméable ». Dans un second temps, les limites des mesures de désimperméabilisation favorisant la diminution des surfaces revêtues et/ou permettant d'accroitre l'infiltration sont traitées à travers deux exemples. Le premier, en milieu méditerranéen où la comparaison des débits ruisselés en fonction des pourcentages d'imperméabilisation montre les limites d'efficacité de ces dispositions pour les pluies intenses. Le second, au Vanuatu où des bidonvilles sont inondés par remplissage des zones endoréiques et ce malgré un contexte géologique parfois très favorable à l'infiltration. Les analyses conduites montrent ainsi que pour de très fortes pluviométries, il n'existe pas d'autres choix que de retenir des dispositifs de drainage et de rétention. En conclusion, sur certains territoires, les solutions à retenir doivent reposer sur un ensemble de mesures complémentaires conciliant désimperméabilisation, infiltration, mais également maîtrise des eaux pluviales mobilisant des dispositifs de rétention, et mettent en jeu des réflexions dépassant le cadre technique pour relever également de l'aménagement du territoire et de sa maîtrise.

Mots-clefs : Désimperméabilisation, infiltration, inondation, stockage, restitution, aménagement, services écosystémiques

Are infiltration and soil de-sealing effective solutions to prevent runoff flooding?

The need for urban projects to include measures that limit runoff flows discharged into river or stormwater systems leads urban planners and engineers to select solutions that promote water infiltration. While the ambition to make "the city more permeable" provides benefits in terms of ecosystem services, initial experience shows that these solutions are not sufficient to limit flooding resulting from heavy rains if not combined with storage/restitution measures. First, this article recalls the benefits associated with the "permeable city". Secondly, the limits of de-sealing measures favoring the reduction of coated surfaces or infiltration are discussed through two examples. The first, in a Mediterranean environment where the comparison of runoff flows according to the percentages of sealing shows the limits of effectiveness of provisions for intense rainfall. The second, in Vanuatu, where shanty towns are flooded by filling in endorheic zones, despite a geological context that is sometimes very suitable for infiltration. Analyses have shown that for very heavy rainfall, there is no other choice than to use drainage and retention devices. In conclusion, in some areas, the solutions to be adopted must be based on a set of measures that combine desealing, infiltration but also control of rainwater using retention devices, and involve considerations that go beyond the technical framework to also fall within the scope of regional planning and its control.

Keywords: runoff, desealing, infiltration, flood, water storage, water restitution, ecosystem services, land planning

1. INTRODUCTION

Face aux politiques de densification et à l'intensification du phénomène de métropolisation, les zones urbaines sont de plus en plus confrontées au défi de gérer efficacement les ressources en eau afin de minimiser à la fois les risques associés aux inondations et à la rareté de l'eau [Wendling & Holt, 2020]. En effet, le risque d'inondation est intensifié par le phénomène d'imperméabilisation du sol associé à l'urbanisation [EC, 2012 ; CEPRI, 2014 ; Carré, 2016 ; Wendling & Holt, 2020]. A titre d'exemple, en France, 72,5 % des communes ont déjà connu au moins une fois une inondation par ruissellement, générant des millions d'euros de dégâts, des dégradations environnementales et parfois malheureusement des décès [CEPRI, 2014] et d'après l'Agence

Européenne de l'Environnement, près de 20 % des villes européennes de plus de 100 000 habitants sont très vulnérables aux inondations [EEA, 2012].

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations, liée au changement climatique, pourrait à l'avenir accroître encore ce risque [IPCC, 2014 ; CEPRI, 2014]. En effet, les conséquences hydrométéorologiques du changement climatique exacerbent les effets de l'imperméabilisation des sols et du ruissellement dans les zones urbaines, la surexploitation des ressources en eau, la pollution de l'eau et le vieillissement des infrastructures [Wendling & Holt, 2014]. En conséquence, il est attendu que le risque d'inondation augmente à l'avenir et représente deux tiers du coût économique des dommages attribués aux catastrophes naturelles en Europe [EC, 2012].

Depuis la fin du 19e siècle, l'assainissement met en œuvre des solutions techniques basées sur l'évacuation des eaux de pluies, de fait, le problème du ruissellement des eaux pluviales a traditionnellement été gérée par l'augmentation du nombre et de la taille des canalisations d'égouts et des canaux de drainage [Carré, 2016 ; Wendling & Holt, 2020]. Aujourd'hui, plusieurs problèmes associés au « tout-tuyau » ont été mis en évidence [Carré, 2016 ; Wendling & Holt, 2020] :

- L'augmentation du risque d'inondation en aval des exutoires d'eaux pluviales
- Le risque de débordement des réseaux unitaires par temps de pluie, associé à un sous-dimensionnement des réseaux par rapport à certains régimes de pluie.
- Le risque de pollution et de dégradation de la qualité des cours d'eau, associé au ruissellement sur des surfaces contaminées et/ou au détournement des surplus des stations d'épuration vers les rivières, sans qu'ils ne soient traités.
- La diminution de la recharge des nappes par infiltration des eaux pluviales et à terme la réduction de la disponibilité des ressources en eaux souterraines ainsi que la contamination potentielle des masses d'eau réceptrices

Ces questions mettent en évidence la nécessité de nouvelles techniques robustes et fiables pour gérer les inondations et améliorer la qualité des eaux de ruissellement. Pour répondre à ces enjeux, des solutions alternatives de gestion des eaux pluviales ont été proposées à partir des années 90. Parmi ces solutions, il faut citer celles permettant l'infiltration naturelle de l'eau dans les sols, afin de réduire le processus de ruissellement et d'inondation. Les infrastructures bleues, ou éléments du paysage urbain liés à l'eau (lacs, étangs, voies navigables, etc.), ou les infrastructures vertes pour la gestion des eaux pluviales urbaines, ont gagné en popularité en raison de leur rapport coût-efficacité ainsi que des multiples avantages connexes. Les infrastructures vertes telles que les jardins de pluie, les toits végétalisés, les trottoirs perméables, les noues, les zones humides et autres systèmes conçus pour réduire le volume des eaux de ruissellement sont identifiés dans le document de l'UE intitulé « Soil Sealing » [EC, 2012] comme des solutions de gestion des eaux pluviales qui améliorent l'environnement urbain. Ces solutions présentent de nombreux avantages ou services écosystémiques en plus de permettre l'infiltration des eaux de pluies. Elles permettent d'augmenter la résilience urbaine grâce à l'apport de nature en ville et donc une régulation du phénomène d'ilot de chaleur ou l'augmentation du bien être des habitants. Ce sont donc de véritables supports de la ville durable.

Pourtant, ces solutions ne permettent pas de gérer les évènements pluvieux au-delà d'une certaine intensité. En effet, les inondations par ruissellement font généralement suite [CEPRI, 2014] :

- Soit à une pluie, éventuellement brève, mais de très forte intensité (plus de 50 mm/h). Dans ce cas, les débits d'eau arrivant au sol sont supérieurs aux capacités d'infiltration ou d'entrée dans le réseau d'assainissement et une partie ruisselle en surface (ruissellement hortonien) ;
- Soit à un cumul important de pluie pendant plusieurs jours, saturant sols, réseaux et ouvrages de rétention, et entraînant le ruissellement de l'eau.

Les auteurs proposent dans cet article une présentation du concept de « ville perméable » et des services écosystémiques qui y sont associés, puis à travers des retours d'expériences en contexte méditerranéen et tropical, ils illustrent les limitent de ces approches en milieu urbain. Enfin, cet article propose une approche multidisciplinaire des eaux pluviales urbaines qui combine efficacement ingénierie robuste avec des solutions et des matériaux alternatifs qui permettent de gérer la quantité et la qualité des eaux de ruissellement afin

d'améliorer la résilience des zones urbaines. Ce sont finalement des systèmes Bleus, Verts et Gris qui combinent réseaux urbains, végétation fonctionnelle, matériaux filtrants ou encore des technologies connexes qui peuvent permettre de créer des systèmes holistiques de gestion durable des eaux pluviales urbaines.

2. VILLE PERMEABLE ET SERVICES ECOSYSTEMIQUES ASSOCIES

Le concept de ville perméable est né dans les années 70, pour intégrer la gestion des évènements pluvieux dans la poursuite de l'urbanisation [Carré, 2016]. Les objectifs de la ville perméable sont de proposer une gestion alternative des eaux pluviales qui permet de limiter le ruissellement, favoriser l'infiltration, favoriser l'évapotranspiration, favoriser le stockage et l'effet retard et finalement profiter des surfaces pour faire autre chose à moindre coût [Barraud, 2018]. L'eau de pluie est ainsi pensée comme une ressource dans la ville perméable.

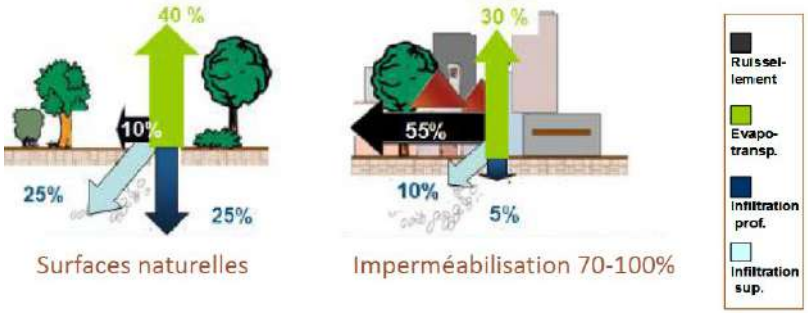


Figure 1 - Comparaison des flux d'eau entre surfaces naturelles et surfaces fortement imperméabilisées, d'après Barraud, 2018.

L'aménagement de la ville perméable se pense à toutes les échelles [Grand Lyon et AE RMC, 2017] :

- A la parcelle (gestion à la source)
  - Valoriser la pluie comme une ressource, en réutilisant les eaux pluviales
  - Limiter les nouvelles imperméabilisations et les compenser
  - Favoriser l'infiltration autant que possible
- A l'échelle du quartier
  - Concevoir des espaces publics perméables et/ou ponctuellement submersibles
  - Gérer les eaux pluviales en cycle court
  - Utiliser des matériaux poreux et/ou végétaux pour lutter contre les îlots de chaleur
- A l'échelle de l'EPCI (Etablissement Public de Coopération Intercommunale)
  - Augmenter le couvert végétal pour favoriser le bien-être en ville
  - Promouvoir les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales
  - Contrôler les réalisations et entretenir les grands ouvrages publics
- Dans le Grand Cycle de l'Eau
  - Préserver les ressources en eau du territoire
  - Préserver et valoriser les ruisseaux et les zones humides
  - Maitriser le risque inondation

Dans les projets d'aménagement ou de rénovation, il est essentiel de prévoir en amont une gestion intégrée de l'eau à la parcelle, en limitant les surfaces qui seront bitumées, en prévoyant de créer des « jardins de pluies », des noues qui sont autant de milieux récepteurs des eaux de pluies, en lien avec une végétalisation abondante. À cela s'ajoute la valorisation des cours d'eau existants, leur réouverture dans certains cas, ainsi que la renaturation des berges urbaines qui en plus de devenir des habitats favorables pour de nombreuses espèces, participent au ralentissement de l'écoulement de l'eau. D'autres techniques d'aménagement, peuvent consister à limiter la pente des voiries afin de ralentir l'écoulement de l'eau, en modifiant leur tracé, pour évacuer l'eau vers des espaces de stockage végétalisés.

De nombreux services écosystémiques sont associés à ces mesures, il s'agit principalement de services de régulation : régulation du climat local grâce à l'évapotranspiration favoriser par la collecte des eaux en surfaces ; régulation de la qualité de l'eau grâce à la filtration des contaminants dans les sols ; régulation des

inondations, régulation de la qualité de l'air grâce à la végétation qui filtre une partie des particules polluantes. D'autres services peuvent être rendus comme des services d'approvisionnement : recharge des nappes ; approvisionnement en eau pour l'arrosage des espaces publics ou des jardins potagers. On peut également y associés des services culturels via l'appropriation des lieux nouvellement aménagés par les habitants.

3. INCIDENCE DE L'ARTIFICIALISATION DES SOLS SUR LES RUISSELLEMENTS GENERES PAR LES PLUIES INTENSES EN REGION MEDITERRANEENNE.

L'impact de l'imperméabilisation est variable selon la capacité d'infiltration initiale du sol naturel et son comportement de surface. Avec la disposition 5A-04 : « Éviter, réduire et compenser l'impact des nouvelles surfaces imperméabilisées », le SDAGE Rhône-Méditerranée à l'ambition de construire des villes « perméables ». Inscrite dans la dynamique de nombreuses politiques publiques (loi Alur, plan nature en ville…), cette disposition contribue à 3 orientations fondamentales (OF) du SDAGE : lutter contre les pollutions (OF5), prévenir les risques d'inondation (OF8) et anticiper les effets du changement climatique (OF0).

Dans cette partie, l'objectif est d'analyser le rôle des actions de « perméabilisation » sur les risques d'inondation consécutifs aux orages violents et fortement localisés, qui s'accompagnent de pluies diluviennes - plus de 200 mm de précipitations en 24 heures -, typiques des territoires méditerranéens (pluies cévenoles).

Pour les pluies courantes à rares, il est avéré qu'il existe :

- Une réduction du temps de réponse du bassin versant, en supprimant la temporisation que génère l'infiltration des premières pluies (c'est-à-dire lorsque le sol dispose de sa capacité maximale de rétention) ;
- Une montée des eaux plus rapide, ce qui constitue un facteur aggravant en termes de risque ;
- Une augmentation manifeste du débit de pointe lorsque la pluie est de courte durée, par rapport à un sol naturel qui aurait assuré l'infiltration de la totalité de la pluie ;
- Un net accroissement des volumes ruisselés au cours de l'événement.

Pour des épisodes pluvieux plus intenses, d'occurrences supérieures, l'impact des actions de désimperméabilisation sur les débits de pointe générés et volumes ruisselés apparaît plus limité. Comme nous le montrons ci-après, de simples analyses hydrologiques utilisant les formules empiriques classiques utilisées par les aménageurs montrent une incidence mesurée des seules mesures de désimperméabilisation sur les épisodes pluvieux intenses en milieu méditerranéen.

Si l'on retient une opération d'aménagement d'une dizaine d'hectares et que l'on estime les débits ruisselés à son exutoire pour des pluies d'occurrences fréquentes à rares (T = 10 ans) ou s'apparentant à l'exceptionnel (T = 100 ans, pluies cévenoles), l'utilisation des formules rationnelles ou une simple modélisation pluie-débit basée sur la formulation du SCS[1] montre une augmentation significative des débits de pointe ruisselés pour les pluies les plus courantes mais un impact plus mesuré sur les débits de pointe calculés pour les pluies de périodes particulièrement intenses. Ce phénomène provient de l'importance des hauteurs précipitées.

En effet, en analysant les pluies caractéristiques de ces occurrences sur le département des Bouches du Rhône utilisées pour concevoir les dispositifs de gestion des eaux pluviales, il apparaît que les hauteurs totales précipitées pour la période de retour 100 ans sont près de 2 fois supérieures à celle de la pluie décennale (figure 2) et que la hauteur précipitée de cette dernière, une fois son pic atteint, correspond à la hauteur précipitée par un épisode centennal au début de sa période intense (figure 3).

[1] Soil Conservation Service

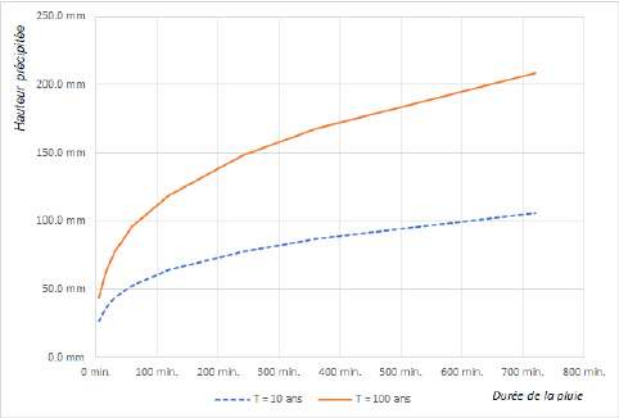


Figure 2 : hauteurs totales précipitées fonctions de la durée des épisodes pluvieux sur le territoire de Marseille

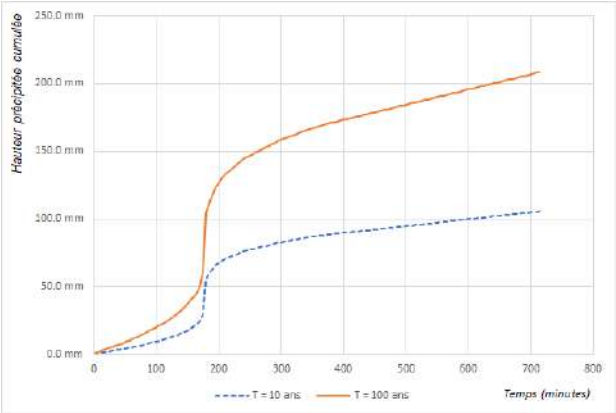


Figure 3 : évolution des hauteurs précipitées cumulées en fonction du temps pour les pluies décennales et centennales de durée 12 heures sur le territoire de Marseille

De la sorte, si un épisode pluvieux survient après une période sèche, la capacité de rétention (d'interception) voire d'infiltration des sols (quelques centimètres) si elle permet de retenir une pluie courante, ne suffit pas à intercepter une fraction significative de la pluie pour des occurrences extrêmes laissant supposer que les débits ruisselés générés seront proches de ceux calculés en considérant un sol revêtu (ruissellement direct).

L'utilisation de méthodes classiques hydrologiques permet de quantifier les débits ruisselés pour deux périodes de retour (10 et 100 ans) et pour différents états d'imperméabilisation de sol.

Une première technique de détermination des débits est l'utilisation de la **méthode rationnelle**.

$$Q = \frac{C*I*A}{360} \qquad (1)$$

où Q est le débit est exprimé en m^3/s, C le coefficient de ruissellement, I l'intensité de l'averse exprimée en mm/h, A la surface exprimée en mm/h.

Elle prend en compte plusieurs hypothèses de départ.

- L'intensité de l'averse est uniforme et dans le temps et sur tout le bassin de drainage.
- La durée de l'averse D est égale au temps de concentration tc du bassin de drainage.
- La fréquence d'occurrence T du débit de pointe Qp est la même que celle de la précipitation.

Elle est habituellement utilisée pour calculer les débits de pointe de période de retour 10 ans. Le calcul du débit centennal peut se baser sur la formule rationnelle avec prise en compte d'une rétention initiale et ajustement du coefficient de ruissellement pour tenir compte de la saturation progressive des terrains.

$$P_0 = \left(1 - \frac{C_{10}}{0{,}8}\right) \times P_{10} \qquad (2)$$

$$C_{100} = \left(1 - \frac{P_0}{P_{100}}\right) \times 0.8 \qquad (3)$$

$$tc_{100} = \left(\frac{P_{100} - P_0}{P_{10} - P_0}\right)^{-0.23} \times tc_{10} \qquad (4)$$

où P_0 est la rétention initiale en mm calculée fourni dans le tableau 1, P_{10} la pluie journalière décennale en mm, P_{100} la pluie journalière centennale en mm, C_{10} le coefficient de ruissellement retenu pour la période de retour 10 ans, C_{100} le coefficient obtenu pour l'occurrence 100 ans.

Couvert	Morphologie	Pente (%)	Nature du sol		
			Sableux	Limoneux	Argileux compact
boisé	plat	0 – 5	90	65	50
	ondulé	5 – 10	75	55	35
	pentu	10 – 30	60	45	25
prairie	plat	0 – 5	85	60	50
	ondulé	5 – 10	80	50	30
	pentu	10 – 30	70	40	25
culture	plat	0 – 5	65	35	25
	ondulé	5 – 10	50	25	10
	pentu	10 – 30	35	10	0

Tableau 1 : Seuils de ruissellement P0 en mm (d'après Astier et al. 1993)

Pour la présente analyse, nous avons retenu un second groupe d'analyses reposant sur un modèle pluie débit sommaire reposant sur la formulation du SCS.

Pour les deux méthodes, les caractéristiques du bassin versant drainé sont les suivantes : surface totale 10 ha, Longueur hydraulique 410 m, pente 0.0195 m/m et le temps de concentration a été calculé par la méthode de Bressand Golossof égal à 6 minutes. A l'état naturel, le coefficient de ruissellement C_{10} est fixé à 0.3 (terrains agricoles drainés).

Les méthodes donnent des résultats comparables comme le suggère le tableau 2. La figure 4 présente l'évolution du débit de pointe ruisselé suivant le niveau d'imperméabilisation pour deux périodes de retour.

Périodes de retour	Méthodes	Etat naturel	Etat actuel		Etat projet		
		(0 % imperméabilisation)	*(62 % imperméabilisation)*		*(92 % imperméabilisation)*		
10 ans	Rationnelle	2.29	5.12	*(+ 124%)/Etat naturel*	6.5	*(+ 184%)/Etat naturel*	*(+ 27%)/Etat actuel*
	Pluie-débit SCS	2.39	5.38	*(+ 125%)/Etat naturel*	6.62	*(+ 177%)/Etat naturel*	*(+ 23%)/Etat actuel*
100 ans	Rationnelle	8.37	10.73	*(+ 28%)/Etat naturel*	11.87	*(+ 42%)/Etat naturel*	*(+ 11%)/Etat actuel*
	Pluie-débit SCS	7.36	10.68	*(+ 45%)/Etat naturel*	11.58	*(+ 57%)/Etat naturel*	*(+ 8%)/Etat actuel*

Tableau 2 : Débits de pointe ruisselés en m3/s calculés pour trois configuration d'occupation des sols d'un terrain de 10 ha.

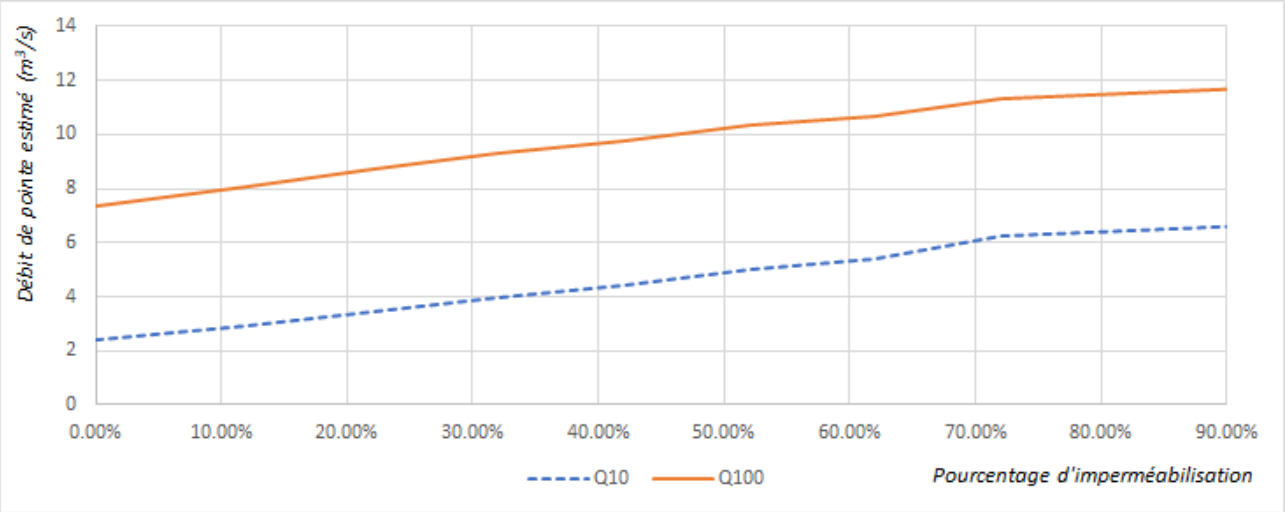


Figure 4 : Evolution du débit de pointe ruisselé suivant le niveau d'imperméabilisation d'un terrain de 10 ha pour deux périodes de retour.

Ces éléments montrent :

- Un triplement du débit de pointe maximum ruisselé entre l'état naturel (0% d'imperméabilisation) et l'état projet (92% d'imperméabilisation) pour une pluie décennale (plus du double pour l'état actuel) alors que ce débit est « seulement » augmenté de moitié entre l'état naturel et l'état projet pour un épisode centennal (+ 30 à 40 % pour l'état actuel).
- L'accroissement de l'artificialisation des sols entre l'état actuel et état projet (+ 30 %, + 3 ha) s'accompagne d'une augmentation comparable des débits de pointe ruisselés pour l'événement

décennal mais génère une augmentation limitée à 10 % pour l'événement de période de retour 100 ans.

4. DRAINAGE DES EAUX PLUVIALES AU VANUATU

Dans un tout autre contexte que précédemment les enseignements d'un projet mené au Vanuatu sont également dignes d'intérêt. Une étude de préfaisabilité d'infrastructures a été engagée à même d'améliorer les conditions de vie dans les bidonvilles de la capitale Port Vila, et notamment d'éviter leur fréquente inondation par ruissellement lors d'évènements pluvieux intenses. Plusieurs facteurs spécifiques caractérisent le contexte local :

- Le climat tropical induit une forte pluviométrie, de l'ordre de 2300 mm par an, soutenue lors de la saison humide mais restant significative lors des mois « secs » (plus de 200 mm/mois au minimum). Les épisodes pluvieux sont toujours intenses, de type « mousson »
- La zone de projet est vallonnée (avec des altitudes comprises entre 0 et 70 m) et comporte un grand nombre de zones endoréiques, à toutes altitudes (Figure 5).
- Le substrat rocheux est calcaire et composé d'anciennes structures coralliennes désormais émergés (localement appelées « coronous rock ») (Figure 6). Il présente par conséquent une perméabilité forte voire très forte, avec des vitesses d'infiltration comprises entre 10^{-4} et 10^{-3} $m.s^{-1}$. En certains endroits des puits d'infiltration naturels (« sinkholes ») permettent une infiltration encore plus élevée.
- Sauf en de rares emplacements de la ville il n'existe pas de réseau de drainage des eaux pluviales, qui s'écoulent la plupart du temps sur le terrain naturel ou le long des voiries existantes.

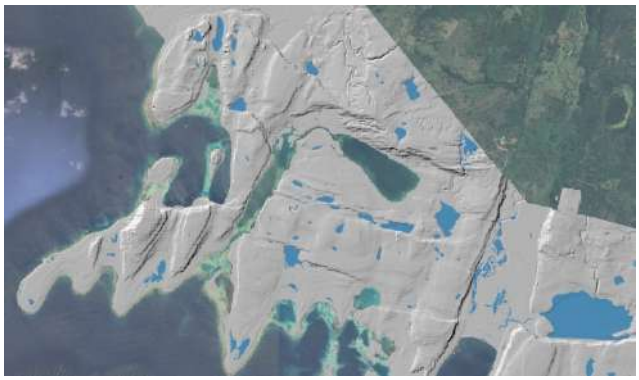


Figure 5 - Zones endoréiques de port Vila (en bleu)

Figure 6 - Substrat de type corallien « coronous »

Malgré cette capacité d'infiltration exceptionnelle les zones endoréiques (où certains quartiers informels sont établis) font face à des inondations récurrentes, au point que certains quartiers sont surnommés « piscine » (Figure 7 et Figure 8).

Figure 7 - Inondation du quartier « Seven Star », avril 2019 [2]

Figure 8 - Habitant indiquant le niveau atteint par l'eau sur sa maison

[2] ©Godwin Ligo

Un des quartiers a fait l'objet d'une analyse particulière. Ce quartier d'une superficie de 12 ha environ (en bleu dans la Figure 9) collecte en son point le plus bas constituant une dépression endoréique les eaux de ruissellement d'un bassin versant de 21,6 ha (Figure 9). Dans un tel contexte, il a semblé naturel d'explorer en premier lieu la possibilité d'infiltrer les eaux de pluie pour éviter soit leur pompage coûteux en exploitation, soit la pose de conduites de drainage à plusieurs mètres de profondeur dans un terrain rocheux. Les surfaces d'infiltration requises pour différentes périodes de retour de pluie, et deux hypothèses de vitesses d'infiltration (10^{-3} et 3.10^{-4} $m.s^{-1}$) ont été calculées (Tableau 3), avec la volonté d'apporter une réponse durable et crédible aux problèmes d'inondation récurrents.

Figure 9 -Découpage du bassin versant (jaune) et contour du quartier étudié (bleu)

Tableau 3 – Calcul des surfaces d'infiltration requises en fonction de la période de retour des pluies avec deux hypothèses de vitesses d'infiltration.

Période de retour	Surface d'infiltration requise (pour 10^{-3} et 3.10^{-4} $m.s^{-1}$)
2 ans	1450 m^2 – 3150 m^2
5 ans	2000 m^2 – 4300 m^2
10 ans	2450 m^2 – 5400 m^2

Même dans un contexte géologique a priori favorable, l'infiltration des eaux pluviales au point bas nécessite des surfaces importantes, y compris pour des pluies d'occurrence modérée. Ces surfaces ne sont pas disponibles au plan foncier.

Une alternative consistant à construire un réseau de drainage et implanter de multiples tranchées et puits d'infiltration le long de ce réseau pour infiltrer progressivement les eaux de ruissellement a été explorée. Cependant elle nécessite la création ex-nihilo d'un important réseau de drainage, peu avantageuse économiquement. Par ailleurs, le retour d'expérience de telles infrastructures mises en place dans d'autres quartiers de Port Vila a montré une diminution rapide des capacités d'infiltration en raison du colmatage précoce des structures, induisant d'importantes contraintes de maintenance, peu souhaitables dans un contexte de quartiers informels et alors même que les responsabilités en matière de gestion des eaux pluviales sont insuffisamment définies au plan municipal et national.

Au regard de ces éléments, et malgré des prédispositions a priori favorables à l'infiltration, l'option retenue consiste, « très classiquement », dans un souci d'optimum économique, à collecter les eaux au point le plus bas de la zone ainsi que dans quelques rues principales seulement (via des drains à ciel ouvert), puis à les évacuer vers la mer via un réseau de drainage de diamètre 1400 à 1600 mm, dont 400 m posés à plus de 4 m de profondeur (Figure 10). Quoique conçues et dimensionnées pour la seule zone de projet (l'étude ne concernant que quelques quartiers) certaines conduites peuvent être redimensionnées pour drainer d'autres bassins versants adjacents, dans le cadre d'un éventuel schéma directeur de drainage plus global adressant la ville dans son ensemble.

Figure 10 - Plan du réseau de drainage

5. GESTION DES EAUX PLUVIALES DU FUTUR QUARTIER RESIDENTIEL DE LA CLAIRIERE A BRON (69) 6 ZAC DES TERRASSES

A la différence des deux autres cas de figure présentés, le quartier de la Clairière, aménagement du site de l'ancienne caserne Raby située au cœur de l'agglomération lyonnaise, a été conçu pour répondre au contexte pluviométrique caractéristique du Grand Lyon. Pour ce projet, à l'instar de projet urbain s'implantant sur une surface déjà imperméabilisée (friche urbaine, rénovation d'espace public ou de voirie), les concepteurs ont été plus ambitieux que la simple transparence hydraulique de leurs aménagements, qui consisterait à ne pas modifier la situation précédente au regard des écoulements pluviaux. Le projet a été construit en prévoyant d'infiltrer et/ou stocker davantage les eaux pluviales qu'avant la réalisation des travaux et de la sorte en contribuant à désimperméabiliser l'existant.

Trois systèmes ont été retenus :

- Des tranchées infiltrantes de Stockholm (selon les voiries celles-ci ont une largeur comprise entre 1 et 4m, et une profondeur comprise entre 1 et 2m) assurant l'infiltration des eaux pluviales et également le stockage ;
- Des tranchées infiltrantes (selon les voiries celles-ci ont une largeur et une profondeur comprise entre 1 et 2m) permettant l'infiltration des eaux pluviales et également le stockage ;
- Des noues de rétention (de 2 m de large sur 33 cm de profondeur) assurant la collecte et le traitement des eaux pluviales. Les eaux stockées et en partie décantées sont rejetées dans les tranchées de Stockholm ou dans les tranchées infiltrantes situées sous les noues. Ce principe permet donc à la fois rétention, épuration de l'eau, et mise en scène paysagère.

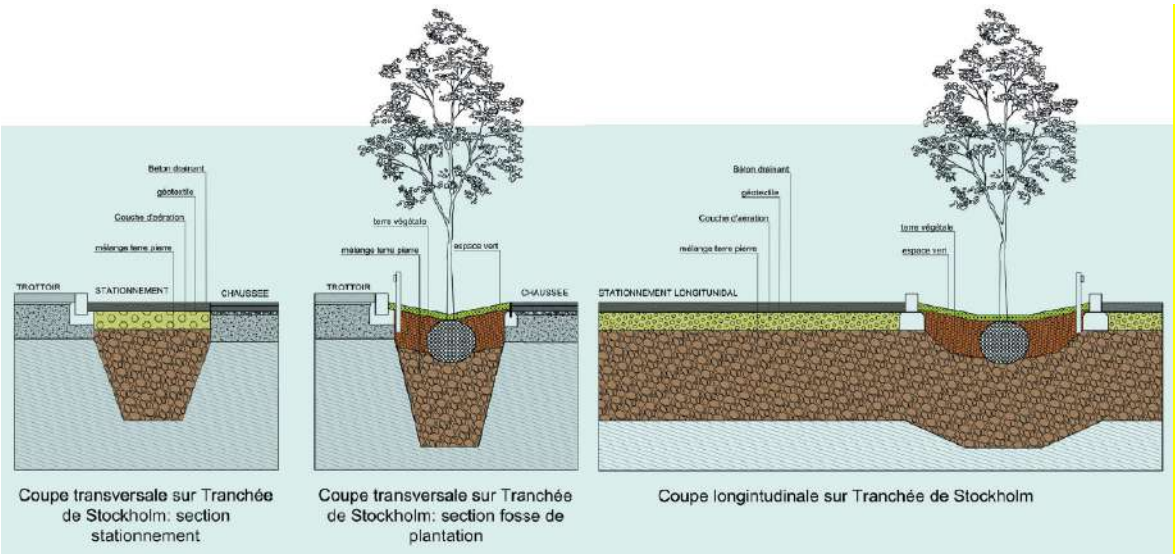


Figure 11 - Les tranchées de Stockholm : technique alternative de gestion des eaux pluviales.

Les dispositifs ont été dimensionnés pour recevoir des volumes ruisselés en tenant compte des capacités intrinsèques de rétention disséminées sur l'ensemble du projet. Pour la quartier de la Clairière, les analyses ont permis de justifier un rejet zéro au réseau d'assainissement jusqu'à une occurrence 100 ans de pluie.

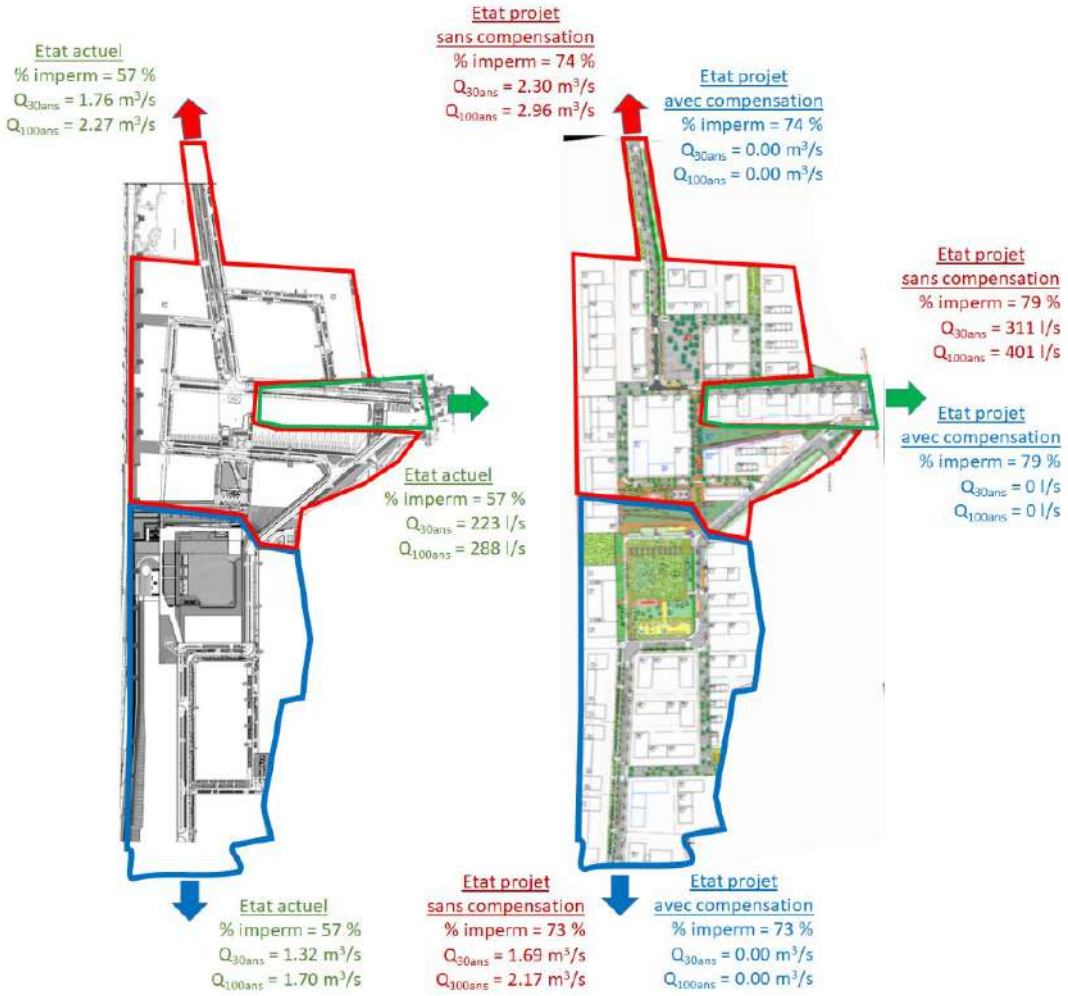


Figure 12 - Débits de pointe évacués vers le réseau d'assainissement communal pour les pluies de périodes de retour 30 et 100 ans pour projet de requalification de la ZAC Terrasses

6. CONCLUSION

Les deux premiers cas de figure présentés montrent que la désartificialisation des sols et l'infiltration seules ne suffisent pas pour diminuer significativement les risques d'inondation des zones urbaines lorsque les événements d'occurrence rare à exceptionnelle sont particulièrement intenses. Il convient d'y associer des mesures de rétention voire de drainage pour permettre une réelle mise hors d'eau quelle que soit l'intensité de la pluie :

- Toitures végétalisées,
- Noues d'infiltration,
- Jardin de pluie,
- Chaussée réservoir,
- Bassins de rétention et/ou d'infiltration, …

Ces mesures se définissent projet par projet, à partir d'une analyse fine des phénomènes en tenant compte des particularismes locaux et des bonnes pratiques. Aussi, la sauvegarde des habitants et la résilience des infrastructures peuvent nécessiter dans certains cas (notamment des pluies particulièrement intenses) de compléter les dispositions relevant de la végétalisation par des ouvrages de rétention et d'évacuation des eaux pluviales.

Cette particularité ne remet pas en cause les avantages environnementaux, économiques et sociaux apportées par un urbanisme qui favorise la perméabilité : meilleure gestion de l'assainissement, protection de la qualité et de la quantité des ressources en eau, réduction des risques (inondation et pollution des eaux) [SDAGE RMC, 2017]. Maîtriser l'imperméabilisation des sols offre aussi la possibilité aux acteurs locaux d'engager une réelle réflexion sur l'urbanisation de demain, en y intégrant des actions de lutte contre les effets du changement climatique et de préservation de la nature en ville, qui participent à l'amélioration du cadre de vie et au bien-être des habitants. Le troisième projet présenté, projet de la Clairière à Bron, en est un exemple concret.

La lutte contre l'imperméabilisation des sols constitue donc une véritable opportunité pour les territoires permettant de favoriser un développement urbain vertueux, source de nombreux services écosystémiques, qui répondent également aux attentes des collectivités et des habitants. La présence de l'eau en surface, associée à la végétation cultivée ou non, participe de la qualité urbaine, depuis les différentes formes d'agriculture en ville, les qualités agronomiques de la pleine terre, une eau de pluie privilégiée pour l'arrosage des jardins individuels et collectifs, jusqu'aux fonctions de santé, de bien-être, étendues à l'adaptation au changement climatique (avec le rôle de rafraichissement nocturne) [Carré, 2016].

REFERENCES

Catherine Carré C. (2016). - A la recherche de la ville perméable, *Constructif*, **n°43**, p. 55-58

Centre Européen de Prévention des Risques (2014). - Gérer les inondations par ruissellement pluvial, Guide de sensibilisation, 92 p.

European Commission (2012). - Guidelines on best practice to limit, mitigate or compensate soil sealing. European Union SWD (2012), 101 p.

European Environment Agency (2012). - Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. EEA Report No 12/2012. http://www.eea.europa.eu/media/publications/

Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... & Dubash, N. K. (2014). - Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (p. 151). Ipcc.

U.S. Environmental Protection Agency (2002) Summary table for the nutrient criteria documents. http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/criteria-nutrientecoregions- sumtable.pdf

Wendling, L. A., & Holt, E. E. (2020). - Integrating engineered and nature-based solutions for urban stormwater management. In *Women in Water Quality* Springer, Cham., p. 23-46.

Tentative de différenciation entre « maîtrise des eaux pluviales » et « gestion des inondations par ruissellement » en contexte méditerranéen à partir du cas de la Métropole Aix -Marseille-Provence (Goudedranche & Langumier)

Tentative de différenciation entre « maîtrise des eaux pluviales » et « gestion des inondations par ruissellement » en contexte méditerranéen à partir du cas de la Métropole Aix -Marseille-Provence

Auteurs : Goudedranche Luce[1], Langumier Julien[2]

[1]DDTM13-Pôle Risques – Marseille – France, luce.goudedranche@bouches-du-rhone.gouv.fr
[2]DDTM13-Pôle Risques – Marseille – France, julien.langumier@bouches-du-rhone.gouv.fr

*La prise en compte des inondations par ruissellement au-delà de la maîtrise des eaux pluviales pose question, car elle se situe en effet à l'interface de plusieurs compétences des collectivités comme le montre le très éclairant le rapport du CGEDD. Le cadre de la Stratégie Locale de Gestion de Risques d'Inondation, animée par la DDTM, a paru pertinent dans le cas de la Métropole Aix Marseille Provence pour initier une dynamique d'acteurs visant à répondre à la question très pratique de la différenciation des projets selon qu'ils relèvent de la maîtrise des eaux pluviales et ou de la gestion du risque inondation. L'analyse de divers documents portant sur la gestion des eaux pluviales, a montré que l'utilisation d'un seul critère pour définir une limite entre ces 2 types des problématiques n'était pas pertinente. L'originalité de la proposition a consisté à articuler trois critères : la localisation du projet par rapport au réseau d'assainissement existant, les contraintes réglementaires qui s'imposent au projet, les objectifs du projet notamment par rapport au dimensionnement correspondant à une occurrence de pluies, dans **un logigramme structuré.***

Mots-clefs : ruissellement, pluvial, GEMAPI, différenciation, logigramme

Attempt to differentiate between "control of rainwater" and "management of flooding by runoff" in a Mediterranean context based on the case of the Aix-Marseille-Provence Metropolis

The consideration of flooding by runoff beyond the control of rainwater poses a question, because it is indeed at the interface of several skills of communities as shown by the very enlightening report of the CGEDD. The framework of the Local Flood Risk Management Strategy, led by the DDTM, seemed relevant in the case of the Aix Marseille Provence Metropolis to initiate a dynamic of actors aiming to answer the very practical question of the differentiation of projects depending on whether they are rainwater control and or flood risk management. The analysis of various documents relating to the management of rainwater, showed that the use of a single criteria to define a limit between these 2 types of problems was not relevant. The originality of the proposal consisted in articulating three criteria: the location of the project in relation to the existing sewerage network, the regulatory constraints which are imposed on the project, the objectives of the project in particular in relation to the sizing corresponding to an occurrence of rain, in a structured flowchart.

Key words : runoff, rain, GEMAPI, differentiation, flowchart

I INTRODUCTION

La mise en place de la compétence « Gestion des milieux aquatique et protection contre les inondations » [GEMAPI- 2014] à partir de 2015 et l'élaboration de la Stratégie Locale des Risques Inondation [SLGRI-2010]

sur les fleuves côtiers de la Métropole Aix-Marseille-Provence sur cette même période ont mis à l'agenda technique de la collectivité en construction, la question de la gestion des inondations par ruissellement et de son financement. De 2015 à 2018, le cœur de la problématique est la correspondance entre un phénomène physique et les périmètres des différentes compétences des collectivités qui peuvent le recouvrir et le prendre en charge.

Les inondations par ruissellement sont en effet à l'interface de plusieurs compétences des collectivités comme le montre le très éclairant rapport du CGEDD [Alain Roche-avril 2017]: assainissement pluvial et GEMAPI principalement mais au sein même de la compétence GEMAPI, la prise en compte des inondations par ruissellement au-delà de la maîtrise des eaux pluviales pose question. Les inondations par ruissellement apparaissent donc dans le rapport d'Alain Roche comme à l'interface de trois compétences des collectivités : pluvial (assainissement), ruissellement et GEMAPI. Cette complexité se traduit bien sûr dans les organisations des services des EPCI (direction de l'eau, de l'environnement et syndicats de rivière historiques potentiels délégataires de la compétence GEMAPI).

Dans ce contexte, le cadre offert par la SLGRI a paru pertinent dans le cas de la Métropole Aix Marseille Provence pour initier une dynamique d'acteurs visant à répondre à la question très pratique de la différenciation des projets selon qu'ils relèvent de la maîtrise des eaux pluviales et ou de la gestion du risque inondation. Pour la DDTM 13 qui au travers du pilotage de la SLGRI a animé ce groupe, ce travail permettait également de répondre à la demande ministérielle d'initier sur l'arc méditerranéen des Plans d'Action de Prévention d'Inondation (PAPI) prenant en compte le risque ruissellement et d'envisager le financement du volet « ruissellement » en mobilisant le Fond de Prévention des Risques Majeurs

II DEMARCHE METHODOLOGIQUE POUR APPROCHER CETTE DIFFERENCIATION

II.1 Cadrage de la réflexion

L'analyse s'est appuyée comme développée dans la cadre de la SLGRI sur l'approche préconisée par le [CEPRI-2015] qui introduit :

1. la notion de réseau mineur et de réseau majeur pour la gestion des écoulements, le réseau majeur étant constitué des voiries et autres espaces publics et collectifs qui prennent en charge l'excédent d'eau pluviale que le réseau mineur le plus souvent enterré, ne peut plus accepter ;
2. la notion de niveaux de service objectivés par rapport à des occurrences de pluies ou des intensités sur une certaine durée. .

A ce titre, trois types d'enjeux, en lien avec l'intensité des pluies et en fonction des niveaux de service recherchés, ont pu être identifiés :

1. Pour des pluies régulières de faible intensité, le réseau de drainage, souvent dimensionné pour une occurrence de pluie oscillant de 10 à 30 ans, assure la collecte et l'évacuation des eaux pluviales. Les fonctions de la ville ne sont pas perturbées et l'objectif fixé dans ce cas est le maintien voire l'amélioration de la qualité du milieu récepteur (cours d'eau, rade) de ce système de drainage.

2. Pour des pluies moins fréquentes et de plus fortes intensités, le réseau de drainage n'est plus suffisant et les eaux pluviales ruissellent sur la voirie. Elles sont alors prises en charge par le réseau majeur. L'enjeu est ici d'organiser et de reconnaître ce réseau majeur, voire de gérer la protection de certains biens ou lieux sensibles, d'organiser la gestion de crise sur la voirie.

3. Pour des pluies exceptionnelles, la gestion de l'inondation n'est plus possible au travers de ce réseau majeur et les débordements deviennent généralisés. Par ailleurs on observe souvent, concomitamment, un débordement des cours d'eau qui aggrave les phénomènes. L'enjeu est alors de gérer la crise globalement et de protéger les personnes en priorité.

Cette approche centrée sur le niveau de service que la collectivité ou l'aménageur souhaite atteindre permet de dépasser une différenciation qui ne serait basée que sur une occurrence de pluie

exceptionnelle ou une localisation géographique dont la pertinence pour la gestion des conséquences négatives des inondations par ruissellement resterait discutable.

II.2 Connaissance de l'aléa ruissellement

Il n'existe ni de définition des inondations par ruissellement ni une caractérisation de cet aléa, stabilisées. Pour initier cette réflexion le groupe de travail s'est appuyé sur **l'analyse de différentes études sur la définition de l'aléa « ruissellement »** menées lors de l'élaboration de PLU, de schémas directeurs des eaux pluviales voire de débordement de cours d'eau très urbanisés tel Les Aygalades.

Cette analyse amène à distinguer 3 types d'études de connaissances des inondations par ruissellement :

- Les études type « débordement de cours d'eau » appliquées sur le chevelu hydrographique fin.

Elles permettent de cartographier le risque d'inondation lié à des axes d'écoulements, des vallats secs et des cours d'eau intermittents. Elles se basent soient sur des dires d'experts, mais de plus en plus sur de la modélisation hydraulique qui intègre des données topographiques précises (développement de l'utilisation de relevés LIDAR).

Si ces méthodes sont pertinentes pour définir les secteurs à risques et appliquer les principes de maîtrise de l'urbanisation, elles ne prennent pas en considération le réseau pluvial et son impact sur les inondations fréquentes et intermédiaires (d'occurrence trentennale ou cinquentenale).

Les études type « ruissellement urbain » – écoulement sur le réseau majeur

En prenant en compte le bâti, ces études permettent en zone urbaine dense de modéliser de façon précise les écoulements plus particulièrement sur le réseau majeur. Elles permettent de définir le risque sur la voirie et d'accompagner la gestion de crise. Là aussi sans prise en compte du réseau pluvial, elles sont surtout pertinentes pour des pluies de fortes intensités et d'occurrences faibles (centennale).

L' Etude hydraulique sur un bassin versant très anthropisé avec prise en compte du réseau pluvial

Sur les secteurs les plus urbanisés, que ce soit dans le cadre de la mise en place de schéma pluviaux ou de PLU/ PPRi, se développent des modélisations qui prennent en compte le fonctionnement du réseau pluvial en intégrant dans la modélisation hydraulique du cours d'eau : les zones de couverture, les canalisations, les points de rejets ou de saturation du réseau pluvial.

II.3 analyse critique de documents

Une fois le cadre posé et afin de définir des critères de différenciation entre la gestion ordinaire du pluvial et la gestion des inondations par ruissellement, différents documents ont été analysés :

– schéma pluvial de différentes communes,

– doctrine départementale des Bouches-du-Rhône « Rubrique 2.1.5.0 de la loi sur l'eau-Principes de gestion des eaux pluviales dans les projets d'aménagement » ,

– délibération de la ville de Marseille pour la mise en place d'une taxe GEMAPI.,

L'étude de ces documents font ressortir deux types de données les plus fréquemment utilisées pour caractériser les projets :

– **des critères géographiques :** localisation dans un talweg y compris secs,
taille du bassin versant intercepté par l'ouvrage : 1ha étant une référence souvent utilisée,
positionnement en amont d'un réseau pluvial ou intégré sur un espace équipé d'un réseau de collecte, zone urbaine ou non urbanisée ;

– **des critères d'occurrence de volume de pluie à stocker ou à évacuer**:

capacité du réseau pluvial qui peut correspondre à une occurrence de quelques années seulement pour certains secteurs de Marseille,

10 ans (référence que l'on note régulièrement dans les zonages pluviaux),

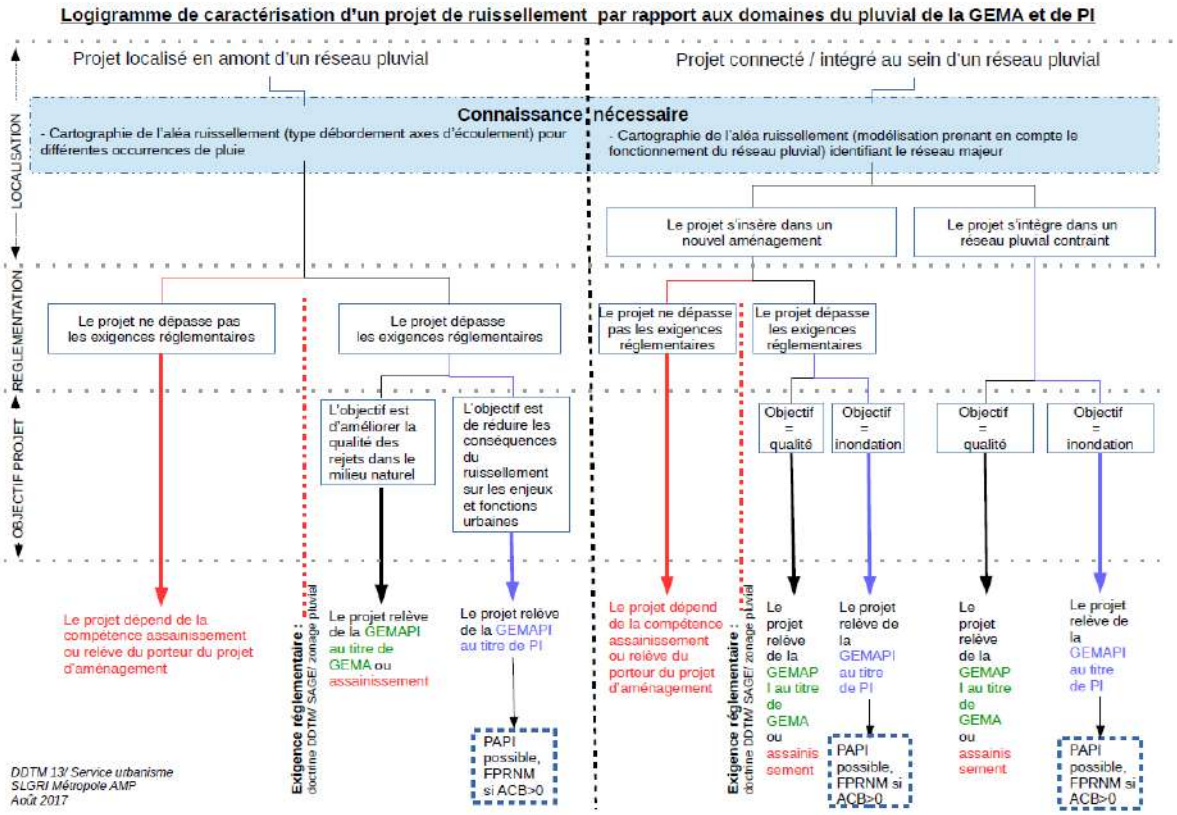
30 ans (occurrence recherchée pour les nouveaux aménagements),

100 ans que l'on peut retrouver dans le zonage pluvial d'Aix-en-¨Provence pour certains secteurs sensibles.

Leur analyse a amené au constat qu'au regard de la diversité des situations et des intensités de pluie fortes qui peuvent être fréquentes sur le territoire de la Métropole, l'utilisation d'une seule de ces approches ou critères pour définir une limite entre « maîtrise du pluvial » et « gestion des inondations par ruissellement » n'était pas pertinente. En effet, elle ne favorisait pas une approche intégrée de la gestion de l'eau de pluie car elle excluait de fait tout une partie d'actions possibles de prévention concernant des pluies fréquentes mais pas ordinairement rattachées à un réseau pluvial.

III LOGIGRAMME ET EXEMPLES

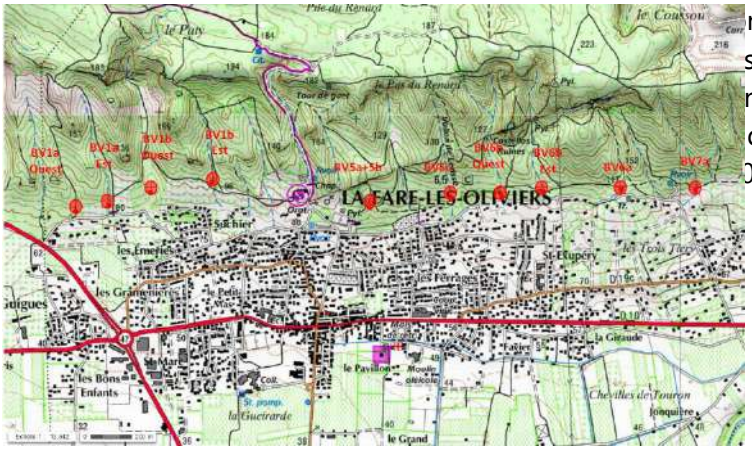
Plutôt que de choisir un seul des critères pour répondre à un problème complexe, l'originalité de la proposition a consisté à articuler trois critères : la localisation du projet par rapport au réseau d'assainissement existant, les contraintes réglementaires qui s'imposent au projet, les objectifs du projet notamment par rapport au dimensionnement correspondant à une occurrence de pluies, dans **un logigramme structuré.**



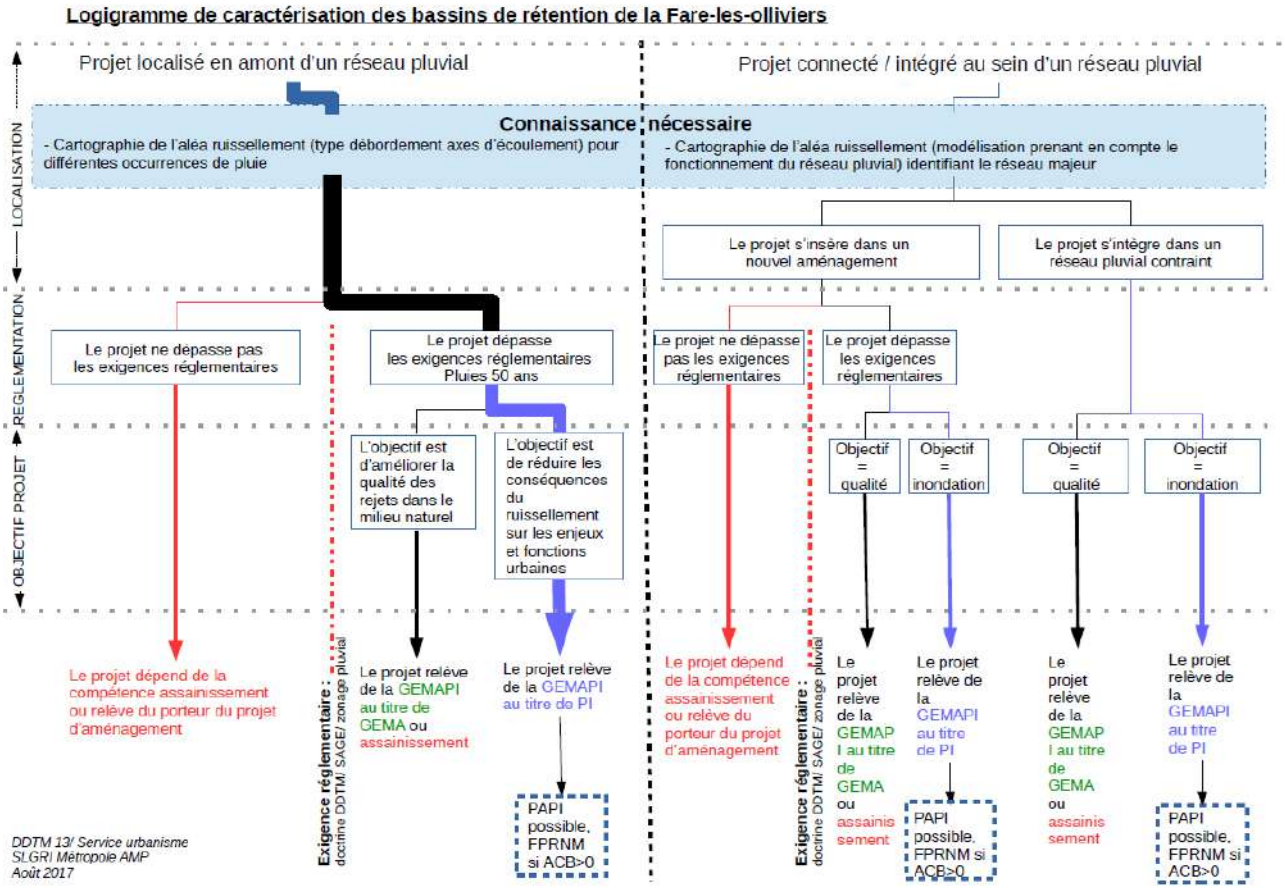
Pour évaluer de l'intérêt et de la pertinence de ce logigramme, cette approche a donc été appliquée à une dizaine de différents exemples dont le projet de bassins de rétention du Pays d'Aix (Gardanne, La Fare les Oliviers, Aix-en-Provence) et du bassin de rétention de Notre Dame de consolation à Marseille.

Projet de bassins de rétention du Pays d'Aix (Gardanne, La Fare les Oliviers, Aix-en-Provence)

La Fare- les -oliviers – protection de la zone urbaine

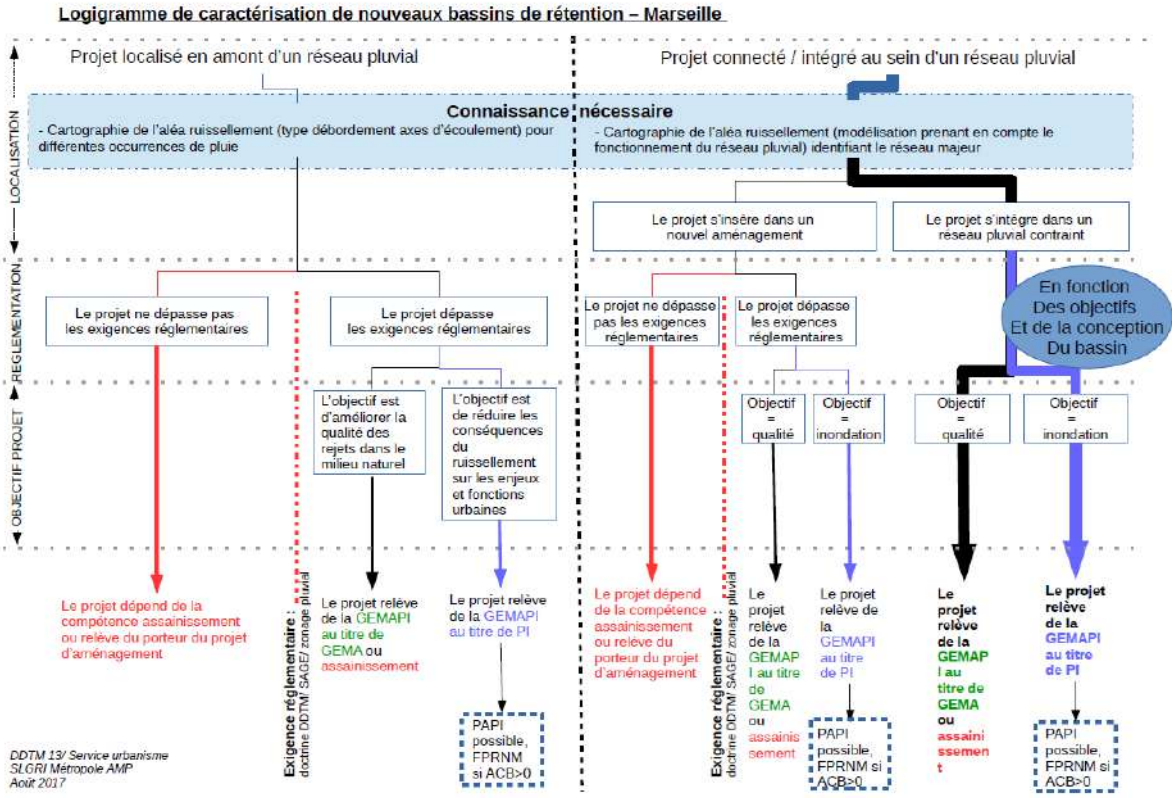


nformité de 2 bassins de rétention des eaux
s-Oliviers.
nts des talwegs afin d'écrêter les débits pour
du réseau pluvial communal.
0 ans.



Projet de bassin de rétention de Notre Dame de consolation à Marseille

Dans le cadre de la réflexion sur la compétence GEMAPI et l'instauration de la taxe à l'échelle de la ville de Marseille, certains bassins de rétention installés dans le lit de Valllats secs, d'anciens cours d'eau ou dont le bassin versant intercepté était conséquent, pour un volume total de rétention de 104 435 m^3 ont été listés comme pouvant relever de cette compétence dont le bassin de la Consolation.


Logigramme de caractérisation de nouveaux bassins de rétention – Marseille
LOCALISATION
REGLEMENTATION
OBJECTIF PROJET
Projet localisé en amont d'un réseau pluvial
Projet connecté / intégré au sein d'un réseau pluvial
Connaissance nécessaire
- Cartographie de l'aléa ruissellement (type débordement axes d'écoulement) pour différentes occurrences de pluie
- Cartographie de l'aléa ruissellement (modélisation prenant en compte le fonctionnement du réseau pluvial) identifiant le réseau majeur
Le projet s'insère dans un nouvel aménagement
Le projet s'intègre dans un réseau pluvial contraint
En fonction Des objectifs Et de la conception Du bassin
Le projet ne dépasse pas les exigences réglementaires
Le projet dépasse les exigences réglementaires
Le projet ne dépasse pas les exigences réglementaires
Le projet dépasse les exigences réglementaires
L'objectif est d'améliorer la qualité des rejets dans le milieu naturel
L'objectif est de réduire les conséquences du ruissellement sur les enjeux et fonctions urbaines
Objectif = qualité
Objectif = inondation
Objectif = qualité
Objectif = inondation
Le projet dépend de la compétence assainissement ou relève du porteur du projet d'aménagement
Exigence réglementaire : doctrine DDTM/ SAGE/ zonage pluvial
Le projet relève de la GEMAPI au titre de GEMA ou assainissement
Le projet relève de la GEMAPI au titre de PI
PAPI possible, FPRNM si ACB>0
Le projet dépend de la compétence assainissement ou relève du porteur du projet d'aménagement
Exigence réglementaire : doctrine DDTM/ SAGE/ zonage pluvial
Le projet relève de la GEMAPI au titre de GEMA ou assainissement
Le projet relève de la GEMAPI au titre de PI
PAPI possible, FPRNM si ACB>0
Le projet relève de la GEMAPI au titre de GEMA ou assainissement
Le projet relève de la GEMAPI au titre de PI
PAPI possible, FPRNM si ACB>0
DDTM 13/ Service urbanisme
SLGRI Métropole AMP
Août 2017

IV CONCLUSIONS

Ce logigramme a donc surtout comme intérêt d'articuler sans rupture et sans risque de périmètre d'exclusion les actions publiques pouvant relever à la fois à la fois de la gestion à ciel ouvert des eaux pluviales et de la prévention des inondations pour des occurrences fréquentes entre 10 et 30 ans dont les conséquences en raison de l'intensité des pluies méditerranéennes sont très impactantes.

À travers la mise en forme de ce logigramme, ce travail a également pour ambition d'initier la construction conjointe par les différentes composantes techniques de la Métropole d'un PAPI « ruissellement » métropolitain.

REFERENCES

GEMAPI – La gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations (GEMAPI) une compétence confiée aux intercommunalités (métropoles, communautés urbaines, communautés d'agglomération, communautés de communes) par les lois de décentralisation n° 2014-58 du 27 janvier 2014 et n° 2015-991 du 7 août 2015, depuis le 1er janvier 2018.

SLGRI – La mise en œuvre de la Directive Inondation de 2007, conformément à sa transposition en droit français dans la loi n°2010-788 du 10 juillet 2010 valant engagement national pour l'environnement, prévoit l'élaboration de stratégies locales de gestion des risques d'inondation pour les territoires à risque important d'inondation – Articles L. 556-7 et 556-8 du code de l'environnement.

CGEDD– 2017 – rapporteur Alain Roche – « Gestion des eaux pluviales, 10 ans pour relever le défi »

CEPRI- 2015 – « Gérer les inondations par ruissellement pluvial »

Le service d'avertissement sur les pluies intenses et les crues soudaines en France (Piotte *et al.*)

Le service d'avertissement sur les pluies intenses et les crues soudaines en France

Olivier PIOTTE[1], Thibaut MONTMERLE[2], Catherine FOUCHIER[3], Anne BELLEUDY[1], Léa GARANDEAU[1], Bruno JANET[1], Céline JAUFFRET[2], Julie DEMARGNE[4], Didier ORGANDE[4]

[1] Vigicrues – Ministère de la transition écologique et solidaire, Schapi – 42, av. G. Coriolis, 31057 Toulouse – mail : olivier.piotte@developpement-durable.gouv.fr, anne.belleudy@developpement-durable.gouv.fr, lea.garandeau@developpement-durable.gouv.fr, bruno.janet@developpement-durable.gouv.fr

[2] Météo-France/DirOP/PI – 42, av. G. Coriolis, 31057 Toulouse – mail : thibaut.montmerle@meteo.fr, celine.jauffret@meteo.fr

[3] INRAE – UR RECOVER Centre de recherche Provence-Alpes-Côte d'Azur – Équipe Risques hydrométéorologiques, 3275 route Cézanne – CS 40061 – 13182 Aix-en-Provence, France – mail : catherine.fouchier@inrae.fr

[4] HYDRIS Hydrologie – Parc scientifique Agropolis II, 2196 Boulevard de la Lironde, Montferrier sur Lez, France – mail : julie.demargne@hydris-hydrologie.fr, didier.organde@hydris-hydrologie.fr

APIC, service d'Avertissement Pluies Intenses à l'échelle des Communes, a été mis en place en 2011 par Météo-France et délivre des avertissements lorsque les précipitations en cours revêtent un caractère exceptionnel sur une commune ou les communes environnantes, par rapport aux données climatologiques de référence. Vigicrues Flash, service d'avertissement sur les crues soudaines, a été ouvert par le ministère en charge de l'environnement en 2017 et délivre des avertissements en cas de prévision hydrologique revêtant un caractère exceptionnel sur un ou plusieurs bassins versants élémentaires, par rapport aux données hydrologiques de référence (quantiles de crues estimés à partir des chroniques de débit simulé avec le même modèle hydrologique). Ces deux services, proposés aux gestionnaires de crise, bénéficient de la même plateforme de prise d'abonnement, d'envoi et de visualisation des avertissements.
D'importantes évolutions sont prévues d'ici à fin 2020 :
- l'évolution technique et ergonomique de la plateforme internet commune aux deux services ;
- l'ouverture des services aux intercommunalités, aux organismes d'utilité publique impliqués dans la gestion de crise ;
- l'ouverture en visualisation pour le grand public ;
- le changement du produit de lame d'eau alimentant le service APIC, permettant la couverture d'une plus grande partie du territoire ;
- l'évolution du modèle hydrologique distribué de Vigicrues Flash et le changement de la lame d'eau l'alimentant, permettant d'étendre la couverture et la robustesse du service.

Mots-clefs : Avertissements, pluies intenses, crues soudaines

The early warning service for heavy rainfalls and flash floods

Two national early warning services have been operationally implemented in France as a result of research undertaken in recent years. APIC, a warning service for heavy rainfall set up in 2011 by Météo-France, issues warnings when the current rainfall exceeds climatological thresholds at the scale of a municipal territory. Vigicrues Flash, a flash flood warning service set up by the Ministry in charge of Environment in 2017, issues warnings when flood forecasts exceed reference flood quantiles (which were estimated from streamflow simulated time series using the same hydrological model) at the scale of small catchments.
These two services enable crisis managers to better mitigate flood risk impacts. They are based on the same web platform for subscription, warning dissemination and hazard map display of the extreme events over the last 72 hours.
Several major enhancements are being implemented in 2020:
- the technical and ergonomic improvement of the web platform;
- the dissemination and communication of the warning services to intermunicipal authorities and public utility organisations involved in crisis management;
- the dissemination and communication of the hazard map display service to the general public;
- the improvement of the radar-gauge quantitative precipitation estimate used as input in the APIC service, to cover the whole french metropolitan territory;
- the improvement of the hydrological distributed model in Vigicrues Flash ingesting the radar-gauge quantitative precipitation estimate, for better performance, robustness and an extended coverage of the flash flood warning service.

Key words : Early warning, heavy rainfall, flash floods

I INTRODUCTION

Les crues dans le département du Var en 2010 ont mis en évidence le manque de services permettant d'avertir en cas de phénomène pluviométrique intense, pouvant conduire à des inondations par ruissellement ou crue rapide de petits cours d'eau, en dehors des vigilances pluies inondation et crues. Depuis, grâce à des travaux de recherche et à leur transposition opérationnelle, deux services d'avertissement ont été mis en place à destination des gestionnaires de crise :

- APIC, service d'avertissement pluies intenses à l'échelle des communes, a été mis en place en 2011 par Météo-France et délivre des avertissements lorsque les précipitations en cours revêtent un caractère exceptionnel sur la commune ou les communes environnantes ;
- Vigicrues Flash, service d'avertissement sur les crues soudaines, a été ouvert par le ministère en charge de l'environnement en 2017 et délivre des avertissements à l'échelle communale en cas de risque de crues dans les prochaines heures sur certains cours d'eau non couverts par la vigilance crues.

D'importantes évolutions sont prévues pour l'automne 2020 sur ces deux services et leur plateforme commune. Après un rappel sur le fonctionnement actuel de ces services, les évolutions sont abordées de manière détaillée dans la suite de l'article.

II RAPPELS SUR LE FONCTIONNEMENT DES DEUX DISPOSITIFS

II.1 Éléments communs

Les deux services APIC et Vigicrues Flash s'adressent, depuis leur création, aux collectivités et aux préfectures. Ces acteurs peuvent s'y abonner afin de recevoir des avertissements sur le risque de pluie intense et de crue rapide sur leur territoire et de consulter en ligne la cartographie des avertissements. Cela peut les aider à surveiller les phénomènes hydrométéorologiques en cours et à mettre en œuvre les mesures de protection des populations et des biens qui seraient nécessaires.

Les deux services bénéficient de la même plateforme de prise d'abonnement, d'envoi des avertissements et de visualisation. Ils sont disponibles gratuitement sur demande pour les communes ou les départements éligibles qui le souhaitent.

A mi-2020, près de 10 000 communes sont abonnées au service APIC, soit près du tiers des communes en France métropolitaine et Outre-Mer. Un peu plus de 1400 communes sont quant à elles abonnées au service Vigicrues Flash (figure 1).

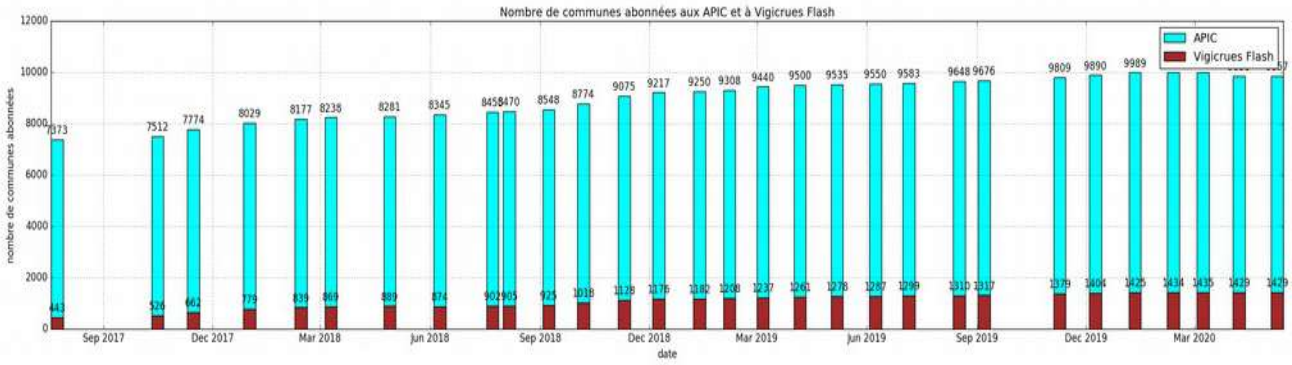


Figure 1: évolution du nombre de communes abonnées au service APIC (cyan) et Vigicrues Flash (brun) depuis 2017.

II.2 APIC

Le produit APIC est proposé depuis 2011 en Métropole et depuis 2015 à la Réunion. Il est actuellement expérimenté aux Antilles et en Nouvelle-Calédonie. Il permet aux acteurs institutionnels d'être avertis à une fréquence horaire lorsque des cumuls de pluies inhabituels sont observés sur leur territoire.

La version opérationnelle se base sur l'estimation des cumuls des précipitations réalisée toutes les 5 min à partir des observations effectuées par le réseau national de radars météorologiques Aramis [Tabary, 2007]. Les lames d'eau Panthère issues de cette estimation sont opérées en temps réel avec une précision kilométrique. Des cumuls 1 h et 24 h en sont déduits, puis comparés aux quantiles de durées de retour 10 et 50 ans issus de la base SHYREG [Arnaud *et al.*, 2008]. Lorsque ces cumuls dépassent les seuils climatologiques sur plusieurs pixels inclus dans une commune donnée, des APIC sont émis et la commune en question est alertée par mail, appel téléphonique ou SMS, selon les caractéristiques de son abonnement. En plus de l'information sur les cumuls de pluie, le produit Panthère fournit un indice de qualité de la lame d'eau restituée. Cet indice est principalement déduit de la mesure radar qui, en plus d'une simple panne, peut-être entachée de nombreux artefacts non météorologiques : obstacles, insectes, propagation anormale, etc. Le calcul de la pluie au sol est également délicat dans les zones trop éloignées de radar, donc dans les zones où le radar ne peut échantillonner au mieux que le sommet des systèmes précipitants du fait de la géométrie de la mesure. À cause du masquage orographique, la mesure est également incomplète, voire impossible, dans certaines régions très montagneuses. Dans la majorité de ces cas, il s'ensuit une sous-estimation des précipitations pouvant conduire au non-déclenchement d'avertissement. De manière à minimiser ces cas de non-détection, certaines communes restent à ce jour inéligibles au service (voir figure 2). Elles représentent environ 8 % du nombre total de communes métropolitaines. De plus, lorsque la qualité est jugée trop mauvaise pour assurer un service nominal, des messages de dégradation temporaire sont diffusés vers les usagers lorsque des précipitations sont prévues sur la commune dans les 12 h à venir.

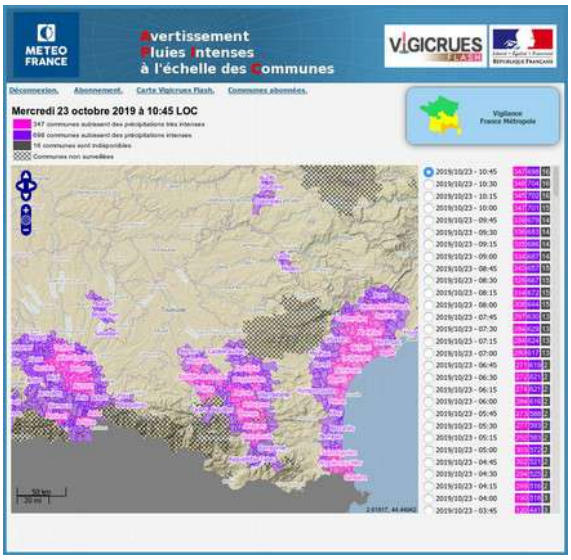


Figure 2 : visualisation des APIC pour le cas du 23/10/2019. Les communes où des précipitations supérieures ou très supérieures à la climatologie locale sont respectivement indiquées en violet et en rose. Les communes exclues de la couverture de service sont hachurées.

II.3 Vigicrues Flash

Via Vigicrues, l'État français surveille environ 20 000 km de cours d'eau afin d'estimer un niveau de vigilance crues dans les 24 h à venir. Les cours d'eau à réaction très rapide ne permettent pas une anticipation du risque suffisante pour intégrer ce réseau surveillé. Un service complémentaire a donc été mis en place depuis mars 2017 par le réseau Vigicrues : Vigicrues Flash.

Ce service, automatique, repose sur une modélisation pluie-débit distribuée alimentée par la même lame d'eau que celle utilisée pour APIC, produite par Météo France (figure 3).

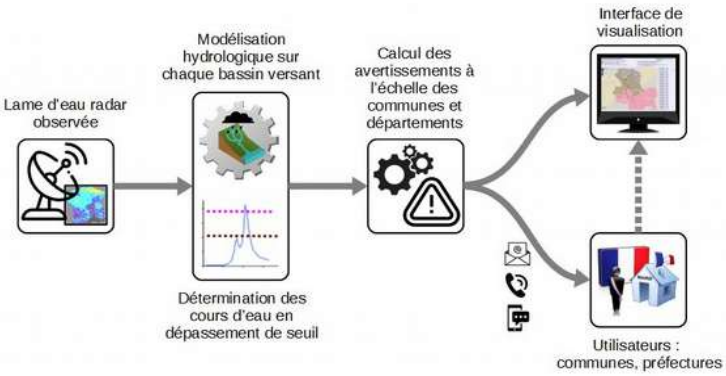


Figure 3 : principe de fonctionnement de Vigicrues Flash

La modélisation hydrologique mise en œuvre dans Vigicrues Flash s'appuie sur la méthode AIGA d'anticipation des crues rapides développée depuis plusieurs années par IRSTEA, devenu INRAE [Lavabre et Gregoris, 2005]. Cette méthode permet de qualifier l'aléa hydrologique en tout point du réseau hydrographique en comparant les débits simulés en temps réel par un modèle pluie-débit conceptuel distribué, le modèle GRD, avec des valeurs seuils. Ces valeurs seuils correspondent à des quantiles de crue, estimés à partir des chroniques de débit simulé avec le modèle GRD utilisant en entrée une longue chronique de pluie distribuée.

Deux quantiles de crue ont été choisis comme seuils permettant de rendre compte d'un risque de crue forte et d'un risque de crue très forte. Les calculs du modèle sont rafraîchis toutes les 15 minutes, et en cas de dépassement d'un des deux seuils, un message est envoyé à l'abonné par SMS, appel téléphonique ou courriel. Ces avertissements ont une durée de validité de 6 heures. Au-delà, si le risque persiste sur le territoire, un nouveau message est envoyé (figure 4).

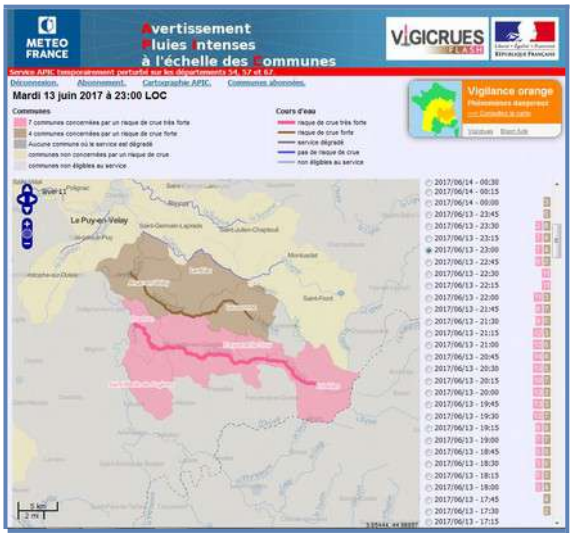


Figure 4 : visualisation de Vigicrues Flash pour le cas du 13 juin 2017. Les tronçons de cours d'eau et communes apparaissant en marron (respectivement en rose) sont concernés par un risque de crue forte (respectivement très forte).

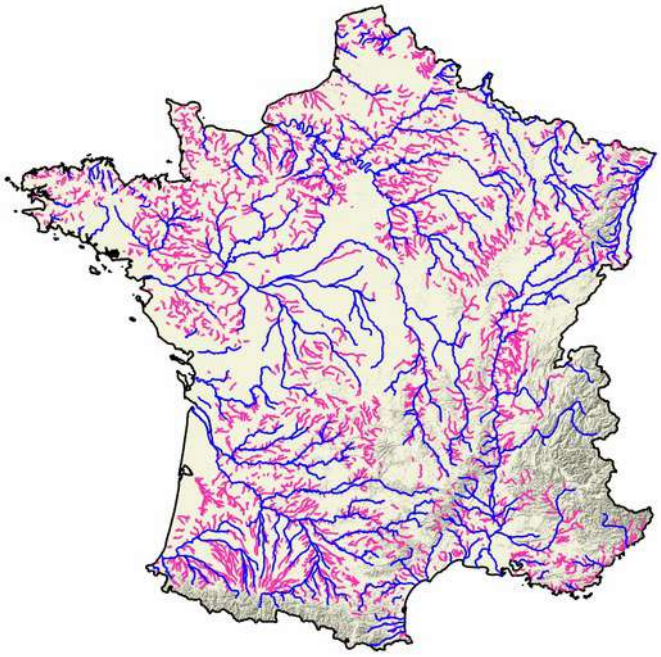


Figure 5 : cours d'eau éligibles à Vigicrues Flash (en rose), aux côtés du réseau surveillé par Vigicrues (en bleu), au 4 juin 2020.

Les cours d'eau intégrés dans le service Vigicrues Flash sont soumis à des critères d'éligibilité, permettant d'assurer les conditions d'une modélisation fiable. En effet, les bassins versants à comportement spécifique (géologie particulière, présence de barrage, forte influence nivale, etc.), trop petits (taille inférieure à 10 km² ou temps de concentration inférieur à 3 h) ou bénéficiant d'une qualité d'observation pluviométrique jugée insuffisante ne peuvent pas bénéficier du service. De plus, les cours d'eau déjà intégrés dans la Vigilance Crues et soumis à l'expertise humaine du réseau Vigicrues n'entrent pas dans le périmètre de Vigicrues Flash. Ainsi actuellement, environ 30 000 km de cours d'eau sont couverts par le service (figure 5), permettant à 10 000 communes de France continentale d'être éligibles.

Après plusieurs années de mise en service, les retours des utilisateurs et les études menées montrent d'une manière générale une plus-value de ce système permettant une anticipation du risque de crues rapides [Garandeau *et al.*, 2018], malgré certains biais constatés (notamment un risque de fausses alertes, assumé pour limiter le risque d'alertes manquées).

III LES ÉVOLUTIONS EN COURS ET À VENIR

III.1 Éléments communs

III.1.1 Nouvelle plateforme

La plateforme web permettant la gestion des abonnements et la visualisation des avertissements via une interface cartographique a été intégralement repensée. D'un point de vue technique, la nouvelle version s'appuie sur des technologies et des pratiques de développement conformes avec l'état de l'art actuel. Son évolutivité ultérieure sera également grandement facilitée.

Sur le plan du design et de l'ergonomie, les parcours utilisateurs et les interfaces ont été repensés et conçus en *responsive design* (figure 6), adaptés aux différents terminaux de navigation utilisés (ordinateur, tablette, ordiphone).

L'ouverture de la nouvelle plateforme, dite APIC-VF v2, est prévue en fin d'année 2020.

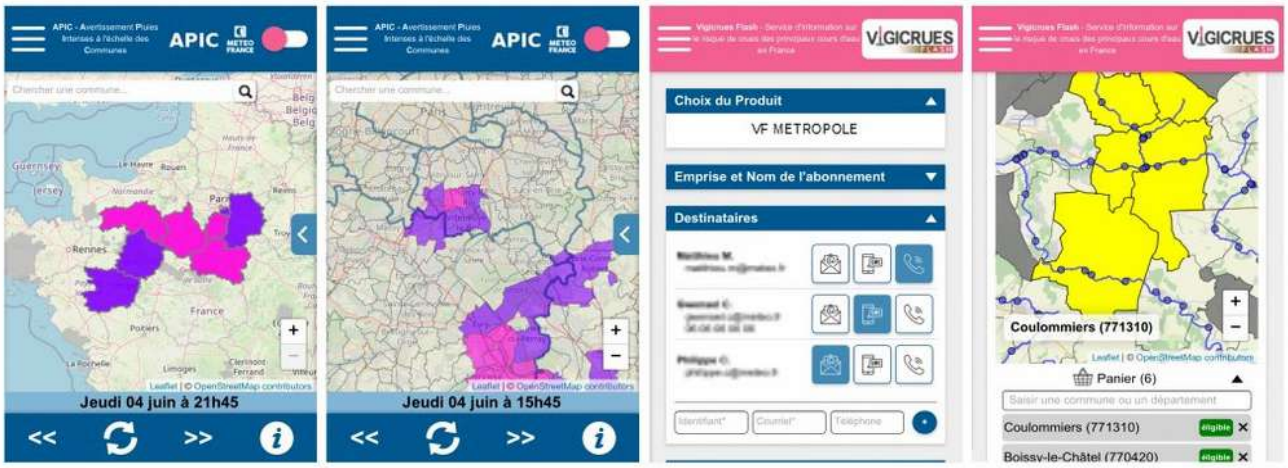


Figure 6 : captures d'écran sur ordiphone de la maquette de la future plateforme (juin 2020)

III.1.2 Ouverture des services aux intercommunalités et grands opérateurs

Les intercommunalités, qui montent en puissance sur la gestion du risque inondation, notamment dans le cadre de la GEMAPI, ainsi que les organismes d'utilité publique impliqués dans la gestion de crise (opérateurs de réseaux, etc.), sont en demande de services comme APIC et Vigicrues Flash, qui permettent d'apporter une plus-value spatialisée utile à la détection d'événements hydrométéorologiques et à la gestion de crise. La nouvelle plateforme permettra à ces organismes de s'abonner en définissant eux-mêmes la couverture de leur abonnement.

III.1.3 Ouverture des services en visualisation pour le grand public

APIC et Vigicrues Flash présentent un intérêt également pour le grand public, dans l'objectif de l'informer et pour lui permettre de jouer son rôle pour assurer sa sécurité vis-à-vis des risques hydrométéorologiques. Une visualisation des avertissements sera proposée pour le grand public depuis les sites institutionnels de Météo-France (https://vigilance.meteofrance.fr/fr) et de Vigicrues (https://www.vigicrues.gouv.fr/), à la fin de l'année 2020 (voir III.1.1).

III.2 APIC

Outre les évolutions communes décrites dans la section précédente, la principale amélioration concernant les APIC côté Météo-France concerne l'extension de la couverture de service à tout le territoire métropolitain d'ici à la fin de l'année 2020. Comme il est détaillé en II.2, certaines communes mal couvertes par les observations radar restent en effet à ce jour inéligibles au service. C'est par exemple le cas des communes situées dans l'Aude qui ont été durement frappées en octobre 2018 par de très fortes précipitations avec des conséquences dramatiques. Dans ce cas extrême, les lames d'eau Panthère, même sous-estimées, ont atteint plus de 2 fois les seuils de durée de retour cinquantennale. La prise en compte de ces communes dans la couverture de service APIC aurait alors permis l'envoi d'avertissements.

Une extension de la couverture de service APIC, avec une garantie de qualité au moins aussi bonne qu'actuellement, est désormais possible grâce à l'utilisation de la lame d'eau Antilope, également développée à Météo-France, qui se base sur une fusion des données radar avec des données de pluviomètres. Cette lame d'eau est produite en temps réel avec des disponibilités compatibles avec le service APIC, mais également en différé, de manière à bénéficier de plus de données pluviométriques ou de données expertisées. Pour le produit Antilope 15' temps réel, entre 850 et 1350 (pour les heures rondes) données de pluviomètres sont prises en compte en plus des radars. Ce produit bénéficie de plus d'un code qualité par pixel, déduit d'une combinaison du code qualité de la mesure radar et de la variance normalisée du krigeage, variance qui permet d'approcher la densité de pluviomètres utilisés (figure 7).

Des études ont été menées pourquantifier la qualité du produit de fusion Antilope 15' vs Panthère. Elles concluent à une meilleure qualité générale des cumuls restitués en termes de biais et d'écart-types, à une dépendance moindre à l'altitude, à une atténuation des forts biais ponctuels, à l'absence de sous-estimation sur le relief. De plus, il est conclu qu'il n'y a pas de contre-indication à ouvrir le service sur tout le territoire.

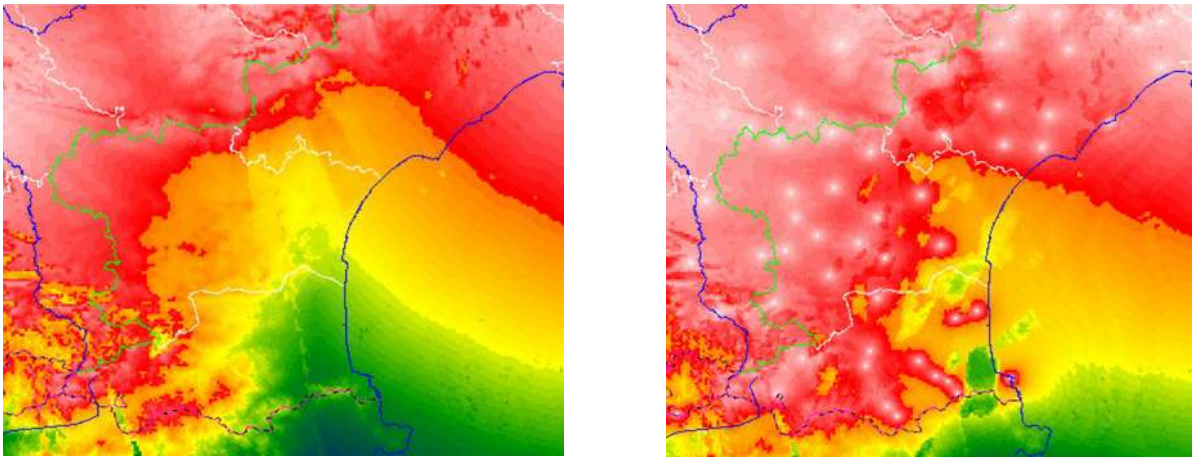


Figure 7: code qualité de la lame d'eau (cas du 21/09/2019 sans le radar d'Opoul), issus à gauche des radars seuls (Panthère), à droite d'une fusion radar-pluviomètres (Antilope 15')

Suite à ces résultats, il a été décidé de tester l'alimentation des APIC par les lames d'eau Antilope 15'. De manière analogue à ce qui est fait avec les données Panthère, des cumuls horaires doivent être calculés puis comparés aux durées de retour SHYREG. À noter que l'indice de qualité fourni en plus des lames d'eau permettra, de manière analogue au fonctionnement antérieur, de prévenir les usagers en cas de dégradation de service.

III.3 Vigicrues Flash

III.3.1 Amélioration du modèle hydrologique

La modélisation hydrologique initiale de Vigicrues Flash associe un modèle horaire événementiel, actualisé toutes les 15 minutes, et 2 modèles continus journaliers qui permettent d'initialiser les niveaux de remplissage des réservoirs du modèle horaire [Javelle *et al.* 2016, Garandeau *et al.* 2018]. Le modèle horaire est alimenté en temps réel par les lames d'eau Panthère, et les modèles journaliers sont alimentés par les lames d'eau Antilope temps réel. Afin de fournir des estimations de débits toutes les 15 minutes, Vigicrues Flash met en œuvre 4 chaînes de modèles en parallèle, opérées à l'heure H pour la première, H+15 min, H+30min et H+45 min pour trois autres. Des travaux récents ont permis de simplifier cette version initiale (dénommée GRD_v0) et de l'adapter au pas de temps infra-horaire : un unique modèle continu est désormais mis en œuvre, alimenté par des lames d'eau au pas de temps de 15 minutes. Cette nouvelle version, dénommée GRD_v1, s'appuie sur 2 paramètres distribués déterminés au pixel, la capacité Cp du réservoir de production et la capacité Ct du réservoir de transfert, ainsi qu'une célérité C du routage, qui peut être distribuée ou uniforme au sein du bassin. Sur chaque pixel i sont estimés l'évapotranspiration nette ENi et la pluie nette PNi, dont une fraction (PRi), proportionnelle au carré du niveau Si du réservoir de production, est dirigée vers le réservoir de transfert, qui assure le transfert non linéaire en fonction de son niveau de remplissage Ri et de sa capacité. Pour obtenir le débit Qbv à l'exutoire en tenant compte du temps de routage de l'écoulement, les débits Qi obtenus en chaque pixel du bassin versant sont sommés en incluant un décalage temporel, défini comme le rapport entre la distance hydraulique pixel-exutoire et la célérité des écoulements.

Suite à des premiers calages effectués au pas de temps horaire [Organde, 2016 ; Demargne et Javelle, 2017], cette version a été calée au pas de temps de 15 minutes en fixant les valeurs des paramètres de transfert et de routage. La capacité du réservoir de transfert a été fixée à la valeur uniforme de 140 mm. La célérité C est considérée comme infinie, ce qui revient à considérer un temps de transfert des débits à l'exutoire nul : les débits de chacun des pixels du bassin sont simplement additionnés pour obtenir le débit à l'exutoire. Ce choix permet de privilégier une montée rapide du débit à l'exutoire du bassin et, en l'absence d'alimentation du modèle par des prévisions de pluie, une meilleure anticipation des crues. La figure 8 montre la structure du modèle GRD_v1 dans cette version dite lag0. Une étude de sensibilité au paramètre de production Cp a été menée avec 10 grilles uniformes de paramètres Cp variant de 30 à 1600 mm sur un échantillon de 1192 bassins versants entre 5 et 1981 km², répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain (figure 9). L'optimisation de ce paramètre par hydro-écorégion à l'aide de scores de contingence calculés sur les dépassements de seuils de débits a conduit à la grille de Cp représentée sur la figure 9.

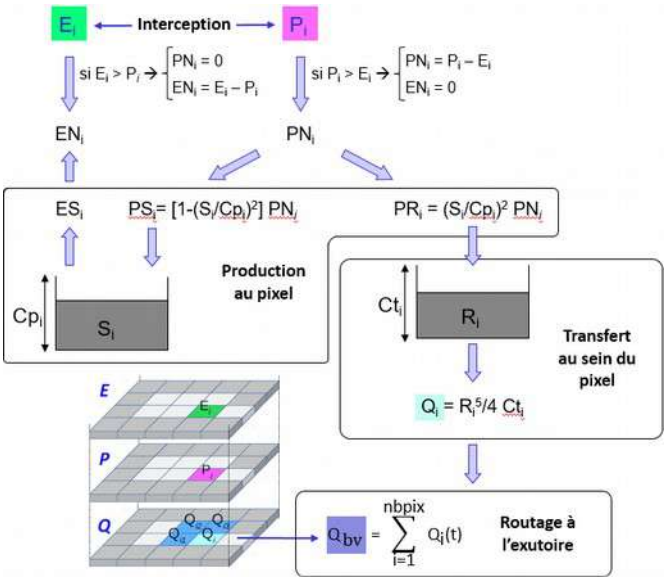


Figure 8 : schéma de fonctionnement du modèle continu distribué GRD_v1_lag0 au pas de temps 15 minutes.

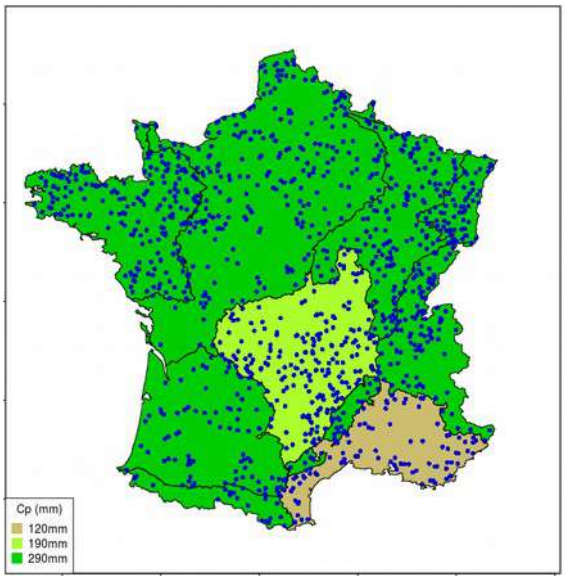


Figure 9 : localisation des 1192 exutoires des bassins de calage, et valeurs du paramètre Cp régionalisé.

La qualité des avertissements de crue issus des débits simulés par les deux modèles GRD_v0 et GRD_v1 a été comparée sur une période de deux ans et demi (août 2015 à janvier 2018) pour laquelle les mêmes données de pluie ont été utilisées en entrée (pluie Antilope J+1 au pas de temps horaire pour GRD_v0, cette même lame d'eau étant désagrégée au pas de temps 15 minutes pour GRD_v1 à l'aide de la répartition temporelle des pluies Panthère 15 minutes). Les comparaisons ont été menées à l'aide des statistiques de contingence (CSI, POD, SR) et du délai d'anticipation de ces dépassements de seuils. Les scores de contingence pour les quantiles de crues de période de retour 2, 5, 10 et 20 ans montrent que le modèle GRD_v1 obtient de meilleures performances (i.e. statistiques de contingence plus proches de leur valeur optimale de 1) que le modèle GRD_v0 : l'amélioration du CSI est le résultat d'une meilleure détection des dépassements (gain sur le POD) et d'une limitation significative du nombre de fausses alertes, se traduisant par une meilleure fiabilité des avertissements avec un gain sur le SR (tableau 1). La comparaison sur une plus longue période (août 2008 – juillet 2018 avec des données Antilope 60' temps réel en entrée de GRD_v0 et Antilope J+1 60' désagrégée en entrée de GRD_v1) montre également de meilleures performances pour le modèle GRD_v1.

	nombre de dépassements modélisés/observés		POD = C/C+M		SR=C/C+FA		CSI=C/(C+M+FA)	
seuil	GRD_v0	GRD_v1	GRD_v0	GRD_v1	GRD_v0	GRD_v1	GRD_v0	GRD_v1
T=2 ans	2500/2554	2244/2571	0,38	0,42	0,39	0,48	0,24	0,29
T=5 ans	1206/846	880/845	0,36	0,41	0,25	0,40	0,17	0,25
T=10 ans	840/428	504/425	0,30	0,38	0,15	0,32	0,11	0,21
T=20 ans	623/249	311/251	0,24	0,34	0,10	0,27	0,07	0,18

Tableau 1 : nombres de dépassements modélisés et observés et scores de contingence calculés pour les modèles GRD_v0 et GRD_v1, en comptabilisant les dépassements corrects (C), les dépassements manqués ou en retard (M) et les fausses alertes (FA).

Concernant l'anticipation des dépassements de seuils, le modèle GRD_v1 se montre plus performant sur le seuil 20 ans que le modèle GRD_v0, avec une anticipation médiane de 5,6 heures contre 4,8 heures (tableau 2). Si les anticipations médianes sur les autres seuils sont du même ordre de grandeur pour les deux modèles, il faut noter que GRD_v1 modélise correctement un plus grand nombre de dépassements de seuil que GRD_v0 comme l'indiquent les meilleures valeurs de POD dans le tableau 1.

	nombre de dépassements corrects		anticipation médiane (en heures) du dépassement	
seuil	GRD_v0	GRD_v1	GRD_v0	GRD_v1
T=2 ans	1110	1284	4,0	4,0
T=5 ans	337	393	3,7	3,8
T=10 ans	141	177	4,3	4,2
T=20 ans	65	91	4,8	5,6

Tableau 2 : anticipations médianes pour les dépassements corrects de seuils et nombres de dépassements corrects correspondants.

Ces résultats permettent de proposer la mise en œuvre au pas de temps 15 minutes du modèle distribué continu GRD_v1 dans Vigicrues Flash. Ce modèle sera mis en œuvre au moment de l'ouverture de la plateforme APIC-VF v2 (voir III.1.1).

III.3.2 Calage du modèle en Corse

Afin d'envisager l'ouverture du dispositif Vigicrues Flash en Corse, où il n'est actuellement pas disponible, le calage du modèle GRD_v1, dans sa version lag0 présentée au III.3.1, y a été conduit *[Organde et al.*, 2020]. Ce calage spécifique est notamment lié à la nature des lames d'eau distribuées disponible sur l'île qui diffère de celle disponible sur le continent. Les données de pluie utilisées pour ce calage sont des lames d'eau horaires (Comephore sur la période 1997-2015 puis Antilope J+1 sur la période 2016-2019) qui ont été désagrégées de manière uniforme au pas de temps de 15 minutes. Les données de débits utilisées sont celle de 17 stations hydrométriques disponibles dans la banque HYDRO et dont le choix a été validé par la DREAL Corse. Le calage a été conduit en optimisant localement les paramètres de production et de transfert Cp et Ct à l'aide d'un test de sensibilité : des simulations ont été effectuées en fixant ces paramètres de manière uniforme sur la Corse, avec 7 valeurs testées pour chacun des paramètres : Cp variant de 20 à 300 mm et Ct variant de 20 à 200 mm. Pour chaque bassin, sont retenues les valeurs de paramètres Cp et Ct qui permettent d'optimiser le critère de contingence CSI calculé en comptabilisant les dépassements des débits seuils de période de retour 2, 5, 10 et 20 ans. La recherche de relation entre ces paramètres locaux et différents descripteurs spatiaux (topographiques, hydrogéologiques, morphologiques, climatiques) a permis de régionaliser ces paramètres. Le paramètre de production Cp est ainsi relativement bien expliqué (R^2=0.55) par une relation linéaire multiple avec 3 variables issues respectivement de Corine Land Cover (présence ou absence d'une couverture herbacée ou d'une végétation basse), de l'European Soil Database (capacité d'infiltration du sol) et de la méthode SHYREG (indice moyen d'humidité pour la saison estivale). La moins bonne explication du paramètre de transfert Ct par les descripteurs spatiaux a conduit à retenir sa valeur médiane de 105 mm. Les critères de contingence obtenus avec ces paramètres optimisés localement puis régionalisés sont meilleurs que ceux obtenus avec un jeu de paramètres unique optimisé de manière uniforme sur l'ensemble des bassins versants (figure 10).

D'une manière générale, les performances du modèle GRD_v1 calé en Corse sont équivalentes à celles obtenues sur le continent. Moyennant une sélection des bassins versants éligibles, l'ouverture de Vigicrues Flash sur le territoire corse se fera en même temps que l'implémentation du modèle GRD_v1, lors de l'ouverture de la plateforme APIC-VF v2 (voir III.1.1).

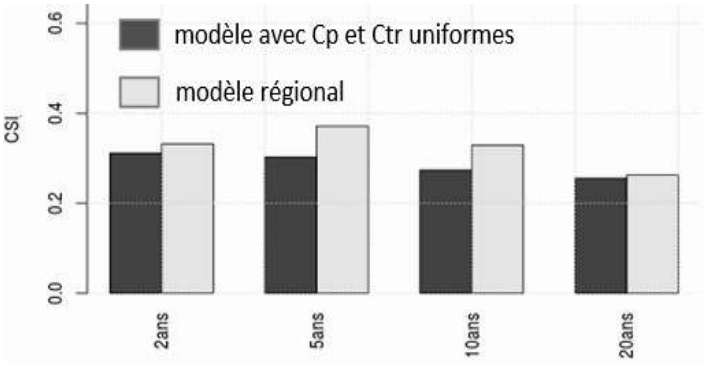


Figure 10 : critère de contingence CSI obtenu par optimisation d'un unique jeu uniforme sur l'ensemble des bassins et avec le modèle régional (Ct=105 mm et Cp obtenu par régression avec 3 descripteurs)

III.3.3 Alimentation avec les lames d'eau Antilope 1/4h

Comme évoqué au III.2 pour APIC, il a été décidé de faire évoluer l'alimentation en lames d'eau observées de la modélisation hydrologique de Vigicrues Flash, en utilisant également des données Antilope au pas de temps 15 min. Une étude menée par INRAE sur 7 événements entre janvier 2017 et janvier 2018 a montré l'intérêt de l'alimentation du service Vigicrues Flash par des pluies Antilope 15' [Demargne et Fouchier, 2019], avec une amélioration de la détection des dépassements et, dans une moindre mesure, une limitation de la proportion des fausses alertes.

Outre l'intérêt strict pour la qualité de la modélisation hydrologique, ce choix présente l'avantage du maintien de la cohérence entre les deux services APIC et Vigicrues Flash, fonctionnant avec les mêmes données d'entrée. Il permet également une extension de la couverture de service en bénéficiant d'une meilleure qualité globale de lame d'eau sur les zones où la couverture radar n'est pas optimale – cette extension est cependant moins notable que pour APIC, car l'éligibilité des bassins prend en compte d'autres critères liés à la morphologie des bassins versants et à la performance attendue du modèle hydrologique (voir II.3). Comme pour APIC (voir III.2), cela rend par exemple possible l'ouverture du service Vigicrues Flash

sur les affluents de l'Aude dans le secteur de Carcassonne, concernés par les crues d'octobre 2018, jusqu'à présent inéligibles du fait de la qualité de la couverture radar.

L'alimentation de Vigicrues Flash avec Antilope 15' sera opérationnelle lors de l'ouverture de la plateforme APIC-VF v2 (voir III.1.1).

IV PISTES D'AMÉLIORATIONS ULTÉRIEURES

IV.1.1 APIC

Du côté du service APIC, l'utilisation de la lame d'eau Antilope dans le calcul des avertissements se généralisera pour l'Outre-Mer, dès que ce produit y sera disponible.

À plus long terme, les avertissements seront accompagnés d'information sur la tendance de l'épisode précipitant en cours, toujours à l'échelle de la commune. Cette information se limitera aux échéances de prévision immédiate (typiquement 3h), et sera déduit d'une fusion entre l'extrapolation de produits issus d'observations et l'équivalent simulé par le modèle de prévision numérique Arome-PI [Auger *et al.*, 2016]. Des recherches sur la probabilité d'occurrence de phénomènes précipitants, basées sur des ensembles de prévision de différentes versions d'Arome (PI, opérationnel sur la France, prévision d'ensemble) sont également en cours au Centre National de Recherche Météorologique (CNRM), notamment dans le cadre du projet ANR PICS[1]. Ces travaux permettront par exemple à terme de fournir une information probabiliste à cette tendance.

IV.1.2 Vigicrues Flash

Concernant Vigicrues Flash, l'utilisation de prévisions de pluie en entrée du modèle GRD constitue également une voie majeure d'amélioration des performances du dispositif. Des tests menés au pas de temps horaire sur 13 événements ont ainsi montré des améliorations significatives sur la détection et l'anticipation des dépassements de seuils, en intégrant des prévisions immédiates de pluie Arome-PI (sur 6 heures d'échéance) par rapport au modèle utilisant uniquement les lames d'eau observées Antilope J+1 [Demargne *et al.*, 2019]. Les travaux préparatoires à l'intégration des prévisions de pluie dans GRD se poursuivent dans le cadre du projet ANR PICS[1].

Par ailleurs, plusieurs pistes sont actuellement explorées ou envisagées afin d'améliorer les capacités prédictives et la robustesse en régionalisation de la méthode AIGA utilisée dans Vigicrues Flash, d'étendre le domaine d'application du modèle hydrologique aux bassins actuellement non éligibles (notamment en raison de la présence de karst ou de neige) et de mieux prendre en compte le ruissellement. Des modules ont ainsi été développés pour simuler le ruissellement hortonien, des dynamiques d'écoulements subsurfaciques, ou encore la constitution et la fonte du manteau neigeux. D'importants travaux ont été réalisés sur la simulation du routage pixel à pixel des débits [Organde, 2018], au lieu d'un routage direct de chaque pixel vers l'exutoire, et sur le développement d'un algorithme d'assimilation de données variationnelle permettant notamment l'estimation de paramètres distribués [Jay-Allemand *et al.*, 2018, 2019].

En aval du modèle, le couplage de ses sorties avec une évaluation préalable de la vulnérabilité des territoires permet de proposer une chaîne intégrée d'évaluation du risque de crues par la méthode AIGA-Risques, allant de la prise en compte de la pluie jusqu'à l'anticipation des impacts des inondations [Saint-Martin, 2018]. Les voies d'amélioration possibles du modèle d'impacts, au sein du projet ANR PICS[1], consistent en la consolidation des scores de vulnérabilité des différentes catégories d'enjeux et sa généralisation à différents contextes hydro-météorologiques et territoriaux.

V CONCLUSION

Les services APIC et Vigicrues Flash, en fonctionnement opérationnel depuis plusieurs années, ont démontré leur robustesse et leur plus-value pour la gestion de crise, malgré certaines limitations inhérentes à ce genre d'approche. Les améliorations prévues en 2020 vont permettre d'élargir les bénéficiaires de ces services (intercommunalités, grands opérateurs, grand public) et d'améliorer la qualité des services rendus, aussi bien sur la pertinence des avertissements émis que sur l'ergonomie des accès à ces services.

Toutefois, un certain nombre de défis techniques restent à relever pour repousser les limites actuelles d'APIC et Vigicrues Flash. Ceux-ci concernent principalement l'amélioration de l'anticipation des avertissements (via l'intégration de produits issus de prévision de pluie notamment), l'extension de la

[1] https://pics.ifsttar.fr/

couverture des services (sur davantage de territoires ultramarins pour APIC ou sur une plus grande variété de bassins versants pour Vigicrues Flash) et la prise en compte de la vulnérabilité des territoires dans la méthode de détermination des avertissements (actuellement uniquement basée sur l'aléa).

VI RÉFÉRENCES

Arnaud P., Lavabre J., Sol B. et Desouches Ch. (2008) – Regionalization of an hourly rainfall generating model over metropolitan France for flood hazard estimation. *Hydrological Sciences Journal*, 53 (1) 34-47.

Auger L., Dupont O., Hagelin S., Brousseau P. and Brovelli P., (2016) – AROME–NWC: a new nowcasting tool based on an operational mesoscale forecasting system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, https://doi.org/10.1002/qj.2463.

Demargne J. et Fouchier C. (2019). — Analyse de la qualité des avertissements du service Vigicrues Flash avec les pluies Antilope V3 temps réel 15 minutes. Rapport d'étude, HYDRIS-hydrologie, INRAE, 37 p.

Demargne J., Javelle P., Organde D., Garandeau L., Janet B. (2019). — Intégration des prévisions immédiates de pluie à haute-résolution pour une meilleure anticipation des crues soudaines. *La Houille Blanche 2019*, 3-4, 13-21.

Demargne J. et Javelle P. (2017). — Amélioration de la modélisation hydrologique pour le service d'avertissement Vigicrues Flash. Programme MEDDE (DGPR / SRNH) - IRSTEA 2017, *Rapport d'étude HYDRIS Hydrologie*, 56 p.

Garandeau L., Belleudy A., Demargne J., Fouchier C., Janet B., Javelle P., Organde D. (2018) — Vigicrues Flash, un service automatique d'avertissement pour les crues rapide, *Actes du colloque « De la prévision des crues à la gestion de crise », Société Hydrotechnique de France, Avignon, 14-16 novembre 2018*.

Javelle, P., Organde, D., Demargne, J., Saint-Martin, C., De Saint-Aubin, C., Garandeau, L., Janet, B. (2016). — Setting up a French national flash flood warning system for ungauged catchments based on the AIGA method, *E3S Web of Conferences*, 7, art. no. 18010. DOI: 10.1051/e3sconf/20160718010.

Jay-Allemand M., Javelle P., Gejadz, I., Arnaud P., Malaterre P.-O., Fine, J.-A. et Organde, D (2019). — On the potential of variational calibration for a fully distributed hydrological model: application on a Mediterranean catchment, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, https://doi.org/10.5194/hess-2019-331, in review, 2019.

Jay-Allemand M., Gejadze I., Javelle P., Organde D., Fine J.-A., Patrick A., et Malaterre P.-O. (2018). — Assimilation de données appliquée à un modèle pluie-débit distribué pour la prévision des crues, in: *De la prévision des crues à la gestion de crise, Société hydraulique de France, Avignon, 2018*.

Lavabre J. et Gregoris Y. (2005). — AIGA : un dispositif d'alerte des crues sur l'ensemble du réseau hydrographique. *Ingénieries EAT*, n° 44, 3-12.

Organde D., Fine J.-A., Demargne J., Fouchier C. (2020). — Etude de faisabilité du déploiement de Vigicrues Flash en Corse. *Convention DGPR/SCHAPI – IRSTEA 2019, Rapport d'étude HYDRIS Hydrologie*, 118 p.

Organde D. (2018). — Mise en œuvre d'un transfert pixel à pixel dans la modélisation hydrologique GR distribuée continue de la méthode AIGA. *Rapport d'étude, HYDRIS-hydrologie*, 2018

Organde D. (2016). — Améliorations de la modélisation hydrologique de la méthode AIGA *Convention DGPR/SCHAPI – IRSTEA 2016, Rapport d'étude HYDRIS Hydrologie,* 49 p.

Saint-Martin C. (2018). — Prise en compte des vulnérabilités territoriales dans l'avertissement des crues rapides : vers une amélioration de la méthode AIGA. *Thèse de doctorat, Université Montpellier 3, Laboratoire GRED, Irstea*, 236 p.

Tabary, P., (2007) – The new French operational radar rainfall pro-duct. Part I: Methodology. *Wea. Forecasting*, 22, 393–427.

Posters session 3

Le risque pluvial : comment mieux le connaitre pour mieux le gérer ? (Meslier *et al.*)

Le risque pluvial : comment mieux le connaitre pour mieux le gérer ?

Sylvain MESLIER[1] - Quentin STRAPPAZZON[2] - Philippe CUSENIER[3] -

[1] SEPIA Conseils – sm@sepia-conseils.fr
[2] SEPIA Conseils – qs@sepia-conseils.fr
[3] SEPIA Conseils – pc@sepia-conseils.fr

La plupart des territoires ont déjà connu des inondations pluviales et certains ont été durement touchés ces dernières années. Le risque pluvial est en outre de plus en plus menaçant, avec l'aggravation concomitante de l'aléa (imperméabilisation des sols) et de la vulnérabilité (développement des territoires sans prise en compte suffisante du risque). On peut craindre par ailleurs que le changement climatique s'accompagne d'une répétition de pluies jusqu'ici considérées comme exceptionnelles.
Si les solutions appropriées sont bien identifiées pour les pluies courantes (une ville plus perméable) et moyennes à fortes (une gestion mieux intégrée), elles le sont moins pour les pluies exceptionnelles, qui inspirent souvent confusion et sentiment d'impuissance. On considère qu'une ville plus perméable et une gestion mieux intégrée des eaux pluviales contribueront à limiter les conséquences de pluies exceptionnelles, mais on pressent que cela ne sera pas suffisant. Par ailleurs, les résultats des schémas directeurs « assainissement des eaux pluviales » sont souvent décevants, avec des propositions de travaux très peu concrétisées.
L'objectif de cette communication est d'apporter des éléments de réponse sur les moyens de mieux connaitre et cartographier le risque pluvial et sur la manière d'envisager une stratégie de gestion intégrée du risque pluvial.

Mots-clefs : risque pluvial, inondations par ruissellement, modélisation 2D, stratégie de gestion intégrée.

Characterization and management of urban flash floods

Most of the territories have already experienced storm flooding and some have been hit hard in recent years. The risk of rain is also increasingly threatening, with the concomitant aggravation of hazard (soil waterproofing) and vulnerability (development of territories without sufficient consideration of risk). There are also concerns that climate change is accompanied by a repeat of rains that have so far been considered as exceptional.
While the appropriate solutions are well identified for running rains (a more permeable city) and medium to heavy rains (better integrated management), they are less so for exceptional rains, which often inspire confusion and feelings of helplessness. It is considered that a more permeable city and more integrated stormwater management will help to limit the consequences of exceptional rains, but it is anticipated that this will not be enough. Moreover, the results of the master schemes carried out by the water and sanitation services are often disappointing, with proposals for work very little concrete.
The aim of this communication is to provide elements of response on how to better understand and map storm flooding and how to envisage an integrated strategy for managing storm risk.

Key words : storm water risk, runoff, 2D modeling, integrated strategy

AVANT TOUT, MIEUX CONNAITRE LE RISQUE DE RUISSELLEMENT PLUVIAL

Le risque pluvial[1] n'est généralement connu que de manière très partielle. Il est par nature relativement complexe à appréhender : il est dispersé, évolutif et ses causes peuvent être multiples. En outre, les efforts consacrés au diagnostic ne sont pas toujours centrés sur les outils les mieux adaptés. La modélisation 1D occupe souvent une place centrale, alors qu'elle ne donne finalement que des informations très partielles sur les causes et les conséquences des inondations (point du débordement du réseau mais quid des eaux non captées par ce dernier ou des eaux ayant débordé en amont).

A l'inverse, des sources d'informations précieuses sont souvent négligées ou sous-exploitées :

- Les inondations constatées par les populations et les autres acteurs ;
- Les enquêtes et observations approfondies de terrain, croisées avec l'analyse fine de la topographie :
- La modélisation 2D (voire couplée 1D-2D).

L'objectif de cette communication est d'apporter dans un premier temps des éléments de réponse sur les moyens de mieux connaitre et cartographier le risque pluvial, cette connaissance affinée étant un élément indispensable pour envisager une stratégie de gestion adaptée du risque, développée dans un second temps.

Collecter et hiérarchiser la mémoire locale des inondations historiques

Il s'agit de la source d'informations la plus fiable et la plus riche. Une base de données sous SIG permettant de répondre aux questions suivantes est probablement le meilleur outil :

- Où sont localisés les désordres ?
- Quelle est la fréquence des inondations ?
- Quelles sont les conséquences des désordres (types d'enjeux touchés, montant des dommages, délais de retour à la normale) ?
- Quelles sont les inondations jugées inacceptables par les acteurs du territoire, auxquelles il faut trouver des solutions en priorité ?

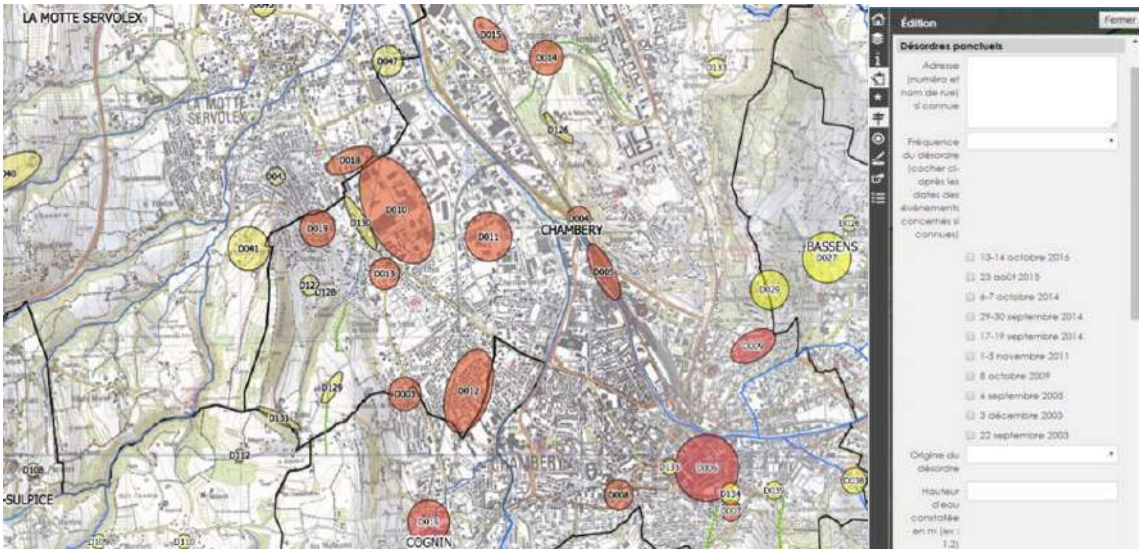


Figure 1 Exemple de base de données des inondations (recensement / qualification / hiérarchisation des phénomènes observés et secteurs touchés) élaborée par SEPIA Conseils pour Grand Chambéry

[1] Précisons que l'on s'intéresse ici aux inondations liées aux écoulements d'eaux pluviales quelle que soit l'origine de ces écoulements (rurale ou urbaine, ruissellement et débordement de réseaux enterrés ou superficiels) et leur forme (diffus ou concentrés dans un ouvrage, un talweg, un petit cours d'eau, sur une voirie…).

Cette base de données permet ainsi de qualifier le « niveau de service » des ouvrages existants puis de prioriser/justifier les études et interventions à mener. Cet outil présente en outre l'avantage de prendre de la valeur avec le temps.

Valoriser les données topographiques pour caractériser le fonctionnement hydraulique du territoire

La précision accrue des données topographiques aujourd'hui disponibles sur la plupart des territoires (Modèle Numérique de Terrain MNT LIDAR) permet une caractérisation à grande échelle du fonctionnement hydraulique du territoire, des facteurs naturels et de la plupart des facteurs anthropiques influençant directement la génération, propagation et accumulation des ruissellements :

- Axes de ruissellement et emprise morphologique associée ;
- Cuvettes d'accumulation / stagnation ;
- Sous-bassin versant contributeur ;
- Remblais d'infrastructures routières et ferroviaires exposés ;
- Ouvrages de traversée sous remblais.

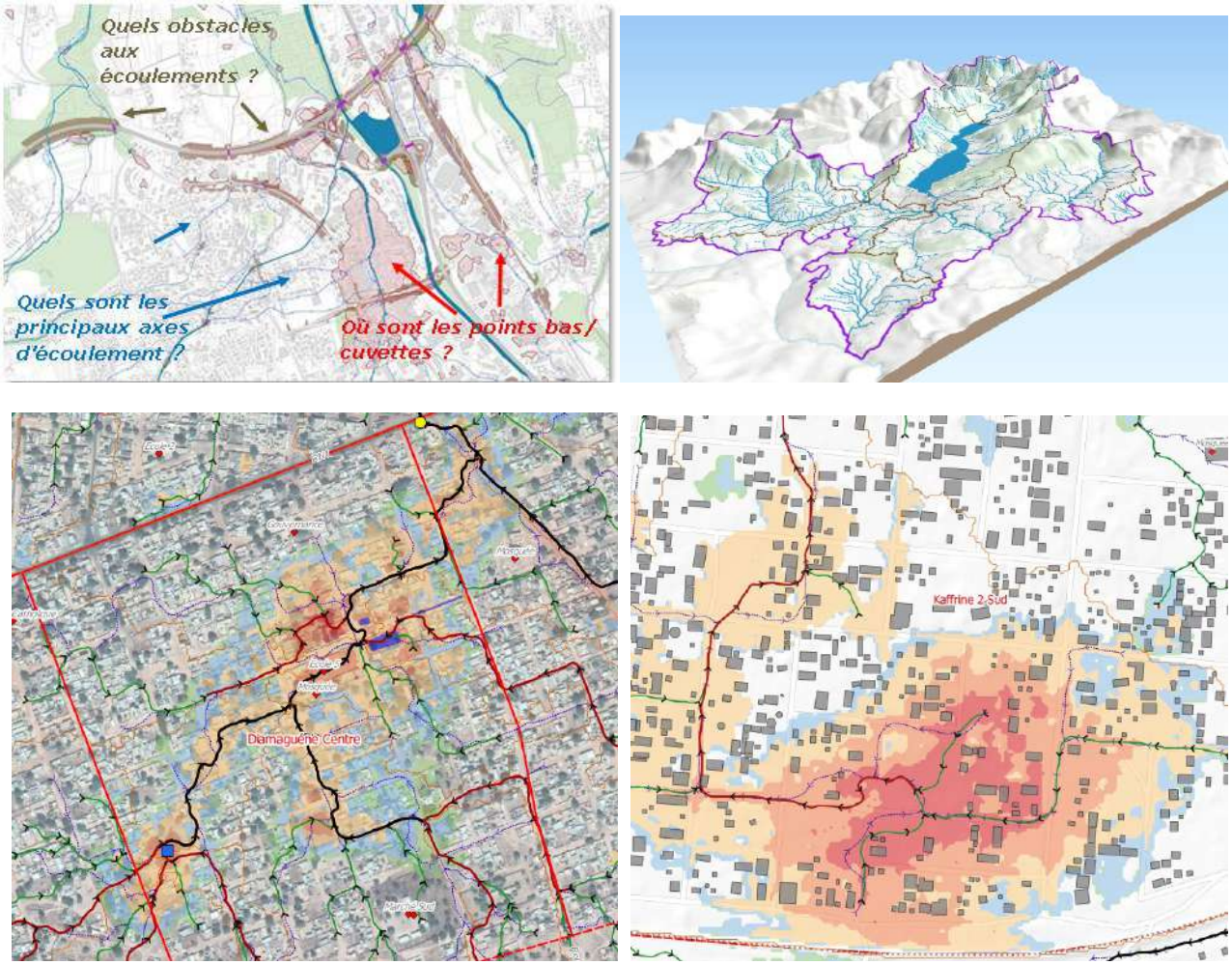


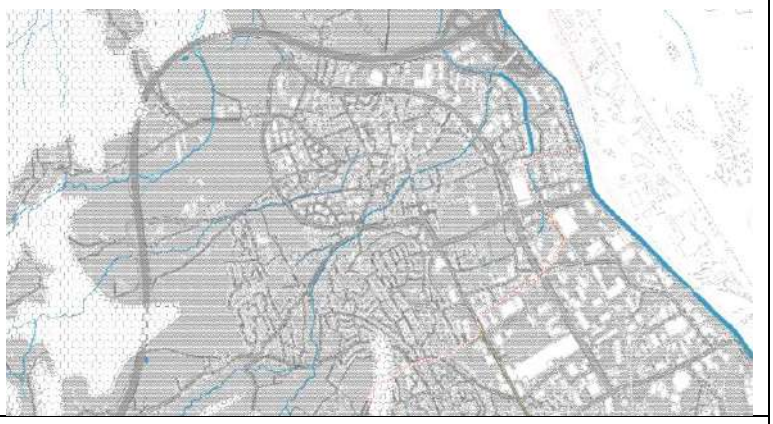
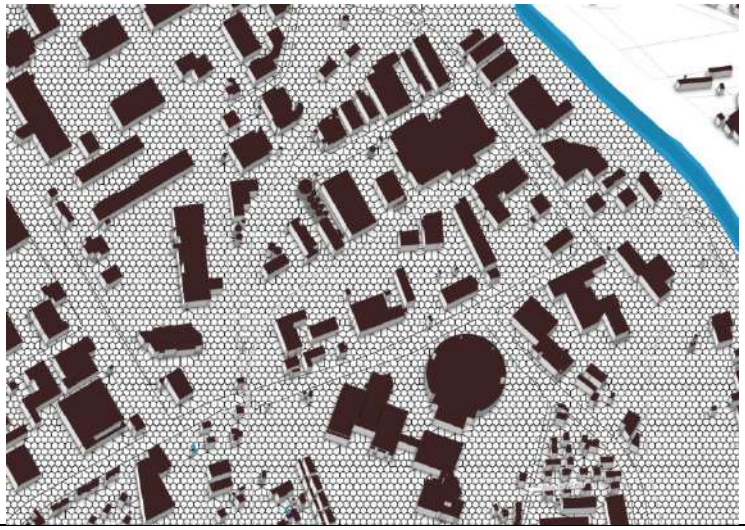
Figure 2 Partir d'un MNT pour caractériser les zones à risque potentielles de ruissellement (exemples de cartes mises au point par SEPIA Conseils sur différents territoires : autour de Chambéry (en haut à gauche), Annecy (en haut à droite) ou encore Kaffrine au Sénégal (en bas)

Remarque : Les enquêtes et observations approfondies de terrain, croisées avec l'analyse fine de la topographie restent incontournables pour bien comprendre l'organisation des écoulements. Sans elles, aucun diagnostic solide ne peut être établi.

Quantifier les inondations par ruissellement en tout point du territoire en déployant un modèle bi-dimensionnel (2D) généralisé

Avec les progrès récents sur les données d'entrée et les temps de calculs, la modélisation bi-dimensionnelle permet des simulations de plus en plus précises des écoulements de surface, y compris en milieu urbain. Elle permet de quantifier les caractéristiques prévisibles des écoulements (emprises, hauteurs de submersion, vitesses) et de réaliser de véritables cartographies du risque (croisement aléa et enjeux).

Les grandes étapes de mise en œuvre d'une modélisation 2D du ruissellement urbain

Elaborer un maillage de calcul se basant sur la topographie du terrain naturel …	
… en prenant en compte l'effet d'obstacle du bâti et de drainage préférentiel par les voiries, les conditions d'infiltration différenciées en fonction de l'occupation des sols et de la géologie/pédologie ...	
… et appliquer une pluie de référence en tout point du territoire pour reconstituer les écoulements de surface de manière généralisée : c'est-à-dire pas uniquement au droit des principaux talwegs d'écoulement mais sur l'ensemble du territoire modélisé..	

L'étape indispensable de validation des résultats de modélisation

Elle s'appuie sur un travail de valorisation de la base de données des désordres historiques (archives, témoignages, photographies disponibles) couplé à des visites de terrain.

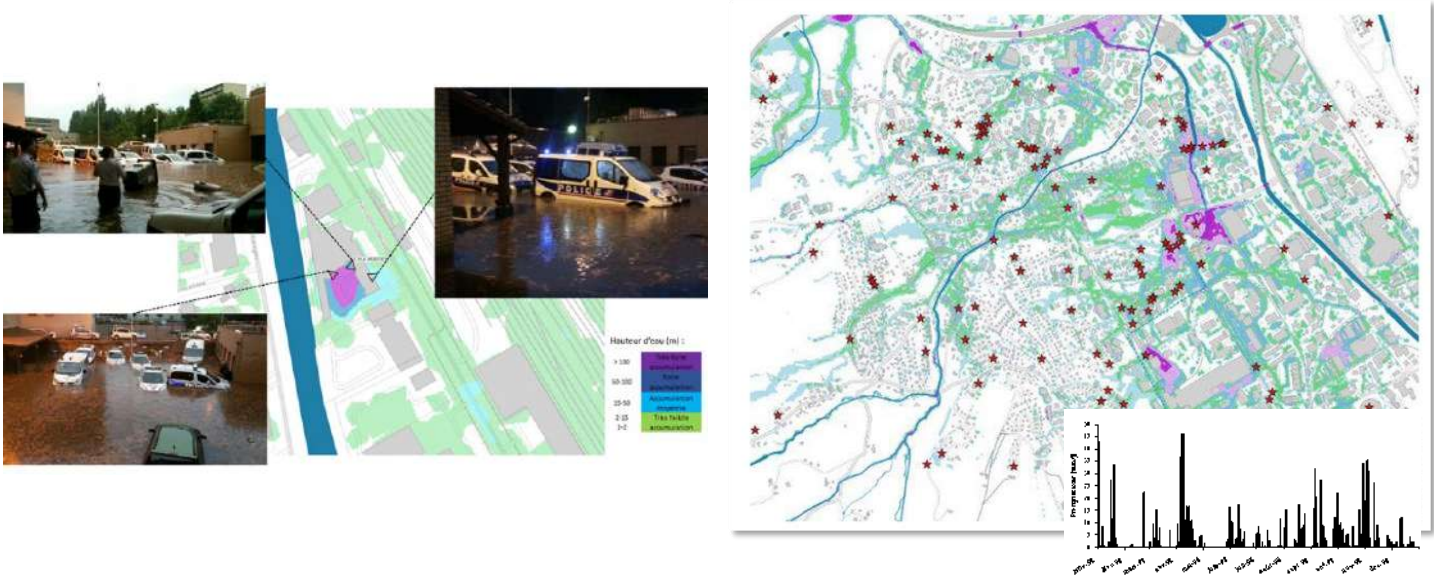


Figure 3 Comparaison entre photographies d'inondation, base de données des désordres et emprises reconstituées par la modélisation 2D (exemple sur Grand Chambéry)

Une mise en valeur très visuelle des résultats de modélisation

Le traitement des résultats de la modélisation permet de construire des cartes d'aléas ruissellement à l'échelle d'une agglomération, d'une commune ou d'un quartier et ainsi de caractériser le risque d'inondation :

- Localisation des principales zones de risques : fortes hauteurs d'eau et/ou fortes vitesses d'écoulement et enjeux exposés
- Dynamique de génération et de propagation des écoulements en surface.

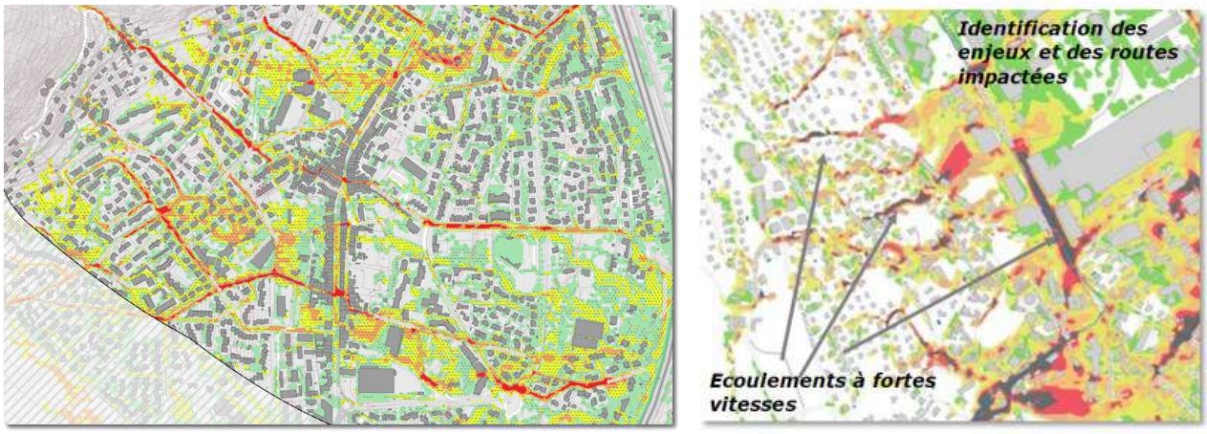


Figure 4 Exemple de rendus de cartographie d'aléa ruissellement

D'autres représentations peuvent être privilégiées pour faciliter la compréhension des phénomènes et des conséquences prévisibles, à l'échelle du quartier notamment :

Figure 5 Visualisation 3D avec représentation des bâtiments (source : SEPIA Conseils)

POUR ENSUITE ENVISAGER UNE STRATEGIE INTEGREE DE GESTION DU RISQUE PLUVIAL

Une meilleure connaissance du risque ruissellement et sa cartographie sont indispensables pour espérer ensuite améliorer sa gestion et définir une stratégie adaptée et globale, que ce soit :

- pour **l'anticipation et la gestion de la crise** : mieux connaitre les secteurs potentiellement exposés pour mieux prévoir les moyens d'accès des secours et les actions à engager en cas de pluie intense, …
- pour la **résorption ou la limitation des dysfonctionnements identifiés comme prioritaires :** mieux connaitre l'origine du problème permet de choisir la solution la plus adaptée et de justifier la mise en œuvre des aménagements associés (au travers d'une analyse couts bénéfices par exemple)
- pour la **réduction de la vulnérabilité sur l'existant** : mieux connaitre les niveaux d'aléa prévisible au droit du bâtiment pour motiver la mise en œuvre de mesures « efficaces »: protection, mise à l'abri, évacuation,…
- ou encore **pour la prise en compte dans l'urbanisme** : identifier en amont l'existence d'un aléa ruissellement et donc d'un risque potentiel sur une nouvelle zone à urbaniser pour éviter de créer une nouvelle vulnérabilité et intégrer le risque dès le début dans la conception du projet urbain, ...

Pour définir une stratégie adaptée et globale de gestion du risque pluvial, différents axes d'interventions sont à étudier et combiner :

Renforcer les ouvrages publics de gestion des eaux pluviales

Améliorer les ouvrages de collecte, étendre ou recalibrer les collecteurs, créer des ouvrages de rétention sont généralement les solutions envisagées en priorité. C'est d'ailleurs l'essentiel des solutions recherchées dans les schémas directeurs d'assainissement eaux pluviales (tels qu'ils étaient réalisés jusqu'à ces dernières années en tout cas …). Mais si des petits travaux d'amélioration de la collecte sont ensuite réalisés, les travaux structurants proposés dans ces schémas directeurs sont très peu concrétisés, pour des raisons multiples : coût, absence de subventions, complexité de mise en œuvre en zone urbaine, efficacité relative voire négligeable face aux pluies exceptionnelles. En bref, des contraintes disproportionnées vis-à-vis des bénéfices escomptés. D'autant que ces solutions techniques trouveront toujours leur limite (la capacité des ouvrages sera dépassée

un jour par une pluie plus forte que la pluie de dimensionnement, en particulier dans un contexte de changement climatique, ou l'entretien insuffisant restreindra leur fonctionnement).

Face à ce constat, on peut se demander pourquoi les solutions hydrauliques structurantes restent celles qui sont envisagées en priorité dans les schémas directeurs. Il y a là probablement une question de culture, aussi bien au sein des collectivités que de leurs prestataires : la culture de l'assainissement et de l'ouvrage, qui incite à rechercher des solutions « en dur », jugées plus sécurisantes, permettant de contenir les écoulements jusqu'à une pluie de référence définie selon les normes existantes et également un « impensé »: le ruissellement, situé à l'interface entre écoulements dans le réseau enterré (relevant de l'assainissement) et écoulements dans les cours d'eau (relevant du risque inondation). Il y a en effet une question de compétences : le service « assainissement » attend de son prestataire qu'il lui propose des solutions restant dans le périmètre de sa compétence. Enfin, les enjeux financiers de la maîtrise d'œuvre n'incitent sans doute pas à proposer des solutions alternatives (sans travaux lourds).

Réduire les apports à la source

La gestion « à la source » est un sujet aujourd'hui largement documenté, et on peut considérer qu'une réelle évolution des pratiques est en cours. Néanmoins, il faut éviter toute confusion entre les différents niveaux de pluie à gérer ou les termes employés. Ainsi, les solutions appropriées pour les pluies courantes (une ville plus perméable) et moyennes à fortes (une gestion mieux intégrée) n'apporteront pas, le plus souvent, une réponse suffisante vis-à-vis des pluies exceptionnelles même si elles contribueront à limiter leurs conséquences. En effet, dans les secteurs déjà urbanisés, les opportunités d'évolution à court et moyen terme sont généralement limitées, à l'échelle du bassin versant d'apport en tout cas. En outre, les inondations pluviales sont souvent au moins en partie liées à des apports des espaces naturels en amont des zones urbaines.

Améliorer la conscience du risque

Le risque pluvial est peu intuitif et, même dans les quartiers qui ont connu des inondations, la conscience du risque s'atténue rapidement. Aussi la conscience des bons comportements à adopter et des responsabilités et rôles de chacun est généralement limitée ; l'idée d'un « risque zéro » assuré par les « services publics » est persistante. Les besoins de communication et de sensibilisation sont donc importants et ils concernent aussi bien les habitants que les usagers (automobilistes notamment) et les différents acteurs de l'aménagement (urbanistes, architectes…). Les moyens envisageables sont nombreux et à adapter aux publics ciblés. Parmi les plus évidents, citons les bulletins communaux ou journaux locaux pour les habitants, les panneaux de signalisation ou pédagogiques pour les usagers des espaces publics inondables, les documents d'urbanisme pour les acteurs de l'aménagement…

Améliorer la gestion de crise

Aujourd'hui, le risque pluvial fait l'objet de peu d'anticipation et de peu de coordination entre les services impliqués, à part peut-être dans les territoires durement touchés au cours des dernières années. Certes, le risque pluvial présente des spécificités dont il faut tenir compte : orages parfois peu prévisibles, événements rapides et temps de réaction limité. Il y a malgré tout de vraies possibilités d'optimiser la gestion de crise, avec une meilleure exploitation des outils de prévision existants :prévisions en ligne de Météo-France, service APIC (Avertissement Pluies Intenses à l'échelle des Communes) proposé par Météo France, applications pour smartphones…, la mise en place d'une surveillance ciblée pour anticiper le débordement des ouvrages structurants et identifier la nécessité de fermeture de certains axes ou même de déclenchement des secours (avec des moyens à identifier voire à inventer au cas par cas), et la préparation des services pour une meilleure coordination le moment venu : Qu'y a-t-il à faire ? Qui est responsable de quoi ? Qui sait faire quoi ? Qui pilote ?

Réduire la vulnérabilité des sites déjà exposés

Certains sinistrés mettent en œuvre spontanément, sans attendre les études ou interventions des services, des solutions simples pour limiter les conséquences d'envahissement par les eaux (installation temporaire de batardeaux, mise à l'abri de certains biens, …). La collectivité peut toutefois apporter une aide précieuse, technique et/ou financière, pour structurer et aller plus loin, avec des mesures de différentes natures (actions, travaux, …) préventives, d'urgence, post-inondation. L'identification des mesures adaptées relève d'analyses au cas par cas, par les propriétaires eux-mêmes (aidés d'un guide pratique) ou par des diagnostics personnalisés confiés à un prestataire spécialisé. Ces diagnostics sont bien entendu utiles pour les bénéficiaires mais ils le sont également pour la collectivité, pour améliorer sa connaissance des personnes vulnérables et mieux prioriser ses secours. La réussite de ce type de démarche passe dans tous les cas par un effort d'accompagnement conséquent de la part de la collectivité.

Améliorer la gestion des débordements au niveau des espaces publics

Des aménagements sont parfois réalisés par les gestionnaires de voiries (communales, intercommunales ou départementales selon les cas), à la suite d'inondations, pour mieux y contenir les débordements des ouvrages : prolongements de trottoirs, reprofilage des enrobés, mise en place de dos d'âne… Ces travaux ciblés contribuent à améliorer la situation mais restent d'une efficacité relative compte tenu de marges de manœuvre qui restent limitées. Ils sont en outre réalisés sans analyse élargie des impacts potentiels d'amont en aval. Dans la même idée, mais dans une vision plus globale et à plus long terme sur le renouvellement urbain, il peut être envisagé d'aménager un véritable « réseau majeur » assurant le « parcours à moindre dommage » des flux excédentaires. Une réflexion d'ingénierie urbaine est alors à mener, pour définir les profils des voiries et plus généralement configurer les espaces publics pour mieux gérer les flux, dans le respect des autres usages (notamment de la circulation des personnes à mobilité réduite).

Et surtout, améliorer la prise en compte du risque dans l'évolution du territoire

Il s'agit avant tout de ne pas aggraver la vulnérabilité du territoire vis-à-vis du risque pluvial. Les projets de construction intégrant des précautions en la matière ne sont pas si nombreux. Des territoires sont en cours de réflexion sur le sujet, ayant saisi l'opportunité d'un nouveau document d'urbanisme.

Une cartographie du risque pluvial est un préalable indispensable. L'établissement de règles et/ou recommandations adaptées passe ensuite par des réflexions sur la grille d'aléa à adopter et sur les objectifs et principes visés en fonction de l'aléa, en évitant les « copier-coller » des doctrines existantes vis-à-vis des débordements des cours d'eau. Il est également nécessaire de rassurer les élus et les services en charge de l'élaboration des documents d'urbanisme : le risque pluvial est bien souvent plus facile à gérer que les débordements de cours d'eau, quelques principes simples permettent d'éviter une grande partie des problèmes rencontrés, et les zones à rendre inconstructibles sont souvent limitées.

Enfin, pour l'aménagement de zones exposées à un aléa ruissellement, si le risque est pris en compte dès le démarrage du projet urbain, il est relativement simple à intégrer grâce à des solutions minimalistes basées sur des jeux de réhausse/décaissement limités et de la rétention généralisée avec mise en eau ponctuelle et préférentielle de certaines surfaces (on profite de tous les volumes disponibles). Cette approche, qui permet de vivre l'inondation de manière proactive et non subie, offre l'opportunité de créer des espaces partagés, accueillant de temps en temps le cheminement naturel de l'eau au cœur de la ville.

EN CONCLUSION : UNE STRATEGIE A CO-CONSTRUIRE

La construction d'une stratégie intégrée de gestion du risque pluvial repose donc d'abord sur une bonne connaissance préalable de ce risque. Les méthodes et outils existent aujourd'hui pour cartographier et qualifier les aléas observés/prévisibles et enjeux exposés, avec des niveaux de précision à adapter aux besoins et caractéristiques propres à chaque territoire.

A la lumière de cette connaissance différents champs d'actions sont ensuite à étudier, par les acteurs du territoire, et à articuler en fonction du contexte, des inondations observées, de la gouvernance en place, des moyens financiers disponibles pour la mise en œuvre des actions…

Les modalités d'élaboration de cette stratégie (gouvernance, pilote, partenaires, financement, moyens, outils, suivi, …) doivent être clairement définies, préalablement au lancement de la démarche, par le référent Risque Pluvial au sein de la collectivité (éventuellement appuyé par un AMO spécialisé si nécessaire). Cette approche en tant que telle étant déjà un premier pas pour une meilleure gestion du risque pluvial sur le territoire.

Gestion du ruissellement pluvial urbain. Retours d'expériences de collectivités du bassin de la Loire et ses affluents (Le Sommer & Pierlot)

Gestion du ruissellement pluvial urbain
Retours d'expériences de collectivités du bassin de la Loire et ses affluents

Maxime LE SOMMER[1], Daniel PIERLOT[2]

[1] Etablissement public Loire – 2, Quai du Fort Alleaume CS 55708 45057 ORLEANS – direction@eptb-loire.fr
[2] SEPIA Conseils – 53, rue de Turbigo 75003 PARIS – sepia@sepia-conseils.fr

Alors que les dangers dus aux crues d'un cours d'eau sont communément perçus, ceux liés au ruissellement restent sous-estimés. Pourtant, sur le bassin de la Loire et ses affluents, 7 collectivités sur 10 ont déjà été confrontées à des inondations par ruissellement urbain. Les conséquences de ces inondations peuvent être majeures, tant sur le plan matériel qu'humain. De surcroît, les précipitations exceptionnelles semblent s'intensifier en lien avec le changement climatique actuel.
Comment le risque de ruissellement est-il pris en compte aujourd'hui par les collectivités du bassin ? Quelles sont les réponses apportées ? Quelles sont les actions possibles ?
C'est notamment à ces questions que l'Établissement public Loire s'est attaché à répondre, en prenant l'initiative de dresser un état des lieux des politiques de gestion des eaux de ruissellement urbain mises en œuvre par les collectivités du bassin fluvial.
Les enseignements tirés des retours d'expériences des collectivités ligériennes ont été compilés dans un guide pratique, puis dans un livret de vulgarisation court et illustré, pour aider les acteurs concernés à mieux gérer le risque sur leurs territoires.
Ces documents soulignent l'importance de l'amélioration de la connaissance du risque, de l'amélioration du niveau de service des ouvrages de gestion des eaux pluviales, de l'intégration de règles d'aménagement adaptées à l'environnement urbain, de la réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens et de l'organisation de la prévision et de la gestion de crise.
Mots-clefs : Ruissellement, Collectivités, Risque pluvial urbain, Réduction de la vulnérabilité

Urban Storm Runoff Management
Feedback from regional authorities on the Loire River basin

While flood hazards are commonly perceived, those related to runoff remain underestimated. However, on the Loire river basin, 7 out of 10 regional authorities have already faced flooding from urban runoff. Their consequences can be major, both material and human. In addition, exceptional rainfall appears to be increasing in line with current climate change.
How is it taken into account today by the regional authorities of the basin ? What are the answers? What are the possible actions ?
It is in particular to these questions that the Loire River Basin Autority (Etablissement public Loire) has endeavored to answer, by taking the initiative to draw up an inventory of the policies for the management of urban runoff water implemented by the regional authorities of the river basin .
The lessons learned from the experiences of the ligerian authorities were compiled in a practical guide, then in a short and illustrated popularization booklet, to sensitize the actors concerned to the solutions for better management of the risk of urban rain runoff, and to enable regional authorities wishing to do so, to go further on questions such as improving risk awareness and the level of service of stormwater management works, the integration of planning rules adapted to the urban environment, the reduction of the vulnerability of people and property and the organization of crisis forecasting and management
Key words : runoff, Regional authorities, Urban Runoff, reduction of the vulnerability

I. INTRODUCTION : UNE DEMARCHE COLLABORATIVE AVEC LES COLLECTIVITES DU BASSIN

Créé en 1983, l'Etablissement public Loire est un syndicat mixte composé aujourd'hui de plus de 50 collectivités ou groupements : 6 régions, 16 départements, 30 villes et intercommunalités, et 4 syndicats

intercommunaux. Au service de ses collectivités membres, l'Etablissement public Loire contribue depuis plus de 35 ans à la cohérence des actions menées en faveur du développement durable du bassin de la Loire et ses affluents, notamment s'agissant de l'évaluation et de la Gestion des risques d'inondations.

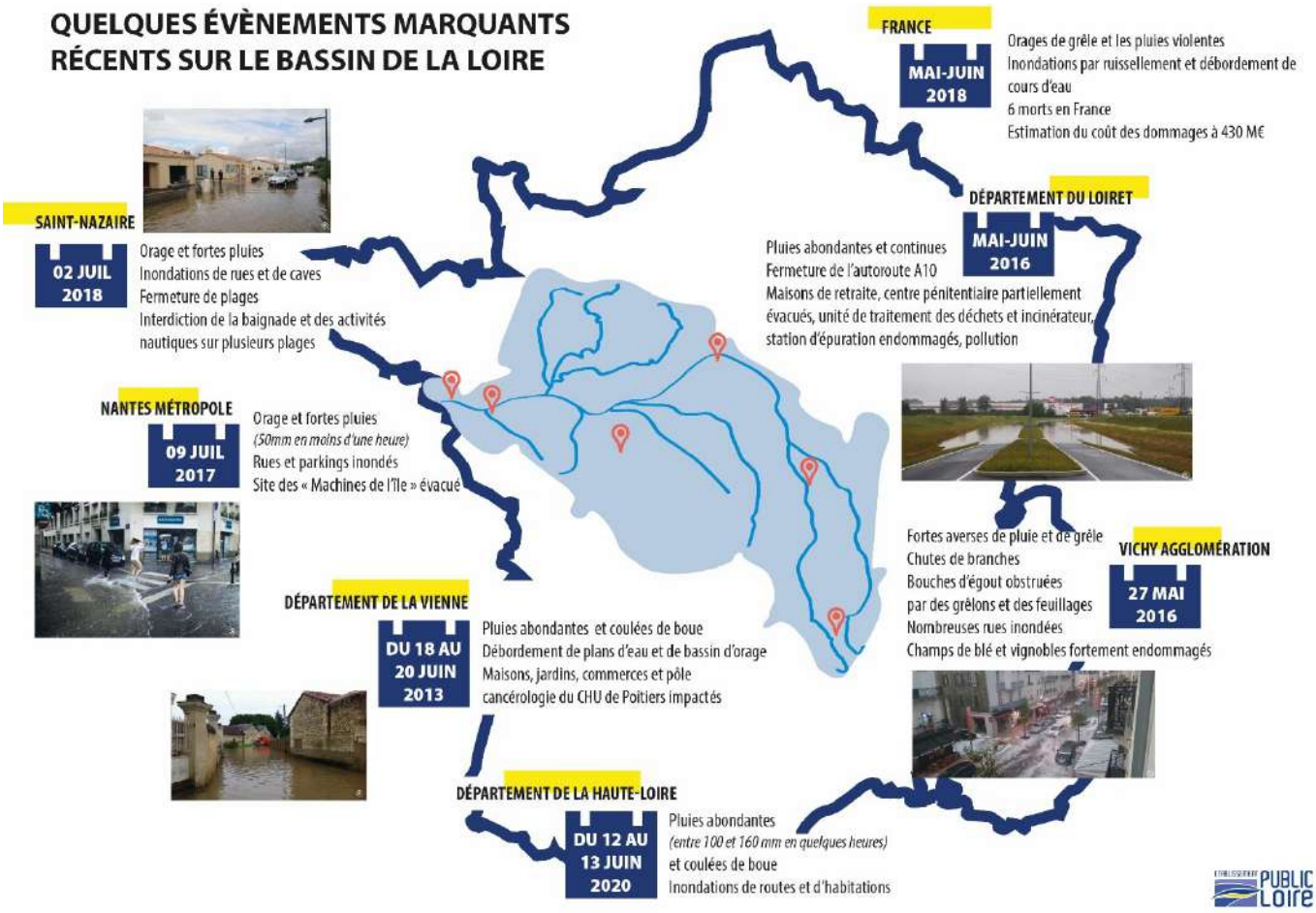
Dans cette optique, en 2016, un travail de stage a été mené au sein des services sur la problématique de la gestion des eaux pluviales urbaines et de la réduction du risque d'inondations par ruissellement à l'échelle du bassin, par un étudiant du Master Ingénierie et Gestion de l'Eau et de l'Environnement de l'Université de Limoges.

Dans le prolongement de cette étude, l'Etablissement a initié, avec le soutien financier de l'Europe (FEDER), le développement d'une analyse technique des problématiques du ruissellement pluvial urbain à l'échelle du bassin fluvial de la Loire qu'il a confiée à SEPIA Conseils.

Dans un premier temps, une typologie des ruissellements pouvant générer des inondations dans les zones urbanisées a été établie, ainsi qu'une analyse comparative des démarches de référence ou approches innovantes menées au niveau national et en particulier celles déployées par des EPCI du bassin pour gérer ce risque : compréhension des phénomènes, acteurs mobilisés, méthodologies, organisations et techniques développées. A ce titre, une quinzaine d'intercommunalités ont partagé leurs retours d'expérience à travers un questionnaire et des témoignages à l'automne 2018. Cet échange a permis d'identifier de bonnes pratiques, à préciser les potentialités/limites de leur mise en oeuvre et à définir des axes de progrès concrets afin de motiver des actions d'amélioration réalistes.

Dans un second temps, ce partage de retours d'expériences a été présenté sous la forme d'un guide pratique illustré des témoignages de collectivités du bassin, et synthétisant les résultats de l'étude et notamment les axes de progrès identifiés.

Un livret de vulgarisation court et illustré a également été édité à destination des acteurs concernés par la gestion du risque de ruissellement pluvial urbain.



II. COMPRENDRE CE QU'EST LE RISQUE PLUVIAL

Plusieurs définitions permettent de cerner les notions de ruissellement pluvial urbain et du risque pluvial associé.

L'étude menée par l'Etablissement public Loire a été l'occasion d'en suggérer deux pour le territoire :

- le ruissellement des eaux pluviales est l'écoulement qui se produit en surface lorsque le sol ne peut pas ou plus absorber la pluie (du fait de l'intensité de la pluie, de la nature du sol ou de sa couverture par exemple) ; en ville, le ruissellement est la partie de l'écoulement qui n'est pas « gérée » par des dispositifs hydrauliques dédiés (enterrés ou superficiels) ; il ne constitue pas nécessairement un désordre en ville et peut être intégré dans une stratégie de gestion des pluies exceptionnelles ;

- le risque pluvial urbain est l'inondation par le ruissellement pluvial d'une aire urbaine vulnérable à cette inondation, du fait de l'inadaptation du bâti, d'activités ou d'usages au ruissellement urbain ; il se caractérise par sa soudaineté et par la difficulté de sa prévision ; il est à distinguer d'une inondation causée par le débordement d'un cours d'eau ou la remontée d'une nappe phréatique.

La difficulté de la prévision d'une inondation par ruissellement pluvial est liée à ses caractéristiques. Il s'agit en effet d'un phénomène souvent très localisé, à l'échelle de petits bassins versants, et qui peut impacter des secteurs éloignés des cours d'eau et de leurs débordements en cas de crue, c'est-à-dire là où on ne s'attend généralement pas à être inondé (figure 1). Soudaines et à cinétique rapide (de quelques dizaines de minutes à quelques heures), ces inondations peuvent générer de nombreux dégâts matériels et mettre les personnes en danger. Elles peuvent être accompagnées de coulées de boue si le bassin d'apport s'étend à l'amont des aires urbaines.

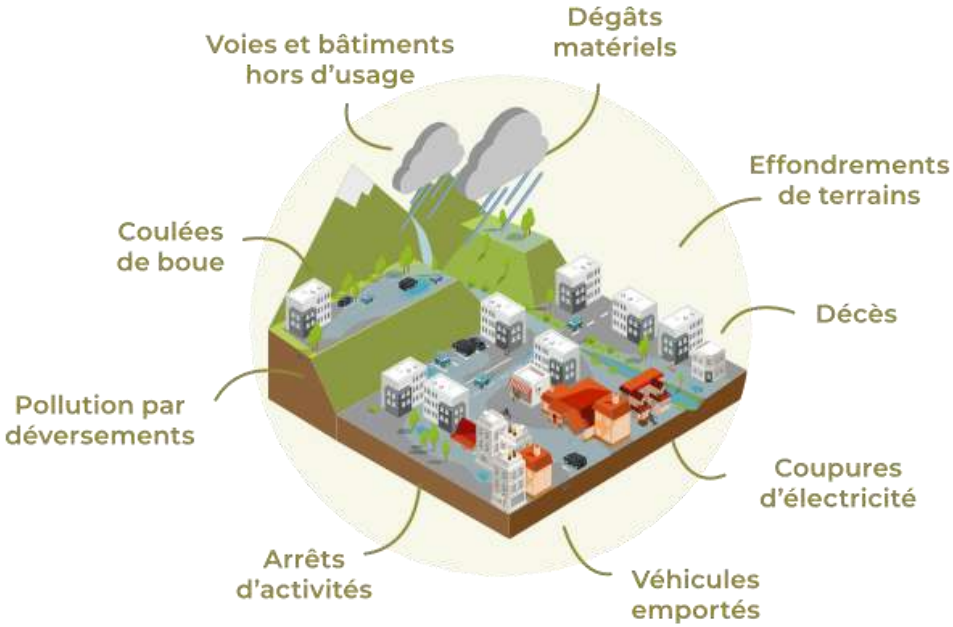


Figure 1 : Schéma conceptuel des dommages potentiels en cas d'inondation par ruissellement pluvial urbain (EP Loire, 2019)

III. UNE PREOCCUPATION A LA CROISEE DES COMPETENCES DES COLLECTIVITES

La création des compétences gestion des milieux aquatiques et de la prévention des inondations (GEMAPI) et gestion des eaux pluviales urbaines (GEPU) a permis de clarifier l'organisation de la prise en charge de la gestion des inondations par les cours d'eau d'une part, et des eaux pluviales urbaines d'autre part. En revanche, la gestion du ruissellement pluvial urbain n'est pas identifiée comme une compétence spécifique. Elle doit

pourtant être prise en charge par les collectivités, à travers leurs compétences dans la gestion du risque, l'aménagement du territoire et l'urbanisme (figure 2).

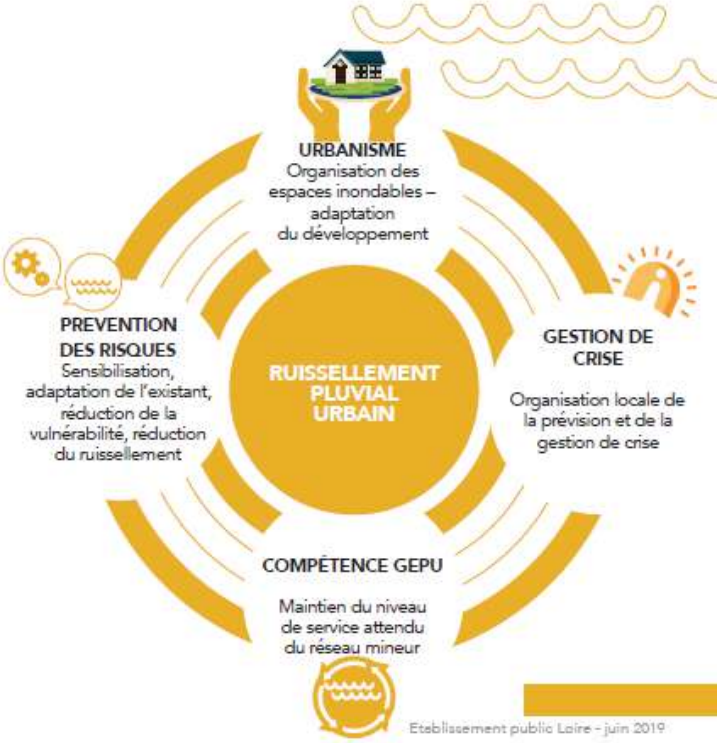


Figure 2 : Articulation des compétences des collectivités intervenant dans la gestion du risque pluvial (EP Loire, 2019)

Les expériences des collectivités du bassin ligérien font ressortir l'indispensable coordination entre acteurs impliqués dans la gestion du risque, l'aménagement du territoire et la gestion des eaux pluviales. Leurs succès reposent sur une répartition claire des rôles entre établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) et communes, sur leur collaboration, et sur les moyens dédiés à leur mise en place.

IV. UNE PRISE EN COMPTE PARTIELLE ET INADAPTEE

Etroitement liés au développement des villes et à leurs équipements de plus en plus vulnérables, le ruissellement pluvial urbain et ses conséquences sont une préoccupation croissante pour les populations et leurs élus. Ils motivent un grand nombre d'études et d'expertises, ainsi que l'établissement de programmes de plus en plus coûteux.

Si plus de la moitié des EPCI interrogés au cours de l'étude ont fait valoir qu'ils avaient une bonne connaissance des secteurs inondables par ruissellement pluvial, liée généralement à l'expérience retirée d'événements passés, les solutions pour les gérer ont rarement été à la hauteur des phénomènes. Ainsi, le projet de maîtriser entièrement l'aléa et de gérer toutes les pluies pouvant causer des dommages en milieu urbain par des ouvrages enterrés a longtemps été soutenu, mais force est de constater que les ambitions du « tout tuyau » ont trouvé leurs limites.

La prise de conscience tardive de cette limite a très rarement abouti à l'élaboration de stratégies alternatives, si ce n'est pour les pluies courantes et moyennes pour lesquelles des scénarios de gestion « *in situ* » ont été largement déclinés.

S'agissant des ruissellements dus aux pluies fortes et exceptionnelles, qui ne peuvent pas être maîtrisés par les réseaux collectifs ou par les aménagements privés, ils ne sont généralement pas encore perçus comme un risque au même titre que les inondations liées aux crues des cours d'eau.

Ainsi, la prévention n'est pas systématiquement intégrée dans les stratégies d'aménagement des collectivités, alors que 70% d'entre elles placent la protection des biens et des personnes en priorité dans leurs préoccupations. D'ailleurs, une part encore conséquente des territoires ne s'est pas engagée dans le recensement et l'identification des secteurs touchés par le ruissellement pluvial.

V. LES FACTEURS DE REUSSITE D'UNE GESTION DU RISQUE PLUVIAL

Les facteurs de réussite d'une démarche de gestion du ruissellement pluvial sont ceux qui aident à la prise en charge complète et transversale de la problématique, dans l'optique de la mise en œuvre d'une stratégie locale de gestion du risque pluvial.

Il s'agit pour les collectivités d'identifier et de clarifier tous les leviers à actionner, qu'ils soient structurels, réglementaires ou organisationnels, en organisant la transversalité nécessaire et en se dotant des moyens suffisants, afin d'initier un développement durable de leurs territoires, axé davantage sur l'adaptation au risque que sur la maîtrise d'un aléa difficilement prévisible.

Une dizaine d'axes de progrès favorables à une démarche de gestion du ruissellement pluvial réussie ont été traités. Parmi eux, citons l'amélioration de la connaissance du risque et du niveau de service des ouvrages de gestion des eaux pluviales, l'intégration de règles d'aménagement adaptées à l'environnement urbain, la réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens et l'organisation de la prévision et de la gestion de crise. Ces axes sont détaillés ci-après.

V.1. AMELIORER LA CONNAISSANCE ET LA PREVISION DE L'ALEA

La connaissance du risque, et notamment de l'aléa ruissellement, est rendue complexe par la nature même des phénomènes qui sont rapides, localisés et fortement liés aux intensités pluvieuses à un pas de temps fin. Contrairement à l'aléa débordement de cours d'eau, que l'on peut plus facilement identifier grâce aux crues passées et à la géométrie du lit majeur, l'inondation par ruissellement pluvial est susceptible de survenir presque partout, même dans les secteurs amont d'un bassin versant.

La connaissance de l'aléa implique donc d'une part, le recensement systématique et l'analyse de la typologie des événements passés (en étant attentif à consigner les circonstances météorologiques ainsi que les facteurs aggravants éventuels) et d'autre part, la caractérisation de l'aléa sur l'ensemble du territoire, par exemple au moyen d'une modélisation fine en 2 dimensions intégrant la topographie et l'occupation du sol, et la relation « pluie-débit » d'événements pluvieux exceptionnels.

V.2. CONNAITRE ET MAINTENIR LE NIVEAU DE SERVICE DES INFRASTRUCTURES EXISTANTES

La gestion des eaux pluviales doit être organisée pour que les milieux naturels soient protégés et que les populations et le fonctionnement de la cité ne soient pas mis en danger, quelles que soient les conditions pluviométriques.

Cette gestion ne peut pas être assurée intégralement par un même principe ni par un même type d'ouvrage. En effet, les infrastructures existantes (réseaux enterrés, fossés, bassins) ne peuvent pas accepter tous les épisodes pluvieux, des petites pluies jusqu'aux pluies les plus exceptionnelles.

Il convient donc que chaque collectivité définisse le niveau de service qu'elle attend de ces infrastructures, en fonction de leurs dimensions et des enjeux soumis au risque pluvial, et qu'elle clarifie dans quelle mesure elles participent à la gestion du risque.

Le schéma ci-dessous (figure 3) propose une articulation souhaitable entre les principes de gestion des eaux pluviales, des niveaux de service et des conditions météorologiques :

- le système mineur est celui le mieux connu, qu'il soit enterré (réseau), surfacique (fossés, noues) ou les deux à la fois, usant des techniques dites "alternatives" ou non ;
- le système majeur est uniquement surfacique et prend en charge l'excédent d'eau de ruissellement que le réseau mineur ne peut accepter. Il s'agit le plus souvent d'espaces publics ou collectifs : la voirie pour les écoulements et des places, terrains de sports ou encore des parcs pour les zones d'accumulation.

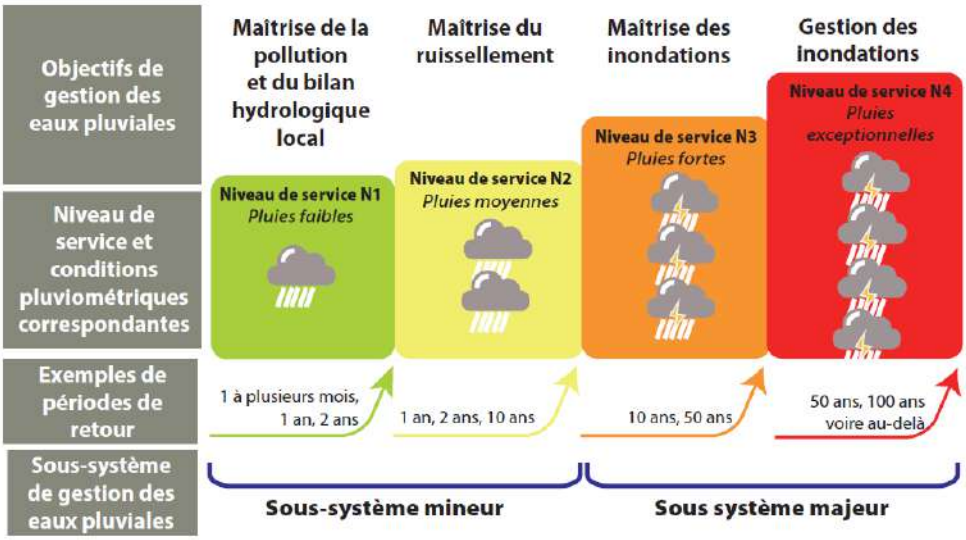


Figure 3 : Organisation de la gestion des eaux pluviales urbaines par niveaux de service selon les conditions pluviométriques (CEREMA - 2003)

Dans ce schéma, les infrastructures existantes, intégrées dans le « système mineur », participent plus ou moins à l'atténuation de l'aléa en fonction du niveau de service qu'elles peuvent assurer, en limitant le ruissellement urbain.

A contrario, leur mauvais état peut donc engendrer une aggravation de ce ruissellement.

Leur maintenance et leur renouvellement sont donc des missions essentielles pour les services en charge de leur gestion (compétence GEPU). Une gestion patrimoniale éclairée des réseaux et de leurs annexes hydrauliques, par une bonne connaissance de leur âge, de leur état et de leur fonctionnement, est ainsi, paradoxalement, la première étape dans la bonne gestion des pluies exceptionnelles dans la ville (figure 4).

Date de mise en service du patrimoine de gestion des eaux	Années 1970 à 2000 pour l'essentiel
Durée de vie moyenne d'un collecteur d'eau	60 ans
Début de la période présumée de remise en état	Années 2030
Renouvellement moyen pour un réseau de 1 000 km de collecteurs	16,6 km/an

→ Établir un plan de reconnaissance des réseaux unitaires et séparatifs

→ Planifier les interventions par priorités (selon la situation géographique, le type d'opération...)

Figure 4 : Caractéristiques et renouvellement des dispositifs de collecte, de transport, de stockage et d'infiltration des eaux pluviales (EP Loire, 2019)

V.3. TENIR COMPTE DU RISQUE DANS L'AMENAGEMENT URBAIN

La prise de conscience des limites techniques de la maîtrise de l'aléa pluvial par le réseau mineur est un préalable nécessaire qui passe, comme vu précédemment, par une bonne connaissance du niveau de service assuré par ce réseau, mais aussi par la volonté politique d'adapter le développement de la ville à une contrainte naturelle qui s'ajoute à d'autres contraintes géographiques, sociétales et économiques.

La prise en compte du risque pluvial dans l'urbanisme doit être une action prioritaire qui complète l'approche hydraulique portée par la compétence GEPU, en adaptant le réseau majeur lui-même, c'est-à-dire l'espace public dans toutes ses composantes, à la gestion du ruissellement pluvial (figure 5).

Cette prise en compte doit passer par la non-aggravation de l'aléa pluvial et de la vulnérabilité de la ville.

La non aggravation de l'aléa implique l'intégration de règles d'urbanisme visant à limiter tous les facteurs aggravant le ruissellement en ville : réduire l'imperméabilisation, favoriser l'évapotranspiration et ralentir des circuits d'évacuation.

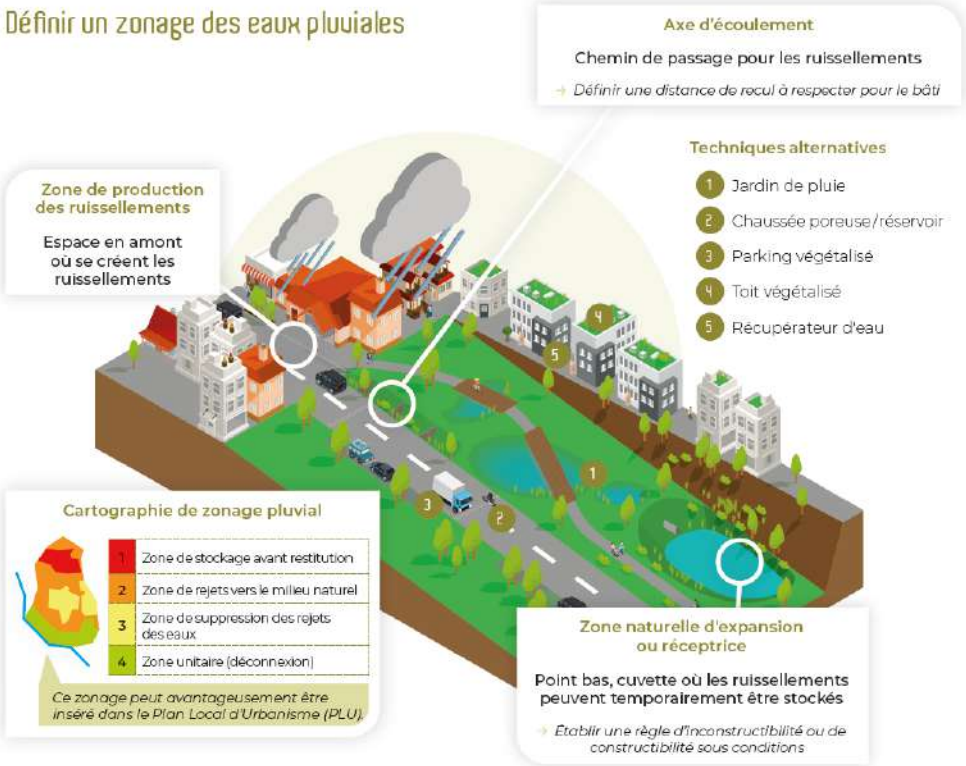


Figure 5 : Zonage des eaux pluviales et prise en compte du risque dans l'aménagement urbain (EP Loire, 2019)

Ces règles résident en particulier dans le développement de la gestion *in situ* des eaux pluviales, par la mise en œuvre de techniques alternatives et de politiques de déconnexion (ou de désimperméabilisation) des espaces publics et privés. Toutes les collectivités ayant répondu à l'enquête incitent à l'infiltration *in situ* des eaux pluviales et 60 % ont intégré des règles de réduction de l'imperméabilisation pour les opérations à venir dans leurs plans locaux d'urbanisme (PLU).

Ces règles sont d'autant plus faciles à faire appliquer que les solutions correspondantes sont peu onéreuses et durables. Leur efficacité est particulièrement sensible dans le voisinage immédiat et en tête de bassin versant. La valorisation et l'adaptation des éléments paysagers existants est une des clefs de cette démonstration (figure 6).

Figure 6 : Exemples de solutions techniques de désimperméabilisation et de déconnexion des eaux pluviales (EP Loire, 2019)

<u>La non-aggravation de la vulnérabilité</u> implique des règles d'urbanisme et de construction telles que l'interdiction de construire dans les zones à risque, le cadrage de la géométrie des bâtiments (calage altimétrique minimum des niveaux habitables, orientation des ouvertures de plain-pied), et l'organisation globale de la nouvelle urbanisation, en adaptant la sensibilité des activités et des services à la hauteur du risque.

L'intégration du risque pluvial dans la réflexion sur son urbanisme, engage entièrement le territoire, sa population et ses décideurs, et passe par une prise de conscience collective salutaire des limites techniques du réseau mineur face à la gestion du risque.

V.4. ENCOURAGER LA REDUCTION DE LA VULNERABILITE DES PERSONNES ET DES BIENS EXISTANTS

La réduction de l'exposition des personnes et des biens au risque pluvial est un axe d'amélioration de la gestion du risque qui peut se révéler beaucoup plus efficace et souvent moins couteux que la réduction de l'aléa. Elle consiste à adapter ou protéger le bâti, les activités et les usages en fonction de l'aléa, par des ajustements parfois marginaux (réhausse d'un seuil, comblement d'une ouverture inadaptée) ou par des mutations urbaines complètes (suppression de places de parking, affectation de logements à des activités plus résilientes, voire destruction de bâtiments).

On note qu'elle est déjà mise en œuvre dans certains territoires où les contextes climatiques et culturels facilitent la prise en charge individuelle de certaines actions telles que la pose de batardeaux devant les accès inondables, de déflecteurs ou la mise en œuvre de merlons, et autres obstacles aux écoulements sur les accès carrossables. La culture du « tout tuyau » et le développement de certains partis architecturaux sensibles au risque de ruissellement (larges accès de plain-pied, descentes de garage non protégées, constructions en déblai, etc..) ont toutefois fait oublier certaines règles de bon sens qu'il convient aujourd'hui de retrouver en corrigeant les erreurs du passé.

A ce titre, il est nécessaire d'informer le public sur le risque pluvial et les solutions possibles *via* des outils ou des actions de sensibilisation afin d'associer tous les occupants de l'espace urbain à l'effort de prévention et concourir au développement d'une culture du risque (figure 7).

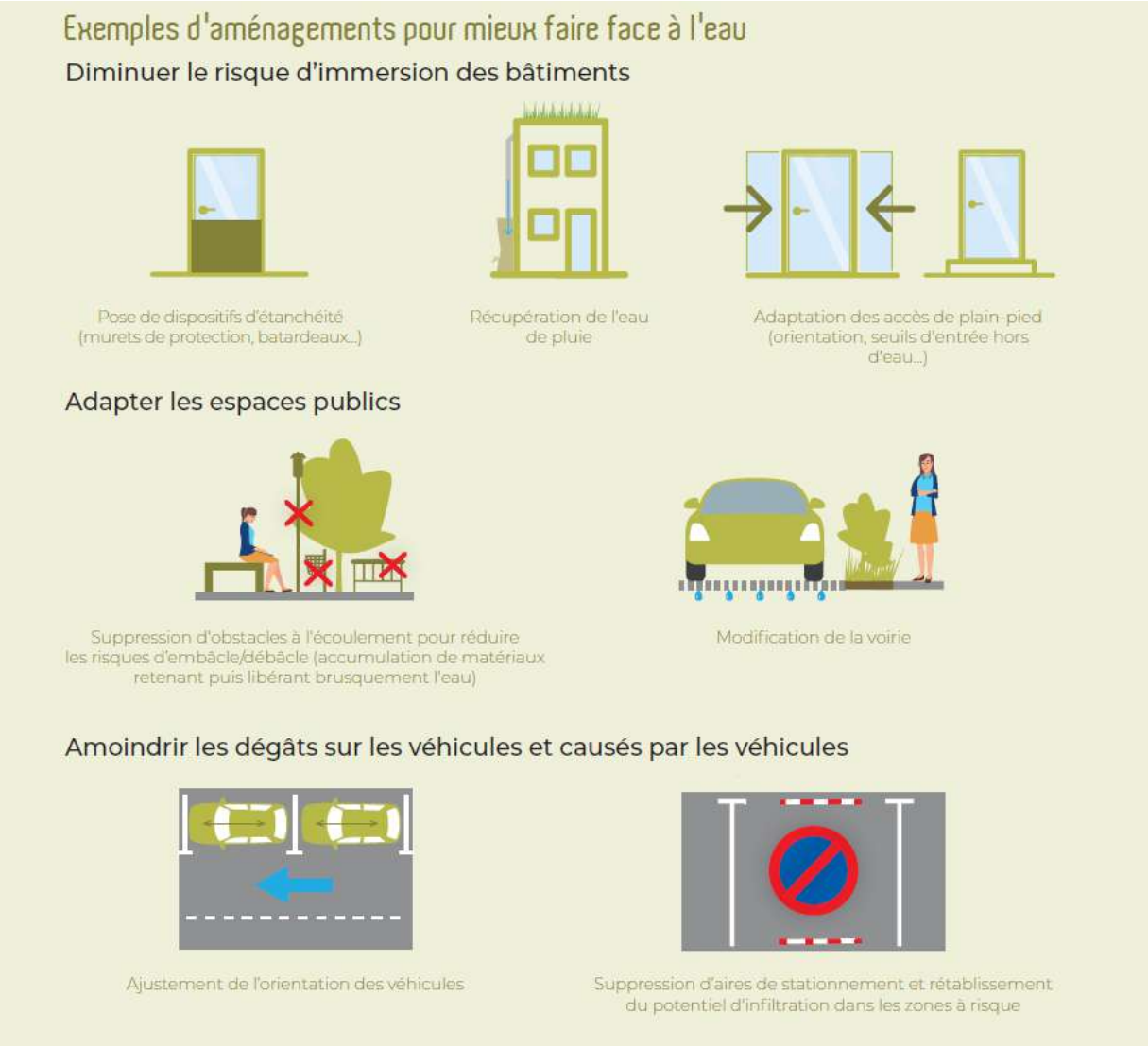


Figure 7 : Exemples d'aménagements pour mieux faire face au risque pluvial (EP Loire, 2019)

V.5. ORGANISER UNE PREVISION ET UNE GESTION LOCALES DE LA CRISE

S'agissant de la prévision des phénomènes de pluies intenses et du risque pluvial associé, la mise en place d'une veille pluviométrique locale doit être prise en charge par les collectivités.

En effet, les dispositifs d'alerte gérés par l'État concernent essentiellement le risque d'inondation par les cours d'eau et ne couvrent pas le risque pluvial, trop soudain, trop aléatoire et trop ponctuel pour être prévu par des modèles régionaux.

Cependant, la plupart des collectivités n'ont pas engagé cette démarche, soit parce qu'elles n'ont pas eu à gérer de crise dans le passé, soit parce qu'elles s'estiment protégées par leurs ouvrages de gestion des eaux pluviales, soient parce qu'elles croient bénéficier du dispositif de prévision des crues de l'État.

Concernant la gestion de crise, les plans communaux de sauvegarde (PCS) intégrant le risque pluvial sont trop peu nombreux à ce jour. Le défaut de compréhension du risque et l'idée trop largement répandue que l'adaptation des réseaux finira par le supprimer expliquent en partie ce constat. Néanmoins, une grande majorité des communes sont exposées et l'intégration de ce risque dans les réflexions et l'organisation des actions de sauvegarde (alerte, mise en place d'une cellule de crise, acquisition de matériel, accueil des victimes, etc.) permettrait d'éviter bien des dégâts à peu de frais.

VI. VULGARISATION ET PARTAGE D'INFORMATIONS

Figure 8 : Guide pratique et livret de vulgarisation présentant les enseignements de l'étude (EP Loire, 2019)

Les enseignements tirés des retours d'expériences des collectivités ligériennes, dans le prolongement de l'étude, ont été compilés dans un guide pratique, puis dans un livret de vulgarisation court et illustré, pour sensibiliser les acteurs concernés aux solutions en faveur d'une meilleure gestion du risque de ruissellement pluvial urbain, et permettre aux collectivités qui le souhaitent d'aller plus avant sur ces questions.

TABLEAUX ET FIGURES

~~3Figure 1 : Schéma conceptuel des dommages potentiels en cas d'inondation par ruissellement pluvial urbain (EP Loire, 2019)~~
~~4Figure 2 : Articulation des compétences des collectivités intervenant dans la gestion du risque pluvial (EP Loire, 2019)~~
~~6Figure 3 : Organisation de la gestion des eaux pluviales urbaines par niveaux de service selon les conditions pluviométriques (CEREMA – 2003)~~
~~6Figure 4 : Caractéristiques et renouvellement des dispositifs de collecte, de transport, de stockage et d'infiltration des eaux pluviales (EP Loire, 2019)~~
~~7Figure 5 : Zonage des eaux pluviales et prise en compte du risque dans l'aménagement urbain (EP Loire, 2019)~~
~~7Figure 6 : Exemples de solutions techniques de désimperméabilitation et de déconnexion des eaux pluviales (EP Loire, 2019)~~
~~8Figure 7 : Exemples d'aménagements pour mieux faire face au risque pluvial (EP Loire, 2019)~~
Figure 8 : Guide pratique et livret de vulgarisation présentant les enseignements de l'étude (EP Loire, 2019)

CONCLUSIONS

Face à la nécessité de réduire les incidences d'une urbanisation déconnectée des réalités hydrologiques, qui a trop largement imperméabilisé les sols et contrarié sans précaution les circuits naturels de l'eau en cas de pluie exceptionnelle, plusieurs collectivités du bassin de la Loire et ses affluents ont été à l'initiative de démarches exemplaires allant du diagnostic précis du risque de ruissellement urbain (ou risque pluvial) à la réduction de la vulnérabilité, en passant par la gestion patrimoniale des réseaux publics et la mise en place de d'alertes météorologiques locales.

L'étude menée par l'Etablissement public Loire a permis d'une part, de présenter de manière synthétique et vulgarisée les principaux facteurs de réussite d'une démarche de gestion du ruissellement urbain menée à l'échelle d'un EPCI en s'appuyant sur leurs exemples et d'autre part, de définir des axes de progrès à suivre pour aller plus loin.

L'Établissement souhaite aujourd'hui capitaliser ces acquis au bénéfice de l'ensemble des acteurs concernés par le sujet de la gestion des problématiques de ruissellement pluvial urbain sur le bassin, en développant une culture commune sur le sujet au travers de l'édition d'un guide, de la poursuite des échanges inter-collectivités et du partage d'expériences, mais aussi de l'intervention de chercheurs et gestionnaires à l'occasion du séminaire annuel des porteurs de stratégie locales et de programme d'actions de prévention des inondations (PAPI) qu'il organise.

REFERENCES

Agence de l'Eau RMC, CERTU, GRAIE, Grand Lyon, INSA, Paysagiste, Région RA, Société SINT - *Pour la gestion des eaux pluviales : Stratégie et solutions techniques* - Région Rhône-Alpes, 32 pages.

APUR (2018) - *Gérer autrement les eaux pluviales : une approche par bassins versants*. Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR), 60 pages.

Bernard Chocat, LGCIE - INSA Lyon (2014) – *Le « tout-à-l'égout » est-il une bonne solution pour gérer les eaux pluviales urbaines?* Méli-Mélo, 14 pages.

CEPRI (2014) - *Gérer les inondations par ruissellement pluvial* – 92 pages.

CERTU (2006) - *Les collectivités locales et le ruissellement pluvial* – MEDD, 82 pages.

CEREMA (2018) - *Comment mieux bâtir en terrains inondables constructibles – Enseignements des projets figurant aux deux palmarès*. 27 pages.

CEREMA (2018) - *Les territoires face au ruissellement – Analyse des dispositifs et enseignements tirés de 4 études de cas*. 126 pages.

Etablissement public Loire (2016) - *Les eaux pluviales et le ruissellement urbain : les bonnes pratiques de gestion pour réduire le risque d'inondation.* Plaquettes de sensibilisation, 2 x 6 pages.

SEPIA Conseils, INFRA Services (2013) - *Gestion intégrée des eaux pluviales sur le bassin Loire-Bretagne : pourquoi ? comment ? – Plaquette de présentation*. Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 8 pages.

SEPIA Conseils, INFRA Services (2013) - *Gestion intégrée des eaux pluviales sur le bassin Loire-Bretagne – Eléments de doctrine pour une définition partagée de la gestion intégrée et critères d'identification d'une collectivité exemplaire.* Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 19 pages.

La désimperméabilisation sur le territoire du Grand Narbonne (Saulais *et al.*)

La désimperméabilisation sur le territoire du Grand Narbonne

Muriel SAULAIS[1], Catherine LEONARD[1], Stéphane DOMINGO[1], Olivier GRADEL[1], Timothée CAPCARRERE[1], Karine MAUBERT-SBILE[1], Aura PENLOUP[2], Mylène CULICCHIA[3], Jean-Louis BURAIS[3]

[1]Cerema, Rue Pierre Ramond 33166 Saint Médard en Jalles, France, e-mail: muriel.saulais@cerema.fr
[2]Le Gand Narbonne, 12 boulevard Frédéric Mistral, 11100 Narbonne, France, e-mail: A.PENLOUP@legrandnarbonne.com
[3]DDTM de l'Aude, 105 boulevard Barbès, 11838 Carcassonne cedex, mylene.culicchia@aude.gouv.fr

Le SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2021 prévoit une disposition 5A-04 "éviter, réduire et compenser l'impact des nouvelles surfaces imperméabilisées". Il s'agit notamment d'inciter les collectivités à intégrer dans leurs documents d'urbanisme une désimperméabilisation des sols à hauteur de 150 % des zones nouvellement urbanisées. Cette mesure touche les zones déjà urbanisées.
La démarche engagée vise à étudier la prise en compte de cette disposition dans le SCoT du Grand Narbonne. Elle s'attache à définir la superficie et la géolocalisation des zones susceptibles d'être désimperméabilisées, leurs caractéristiques (typologie ; maitrise foncière) et l'opportunité de leur désimperméabilisation. Il s'agit in fine de proposer à la collectivité un outil d'aide à la décision lui permettant de mobiliser des zones urbanisées existantes pour compenser l'imperméabilisation liée à l'urbanisation future. En parallèle, les leviers à mettre en œuvre pour désimperméabiliser sont présentés : documents d'urbanisme, techniques alternatives, financement…
Mots-clefs : Désimperméabilisation, gestion alternative des eaux pluviales

Regain permeable soils in Narbonne

Résumé anglais dans le même style. Pour un texte en français, le résumé en anglais pourra être légèrement plus long (300 mots max).
The SDAGE Rhône-Mediterranean 2016-2021 includes a provision 5A-04 "avoid, reduce and compensate for the impact of new waterproofed surfaces".
This is in particular to encourage communities to include in their urban planning documents rules to regain permeable soils with a percentage of 150% of the newly urbanized areas. This measure affects already urbanized areas.
The approach aims to study the taking into account of this provision in the SCoT of Grand Narbonne.
It defines the area and geolocation of the areas likely to be waterproofed, their characteristics (typology; land management) and the appropriateness of their waterproofing.
Ultimately, it is a question of offering the community a decision-making aid tool enabling it to mobilize existing urbanized areas to compensate for the waterproof. In parallel, the levers to be implemented to waterproofing are presented: town planning documents, alternative techniques, financing, etc.fing linked to future urbanization.

Key words : permeable soils, water management.

INTRODUCTION

L'assainissement tout tuyau et l'imperméabilisation des sols ont engendré de graves problèmes d'inondation et de pollution. Face à ces phénomènes, la politique de l'eau s'est progressivement orientée vers une gestion alternative des eaux pluviales. À partir de la fin du 20e siècle, la prise en compte progressive des problèmes écologiques a enclenché la prise de conscience de la nécessité d'une meilleure maîtrise de l'assainissement et de l'utilisation des eaux pluviales. Progressivement, on comprend que la perturbation du cycle naturel de l'eau engendre des conséquences non seulement au niveau environnemental mais aussi pour la qualité de vie en ville. Redonner de la visibilité aux cheminements de l'eau en ville et gérer les eaux pluviales à la source deviennent des objectifs des collectivités. En conséquence, retrouver des zones plus perméables en ville est un concept qui se développe progressivement. Cela permet de favoriser l'infiltration des eaux pluviales et l'évapotranspiration.

Le concept de désimperméabilisation prend naissance dans ce contexte et consiste d'une part à remplacer des surfaces imperméables par des surfaces plus perméables et d'autre part à promouvoir la gestion des eaux pluviales à la parcelle. Son objectif est d'offrir une opportunité au développement d'aménagements plus perméables et respectueux de l'environnement, à des degrés d'échelle différents, de la planification urbaine au projet lui-même.

La désimperméabilisation concourt à l'adaptation au changement climatique par :

- la réduction du risque inondation en limitant le ruissellement sur les surfaces imperméabilisées ;
- la préservation des ressources naturelles en permettant la recharge des nappes phréatiques ;
- la réintroduction de la nature en ville : le cadre de vie et le bien-être des habitants sont améliorés, des îlots de fraîcheur se créent, la biodiversité se développe et l'attractivité du territoire s'accroit.

Le SDAGE du bassin hydrographique Rhône-Méditerranée-Corse 2016-2021 **[Comité de Bassin Rhône-Méditerranée, 2015]** contribue à cette désimperméabilisation à travers 3 grands principes :

- EVITER en limitant l'imperméabilisation nouvelle des sols par rapport à l'urbanisation future ;
- REDUIRE en limitant l'impact des nouveaux aménagements ;
- COMPENSER en renouvelant le tissu existant via la désimperméabilisation de surfaces déjà aménagées.

Dans l'hypothèse de la compensation, il est indiqué que « la surface cumulée des projets de désimperméabilisation visera à atteindre 150% de la nouvelle surface imperméabilisée suite aux décisions d'ouverture à l'urbanisation prévues dans le document de planification. » **[Poudevigne M et al., 2017]**.

Le Cerema a accompagné la DDTM de l'Aude et les équipes du Grand Narbonne durant un an pour identifier comment intégrer les principes du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin hydrographique Rhône-Méditerranée-Corse 2016-2021 au sein du Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) de la Narbonnaise. Cet article développe le travail d'accompagnement et les résultats obtenus. Le travail a porté principalement sur l'identification de la surface à compenser et du potentiel de désimperméabilisation sur le territoire du SCoT de la Narbonnaise. Par ailleurs, il a examiné les leviers pour désimperméabiliser. L'article vise à présenter ce travail d'accompagnement et la cartographie sur le potentiel de désimperméabilisation à l'échelle du SCoT du Grand Narbonne obtenue à l'issue de ces travaux.

METHODOLOGIE

Détermination de la surface à compenser

La méthode de compensation se décompose comme suit **[Poudevigne M et al., 2017]** :

- Évaluation des surfaces imperméabilisées à terme (1),
- Evaluation des surfaces à compenser après affectation d'un coefficient de modulation (2)

(1) L'évaluation des surfaces imperméabilisées à terme s'obtient à partir des prévisions d'urbanisation en extension issues du SCoT. On affecte à chaque typologie identifiée : extension à vocation résidentielle, à vocation économique ou d'équipements, un coefficient d'imperméabilité. La méthode issue du guide Ville perméable consiste à « adopter des coefficients d'imperméabilisation moyens, qui dépendent des différents types de zones considérées : zones d'activité économiques, zones résidentielles périurbaines, zones urbaines denses, surfaces de voiries ou d'espaces publics.
Ces coefficients moyens peuvent être :
- estimés au regard des coefficients moyens constatés sur le territoire,
- modulés en fonction des orientations énoncées par le SCoT concernant les coefficients minimaux de pleine terre, coefficients maximaux d'imperméabilisation, coefficients de biotope et règles incitatives pour l'aménagement des voiries et espaces publics. »

(2) La surface à compenser s'obtient par le calcul suivant :

$S_{compensation} = C_{mod} * C_{imperméabilisation} * S_{urba}$

Avec $C_{imperméabilisation}$ = coefficient d'imperméabilisation à terme

S_{urba} = surfaces ouvertes à l'urbanisation

C_{mod} = coefficient de modulation. Ce coefficient est compris entre 0 et 1 et peut être variable en fonction de la politique de gestion des eaux pluviales menée sur le territoire.

Plus un SCoT sera volontaire dans la limitation de sa consommation future d'espace urbain et en particulier au sein des prescriptions de son document d'orientations et d'objectifs (partie opposable du SCoT), plus la quantité de surface à désimperméabiliser sera limitée.

Evaluation du potentiel de désimperméabilisation

Il s'agit ensuite de croiser les données du sous-sol (infiltrabilité des eaux) avec celles de la structure superficielle du sol (imperméabilité du sol) suivant une méthode déjà éprouvée **[Vallin V et al., 2016] , [Petter C , 2013] , [Roche L , 2017] :**

- L'infiltrabilité des eaux est déterminée suite à un travail géomatique qui permet de prendre en compte la texture des sols **[Vaysse K , 2016]** et les critères environnementaux qui permettent d'identifier des points de vigilance pour désimperméabiliser certaines zones (zones de captage des eaux potables, sols pollués, pente trop importante…). On réalise ensuite une hiérarchisation des secteurs en fonction du nombre de critères environnementaux non propices à l'infiltration. Ces critères sont classés en tant que critères d'incidence moyenne ou forte en fonction de l'intensité de la contrainte environnementale.
- L'imperméabilité du sol est variable en fonction de l'usage du sol ; cette connaissance est possible grâce à la couche d'information « Imperviousness » issue du programme européen Copernicus. la couche HLR imperviousness est créée à partir d'une classification supervisée semi automatique (images satellites haute résolution (IRS-P6/Resourcesat-2 LISS-III, SPOT 5 and Landsat 8) et de CLC) des zones bâties / non bâties avec amélioration visuelle ultérieure des résultats de classification et l'origine du degré d'étanchéité est basé sur des images saisonnières multi-temporelles continues (3 par an), ce qui permet de limiter les influences des variations saisonnières du couvert végétal. Les millésimes précédents sont aussi utilisés pour faire des vérifications et déterminer les changements accumulés. Le résultat final est un jeu de données raster de zones bâties et non bâties, y compris le degré de étanchéité de 0 à 100 avec une résolution spatiale de 20 x 20 m. Dans le cas du SCoT du Grand Narbonne, le modèle d'occupation du sol a été utilisé pour identifier et classer les secteurs les plus imperméabilisés.

La désimperméabilisation est d'autant plus pertinente qu'elle porte sur les zones les plus imperméabilisées.

Il est ici proposé de sélectionner les surfaces imperméabilisées à plus de 60 % en calculant le taux d'imperméabilisation de chaque catégorie d'occupation du sol. Ces taux sont disponibles à l'échelle du SCoT (moyenne des 37 communes) et à l'échelle de chaque commune car ils peuvent varier en fonction des caractéristiques de la commune et de son mode d'urbanisation.

Identification des leviers à mobiliser pour réaliser la désimperméabilisation

Les leviers suivants ont été analysés :

- Les leviers techniques : développement des techniques alternatives
- Les leviers opérationnels : dispositions des plans locaux d'urbanisme et outils de l'aménagement
- Les leviers financiers

RESULTATS

Surface à compenser

Sur le territoire du SCoT de la Narbonnaise d'une surface de 943km^2, la surface totale à urbaniser est estimée à 800 ha dont :

- 550 hectares dédiés au développement résidentiel,
- 200 hectares pour les espaces à vocation économique,
- 50 hectares pour le développement d'équipements notamment touristiques.

On considère que les surfaces à vocation résidentielle seront en moyenne imperméabilisées à hauteur de 50%, celles à vocation économique à hauteur de 80% et celles accueillant des équipements à hauteur de 90%.
S la base de 800 hectares en extension, la surface qui sera à terme imperméabilisée est de :

$C_{imperméabilisation} * S_{urba} = C_{résidentiel}*S_{résidentiel} + C_{économique}*S_{économique} + C_{équipements}*S_{équipements} =$
0,5*550 + 0,8*200 + 0,9*50 = 480 ha.

La surface totale qui sera imperméabilisée est estimée à 480 hectares.
La surface à désimperméabiliser maximale est égale à Sdésimp = Cmod*1,50*480.

Le coefficient de modulation a pour but de prendre en compte le volontarisme des documents d'urbanisme en matière de limitation des effets de l'imperméabilisation. En fonction des règles prescriptives du SCOT, ce coefficient de modulation peut varier entre 0,1 et 0,5. Ainsi, la surface à désimperméabiliser est comprise entre 0,1 * 1,50 * 480 = 72 ha et 0,5 * 1,50 * 480 = 360 ha. Au vu des dispositions du SCoT, la surface à désimperméabiliser en compensation des extensions urbaines est comprise entre 72 hectares et 360 hectares.

Potentiel d'infiltrabilité des sols

Les zones d'infiltrabilité sont déterminées de la manière suivante (figure 1) :

Zones d'Infiltrabilité	Possibilité d'infiltration	Action à réaliser
	Infiltration possible	Desimperméabilisation possible
	Infiltration possible faiblement contrainte (avec 1 CIM)	Desimperméabilisation possible mais avec 1 CIM
	Infiltration possible moyennement contrainte (avec 2 CIM)	Desimperméabilisation possible mais avec 2 CIM
	Infiltration possible fortement contrainte (avec 3 CIM)	Desimperméabilisation possible mais avec 3 CIM
	Infiltration possible mais très fortement contrainte (avec au moins 1 CIF)	Desimperméabilisation très fortement contrainte

Figure 1 Catégories des zones d'infiltrabilité

CIM = critère d'importance moyenne ; CIF = critère d'importance forte

La carte d'Infiltrabilité ci-contre (figure 2) met en lumière que sur une majeure partie du territoire l'infiltration est possible mais très fortement contrainte (c'est-à-dire avec au moins un critère d'importance forte et plus).

Ces secteurs fortement et très fortement contraints correspondent à une superposition de critères limitatifs sur des territoires majoritairement concernés par des risques remontées de nappes d'intensité moyenne et fort mais aussi par des risques de pente et résurgence moyen et fort. Sur ces zones fortement et très fortement contraintes, l'infiltration ne se fera qu'en prenant des précautions (système de cloisons en présence d'une pente forte, etc.).

D'autre part, la lecture de cette carte montre que sur certaines tâches urbaines (Gruissan, Port-la-Nouvelle, Narbonne Plage, Leucate,…), l'infiltration est possible avec très peu de contraintes ce qui laisse pressentir une certaine souplesse dans les recommandations applicables pour réaliser une désimperméabilisation.

Dans le Nord-Ouest du territoire, il y a aussi des secteurs peu impactés par des contraintes et sur lesquels il est possible de réaliser de la désimperméabilisation.

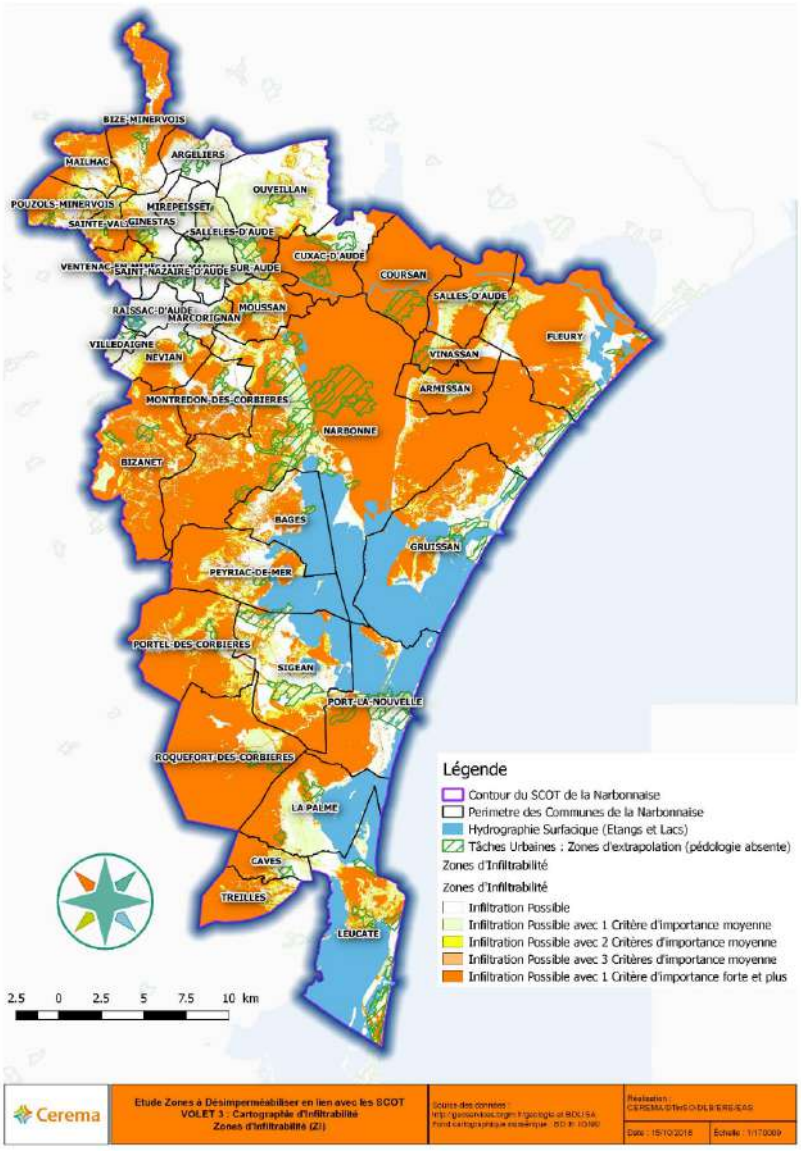


Figure 2 Cartographie du potentiel d'infiltrabilité sur le territoire du SCoT du Grand Narbonne

Potentiel de désimperméabilisation des sols

A l'issue de la démarche SIG d'identification des zones et des surfaces propices à la désimperméabilisation du Grand Narbonne au sein des enveloppes urbaines, le potentiel théorique repéré permet de répondre aux objectifs de compensation qui résultent du projet porté par le SCoT. Cette méthode donne de premières indications sur les zones favorables à la désimperméabilisation. Elle nécessitera d'être complétée projet par projet par des données pédologiques permettant de vérifier les capacités d'infiltration des sols. (cf. supra extrapolations faites sur les zones urbaines).

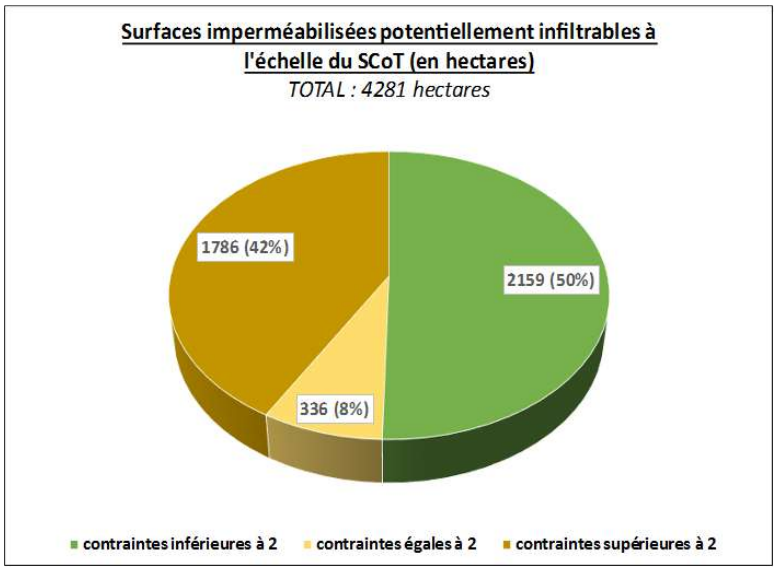


Figure 3 Surfaces potentiellement désimperméabilisables en fonction des contraintes environnementales

Il ressort des analyses produites sur le SCoT du Grand Narbonne une surface théorique de 2159 hectares (figure 3) potentiellement mobilisables pour répondre aux objectifs de compensation et de désimperméabilisation identifiés ci-dessus. L'analyse devra ensuite être affinée (leviers fonciers, financiers, techniques) projet par projet en fonction d'une approche de faisabilité et d'opportunité : maitrise foncière des terrains, techniques de gestion des eaux pluviales appropriées aux sites, couts d'investissement et fonctionnement.

Au niveau du SCoT ou de la communauté d'agglomération, cela nécessitera de recenser les projets urbains ou de recyclage foncier à l'échelle du périmètre du Grand Narbonne (exemples : Narbonne plage ; friche supermarché Gruissan…) afin d'estimer la surface cumulée des projets pouvant contribuer à désimperméabiliser les espaces urbains existants et de se doter d'un outil de suivi de la surface désimperméabilisée pour mesurer l'atteinte des objectifs de compensation précités issus de la disposition du SDAGE. A titre d'illustration, la Métropole de Lyon suit la surface désimperméabilisée par projet d'aménagement suite à la remise en état de friches urbaines ou d'opérations de renouvellement urbain.

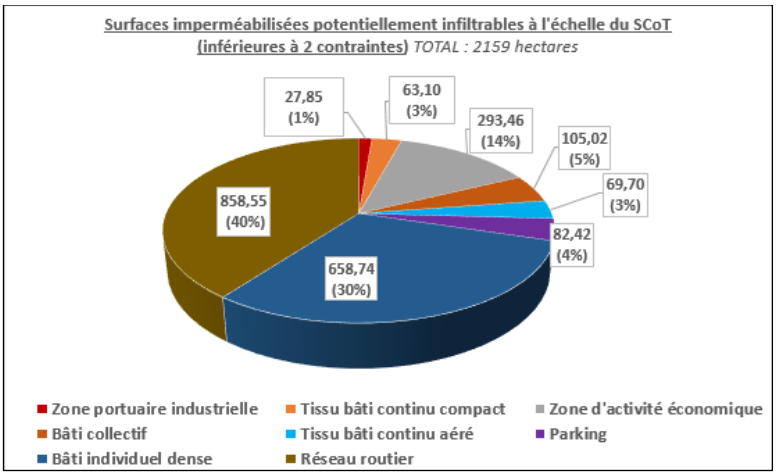


Figure 4 Surfaces désimperméabilisables en fonction de l'usage des sols

Le potentiel théorique de désimperméabilisation (2159 hectares) est détaillé figure 4 par poste d'occupation du sol issu du modèle d'occupation du sol du Grand Narbonne. Les postes les plus importants relèvent par ordre décroissant des typologies « réseau routier », « bâti individuel dense » et « zones d'activités ».

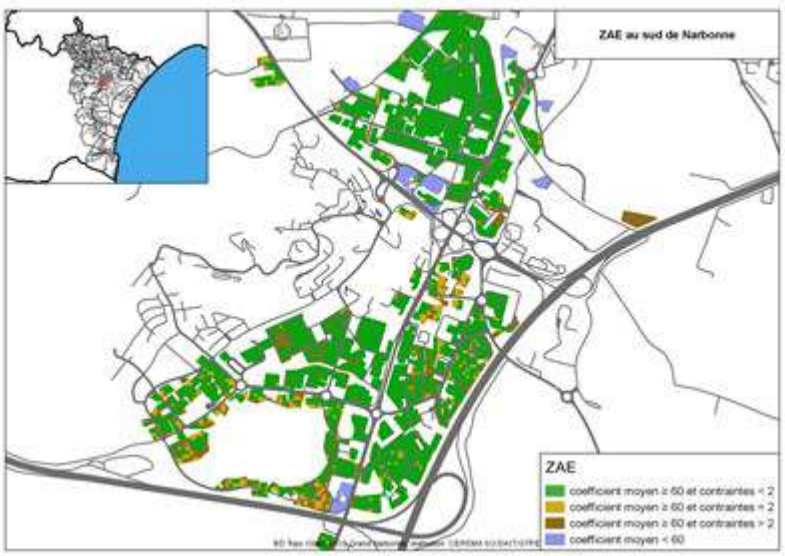


Figure 5 Zones d'activités économiques du Sud de Narbonne

A Narbonne, les zones d'activités économiques (ZAE) ont un taux d'imperméabilisation de plus de 80%, ce qui est un taux courant pour ce type d'occupation du sol (figure 5). Les ZAE représentent le 2ème poste le plus imperméabilisé de la commune.

La Figure 5 permet d'identifier sur une zone géographique donnée les secteurs les plus propices à l'infiltration des eaux pluviales. Les secteurs identifiés en vert sont les plus favorables en théorie à la désimperméabilisation car ils présentent un nombre de critères environnementaux limitatifs inférieur à 2.

Cette analyse théorique doit être complétée par un examen des leviers fonciers éventuels pour intervenir sur ce type de secteurs et des visites de terrain afin de vérifier les résultats obtenus par traitement de système d'information géographique.

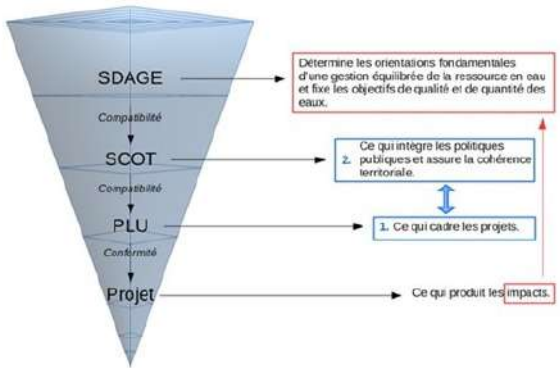
Leviers à mobiliser

Les leviers à mobiliser sont aussi bien la prise en compte de la désimperméabilisation dans les documents d'urbanisme (PLU, SCoT) que les leviers techniques (techniques alternatives) et les leviers financiers.

Les leviers d'urbanisme

Si la désimperméabilisation s'adresse à tout maître d'ouvrage public ou privé disposant de surfaces imperméabilisées (voiries, parkings, zones d'activités, places, terrasses…), elle s'organise au niveau des documents de planification de l'urbanisme (SCoT, PLU-i).

Figure 6 La pyramide de compatibilité des documents de planification de l'urbanisme



Le SCoT définit un projet d'aménagement et de développement durables pour le territoire (figure 6). Il analyse la consommation d'espaces sur les dix ans précédant l'arrêt du projet et justifie les objectifs chiffrés de limitation de cette consommation. Les surfaces à compenser seront calculées en fonction des besoins en extension foncière identifiés dans le SCoT.

Plus le contenu du SCoT sera « vertueux » dans la limitation de sa consommation d'espaces future et au sein des prescriptions de son document d'orientations et d'objectifs (partie opposable du SCoT), plus les obligations de compensation seront allégées.

Le Cerema a identifié dans les différents volets du SCOT, diagnostic, PADD et document d'orientations et d'objectifs (DOO) du SCoT du Grand Narbonne les dispositions en faveur de la limitation de l'imperméabilisation ou de la désimperméabilisation. •

Le DOO du SCoT de la Narbonnaise évoque la désimperméabilisation au sein de ces 3 axes principaux

- Axe 1 : S'ouvrir pour se démarquer (compétitivité économique, tourisme, coopérations territoriales, transports, numérique)
- Axe 2 : Attirer par la qualité (services et commerces de proximité, maillage territorial, offre de mobilités, préservation des ressources naturelles)
- Axe 3 : Aménager autrement (développement urbain maîtrisé, besoins en logement, aménagement du littoral, adaptation aux risques et au changement climatique)

L'axe 3 du SCoT « aménager autrement » est l'axe comportant le plus de dispositions en faveur de la désimperméabilisation et de la limitation de l'imperméabilisation nouvelle des sols. Cet axe « vise à proposer de nouveaux modes d'aménager adaptés aux enjeux liés à l'adaptation au changement climatique et à la transition écologique et économique » : des aménagements moins imperméabilisés, un renouvellement des stations littorales, une optimisation du foncier déjà urbanisé (centres-villes, zones économiques), des opérations de renouvellement urbain prenant en compte la désimperméabilisation et l'infiltration des eaux pluviales.

Axe 3/3.4 Intégrer la gestion des risques et des ressources en amont du développement/3.4.2 Anticiper la gestion des risques inondation et littoraux par une stratégie de recomposition spatiale/Étudier les opportunités de désimperméabilisation de l'existant

- Lors des opérations de renouvellement urbain (et en particulier celles de grande ampleur), les collectivités doivent mener une réflexion sur les opportunités de désimperméabilisation. Outre l'intérêt hydraulique, la désimperméabilisation peut donner l'occasion aux collectivités de repenser la configuration spatiale de leur territoire en traitant notamment certains secteurs imperméabilisés (parkings, places, toits, voiries), en particulier ceux laissés à l'abandon, ainsi qu'en redonnant un contexte plus favorable à la nature en ville et à ses bienfaits. Il s'agit également de réduire les pressions sur les réseaux d'assainissement ainsi que les risques liés aux ruissellements pluviaux.

Encadré 1 Extrait du SCoT

Le lien entre le SDAGE et le SCoT est un lien de compatibilité. C'est la transposition des dispositions du SDAGE dans le SCoT qui permettra d'assurer leur prise en compte par le PLU.

Les plans locaux d'urbanisme devront être compatibles avec les dispositions du SCoT.

Les demandes d'autorisation des projets (permis de construire et permis d'aménager principalement) sont instruits au regard des Plans locaux d'urbanisme, dans un lien de conformité au règlement. Seuls les projets les plus importants doivent démontrer leur compatibilité avec le SCoT, dont les lotissements lorsqu'ils portent sur une surface de plancher de plus de 5 000 mètres carrés. Dès lors, la plupart des projets du territoire

échappent à l'obligation de regard et de prise en compte du SCoT. En conséquence, pour couvrir l'ensemble des possibilités offertes par le code de l'urbanisme pour mettre en œuvre les orientations du SDAGE, il est nécessaire de mettre en perspective le document d'orientations et d'objectifs avec la façon dont il peut être utilisé dans les plans locaux d'urbanisme et cartes communales.

De la même manière, les règlements des PLU doivent être travaillés en fonction de la façon dont les demandes d'autorisations sont constituées puis instruites.

La lecture des documents d'urbanisme a été croisée avec les leviers mobilisables au sein du code de l'urbanisme au bénéfice de ces mêmes objectifs. A partir de ce croisement, des pistes de renforcement du document d'orientations et d'objectifs (DOO) du SCoT sur ces thèmes ont été proposées. Pour les espaces déjà artificialisés, le Cerema a proposé par exemple de mobiliser la réglementation relative au maintien de la biodiversité, à la préservation ou à la remise en bon état des continuités écologiques et aux objectifs de qualité paysagère (articles L141-10, L141-18).

Les leviers techniques

Une fois les leviers de l'urbanisme identifiés, les leviers techniques ont été analysés : puits, bassins d'infiltration, pavés poreux, jardins de pluie, parkings drainants **[Ansart C et al., 2014] , [Luxembourg , 2012] , [Poudevigne M et al., 2017] (figure 7)**. Une fiche a été réalisée par type d'aménagement, avec la description de son fonctionnement, ses avantages et inconvénients, son coût et la prise en compte des critères environnementaux pour sa mise en œuvre.

Figure 7 Aménagements de désimperméabilisation en zone urbaine (Port-Leucate)

Pour exemple, la prise en compte des contraintes environnementales pour la mise en œuvre des puits d'infiltration a été réalisée **[Thomas G, 2016] (figure 8)**.

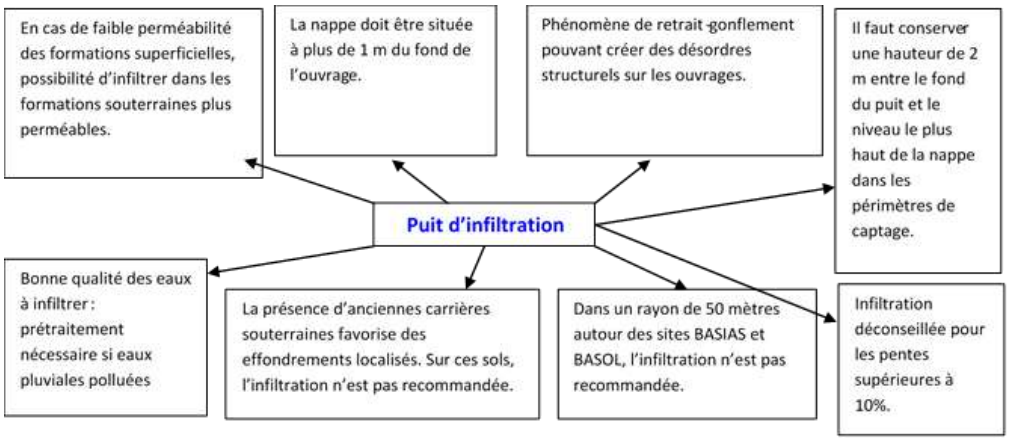


Figure 8 Préconisations pour le puits d'infiltration en fonction des contraintes environnementales

Leviers financiers

Les financements peuvent être directs via les Agences de l'eau si le projet de désimperméabilisation est couplé avec l'introduction de techniques alternatives de gestion des eaux pluviales.

Ils peuvent être indirects en fonction de la localisation du projet (quartier politique de la ville, littoral) et de sa nature (restauration de continuité écologique, renaturation pour expansion des crues, végétalisation de toitures, friches urbaines en renouvellement, aménagement d'espaces publics…). L'objet principal de l'opération n'est pas, ou pas uniquement, la désimperméabilisation des sols mais comporte d'autres volets qui peuvent mobiliser d'autres sources financières.

CONCLUSION

La mise en œuvre de la désimperméabilisation sur un territoire repose sur :

- une volonté politique forte et une exemplarité de l'action publique (effet d'entraînement) ;
- des coûts de désimperméabilisation politiquement et socialement acceptables au regard des gains ;
- des bénéfices pour la population à valoriser : santé, bien-être, cadre de vie ;
- des opportunités au sein des projets urbains à mobiliser au profit d'opérations emblématiques ;
- une anticipation et une intervention publique en amont des projets auprès des aménageurs et promoteurs (négociation) ;
- de l'ingénierie qualifiée prenant en compte les conditions climatiques locales ;
- la sensibilisation des habitants et notamment des résidents non permanents dans le cas des communes touristiques.

L'expérience menée sur le Grand Narbonne a permis de mobiliser les acteurs du territoire sur la prise en compte de la désimperméabilisation dans leur politique d'urbanisme et de gestion des eaux pluviales. L'identification du potentiel de désimperméabilisation reste une première étape, il leur revient désormais de s'emparer du sujet et de faire naître des projets concrets de désimperméabilisation sur leur territoire.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des communes ayant contribué à l'étude, notamment aux travers de rencontres lors des visites de terrain et comités de suivi.

REFERENCES

- Ansart C, Champres J, Saulais M (2014) - Osons désimperméabiliser les sols ! Journée Technique des Eaux Pluviales, Recueil des interventions. 14 pages, Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse

- Comité de Bassin Rhône-Méditerranée (2015) – Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux Rhône-Méditerranée 2016-2021. Directive Cadre Européenne sur l'eau pour le bon état écologique des milieux aquatiques. 512 pages

- Luxembourg (2012) – Lignes Directrices concernant les meilleures pratiques pour limiter, atténuer ou compenser l'imperméabilisation des sols. Union Européenne Environnement. 68 pages

- Poudevigne M., Billon V., Charrier G., Pojer K. (2017) – *Vers la ville perméable : Comment désimperméabiliser les sols.* Guide technique du SDAGE. 64 papes.

- Petter C (2013) – Définition des potentialités d'infiltration des eaux pluviales sur le territoire de la Communauté Urbaine de Strasbourg au regard des contraintes locales – Rapport final, Antea Group, 79 pages.

- Roche L (2017) - Carte d'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales. Schéma de Gestion des Eaux Pluviales, Commune de Viry. bureau d'études Nico Ingénieurs Conseils, 24 pages.

- Thomas G (2016) - Guide pour la mise en œuvre des techniques alternatives. Gestion des eaux pluviales, Symasol. 34 pages.

- Vallin V, Dumont E, Petillon G, Gerolin A, Degrave M, Le Nouveau N, Ferrier V, Borst W (2016) - Cartographier l'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales : l'expérience de 6 collectivités en France. Les enseignements d'expériences francaises et étrangères, Cerema, 244 pages

- Vaysse K (2016) - Thèse Application et développement de méthodes de cartographie numérique des propriétés des sols à l'échelle régionale : cas du Languedoc-Roussillon.:. Université de Montpellier

Maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols en zone maraîchère sur les hauteurs de SEDAN (Ardennes - France) : constats, études, travaux et premiers résultats (Fafournoux & Morhain)

Maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols en zone maraîchère sur les hauteurs de SEDAN (Ardennes - France) : constats, études, travaux et premiers résultats.

Pierre-Yves FAFOURNOUX[1], Eric MORHAIN[2]

[1] Ingénieur Conseil, VOIRON, France, mel : Pierre-Yves.Fafournoux@orange.fr
[2] EMC Environnement, TALANT, France, mel : emc.environnement@orange.fr

Le poster présente les travaux de maîtrise du ruissellement sur les hauteurs de SEDAN réalisés en 2012.
La surface concernée est de 470 hectares répartis sur les quatre communes de BALAN, BAZEILLES, SEDAN et GIVONNE.
Les terres agricoles appartiennent à 139 propriétaires et sont consacrées à l'exploitation maraîchère.
Une étude préliminaire a été engagée en 2000, dans le cadre d'une opération d'aménagement foncier soutenue par le Conseil Général du Département des Ardennes.
Les objectifs du projet n'ont pas suscité d'opposition locale, et après l'épisode pluvieux du 8 juin 2007, ils ont été repris par l'Association Foncière Intercommunale et la Communauté de Communes du Pays Sedanais.

Bien que la surface traitée soit relativement faible, et que les techniques mises en oeuvre soient simples et robustes, il aura fallu plus de 10 années pour aboutir à l'achèvement complet des travaux.
Cette expérience illustre la difficulté d'intervenir sur un parcellaire très morcelé et elle montre l'inadaptation des procédures administratives et financières actuelles pour engager de telles opérations dans des délais réalistes.

***Mots-clefs** : zones agricoles maraîchères, aménagement foncier, maîtrise du ruissellement.*

Control of runoff and soil erosion in market gardening areas on the heights of the city of SEDAN (Ardennes - France) : observations, studies, works and first results.

The poster presents the runoff control work on the heights of SEDAN carried out in 2012.
The total area is 470 hectares spread over the four municipalities of BALAN, BAZEILLES, SEDAN and GIVONNE. The agricultural land belongs to 139 owners and is used for market gardening.
A preliminary study was launched in 2000 as part of a land development operation supported by the Department of the Ardennes.
The objectives of the project did not arouse local opposition, and after the flash flood of June 8 th/2007, they were taken over by the "Communité de Communes du Pays Sedanais".
Although the treated area is relatively small, and the techniques used are simple and robust, it will have taken more than 10 years to complete the works.
This experience illustrates the difficulties of intervening on a fragmented plot and it shows the inadequacy of current administrative and financial procedures to achieve such operations within realistic deadlines.

***Key words** : market gardening, land development, runoff control.*

Video : https://veille-eau.com/videos/association-fonciere-de-balan-bazeilles-givonne-sedan-l-association-et-les-aleas-climatiques-agence-de-l-eau-rhin-meuse

PRESENTATION GENERALE

L'Association Foncière Intercommunale de Remembrement (AFI) des quatre communes de BALAN, BAZEILLES, GIVONNE et SEDAN (Ardennes) assure la création et l'entretien des chemins d'exploitation, fossés et ouvrages d'intérêt collectif, sur une surface de 470 hectares de terres agricoles consacrées aux productions maraîchères, sur les hauteurs de SEDAN. L'AFI regroupe 139 propriétaires des parcelles.

A la suite d'importants dégâts (érosion de terres, voiries dégradées, coulées de boues, …) résultant de plusieurs épisodes pluvieux et des conditions d'exploitation intensive des terres, il est apparu nécessaire de repenser la question de la maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols, avec un objectif de développement durable. Cette réflexion a été menée dans le cadre d'un projet d'aménagement foncier, visant à réorganiser le parcellaire des exploitations maraîchères afin de :

- regrouper les propriétés pour réduire les dépenses d'exploitation inutiles,
- diminuer le nombre de parcelles et améliorer la fonctionnalité des îlots (le nombre de parcelles est ainsi passé de 843 à 375 et la surface moyenne des parcelle est passée de 0,56 ha à 1,25 ha),
- restructurer la voirie de desserte agricole et remettre en état le réseau de chemins principaux,
- résoudre des problèmes de ruissellement et d'érosion des terres,
- préserver les emprises foncières nécessaires pour les aménagements de la voirie et de desserte, les ouvrages hydrauliques et les zones de mise en valeur écologique.

Ces orientations ont été présentées dans l'étude d'environnement réalisée en 2000 par les auteurs. Elles ont été confirmées dans l'Avant-Projet Sommaire de travaux connexes à l'Aménagement Foncier établi en 2006.

Après l'épisode pluvieux intense du 8 juin 2007 qui a causé des inondations en aval dans le centre de SEDAN, le projet a été actualisé, et l'AFI s'est coordonnée avec la Communauté de Communes du Pays Sedanais, qui est chargée de l'assainissement pluvial, afin d'obtenir des financements complémentaires.
L'Avant Projet Détaillé des travaux a été élaboré à la fin 2007. Il conserve et précise les principes initiaux :

- la réorientation des parcelles perpendiculairement à la pente, avec création de bandes enherbées, de haies et de talus pour ralentir les écoulements et réduire l'érosion des sols ;
- la modification du tracé des chemins de desserte du parcellaire, en suivant au mieux les lignes de niveau et en les bordant de noues et de fossés de collecte des eaux,
- l'aménagement de 9 bassins de rétention des eaux de ruissellement.

Le projet comprend la création de 26 bandes enherbées et de noues sur une longueur de 8570 ml (soit une surface totale de 4 ha), la reconstitution de 730 ml de haies, la suppression de 2600 ml de chemins devenus inutiles et la création de 9 bassins de rétention sur une surface de 2 ha, offrant une capacité de 7500 m^3, ce qui correspond à 50% du volume du ruissellement en cas d'orage décennal (32 m^3/ha).

Un travail important de sensibilisation des propriétaires, des exploitants agricoles et des élus des communes a été conduit, ce qui a facilité d'une part l'acceptation des échanges fonciers et des propositions et d'autre part la mise en place de pratiques agricoles plus respectueuses des sols et de l'environnement (nouveaux tracés des chemins de desserte, création de haies, de talus et de noues, réduction des traitements phytosanitaires, …).

Après obtention des autorisations administratives et des aides financières, la maîtrise d'œuvre des travaux a été confiée au groupement des bureaux d'études DUMAY Infra / HYDRATEC / EMC Environnement.
Les travaux ont été engagés en 2010 et terminés en 2012.

Le coût total des études et des travaux s'est élevé à 900 000 € HT soit 1 900 € HT./ha.
L'AFI et la Communauté de Communes du Pays Sedanais ont bénéficié des aides financières du Département des Ardennes et de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

QUELQUES PHOTOS AVANT ET APRES LES TRAVAUX

Le Poster présente l'état initial du site, les techniques mises en œuvre, les travaux effectués.

Les deux photos ci-dessous montrent l'état de saturation des sols argilo-sableux des plateaux, par temps de pluie et l'effet des passages fréquents des engins agricoles dans les parcelles (janvier 2000).

Les travaux réalisés ont consisté à repenser le tracé de tous les chemins de desserte et à insérer des petits aménagements hydrauliques, telles que des talus, des bandes enherbées et des noues, en amont des neuf bassins de rétention prévus. Cela permet une restructuration douce du paysage, comme le montre les photos ci-dessous.

La réalisation des bandes enherbées demande un travail soigné pour leur implantation et leur dimensionnement. Elles ont été équipées de petits seuils transversaux, à la fois pour augmenter leur capacité de rétention et pour aménager l'accès des engins agricoles aux parcelles.

Les intempéries survenues au cours du chantier ont conduit à reprendre certains de ces ouvrages.
Quelques bandes enherbées endommagées ont dû être remodelées et revégétalisées.
Les plantations d'arbres ont été équipées de protection contre les chevreuils.

Il faut souligner le rôle indispensable du Maître d'Œuvre pour le contrôle des travaux des petits ouvrages hydrauliques (bandes enherbées, noues), dont les dimensions et les pentes doivent être bien respectées par l'Entreprise, pour que le ralentissement de l'eau soit assuré.

RETOUR D'EXPERIENCE

Cette expérience positive engagée entre 2000 et 2012 illustre cependant la complexité de telles opérations.
Le projet a porté sur 470 hectares. Il a couté 900 000 € HT et nécessité plus de 10 ans pour arriver à terme.

Les études ont été longues : d'abord l'étude préalable portant sur les aspects agricoles, hydrauliques et fonciers. Ce n'est qu'après l'épisode pluvieux de 2007 qu'ont été engagées les études d'Avant-Projet, l'Etude d'Impact sur l'environnement et le Dossier d'Autorisation au titre de la loi sur l'eau. Le projet a été affiné après l'Enquête Publique, dans le cadre de la préparation du Dossier de Consultation des Entreprises.

La longueur du processus aboutissant aux autorisations et à l'obtention des financements n'a pas entamé la confiance des agriculteurs. La persévérance des membres du bureau de l'AFI doit être soulignée.

Les résultats recherchés ont finalement été atteints et les exploitants agricoles sont aujourd'hui satisfaits.
Le projet a été nominé lors des Trophées de l'Eau organisé par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse en 2015.
Le site est régulièrement visité et montré en exemple.

Mais si l'on veut dans le futur mener à bien de telles opérations dans des délais réalistes, et répondre ainsi aux nouveaux défis agricoles et environnementaux, il faudra simplifier la chaîne décisionnelle, réduire le nombre des intervenants (Maîtres d'Ouvrage et financeurs), et alléger les procédures d'instruction administrative.

Diagnostic hydrologique et proposition d'aménagements contre le risque inondation par hydrologie distribuée sur le bassin versant de la Chère (Ducatez *et al.*)

Diagnostic hydrologique et proposition d'aménagements contre le risque inondation par hydrologie distribuée sur le bassin versant de la Chère

Jean-Paul DUCATEZ[1], Grégory SEILLER[1], Erwan ALLARD[1]

[1] DHI, 2/4 rue Edouard Nignon 44300 Nantes, France, france@dhigroup.com

Des inondations sont survenues plusieurs fois en France ces dernières années, comme à Châteaubriant (44) en juin 2018. La Chère, qui traverse la ville, a un bassin versant dont la typologie est fréquente : une partie amont assez rurale et agricole pour une vallée habitée et urbanisée. Les ruissellements, accentués par des cultures parfois à sol nu et les zones imperméabilisées, provoquent un apport de volume d'eau dans les cours d'eau rapide et conséquent. Une fois arrivés aux abords de la ville, ces apports sont parfois supérieurs aux capacités d'écoulement des rivières calibrées par les ouvrages urbains. Un modèle hydrologique via MIKE SHE a permis de constituer un diagnostic distribué du fonctionnement du bassin, de connaître les processus naturels à l'échelle de la parcelle et d'identifier les zones de production, les axes préférentiels d'écoulement et les zones d'accumulation. Ce modèle a été couplé avec un modèle hydraulique unidimensionnel (MIKE HYDRO) afin d'identifier en même temps les verrous hydrauliques et les zones inondées en centre urbain. Grâce à ce modèle, des aménagements contre les inondations ont été proposés et leurs effets simulés afin d'en juger la pertinence. Ce type de modèle permet d'intégrer des ouvrages écrêteurs sur cours d'eau, des ralentisseurs sur les axes de ruissèlements, des suppressions de verrous hydrauliques, l'impact d'un programme de replantation de haies ou encore les effets d'un changement des pratiques culturales. L'évaluation des changements qui surviennent sur le bassin versant est réalisée de manière dynamique pour une meilleure gestion du risque inondation.

Mots-clefs : Ruissellements, hydrologie distribuée, inondations.

Hydrological diagnosis and proposal for flood risk management by distributed hydrology on the Chère catchment area

Flood events has occurred several times in France in recent years, as in the city of Châteaubriant in June 2018. The watershed of the river Chère, which cross the city centre, has a common typology: the upstream part is rural and agricultural when the valley is inhabited and urbanized. The runoffs, accentuated by the bare soils and the paved areas, cause a flash water discharge in the streams sometimes bigger than the flow capacity of the river structures in the city. A distributed hydrologic model (MIKE SHE) was set up to diagnose the watershed behavior and to learn about the natural processes, the runoff production area, flow axis and accumulation area at the local and global scale. This model has been coupled with an 1D hydraulic model (MIKE HYDRO) in order to identify the dysfunction caused by any structure. Thanks to the models, solutions were designed to protect against the floods and tested with simulations. This type of model allows to simulate effects of new structures on rivers, but also on flow axis, effects of hedges replantation and changes in cultivation practices. The evaluation of the changes in the watershed is made dynamically for a better flood risk management.

Key words : runoff, distributed hydrology, floods.

INTRODUCTION

Sur le bassin versant de la Chère à Châteaubriant (44), un épisode orageux intense en juin 2018 a causé des inondations par débordement de cours d'eau mais également par ruissellement. La Chère et son affluent le Rollard traversent le centre de Châteaubriant et leurs morphologies sont donc fortement influencées pour les ouvrages présents. Lors de cet événement, les apports en eau de leurs bassins versants respectifs ont été si importants et rapides qu'ils ont dépassé les capacités de protection prévues par les ouvrages écrêteurs. Les objectifs de l'étude menée ont été de décrire le fonctionnement à la fois hydrologique et hydraulique du bassin versant, et d'étudier les effets de plusieurs scénarios d'aménagements de protection contre les inondations. Une modélisation par hydrologie distribuée a été mise en place et a l'avantage, par rapport aux modèle globaux, de pouvoir connaître la contribution des ruissellements sur le territoire à travers une cartographie détaillée de la production du ruissellement.

SITE D'ETUDE

Le bassin versant de la Chère à Châteaubriant (78 km^2) est situé au Nord du département de Loire-Atlantique (Figure 1). La partie étudiée se concentre sur les communes de Châteaubriant et de Soudan, où elle prend sa source. La Chère traverse le lieu-dit habité du Nid Coquet à Soudan puis le centre bourg de Châteaubriant en se séparant en deux bras. La confluence du Rollard, un de ses affluents, avec la Chère se trouve en plein de centre de la ville ce qui rend le réseau hydrographique complexe au sein de la ville.

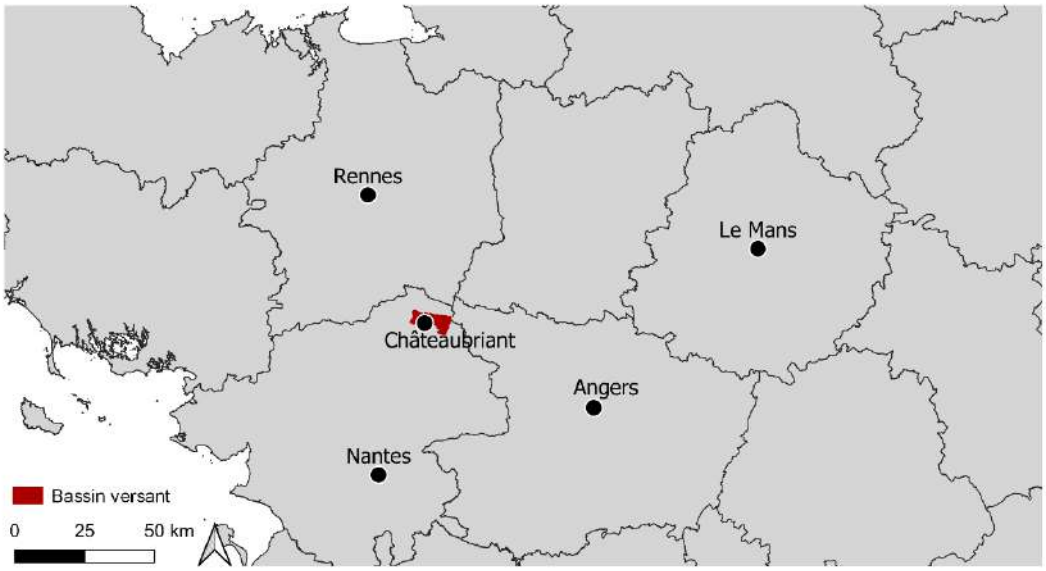


Figure 1 : Carte de localisation du bassin versant de la Chère à Châteaubriant, Loire-Atlantique.

L'EVENEMENT DE REFERENCE

Le 11 juin 2018, entre 100 et 110 mm sont tombés en l'espace de huit heures. Cet événement, dont la période de retour est difficile à estimer par le manque de données horaires à la station pluviométrique, a été précédé par un autre événement le 9 juin où 30 mm sont tombés en une heure, favorisant la saturation des sols. Le débit enregistré en aval de la ville de Châteaubriant a atteint 14,5 m^3/s, qualifiant la crue de vicennale. Cet événement a causé des inondations un peu partout sur le bassin versant et notamment dans le centre urbain de Châteaubriant où de nombreux bâtiments ont été impactés (Figure 2).

Figure 2 : Emprise des inondations (gauche) et photo aérienne lors de l'événement du 11 juin 2018.

Les quatre retenues sèches situées en amont de la zone urbaine et dimensionnées pour des pluies décennales (378 000 m^3 de rétention possible) ont toutes été remplies et sont passées en surverse.

CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT

Topographie

Le bassin de la Chère est constitué de plaines et de vallons successifs, faisant de la vallée de la Chère une vallée peu encaissée (Figure 3). En amont, des plateaux précèdent des versants à forte pentes.

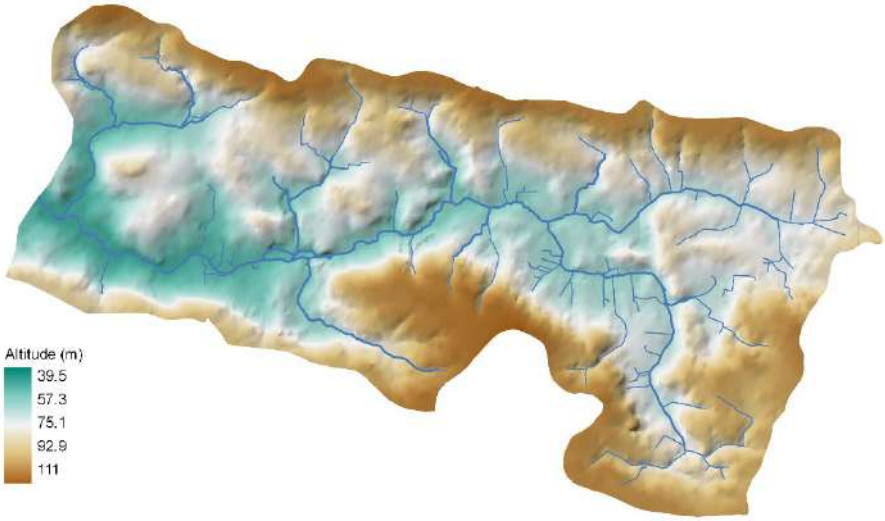


Figure 3 : *Topographie du bassin versant. Source : IGN Référentiel à Grande Echelle (RGE)*

Textures des sols

Les textures rencontrées (voir Figure 4) sur le bassin versant de la Chère sont assez homogènes et sont principalement représentées par des complexes limono-sableux à limono-argileux en fonction de la topo séquence rencontrée du le bassin versant. Aux sols limono-sableux bien drainés des plateaux succèdent des sols plus hydromorphes sur les interfluves et progressivement argilo-limoneux à mesure de la proximité des vallées. Les traces d'hydromorphie témoignent de la saturation progressive des sols (parfois peu profonds) due

à un substrat partiellement imperméable. Ces sols sont à la fois sensibles aux mécanismes de production Hortonien et aux mécanismes d'écoulements par saturation des bas-fonds.

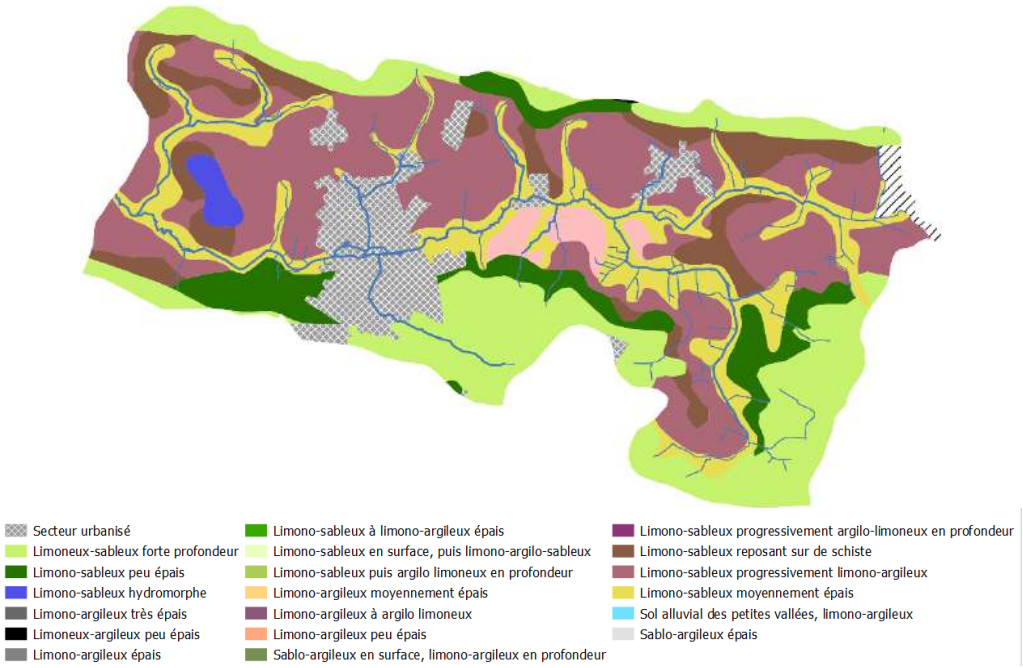


***Figure 4** : Carte des sols. Source : AgroCampus Ouest*

Occupation du sol

Le bassin versant de la Chère est composé essentiellement de terres agricoles (33% de terres arables et 14% de terres agricoles hétérogènes) et de prairie (39%). Les forêts sont très minoritaires sur le territoire (3%). Le bassin versant est, à l'exception de la zone urbanisée de Châteaubriant, essentiellement rural. La proportion de prairie sur le bassin versant est notable et n'est pas restreinte aux seules vallées. Les parcelles à nu en juin 2018 ont été différenciées de celles couvertes pour mieux appréhender les phénomènes de ruissellement (Figure 5).

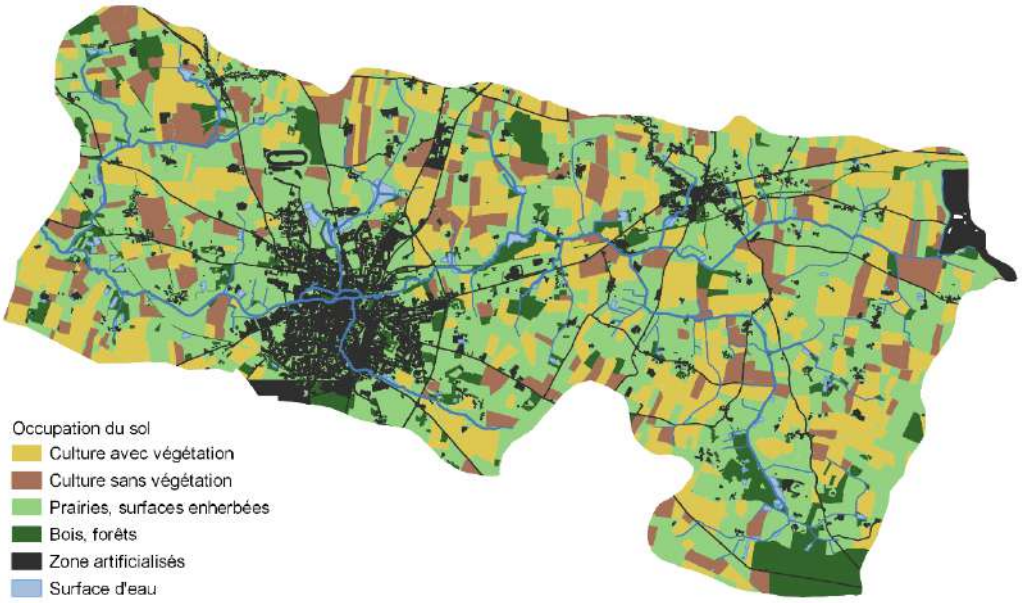


***Figure 5 :** Occupation du sol sur le bassin versant, représentatif d'un mois de juin. Source : OCS à Grande Echelle, IGN 2013.*

METHODE

Pour étudier le fonctionnement hydrologique et hydraulique du bassin versant, une modélisation numérique a été mise en œuvre. L'objectif est de développer un outil permettant de reconstituer un événement historique intense ayant causé des inondations et d'être adaptable pour la modélisation de scénarios d'aménagement. Pour ce faire, deux modèles ont été couplés dynamiquement sur l'ensemble du bassin versant : le premier est réalisé à l'aide de MIKE SHE pour modéliser les processus hydrologiques, le deuxième est réalisé à l'aide de MIKE HYDRO RIVER pour modéliser les processus hydrauliques.

La modélisation avec MIKE SHE

MIKE SHE permet la modélisation des processus hydrologiques comme l'infiltration, le ruissellement voire l'érosion des sols à l'échelle de la parcelle. Ces processus (évapotranspiration, interception par les plantes, infiltration, écoulements de surface, interaction avec la nappe) sont décrits dans des mailles, 100 m^2 dans cette étude, à partir d'équations à base physique et des données intrinsèques des bassins versants : topographie, occupation du sol jusqu'au type de culture à la parcelle, texture des sols. Adaptable, il permet une fois le modèle calé d'étudier les impacts d'aménagements diffus. L'occupation du sol (croisement entre les données OCS GE 2013 et Registre Parcellaire Graphique de l'IGN) permet de décrire l'impact de la végétation sur l'interception et l'évapotranspiration (Kirstensen & Jensen, 1975). Les textures de sol, à dominance limono-sableuse sur le bassin de la Chère[1], donne les paramètres pour le calcul de l'infiltration (Rawls, Brakensiek, & Miller, 1983) via l'écoulement gravitaire et les équations de Green et Ampt (Green & Ampt, 1911; van Genuchten, 1980; Richards, 1931). Ainsi, la saturation du sol est détaillée dans une discrétisation verticale de la maille. Une attention particulière a été portée à l'influence de la couverture végétale sur l'infiltration, les sols du bassin de la Chère pouvant présenter des phénomènes de battance favorisés lorsque que les cultures ont été récoltées. Enfin, les écoulements de surface sont calculés par la méthode des différences finies et de l'approximation de l'onde diffusive des équations de Barré de Saint-Venant à partir les données topographiques (Lidar 1m étendue avec un RGE 5m) et d'occupation du sol pour déterminer la rugosité. Les obstacles à l'écoulement comme les voiries sont soit corrigés directement sur la donnée, soit représentés dans le modèle MIKE HYDRO River. La continuité des ruissellements avec les cours d'eau est assurée par le couplage entre MIKE SHE et MIKE HYDRO River.

La modélisation avec MIKE HYRO River

Les effets hydrauliques comme les verrous provoqués par de potentiels ouvrages ou la gestion de vanne de régulation ont été simulés grâce à MIKE HYDRO River, qui calcule les écoulements unidimensionnels par la résolution des équations de Barré de Saint-Venant. Aussi, les hauteurs d'eau et les débits sont connus en tout point du linéaire des cours d'eau modélisés. Ce modèle hydraulique permet donc de décrire les 80 ouvrages à l'aide de canalisation, dalots, orifices ou encore des seuils. Le fonctionnement des six ouvrages de protection contre les inondations et des deux étangs traversés par la Chère et ses affluents sont ainsi représentés et analysés. Cette précision est d'autant plus nécessaire dans un contexte urbain où la présence de ponts et ouvrages industriels sont de potentiels verrous hydrauliques, et où la Chère se sépare en plusieurs bras et reçoit les apports du Rollard.

Le modèle couplé

Les deux modèles communiquent et échangent des débits dynamiquement soit par les apports de ruissellement aux cours d'eau (MIKE SHE vers MIKE HYDRO), soit par débordement de ceux-ci dans le lit majeur (MIKE HYDRO vers MIKE SHE). Ces deux modèles constituent *in fine* un seul et unique modèle, calibré à partir de l'événement de juin 2018 et ont été vérifiés sur celui de décembre 2013, vecteur d'inondations lui aussi. Pour chaque événement, une étape d'initialisation du modèle a été nécessaire afin de rendre compte d'une saturation préalable du sol : les conditions hydrologiques qui précèdent l'événement jouent donc un rôle dans les débits atteints dans les cours d'eau. Il est ainsi tout à fait possible de comparer deux événements avec des antécédents hydrologiques différents. Le calage, notamment des paramètres hydrauliques, se base sur les mesures de niveau et de débits disponibles ainsi que l'emprise de zone inondée de chaque événement.

[1] Programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols - Région Pays de la Loire – Echelle 1/1 250 000

RESULTATS

Le modèle a su reproduire l'événement de juin 2018 à travers le débit enregistré à la station. Ce débit montre deux pics : un premier pic issu des ruissellements urbains, et un deuxième, plus lent mais plus large, issu du régime fluvial de la Chère et du bassin versant rural amont (Figure 6).

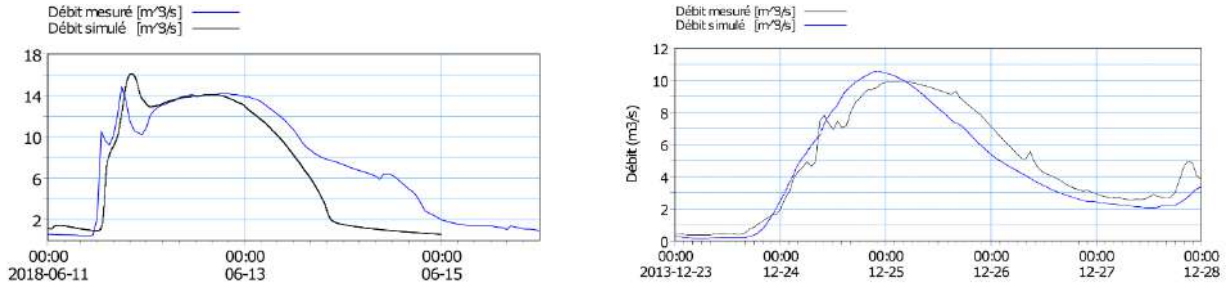


Figure 6 : Résultats de calage (gauche) et de validation (droite).

Une fois les modèles calés, le diagnostic a pu être réalisé en déterminant les zones de production du ruissellement, les axes préférentiels d'écoulement et de concentration du ruissellement et les zones d'accumulation à travers les hauteurs d'eau (Figure 7), les vitesses, le taux d'infiltration ou encore le volume ruisselé et/ou infiltré (Figure 8).

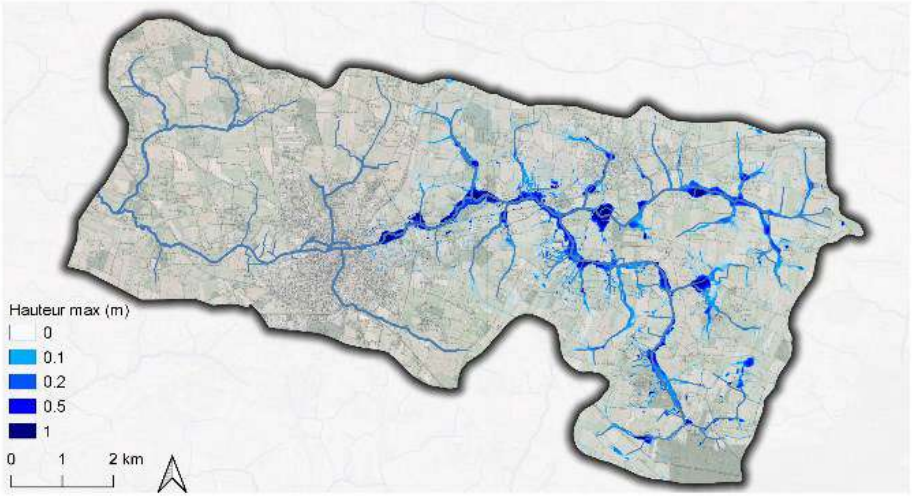


Figure 7 : Hauteur d'eau maximale pour l'événement du 11 juin pour le bassin amont.

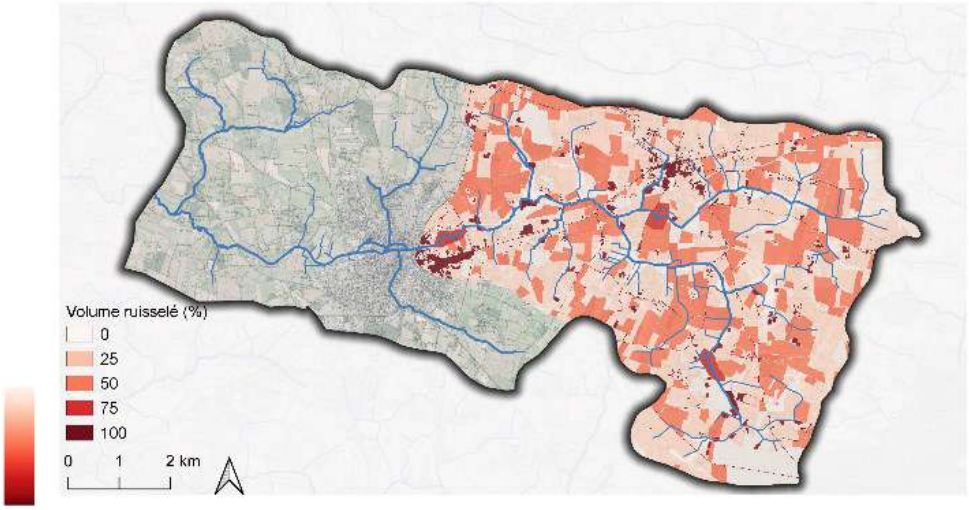


Figure 8 : Volume ruisselé en pourcentage pour l'événement du 11 juin pour le bassin amont.

Une vision détaillée des processus sur le bassin versant aide à l'identification des axes importants de ruissellement et permet d'envisager une stratégie d'aménagements dispersés sur le territoire. L'objectif est d'avoir une approche de réduction des apports en amont des zones d'enjeux en ralentissant les écoulements et de réduire le débit de pointe à proximité des habitations.

Deux scénarios d'écrêtements ont pu être comparés : (1) avec ouvrages écrêteurs sur les cours d'eau mêmes, avec création de digue et (2) avec ouvrages dispersés sur les axes de ruissellement, profitant de la topographie et des éléments structurants déjà présents, pour un volume total de 106 000 m^3. Par ailleurs, les effets de suppression des verrous hydrauliques souvent présent en zone urbaine ont pu être également être simulés. Dans un scénario complémentaire, MIKE SHE a également permis de quantifier les impacts d'un programme de replantation de haies sur le ralentissement des écoulements à l'échelle du bassin versant. Pour cela, sur un linéaire de haies préalablement choisi (perpendiculaire aux axes de ruissellement, position en fin de parcelle), les conductivités hydrauliques à saturation ont été doublées (Kiepe, 1995) et le coefficient de rugosité réduit.

Cette étude a permis de définir un programme d'aménagement global sur la réduction du risque inondation en combinant des ouvrages écrêteurs et un programme de replantation de haie sur l'ensemble de la partie amont. Elle a aussi mis évidence l'influence aggravante de seuils présents dans les cours d'eau.

CONCLUSIONS

L'association d'un modèle d'hydrologie distribuée et d'un modèle hydraulique d'écoulement présente l'avantage de pouvoir apprécier les différents processus hydrologiques se produisant à une maille fine intra parcellaire et de calculer leur conséquence à la fois globale à l'échelle du bassin versant et à la fois locale à l'échelle des enjeux. Cette méthode nécessite cependant d'accéder à de nombreuses données décrivant le territoire (occupation du sol, texture des sols, mesures hydrométriques etc.) et de données de calage pour améliorer la justesse et la robustesse des modèles.

Les différents processus hydrologiques étant reproduits à l'échelle de la maille de calcul, ils peuvent être représentés et communiqués grâce à une cartographie sur l'ensemble du territoire pour une meilleure prise de décision individuelle et collective. La production de cartographie permet par ailleurs la création du support de communication diffusable auprès du grand public. Les effets à petite échelle tels que les changements de pratiques culturales, les changements d'occupation des sols, l'organisation de l'exploitation des sols agricoles et les opérations de désimperméabilisation des communes peuvent être évalués de manière dynamique pour une meilleure gestion du risque inondation.

REFERENCES

DHI. (2001). *MIKE SHE Reference guide V2.* Aarhus, Denmark.

Green, W., & Ampt, G. (1911). Studies in soil physics. *J Agric Sci (England), 4*, 1-24.

Kiepe, P. (1995). No Runoff, no Soil Loss: Soil and Water Conservation in Hedgerow Barrier Systems. *Wageningen Agricultural University*.

Kirstensen, K., & Jensen, S. (1975). A model for estimating actual evaporation from potential evapotranspiration. *Royal Veterinary and Agricultural University, Nordic Hydrology*, 170-188.

Rawls, W., Brakensiek, D., & Miller, N. (1983). Green-ampt Infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of Hydraulic Engineering, 109*, 62-70.

Richards, L. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, 318-333.

van Genuchten, M. (1980). A closed-from Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 882-898.

Construire une stratégie de gestion des risques de ruissellement dans l'arc méditerranéen (Moullin & Verrhiest-Leblanc)

Construire une stratégie de gestion des risques de ruissellement dans l'arc méditerranéen

Christophe MOULIN[1], Ghislaine VERRHIEST-LEBLANC[2]

[1] Cerema Méditerranée, Pôle d'activité, 30 avenue Albert Einstein, CS 70 499, 13 593 AIX-EN-PROVENCE cedex 3, France, christophe.moulin@cerema.fr

[2]DREAL Provence – Alpes – Côte d'Azur 36, Boulevard des Dames, 13 002 Marseille, France, ghislaine.verrhiest@developpement-durable.gouv.fr

Les dernières inondations majeures sur l'arc méditerranéen ont mis en exergue la question du ruissellement. Face à cette problématique, la caractérisation de l'aléa et la définition d'une stratégie de gestion s'avèrent complexes. Comment définir le ruissellement ? En quoi est-il singulier ? Comment peut-on le gérer ?

La mission interrégionale inondation arc méditerranéen (MIIAM) a mobilisé le Cerema sur ces questions. Les réflexions se sont appuyées sur des expérimentations territoriales associant des collectivités locales et des services de l'État au travers de territoires « tests » – Cannes, Nice, Sainte-Anastasie et Banyuls-sur-Mer – et de territoires « témoins », avancés sur la question : Marseille, Nîmes, Montpellier et Antibes.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas réellement de définition partagée, mais des consensus suffisants pour établir un cadre commun de réflexion intégrant les singularités de l'arc méditerranéen.

La question de la gestion du ruissellement passe d'abord par celle des acteurs, relativement nombreux autour du noyau communal, et non par l'outil. Un ensemble de compétences est à coordonner dans un objectif d'optimisation de la circulation de l'eau et de gestion des eaux pluviales, notamment lors d'épisodes majeurs: aménagement des voiries et de l'espace public, gestion des eaux pluviales, urbanisme, gestion des ouvrages de protection, gestion de crise et information préventive.

La démarche proposée consiste à identifier des secteurs géographiques particuliers, puis à identifier les actions possibles au niveau d'une parcelle de terrain, afin de les agglomérer dans une stratégie globale inscrite dans un schéma de gestion des eaux pluviales et déclinée dans tous les documents des politiques sectorielles.

Mots-clefs : ruissellement stratégie urbanisme schéma de gestion des eaux pluviales

Handling runoff with a risk management strategy

The last major floods on the Mediterranean arc have highlighted the issue of runoff. Faced with this problem, the characterization of the hazard and the definition of a management strategy prove to be complex. How to define runoff? How is it unique? How can we manage it?

The Mediterranean Arc Interregional Flood Mission (MIIAM) has mobilized Cerema on these issues. The reflections were based on territorial experiments associating local communities and State services through "test" territories - Cannes, Nice, Sainte-Anastasie and Banyuls-sur-Mer - and "witness", advanced territories on the question: Marseille, Nîmes, Montpellier and Antibes.

The results show that there is not really a shared definition, but sufficient consensus to establish a common framework for reflection integrating the singularities of the Mediterranean arc.

The issue of runoff management begins with that of the relatively numerous actors around the communal core, and not by the tool. A set of skills is to be coordinated with a view to optimizing water circulation and managing rainwater, particularly during major episodes: development of roads and public space, management of rainwater, town planning , management of protective structures, crisis management and preventive information.

The proposed approach consists in identifying particular geographic sectors, then in identifying the possible actions at the level of a plot of land, in order to agglomerate them into a global strategy included in a rainwater management scheme and detailed in all the documents of the sectoral policies.

Key words : runoff, water management, town planning

INTRODUCTION

Les évènements de 2014 dans le Languedoc-Roussillon et de 2015 dans les Alpes-Maritimes ont remis sur le devant de la scène le sujet du ruissellement et nombre d'acteurs ont semblé le découvrir. L'instruction du gouvernement du 31 décembre 2015, relative à la prévention des inondations et aux mesures particulières pour l'arc méditerranéen face aux évènements météorologiques extrêmes, qui en a découlé, lui faisait une large part.

Pourtant ce sujet n'est pas nouveau, surtout dans le pourtour méditerranéen où les cumuls de pluie sur des temps courts sont les plus importants. En 2004, un guide national sur les plans de prévention des risques d'inondation par ruissellement péri-urbain sortait. En 2009, le Conseil général de l'environnement et du développement durable publiait un rapport sur le sujet à la demande de l'administration centrale.

La question de la définition de ce qu'est le ruissellement, de ce qu'il recouvre, est ardue, et a parfois pour conséquence une gestion peu claire, rendue plus confuse encore par l'enchevêtrement des compétences qui sont censées permettre sa gestion : gestion de l'assainissement pluvial, GEMAPI, prévention des risques, gestion des infrastructures… Des outils existent dans ces domaines de compétence mais sont difficiles à mobiliser – et plus encore à coordonner – sur cette question, et face aux dépenses pharaoniques prévues dans les schémas de gestion des eaux pluviales pour réaliser des travaux, la tentation est forte de ne rien faire et de s'en remettre au hasard.

La mission interrégionale inondation arc méditerranéen (MIIAM) a mobilisé le Cerema sur ces questions. Les réflexions ont notamment associé des collectivités locales et des services de l'État au travers de territoires « tests » – Cannes, Nice, Sainte-Anastasie et Banyuls-sur-Mer la plupart affectés par des évènements récents – et de territoires « témoins », avancés sur la question : Marseille, Nîmes, Montpellier et Antibes. Le but était de proposer la mise en place d'une stratégie globale de gestion du ruissellement applicables sur des territoires communaux ou intercommunaux. La volonté, au travers de la définition de cette stratégie globale était, en s'appuyant sur un diagnostic territorial, de formuler une réponse multi-acteurs et multi-outils adaptée au contexte local et dépassant le strict usage de l'outil « plan de prévention des risques ».

Travailler sur l'arc méditerranéen a du sens, car il est singulier pour un ensemble de raisons. Il conjugue des pluviométries de forte intensité sur des cours laps de temps à une occupation du sol souvent dense sur des reliefs marqués. Les réseaux pluviaux n'ont souvent pas été dimensionnés pour ces pluies importantes. Par ailleurs les ravins secs ont souvent été aménagés en zone urbaine, couverts, busés en sous-estimant leur capacité à endommager la ville. L'impact du changement climatique et l'urbanisation croissante sur ce territoire fait craindre une amplification (fréquence et intensité) de ce type de phénomène.

PEUT-ON ET DOIT-ON DEFINIR LE RUISSELLEMENT ?

La littérature, tant administrative que scientifique, regorge de définitions et les échanges avec les collectivités locales ont montré la diversité des appréciations de ce que recouvre le « ruissellement ». Pour certains, cela s'apparente aux eaux pluviales urbaines non prises en charge par les réseaux, et s'écoulant ensuite dans les rues. Pour d'autres, cela correspond à une lame d'eau en dehors de tout cours d'eau. Cela peut aussi recouvrir les inondations occasionnées par des petits ravins, secs presque toute l'année.

Il ne peut exister de définition unique convenant à tous les acteurs. On peut néanmoins citer des caractéristiques semblant communes, et faisant consensus :

- les phénomènes se produisent là il n'y a pas de cours d'eau reconnu ;
- la taille des bassins versants concernés est réduite (certains fixent une limite à 1 km², mais il est fréquent d'aller jusqu'à quelques km²) ;
- il est souvent affecté notablement par la « microtopographie » : en milieu urbain, de petites élévations du niveau des trottoirs par exemple peuvent jouer un rôle important sur les écoulements et les phénomènes apparaissent donc comme quelque peu chaotiques ;
- il y a consensus pour décrire le ruissellement en 3 types : production, transfert, accumulation, même si ces catégories recouvrent des réalités différentes selon les acteurs.

Le plus simple et le plus efficace semble consister à définir le ruissellement par ce qui ne relève pas du débordement de cours d'eau. La notion de cours d'eau n'étant pas partagée, cette définition du ruissellement

recouvrira aussi des réalités différentes selon les acteurs et les territoires ; le choix est fait d'accepter cette diversité, la vraie question étant celles des solutions à trouver.

LA GESTION DES EAUX DE PLUIE EST AUJOURD'HUI PROBLEMATIQUE

La gestion contemporaine des eaux pluviales est d'abord l'héritière d'une vision hygiéniste des eaux. Comme les eaux usées, elles transportent une pollution à traiter, après avoir été collectées par un réseau prévu ou à prévoir pour cela. Les extensions d'urbanisation sont l'occasion d'étendre les réseaux, et là où cela a posé des difficultés à l'aval, des rétentions ont été mises en place à l'amont (jusqu'à retenir l'eau à la parcelle).

Mais qu'advient-il lorsque les capacités des réseaux sont dépassées ? On considère en général que ces situations relèvent d'un cas de force majeure, et qu'il n'y a rien de plus à faire, sinon à attendre la fin de l'évènement et à remettre en état *a posteriori*. Face à ce fatalisme, élargir toujours plus les canalisations peut paraître la solution la plus évidente en première approche. Cependant, cette solution s'avère rapidement irréaliste économiquement (trop onéreuse) et techniquement (mise en œuvre complexe dans des environnements urbains contraints).

La mise en place de la GEMAPI, introduite par la loi de modernisation de l'action publique territoriale et l'affirmation des métropoles (MAPTAM) du 27 janvier 2014, pour allier prévention des inondations et gestion des milieux, est une bonne illustration de cette dichotomie : la maîtrise des eaux pluviales et de ruissellement n'entre pas dans son champ de compétence (article L211-7 du code de l'environnement) tandis que « l'aménagement d'un bassin » (versant) ou « la défense contre les inondations » relève bien de ce champ ; pourtant ces inondations peuvent éventuellement provenir d'un excès d'eaux pluviales.

Des outils existent et sont déjà – partiellement – mis en œuvre :

- le schéma de gestion des eaux pluviales, qui programme les travaux à venir sur la base d'un diagnostic ; malheureusement il se limite souvent, aujourd'hui, aux eaux transportées par les canalisations et fossés dédiés ;
- le zonage d'assainissement pluvial et le Plan Local d'Urbanisme permet de limiter les apports amont en imposant des règles de rétention ; le PLU peut pourtant aller beaucoup plus loin ;
- les plans de prévention des risques permettent de fixer des règles liées au code de la construction (matériaux, mises en œuvre par exemple) ;
- les programmes d'action de prévention des inondations (PAPI) de 3e génération permettent désormais le financement des opérations liées à des inondations par ruissellement.

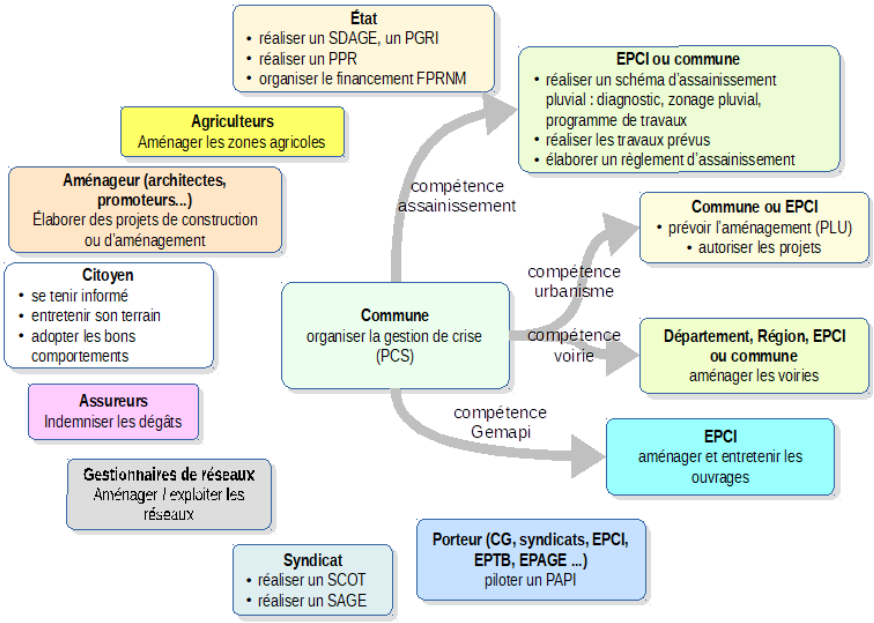


Figure 1 : la commune est un acteur central de la gestion du ruissellement mais ses compétences peuvent être éclatées dans des services différents, voire d'autres collectivités

D'autres outils existent et augmentent encore la complexité de l'ensemble et le nombre d'acteurs pouvant potentiellement intervenir.

Cette multiplicité d'acteurs se manifeste tant au niveau du bloc communal (l'aménagement des voiries et de l'espace public, la gestion des eaux pluviales, l'urbanisme, la gestion des ouvrages de protection, la gestion de crise et l'information préventive) qu'à l'extérieur de ce bloc (État, porteur de PAPI, acteurs de la société civile…).

Enfin, aux rangs des difficultés notoires s'ajoutent les méthodes de définition de l'aléa. En effet, si les méthodes pour délimiter les zones inondables par débordement de cours d'eau se perfectionnent et sont reconnues (malgré les incertitudes – souvent fortes – qui les entourent), force est de constater que pour le ruissellement, ces méthodes sont plus hasardeuses. Des modèles 2D simulant les pluies tombées à chaque endroit du territoire, sur des modèles numériques de terrain de plus en plus précis (relevés tous les mètres par lasers aéroportés), laissent penser que les méthodes des cours d'eau seraient transposables *via* un luxe de précision des données d'entrées. Mais ces modèles ne représentent pas les micro-obstacles (trottoirs, dos d'âne…) qui pourtant peuvent jouer un rôle décisif dans l'inondation en envoyant des eaux rapides mais avec des hauteurs faibles dans une rue plutôt que dans une autre… De nouvelles méthodes sont prometteuses, telle la méthode Exzeco développée par le Cerema, en cours déploiement sur l'ensemble de l'arc méditerranéen dans le cadre de la stratégie zonale de prévention des inondations au bénéfice des acteurs locaux. Si elle n'apporte pas toutes les réponses (la méthode ne permet notamment pas d'obtenir les hauteurs d'eau, les vitesses, ou la qualification des périodes de retour…), elle fournit cependant des données socles en matière de détermination des zones potentiellement soumises au ruissellement pour asseoir et conduire des études et modélisations complémentaires en fonction de besoins et du contexte territorial visant à affiner la caractérisation de l'aléa ruissellement.

À ces difficultés, s'ajoute la question des pluies à considérer ; des orages très localisés peuvent entraîner des dégâts importants sur de petits bassins, de manière totalement imprévisible ; aucune zone du pourtour méditerranéen n'est épargnée et l'orage de Goudet et Landos en Haute-Loire (2017), entraînant 193 mm en 2 h – plus que les records de tous les départements du pourtour méditerranéen à l'exception de l'Aude –

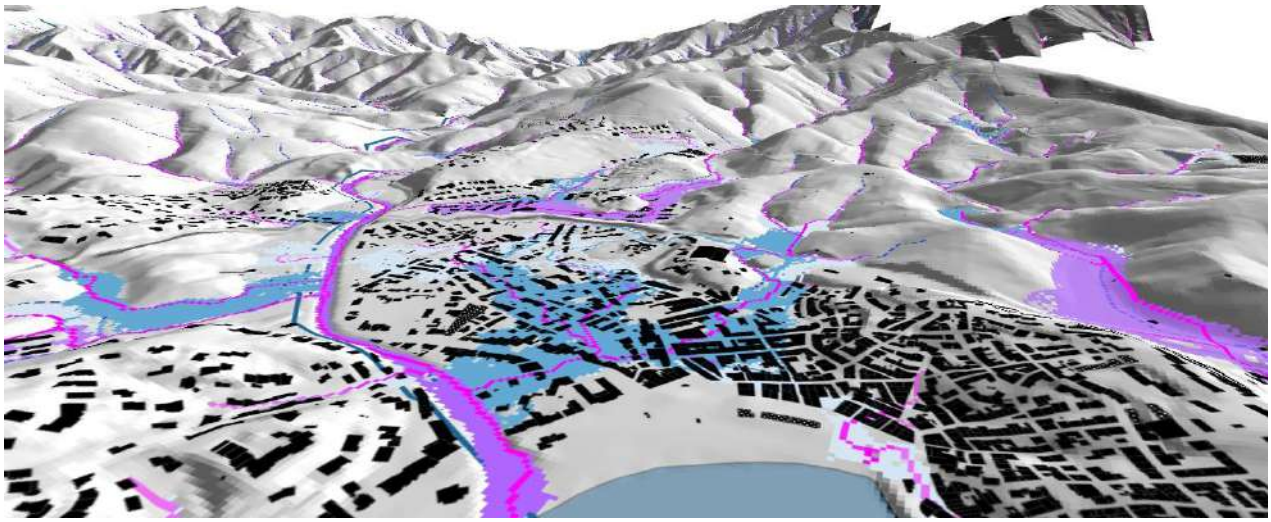


Figure 1: la méthode Exzeco s'appuie sur un modèle numérique de terrain uniquement ; elle confirme le caractère inondable du centre de Banyuls par des ruissellement de moins de 1 km² de bassin versant

incite à penser que la problématique du ruissellement (extrême) concerne potentiellement un nombre important de communes.

DEFINITIONS ET ENJEUX

L'un des défis à relever consiste à bien appréhender le passage d'une gestion des eaux pluviales « courantes » à une gestion des risques engendrés par le débordement des réseaux ordinaires. Dit autrement, il s'agit de bien appréhender les niveaux d'évènements pouvant se produire, de l'évènement courant restant contenu dans les réseaux dédiés, constitués de canalisations et de fossés (appelés « réseaux mineurs »), à l'évènement extrême provoquant des débordements généralisés.

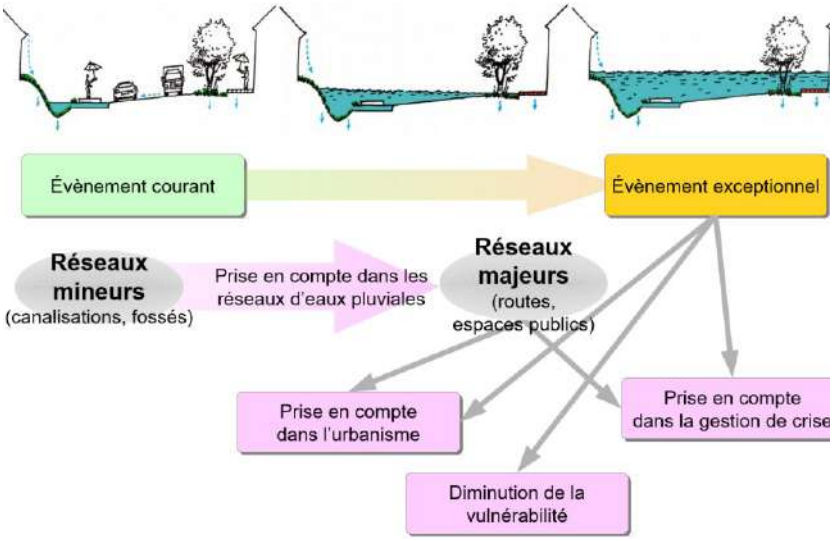


Figure 2: la mobilisation des systèmes mineurs et majeurs correspond à des gammes d'évènement graduels, du courant à l'extrême

Le traitement de ces deux extrêmes par les collectivités nécessite déjà d'engager des efforts importants. A titre d'exemple, la gestion du patrimoine vieillissant du réseau des eaux pluviales, et pas seulement de ses extensions liées à l'urbanisation, est un sujet qui occupe sérieusement les collectivités. À l'autre extrémité, la mise en place d'une gestion de crise prenant en compte les caractéristiques de ces phénomènes doit s'appuyer sur des dispositifs de prévision difficiles à mettre en place, et sur les Plans Communaux de Sauvegarde. Compte tenu des délais réduits dont on dispose généralement, le risque est important que l'évènement attendu ne se produise pas.

Pourtant, il serait réducteur de s'en tenir aux extrêmes, et le vrai sujet ici est celui des évènements dépassant le niveau de service et générant des débordements qui empruntent des zones de surface. De la posture déjà décrite consistant à constater que des espaces publics (et privés) sont vulnérables à ces phénomènes, il est possible d'envisager une gestion alternative des débordements empruntant des itinéraires pensés à cette fin, un « réseau majeur ». Ce réseau, mobilisé uniquement dans des évènements importants, peut être une voie de circulation par exemple, gérée avec cette contrainte.

Figure 3: cette rue de Saint-Anastasie peut d'évidence faire partie d'un réseau majeur à créer

Cette posture n'a rien de simple : elle suppose d'assumer une part d'incertitude – il est délicat voire risqué si elle n'est pas bien accompagnée d'accepter que les eaux envahissent un espace normalement occupé par des activités humaines. Elle suppose de piloter des acteurs, de mettre en œuvre un ensemble d'outils dans une logique de projet pour y arriver.

DEMARCHE : POINT FONDAMENTAUX

Les difficultés pour construire une stratégie ont déjà largement été évoquées. En résumé, les objectifs pour y faire face sont les suivants :

- fixer une limite claire au réseau mineur ;
- accepter de gérer les évènements supérieurs ;
- penser la logique de gestion dans le spectre des évènements possibles ;
- mettre en œuvre des solutions dans plusieurs domaines ;
- assurer un pilotage dans cette logique pluridisciplinaire.

Les limites du réseau mineur doivent être claires

Le niveau de service évoqué précédemment doit être clairement défini. Ainsi il est plus facile aux décideurs publics de justifier qu'un évènement n'a pas été contenu, puisqu'il dépassait ce niveau de service. Cependant ce niveau de service peut être différent selon les sous-bassins, et il peut être mis à mal par des

désordres locaux (étranglements par exemple) empêchant de respecter localement un niveau de service qui serait atteint par ailleurs.

C'est un des objets du schéma de gestion des eaux pluviales, aussi appelé schéma d'assainissement des eaux pluviales, que de chercher à homogénéiser le fonctionnement, tout en limitant les coûts d'investissement. Il consiste généralement en un diagnostic, un zonage d'assainissement pluvial et un programme de travaux.

Tenter d'améliorer le niveau de service

Améliorer la performance du réseau mineur, c'est-à-dire tenter de décaler le niveau de service vers le haut si des investissements modérés le permettent peut être un objectif légitime ; le constat est que les schémas d'assainissement pluviaux ambitieux ne sont généralement pas mis en œuvre.

Identifier le réseau majeur et l'aménager

Les espaces pouvant faire office de réseau majeur peuvent être connus à la suite d'évènements passés ; des calculs peuvent aussi permettre de l'identifier. Il s'agit alors de l'assumer, de conforter son rôle en l'aménageant et en réfléchissant aux règles de son occupation et de sa gestion.

Penser la gestion de crise avec des délais de réaction réduits

Les délais entre la pluie et ses conséquences sur le terrain sont extrêmement réduits. La gestion de crise doit en tenir compte, en échelonnant avant la certitude de l'évènement un ensemble de mesures progressives qui dans la plupart des cas s'avéreront des précautions inutiles, mais permettra le jour J une gestion plus efficace.

Réduire l'exposition et la vulnérabilité

Comme pour les débordements de cours d'eau, la réduction de vulnérabilité par la mise en place de travaux, de mesures de gestion voire de délocalisations se pose. En effet, il peut s'avérer que dans certains cas rien ne puisse atténuer un aléa incompatible avec un type de présence (établissements sensibles tels que écoles, crèches, maisons de retraites…).

Ne pas aggraver la situation

Le dernier point concerne le futur, il s'agit de ne pas aggraver la situation. Pour cela : éviter de construire dans certaines zones, mettre en place des prescriptions, prévoir de retenir l'eau à la parcelle.

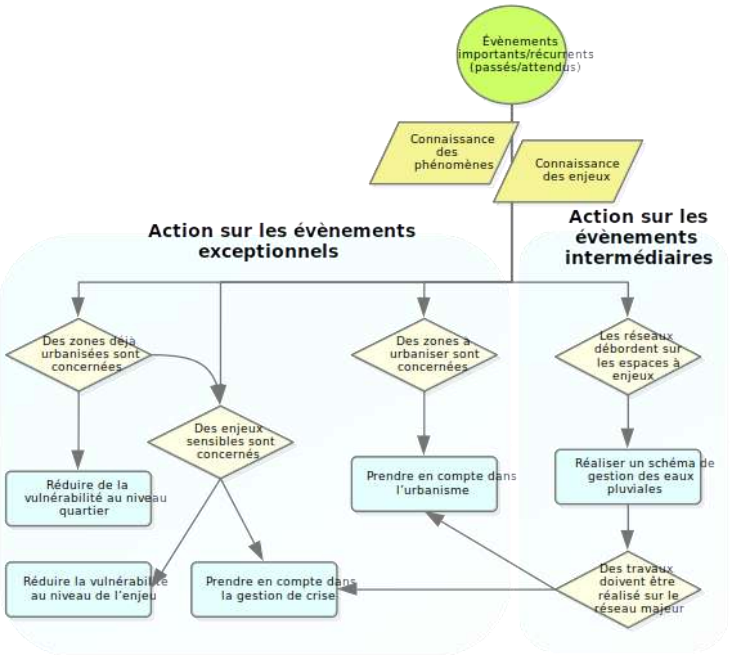


Figure 4 : la gestion du ruissellement s'envisage au travers d'une gamme d'évènement potentiels et d'outils variés

CONSTRUIRE UNE STRATEGIE D'ACTION

Penser l'action avant l'aléa

Très souvent la logique prévalant à la construction d'une stratégie de gestion des risques d'inondation consiste à rechercher l'aléa (le caractériser, circonscrire les phénomènes), à le cartographier, à établir des règles liées à cet aléa et à l'occupation humaine des sols, puis à établir un zonage résultant assorti de mesures types adaptées à la marge.

Cette démarche – fort logique – est mise à mal par le ruissellement, phénomène multiforme, mal connu, et pouvant s'avérer extrêmement compliqué à localiser, comme cela pu être évoqué précédemment.

Face à ce constat, une première possibilité serait de s'en remettre encore à la technique, en cherchant à la rendre aussi précise que nécessaire, en reproduisant les modèles connus avec des modèles numériques de terrain extrêmement précis, en allant jusqu'à représenter les micro-obstacles. La recherche de solutions en ce sens est nécessaire mais pas suffisante.

L'option choisie a consisté à se concentrer sur les actions possibles pour lutter contre le risque lié au ruissellement et à rechercher les types de zone dans lesquelles ces actions peuvent être mises en œuvre avec pertinence. Le but étant de gérer le ruissellement, comment peut-on agir à l'échelle individuelle, au niveau d'une parcelle de terrain, au niveau d'un bâtiment ?

Établir la liste des actions possibles

Une liste de 41 actions « élémentaires » a ainsi été bâtie, en grande partie à partir des travaux existants, en associant à chaque action les zones géographiques pertinentes pour la mettre en œuvre (par exemple : proximité de talweg, zone urbanisées…). Le classement des actions s'est effectué selon les 3 grandes catégories communément admises : zones de production, zones de transfert et zones d'accumulation.

Type de phénomène	Objectif	Action	Secteurs concernés par l'action
Production (1)	**Retenir l'eau (1.2)**	Mettre en place des dispositifs de rétention pour résorber les problèmes identifiés (1.2.2)	Secteurs de production à l'amont des problèmes identifiés
		Utiliser les terrassements et ouvrages pour maîtriser les écoulements, adopter des pratiques culturales ralentissant les écoulements (1.2.3)	Secteurs agricoles, en particulier à l'amont des secteurs à enjeux
		Favoriser les boisements, éviter de défricher (1.2.4)	Secteurs naturels et forestier à l'amont des secteurs à enjeux
Transfert (2)	**Permettre le passage de l'eau (2.1)**	Prévoir et organiser la circulation des eaux sur les espaces publics (2.1.2)	Espaces publics : routes, places, parkings,...
		Prévoir, pour les constructions neuves et aménagements, une distance de recul par rapport aux axes d'écoulement identifiés (2.1.3)	Secteurs à proximité des axes d'écoulements
		Contrôler le bon fonctionnement des « points noirs » (névralgiques) avant les épisodes importants (2.1.8)	Point « noirs » connus pour être à l'origine de problèmes (passages inférieurs, entrées de canalisation, grilles à végétaux,...)
	Se prémunir de l'action mécanique des eaux (2.3)	Utiliser des structures de chaussée résistant à l'érosion (2.3.1)	Tous secteurs
		Protéger les « berges » de talweg (2.3.2)	Berges des talwegs
	Connaître et gérer le danger (2.4)	Connaître le danger de ce type de zones et les comportements à adopter (2.4.1)	Tous secteurs
		Connaître les secteurs dangereux (2.4.2)	Tous secteurs
		Connaître l'état de la situation lors d'un événement (2.4.3)	Tous secteurs
		Gérer collectivement le risque (2.4.4)	Tous secteurs
Accumulation (3)	**Se prémunir de l'eau (3.1)**	Adapter les réseaux nécessaires aux bâtiments : énergie, télécommunication, etc. (3.1.4)	Dépressions et zones alimentées par les zones de transferts
		Adopter une agriculture adaptée au caractère inondable (3.1.7)	Dépressions en zone agricole
	Connaître et éviter le danger (3.2)	Connaître l'état de la situation lors d'un événement (3.2.3)	Tous secteurs

Tableau 1 : exemples d'actions pouvant être mises en œuvre pour gérer le ruissellement

La démarche vaut déjà par elle-même. En effet, disposer d'une liste la plus exhaustive possible d'actions à mettre en œuvre permet de disposer d'une vision plus claire dans un domaine où les références manquent. Notons que certaines actions, notamment dans les zones d'accumulation, sont fortement inspirées de celles couramment mises en œuvre pour les cours d'eau.

Cartographier les zones d'action potentielle

À partir de la liste des actions, se dégagent des zones d'action potentielle, pouvant se superposer :

- zones de problèmes identifiés (inondations récurrentes, inondations importantes, cuvettes…) ;
- zones urbanisées, urbanisables, naturelles, agricoles, forestières, enjeux sensibles ;
- zones amont des problèmes identifiés ;
- axes d'écoulements ;
- espaces publics et privés empruntés par les eaux (dont voiries) ;
- points noirs du réseau de collecte ;
- dépressions, accumulations, étranglements.

La démarche proposée consiste à repérer ces zones sur le terrain, puis à passer en revue les actions possibles pour chacune de ces zones, issues du travail précédent, afin de les agglomérer dans une liste globale.

OUTILS ET MISE EN ŒUVRE

Organiser le pilotage et le suivi

La multiplicité des acteurs et compétences nécessaire rend l'organisation du pilotage et du suivi particulièrement centrale dans la réussite de la démarche.

La gouvernance devrait être organisée dès le début, de manière à bien identifier les différents rôles et de faire connaître à chacun les compétences utiles détenues par d'autres. Lorsque les compétences utiles sont éclatées, ce point est délicat car personne n'a la légitimité pour porter la totalité du plan d'actions. Un choix doit alors être opéré.

Avant même d'identifier des actions, le partage du diagnostic et de l'identification des problèmes semble être un préalable indispensable.

Consigner le plan d'action dans le schéma de gestion des eaux pluviales

Il s'agit ensuite d'inscrire le plan dans un schéma de gestion des eaux pluviales « étendu » qui a vocation à être ensuite décliné dans tous les documents des politiques sectorielles. Cette utilisation du schéma peut dérouter les gestionnaires d'eaux pluviales qui n'y voient souvent qu'un moyen de programmer des travaux sur le réseau ; il convient de noter que ce document n'est défini par aucun texte réglementaire ; son contenu peut donc être adapté.

Traduire les actions dans les documents pertinents

Comment traduire de manière la plus opérationnelle possible les actions envisagées ?

Si la prise en compte par l'ensemble des acteurs dans leur quotidien est nécessaire, l'inscription des actions dans les documents réglementaires est également nécessaire. On peut citer :

- le Plan Local d'Urbanisme, incontournable : il ne se cantonne pas à la rétention à la parcelle ; il permet d'inscrire des emplacements réservés pour aménager des ouvrages publics (partie de réseau majeur par exemple) ; il permet de mailler de secteurs, de limiter imperméabilisation, l'occupation du sol… ;
- le Plan de Prévention des Risques, porté par les services de l'État, permet d'inscrire des mesures d'adaptation des dispositions constructives du bâtiment (tel que matériau, mises en œuvre…), d'imposer des mesures aux biens existant ;
- le Plan Communal de Sauvegarde peut prévoir des interventions cohérentes avec le réseau majeur envisagé : fermeture d'axes ou de quartiers lors du passage des eaux, appels des gestionnaires des établissements du site… ;
- le zonage d'assainissement pluvial : c'est une évidence ; il est souvent parti intégrante déjà aujourd'hui du schéma de gestion des eaux pluviales.

CONCLUSIONS

Le ruissellement est un phénomène multiforme souvent mal appréhendé, bien différent des inondations par débordement de cours d'eau. Le gérer suppose de passer par un changement de perspective de gestion des risques et un décloisonnement des compétences.

Ainsi la recherche des phénomènes (définition de l'aléa) passe le plus souvent par un croisement des approches, des méthodes de modélisation traditionnelles à la méthode Exzeco développée par le Cerema ; la recherche de solutions passe par l'identification de types d'occupation du territoire plutôt que des traditionnelles zones d'aléa. Les actions à mettre en œuvre sont à imaginer à partir d'un référentiel construit à cette fin ; elles peuvent être inscrites dans un plan d'action dans le schéma de gestion des eaux pluviales.

Enfin ce plan, piloté par un acteur clairement désigné, a vocation à se décliner dans les missions de tous, et dans les documents réglementaires tels que PLU, PPR ou PCS. L'aménagement et l'urbanisme doivent être fortement mobilisés pour construire des territoires adaptés aux ruissellements qui peuvent s'y produire.

Bien que la réflexion ait été menée sur des communes de l'arc méditerranéen, elle est en grande partie transposable sur le reste du territoire national.

REFERENCES

[1] GUITON (1994). *Ruissellement et risque majeur – Crue centennale en milieu urbanisé – Etude de cas : le Grand-Bornand, Nîmes, Paris et Vaison-la-Romaine.*

[2] GRAIE (2004). – *Guide pour la prise en compte des eaux pluviales dans les documents de planification et d'urbanisme*.

[3] MEDD (2004). – *Les risques d'inondation – Le ruissellement péri-urbain*.

[4] MIAT (2005). – *Plan communal de sauvegarde – guide pratique d'élaboration*.

[5] MEDAD (2006). – *Les collectivités locales et le ruissellement pluvial*.

[6] CGEDD (2009). – *Le ruissellement urbain et les inondations soudaines.*

[7] GRAIE (2011). – *Éléments pour l'élaboration d'un schéma directeur de gestion des eaux pluviales adapté au contexte local*.

[8] CEPRI (2014). – *Gérer les inondations par ruissellement pluvial – Guide de sensibilisation*.

[9] POULARD et BREIL (2015). – *Le ruissellement : comprendre pour diagnostiquer et agir.*

[10] CGEDD (2017). – *Gestion des eaux pluviales, 10 ans pour relever le défi*.

Vers l'intégration d'un indicateur hydrologique pour une nouvelle vigilance "pluie-inondation" (Bildstein *et al.*)

VERS L'INTÉGRATION D'UN INDICATEUR HYDROLOGIQUE POUR UNE NOUVELLE VIGILANCE « PLUIE-INONDATION »

Audrey BILDSTEIN[1], Pierre-Emmanuel GALLERAND[2], Renaud MARTY[1], Françoise TORTEROTOT[3], Raphaëlle KOUNKOU-ARNAUD[3], Béatrice VINCENDON[4], Brigitte DUBOIS[5], Ludovic MAGNOULOUX[2], Bruno LOSSEC[3]

1Service de Prévision Crues Loire – Cher – Indre, DREAL Centre-Val de Loire, 5 avenue Buffon, Orléans, France – prénom.nom@developpement-durable.gouv.fr

2Météo-France, Direction Interrégionale Centre-Est, avenue Louis Mouillard, Bron, France – prénom.nom@meteo.fr

3Météo-France, Direction Interrégionale Ile de France, 73 avenue de Paris, St Mandé, France – prénom.nom@meteo.fr

4Météo-France, Direction de la Climatologie et des services climatiques, 42 avenue Georges Coriolis, Toulouse, France – prénom.nom@meteo.fr

5Météo-France, Direction Interrégionale Ouest, 27 rue Jules Vallès, Saint-Jacques de la Lande, France – prénom.nom@meteo.fr

Les inondations de mai-juin 2016 ont mis en évidence l'ambiguïté de l'articulation entre les vigilances pluie-inondation de Météo-France et crues (ex-inondations) confiée à Vigicrues. Désormais, le phénomène inondation relatif à la vigilance pluie-inondation se rapporte aux cours d'eau non surveillés au titre de la vigilance crues. Il s'agit alors de construire un outil simple améliorant la mise en vigilance pluie-inondation actuelle, en intégrant un indicateur hydrologique de l'état de saturation des sols.
Une expérimentation est menée par le Service de Prévision des Crues Loire-Cher-Indre et les directions interrégionales de Météo-France de Lyon, Paris et Rennes, à l'échelle du zonage Alerte-Précipitation (AP), en considérant les bassins versants jaugés par Vigicrues, hors zone urbaine et de surfaces drainées inférieures à 1000 km². L'aléa inondation y est défini selon les temps de retour 2 et 5 ans, correspondant respectivement à des vigilances jaune et orange.
Trois indicateurs hydrologiques issus, soit des mesures hydrométriques, soit de modélisation hydro-météorologique sont considérés afin de compléter les critères de vigilance fondés uniquement sur des cumuls de précipitations journalières. Ceux-ci sont intégrés au pas de temps journalier et moyennés sur le zonage AP. La prise en compte d'un indicateur hydrologique améliore nettement la détection des événements d'inondation et, ainsi, permet de consolider le déclenchement de la vigilance pluie-inondation.

Mots-clefs : vigilance météorologique, indicateur hydrologique, forte pluie, inondation

Integration of a hydrological indicator for a new "Rainfall-Runoff" warning

The exceptional flood events occurred in May-June 2016 outlined the ambiguity between rainfall-runoff warning issued by Météo-France, and flood warning provided by the French flood forecasting services (Vigicrues). Henceforth the so-called rainfall-runoff warning includes floods that concern rivers excluded from the national flood warning system. Thus a simple tool is needed to improve rainfall-runoff warnings considering hydrological indicators linked to soil wetness state.
The Loire-Cher-Indre regional flood forecasting service and the regional weather services in charge of the Loire basin weather monitoring, conduct an experimentation at the spatial scale of the official rainfall warnings (called AP), considering gauged watersheds with an area lower than 1000 km². In this study, urban basins are. And the flood hazard refers to 2 and 5 years return period, corresponding to yellow and orange warning levels, respectively.
Three hydrological indicators, either from hydrometric measures or from hydro-meteorological modelling, are considered to expand the warning criterion that is today only based on daily rainfall amount. These are aggregated at daily time step and averaged at AP spatial scale. The study shows that using a hydrological indicator improves flood events detection and consequently the rainfall-runoff warnings efficiency

Key words: Weather warning, hydrological indicator, rainfall, runoff

I INTRODUCTION

La vigilance météorologique est destinée à informer sur le risque constitué par des phénomènes météorologiques dangereux, en fonction de leur intensité. Elle porte sur différents types d'aléa (orages, avalanche, grand froid…) et se matérialise par un code couleur vert-jaune-orange-rouge. La vigilance crue est confiée au réseau Vigicrues. Elle concerne le risque de montée des eaux et de débordement sur les cours d'eau surveillés par l'État, ce qui représente un linéaire d'environ 23000 km [Leleu et al., 2016]. Elle est diffusée selon le même code couleur que la vigilance météorologique. Belin et al. [2018] mentionnent que la vigilance pluie-inondation a remplacé la vigilance forte pluie suite aux évènements hydrométéorologiques de

septembre 2005 dans le Gard. Celle-ci est construite selon l'aléa le plus pessimiste parmi les fortes pluies et les crues de Vigicrues. L'audit conduit par le CGEDD et l'IGA suite aux inondations des bassins moyens de la Seine et de la Loire de mai-juin 2016 souligne l'ambiguïté de l'articulation entre les vigilances pluie-inondation de Météo-France et crue (ex-inondation) confiée à Vigicrues [Perrin et al., 2017]. Afin d'éviter tout risque de confusion entre les deux vigilances, la vigilance crue est dissociée de la vigilance pluie-inondation qui couvre désormais uniquement les autres aléas d'inondation, liés aux précipitations (ruissellement pluvial, remontée de nappe souterraine et débordement des cours d'eau non surveillés).

L'évolution de la vigilance pluie-inondation nécessite de prendre en compte des éléments hydrologiques afin de définir le niveau de vigilance le plus pertinent au regard d'une situation hydrométéorologique. De récentes études soulignent l'intérêt d'intégrer une modélisation hydrologique, que ce soit dans le cas d'alerte aux crues rapides [Garandeau et al., 2018] ou la détection du risque d'inondation du réseau routier sur l'arc méditerranéen [Naulin et al., 2013]. L'ajout d'une telle modélisation est actuellement peu compatible avec les pratiques opérationnelles des prévisionnistes météorologues. Différentes expérimentations sont conduites par Météo-France et Vigicrues afin d'identifier et proposer un outil simple permettant d'appréhender la réponse hydrologique aux précipitations prévues. Trois de ces expérimentations concernent le pourtour méditerranéen, une quatrième concerne le bassin de la Loire (jusqu'au Bec de Vienne).

Nous nous intéressons ici à cette dernière expérimentation menée par le Service de Prévision des Crues Loire-Cher-Indre (SPC LCI) et les directions interrégionales de Météo-France de Lyon, Paris et Rennes, qui se concentrent sur les seuls phénomènes de ruissellement de versant et de débordement de cours d'eau non surveillés, sur le territoire de compétence du SPC LCI. Les phénomènes de remontée de nappes ou ruissellement urbain sont ici mis de côté. Cette approche cherche à construire un outil simple et parcimonieux capable de déterminer le niveau de vigilance pluie-inondation, en prenant en compte la pluviométrie ainsi qu'un critère hydrologique synthétisant l'état des sols de façon à représenter les processus à l'origine du ruissellement : le dépassement de la capacité d'infiltration par l'intensité de la pluie et la saturation en eau du sol. Le choix s'est porté sur la production d'abaques.

II DONNEES METEOROLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES

Les données utilisées dans la phase d'élaboration des abaques sont choisies en veillant à ce qu'elles soient disponibles en temps réel pour une utilisation opérationnelle. Le travail est réalisé au pas de temps journalier. Cela constitue une première approche, limitant le nombre de données à analyser, tout en étant cohérent avec le pas de temps de l'expertise des bulletins de précipitations émis par Météo-France. Les données sont prises sur la période du 1er janvier 2003 au 5 juillet 2018, afin de disposer d'un nombre conséquent d'événements, tout en gardant une qualité homogène des données.

II.1 DONNEES PLUVIOMETRIQUES ET ZONAGE

La pluviométrie est d'abord prise en compte à l'échelle de la station de mesure de précipitation, puis est moyennée à l'échelle du zonage Avertissement Précipitations (AP) [Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, 2008] dans sa version 10, qui est déployée depuis le 1er octobre 2019 [Figure 1]. Chaque zone AP comprend entre 3 et 24 pluviomètres, avec une moyenne de 11 pluviomètres par zone. Des prévisions expertisées de précipitations journalières moyennes sont réalisées par Météo-France au moins deux fois par jour à l'échelle de la zone AP.

II.2 DONNEES HYDROMETRIQUES ET ZONAGE

Ne disposant pas de données de ruissellement, les données hydrométriques de débits sont choisies. Elles ont l'avantage d'être expertisées, et donc de qualité contrôlée. De plus, ces données sont disponibles sur une grande période de temps à la fois sur le réseau surveillé, mais aussi en dehors de celui-ci. L'étude des événements de crue est réalisée à l'échelle de la zone AP, afin d'avoir une cohérence géographique avec les événements de pluie. Au sein d'une zone AP, plusieurs stations hydrométriques existent, correspondant à une grande diversité de surfaces drainées de bassins versants (de 5-10 à 60 000 km²). Seules les stations situées sur les têtes de bassin sont retenues dans cette étude, soit 95 stations [Figure 1]. Ainsi ne sont pris en compte que les phénomènes hydrologiques liés à la pluviométrie locale. Les inondations issues de la propagation d'onde de crue formée en amont ne correspondent pas à l'aléa inondation ciblé dans cette étude. Les bassins versants drainant une surface supérieure à 1000 km² sont ainsi exclus de cette étude. Chaque zone AP comprend entre 1 et 7 stations hydrométriques, avec une moyenne de 4 stations par zone [Table 1].

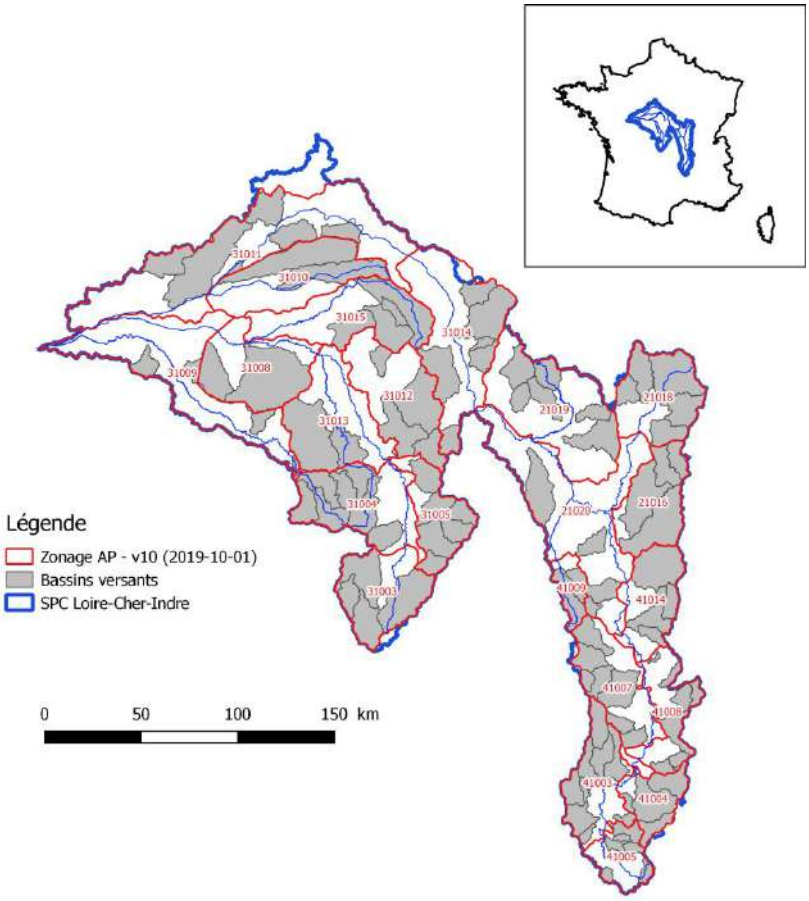


Figure 1: Carte des zones AP et des bassins versants à l'étude sur le territoire du SPC LCI

Table 1: Zones d'avertissement précipitations sur le territoire du SPC LCI(NP : Nombre de stations pluviométriques ; NH : Nombre de stations hydrométriques ; FP : Forte pluie ; TR : Temps de réponse)

Code zone AP	Nom	Superficie (km²)	NP	NH	TR [min; moy; max] (en h)	Nbr de jours FP	Nbr de jours de crue (Q2; Q5)	Nbr de jours de crue Q2 sans FP
21016	Arconce Bourbince	1537	9	4	[11; 29; 46]	123	(141;78)	122
21018	Arroux amont	1789	7	5	[7; 15; 24]	235	(90;36)	63
21019	Aron Nievre	3081	10	6	[8; 15; 21]	151	(129;50)	114
21020	Vallee Loire bourbonnaise	3720	16	4	[3; 14; 32]	210	(61;12)	51
31003	Tardes Cher amont	1727	11	5	[9; 13; 21]	120	(48;15)	40
31004	Indre amont Arnon amont	2182	8	6	[13; 20; 40]	82	(60;29)	49
31005	Aumance Marmande	1272	6	5	[6; 13; 23]	81	(57;25)	52
31008	Indrois Fouzon	2042	12	2	[28; 39; 51]	69	(78;31)	74
31009	Cher aval Indre aval	3146	19	2	[14; 14; 15]	113	(30;9)	28
31010	Cosson Beuvron	2165	9	2	[50; 62; 74]	63	(83;32)	82
31011	Loire Tourangelle	4835	24	5	[26; 39; 72]	106	(141;48)	132
31012	Yevre	2189	13	4	[11; 32; 51]	101	(182;35)	173
31013	Arnon aval Theols	2312	12	1	[43]	89	(18;12)	17
31014	Loire Giennoise	3186	12	5	[12; 23; 42]	99	(135;29)	128
31015	Sauldre	2290	11	4	[9; 21; 39]	88	(77;44)	69
41003	Borne Ance du Nord	1592	10	7	[3; 10; 16]	193	(40;17)	26
41004	Lignon Velay Dunieres	857	8	4	[8; 11; 20]	155	(19;8)	8
41005	Source Loire	805	9	4	[3; 4; 5]	271	(15;7)	1
41007	Lignon Forez Mare	1814	13	7	[3; 8; 18]	239	(58;24)	39
41008	Furan Semene Coise	1232	12	6	[4; 6; 8]	198	(60;20)	36
41009	Besbre amont	452	3	2	[6; 9; 12]	120	(41;14)	30
41014	Rhins Sornin	1416	13	4	[5; 11; 16]	171	(42;12)	32

II.3 INDICATEURS HYDROLOGIQUES

Trois indicateurs sont testés, dans le cadre de cette étude : l'un est issu de mesures hydrométriques et deux autres de modélisations hydro-météorologiques intégrant la transformation pluie-débit. Ces indicateurs sont calculés au pas de temps journalier : la valeur du jour J correspond à la valeur moyenne du jour J à 6 hTU au jour J+1 6 hTU. Ainsi, pour chaque jour inclus dans un événement de pluie ou de crue, l'indicateur retenu est celui de la veille (J-1).

Débits classés : DC

Cet indicateur est construit à partir des débits mesurés au droit des stations hydrométriques. La courbe de fréquence cumulée est réalisée pour chaque station hydrométrique utilisée, selon la procédure DEBCLA de la Banque Hydro [Leleu et al., 2014]. Tous les débits instantanés historiques à disposition sont triés par ordre croissant et associé à une fréquence de non dépassement, comprise entre 0 et 1. Une fréquence proche de 1 est synonyme d'un débit de hautes eaux (crue), et inversement proche de 0 un débit de basses eaux (étiage). Ainsi chaque matin, à partir des débits moyens de la veille, il est possible d'avoir les fréquences de non dépassement de toutes les stations hydrométriques existantes sur la zone. C'est ensuite la valeur moyenne des fréquences par zone AP qui est utilisée. Cet indicateur est choisi car l'écoulement dans les cours d'eau est corrélé à l'humidité des sols. Ceci n'est valable que si l'écoulement est naturel, c'est-à-dire pour des stations « naturelles », non-influencées. La sélection des bassins versants répond à cette contrainte, car seuls les bassins naturels sont retenus.

Réservoir de production de GRP : SJ

La modélisation pluie-débit est largement répandue au sein du réseau Vigicrues. Le modèle GRP est un modèle hydrologique global, appartenant à la famille des modèles conceptuels, fonctionnant en continu à pas de temps horaire [Berthet, 2010]. Ce modèle comporte un module de production et un module de transfert. Le module de production permet d'estimer les pluies efficaces : pluies résiduelles de l'interception par évapotranspiration et de la percolation issue de la vidange d'un réservoir. Un réservoir de production est alors modélisé. En prévision, le modèle est utilisé conjointement avec une procédure d'assimilation de données, de manière à pouvoir exploiter les débits observés en temps réel. L'indicateur SJ est construit à partir du niveau dans le réservoir de production, normalisé par sa capacité maximale (275 mm), qui est un paramètre fixe du modèle. Une valeur SJ proche de 1 signifie que le rendement de la pluie sera élevé (forte réactivité du bassin) alors qu'un rendement proche de 0 correspond à un bassin peu réactif. L'intérêt de cet indicateur réside dans la prise en compte de l'historique des données climatiques par le biais de la modélisation pluie-débit aboutissant à l'état courant du réservoir de production. Le SPC LCI dispose de modèles GRP sur 64 bassins parmi les 95 bassins retenus. Il existe au moins un modèle GRP par zone AP.

En raison d'une évolution majeure de sa modélisation en cours d'implémentation, l'indicateur équivalent de SJ provenant du système d'alerte automatisée Vigicrues Flash [Garandeau et al, 2018] n'a pu être intégré aux données.

Soil Wetness Index : SWI

L'indice d'humidité des sols, appelé SWI (Soil Wetness Index en anglais) est un indice utilisé dans la communauté scientifique internationale qui représente l'état de la réserve en eau du sol par rapport à la réserve utile (eau disponible pour l'alimentation des plantes). Dans cette étude, le SWI est issu du modèle hydro-météorologique SIM (Safran-Isba-Modcou) de Météo-France [Habets et al., 2008], utilisé pour représenter les échanges en eau à l'interface sol-atmosphère et dans le sol (évaporation, infiltration, interception de l'eau par la couverture végétale, ruissellement en surface, drainage vers le sol profond, etc). Le SWI est calculé sur une profondeur de sol d'environ 2 mètres. Un SWI égal à 0, indique que le sol est très sec, tandis qu'un SWI supérieur à 1 illustre que le sol est saturé d'eau et a atteint sa réserve utile. Météo-France dispose d'une ré-analyse de ce SWI depuis 1959. Cette ré-analyse permet de bien prendre en compte les mises à jour des données de pluies utilisées dans SIM. Dans cette étude, les données horaires sont moyennées sur la journée et agrégées à l'échelle des zones AP. Les données disponibles en temps réel pour l'opérationnel ne bénéficie pas de la ré-analyse, mais sont issues de la même version du modèle qu'en phase de calage. Il est donc estimé que le SWI disponible en opérationnel reste du même ordre de grandeur que celui d'étude et que son utilisation est possible. L'indicateur SWI est retenu, car il permet de bien suivre la dynamique de l'humidité des sols et qu'il est facilement accessible et peut être calculé sur les zones AP.

II.4 EVENEMENT DE MAI-JUIN 2016 SUR LE COSSON ET LE BEUVRON

La Sologne, correspondant ici à la zone AP Cosson-Beuvron (31010), a été concernée par des crues majeures au printemps 2016 [Perrin, 2017]. Cet événement sert de fil conducteur pour illustrer la construction et l'application des abaques de vigilance *pluie-inondation*. La Figure 2 présente la pluviométrie moyenne journalière et les indicateurs hydrologiques. La pluviométrie moyenne est notamment significative les 30 et 31 mai 2016. Les valeurs des trois indicateurs hydrologiques (DC, SJ et SWI) augmentent suite à la survenue des précipitations puis décroissent au cours du mois de juin 2016. L'évolution de ces indicateurs au long de cet événement est cohérente avec l'objectif de cette étude, à savoir l'anticipation d'inondation sur le réseau non surveillé par Vigicrues, puisque les inondations sont principalement observées du 30 mai au 1er juin.

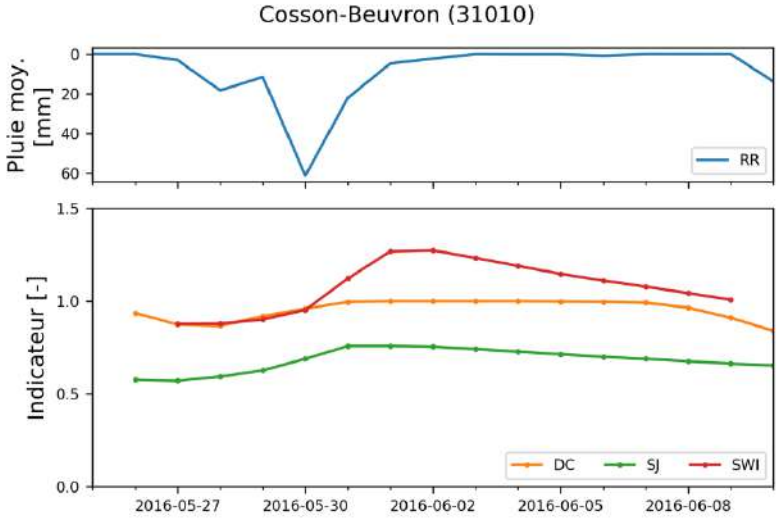


Figure 2: Pluviométrie et évolution des indicateurs hydrologiques lors de l'événement de mai-juin 2016 sur la zone AP Cosson-Beuvron (31010). La crue s'est étendue du 27 mai au 10 juin 2016.

III METHODOLOGIE

III.1 DEFINITION DES EVENEMENTS HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE

Un événement de pluie est défini à l'échelle de la zone AP, dès lors que la précipitation quotidienne relevée par un pluviomètre de la zone dépasse le seuil de 30 mm.

Un événement de crue est d'abord défini à l'échelle du bassin versant, dès lors qu'une station hydrométrique voit son débit instantané maximal dépasser son débit de période de retour 2 ans (Q2) ou 5 ans (Q5). Ces deux seuils sont choisis pour être assimilables à deux niveaux de vigilance distincts (jaune et orange). La période de crue prend en compte le temps hydrologique caractéristique du bassin : le temps de réponse (Tr), intervalle de temps qui sépare le barycentre des pluies du maximum de la réaction hydrologique. Selon l'approche de l'hydrogramme unitaire, la période de crue est caractérisée de façon schématique comme 1 fois le temps de réponse avant le pic et 2 fois après le pic de crue (m1p2). Cependant cette définition a été reprise à l'issue des premiers essais, pour en tester deux autres ne gardant que les instants de montée de crue : sur 1 ou 2 temps de réponse (m1p0 ou m2p0). La phase de décrue est alors retirée, car elle n'est pas associée à de fortes pluies. Cela revient à considérer que l'aléa inondation ciblé dans cette étude survient lors de la montée de crue des différents cours d'eau jaugés inclus dans la zone AP.

Ainsi comme l'illustre la Figure 3, avec la définition de crue m2p0, pour chaque station hydrométrique, un événement de crue est considéré comme la période débutant le jour correspondant à 2 temps de réponse du bassin avant la pointe de crue qui dépasse un des seuils Q2 ou Q5 et se terminant le jour de la pointe de crue. À l'échelle de la zone AP, les périodes de crue de chaque station sont rassemblées et fusionnées si elles se recouvrent.

L'échantillon de pluie est complété par les dates des événements de crue si celles-ci ne sont pas déjà présentes. Ceci explique le fait d'avoir quelques jours avec des pluies journalières faibles en cas d'événements de crue.

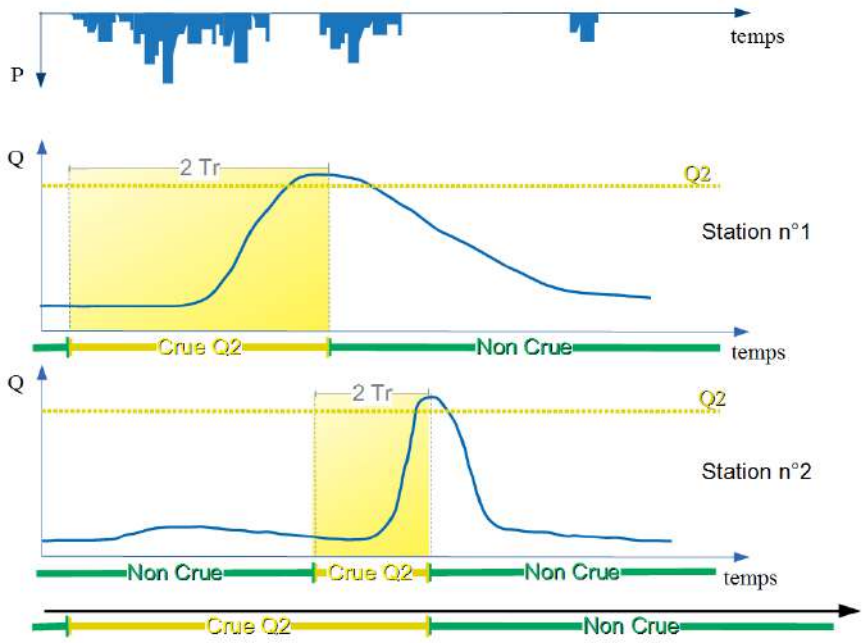


Figure 3: Schéma de la définition d'un événement de crue, à l'échelle d'une zone AP. Exemple avec une période de crue définie par 2 fois le temps de réponse du bassin versant (m2p0).

III.2 ABAQUES ET DROITES PIVOTS

Les abaques ont trois données d'entrées différentes : le cumul de pluies, l'indicateur d'humidité du sol et la nature de la vigilance *pluie-inondation*. Pour chaque zone AP, les abaques sont construits de manière à avoir la donnée du cumul journalier de pluie en ordonnée et la donnée de l'humidité sol de la veille en abscisse. La nature de la vigilance *pluie-inondation* observée est quant à elle spécifiée par un code couleur (absence de vigilance, vigilance jaune ou orange).

L'objectif de l'abaque est de trouver une délimitation simple pour aider au déclenchement de la vigilance pluie-inondation. Deux limites sont à optimiser : la droite « Pivot 2 » entre les vigilances au moins jaunes (c'est-à-dire Q2 et Q5) et l'absence de vigilance (les événements de « non-crue ») ; et la droite « Pivot 5 » entre les vigilances oranges (Q5) et les vigilances inférieures (Q2 et « non-crue »). Les droites pivot peuvent être soit oblique, soit horizontale, soit verticale (Figure 4). Dans le cas d'une verticale, cela revient à dire que le passage à l'état de crue ne dépend pas du cumul de pluie, mais seulement du dépassement d'un seuil d'humidité. Inversement une droite horizontale équivaut à avoir un déclenchement seulement par dépassement d'un seuil de cumul de pluies journalier, ce qui rejoint la configuration actuelle de la vigilance *pluie-inondation*. Les droites obliques génèrent des déclenchements qui dépendent à la fois du cumul de pluie journalier et de l'humidité du sol. Comme il paraît intuitif que le déclenchement sur sol « sec » demande plus de cumul de pluie et que celui sur sol « humide » en nécessite moins, ne sont testées que les droites décroissantes de cumul de pluie en fonction de l'humidité. Pour chaque droite pivot testée, un score de performance est calculé. Seule la droite obtenant le meilleur score est retenue.

III.3 CRITERES D'EVALUATION

L'objectif de l'abaque est de prévoir si oui ou non un événement de *pluie-inondation* aura lieu. De ce fait, pour chaque prévision, il est possible de répondre aux questions de la Table 2. L'abaque peut soit voir juste si une non-vigilance a bien été rejetée (d) ou si une vigilance a bien été détectée (a) ; soit se tromper si une vigilance n'a pas été détectée (b) ou si une vigilance a été détectée sans que cela ne soit nécessaire (c).

L'évaluation des modèles générant les vigilances consiste, ici, à définir un score approprié résumant en une seule valeur, l'information contenue dans le tableau de contingence [Laio et Tamea, 2007]. Mason (2003) propose une description exhaustive des scores fréquemment utilisés pour évaluer la performance des systèmes de prévisions binaires. Dans le cadre de cette étude, le score retenu est l'Indice de Succès Critique (Critical Success Index, CSI) dont l'usage est répandu pour évaluer les prévisions de dépassement de seuil.

Table 2: Table de contingence des vigilances effectives et prévues

		Vigilance *pluie-inondation* effective ?	
		oui	*non*
Vigilance *pluie-inondation* émise par l'abaque ?	*oui*	a	c
	non	b	d

Le CSI est la probabilité conditionnelle d'émettre une bonne vigilance *pluie-inondation* (a), sachant qu'une vigilance a été émise et/ou un évènement a été observé (a + b + c). Il se définit par l'expression :

$$CSI = \frac{a}{a+b+c} \quad (1)$$

Avec (a) les vigilances pertinentes, (b) les vigilances manquées, (c) les fausses vigilances.

Ignorant les rejets corrects (d), ce score est fréquemment utilisé pour l'évaluation d'un système de prévision d'évènements rares. Le CSI d'un système parfait vaut 1 (a≠0, b=0, c=0). La valeur minimale du CSI est 0, ce qui survient lorsque le système est incapable d'émettre de bonne vigilance (a=0).

IV ABAQUES DE VIGILANCE PLUIE-INONDATION

IV.1 DESCRIPTION D'UN ABAQUE

La Figure 4 correspond à l'abaque de la zone « Cosson Beuvron », utilisant les débits classés (DC). Les droites horizontales jaune et rouge correspondent aux seuils de cumul journalier de forte pluie (FP) actuels de Météo-France. Ces seuils varient selon les zones AP.

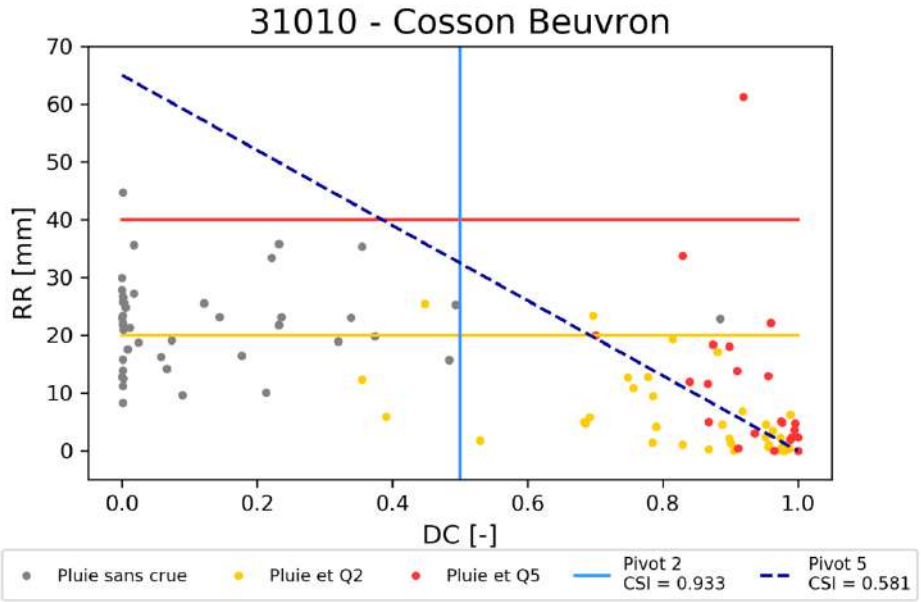


Figure 4: Exemple d'abaque, pour la zone AP du Cosson Beuvron, avec comme indicateur d'humidité des sols les débits classés (DC)

Il ressort que la majorité des événements de crue sont en dessous des seuils de forte pluie (FP). Ainsi ces seuils ne sont pas adaptés pour une bonne détection des événements de crue. La droite optimisant au mieux la détection des événements de crue supérieurs à Q2 (Pivot 2) est une droite verticale avec comme abscisse DC= 0,5. Ainsi, seule l'humidité des sols représentée par les débits classés conditionne le passage en vigilance *pluie-inondation*. Pour la détection des événements de crue de type Q5, le passage est conditionné à la fois par le cumul de pluie journalier et les débits classés, puisque la droite Pivot 5 est oblique. Tout point au-dessus de cette droite sera considéré en vigilance orange.

Dans cet exemple se pose la question de l'incohérence du positionnement des droites pour un débit classé inférieur à 0,5 et des cumuls de pluie journaliers supérieur à 35 mm. En effet, il semblerait possible d'avoir un niveau de vigilance *pluie-inondation* de couleur orange sans être passé par le jaune. Sur cette zone aucun événement réunissant ces conditions n'a été observé entre 2003 et 2018. Il n'y a aucune connaissance a priori

du type de réaction hydrologique attendu dans de telles conditions. Dans un souci de simplification, le choix s'est tout de même porté sur des abaques avec des droites. Pour l'opérationnel, il est possible de censurer une partie des droites ou de faire des droites par morceau en cas d'incohérence entre Q2 et Q5.

IV.2 PERFORMANCES DES ABAQUES DE VIGILANCE

Plusieurs expériences ont été conduites : en faisant varier la définition des événements de crue et en prenant des indicateurs d'humidité différents.

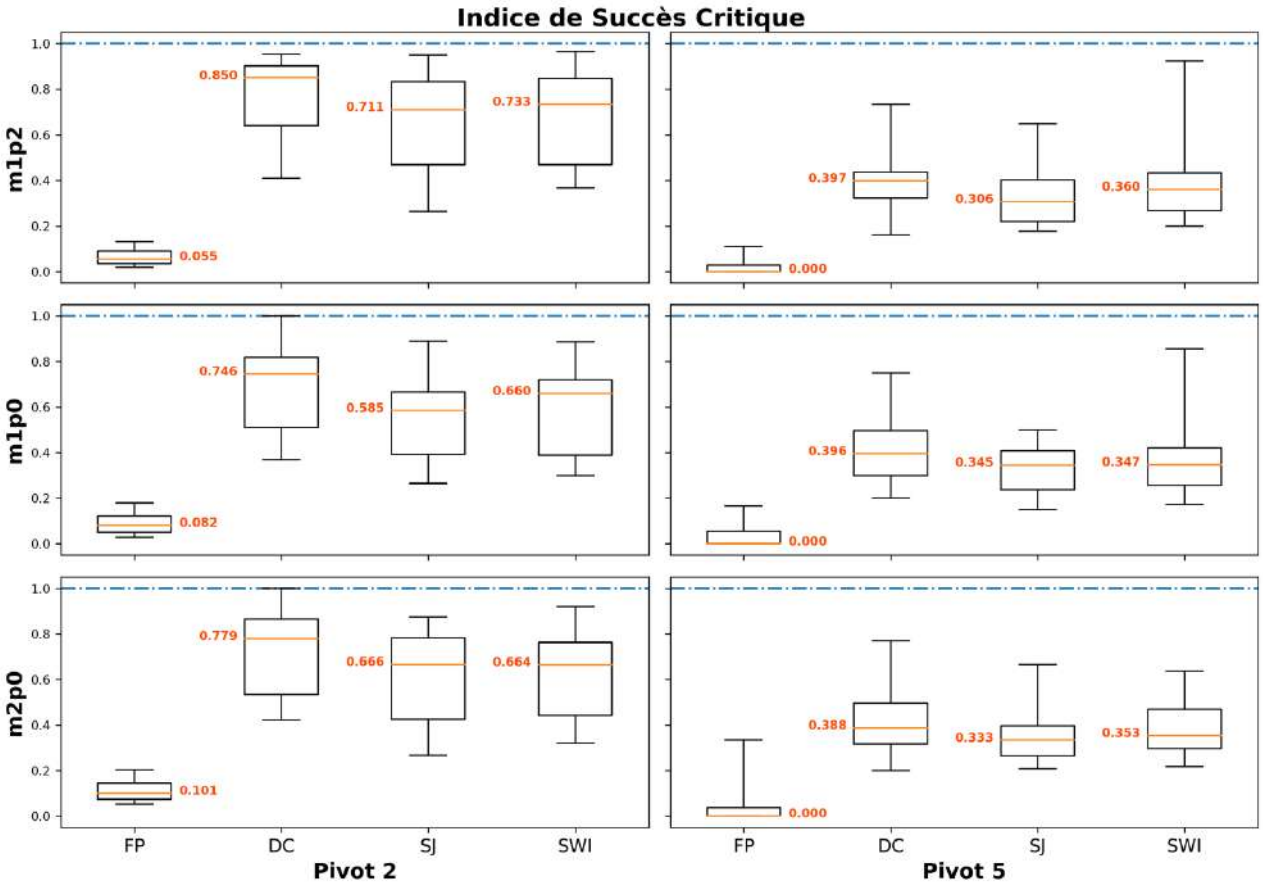


Figure 5: Répartition des scores CSI de l'ensemble des zones AP, avec les seuils de forte pluie (FP), les abaques fonctions des débits classés (DC), des niveaux de réservoir de production GRP (SJ) ou du SWI comme indicateur d'humidité des sols, et pour des définitions de crues différentes (m1p2 : [pic-1*Tr ; pic+2*Tr] ; **m1p0** : [pic-1*Tr ; pic] ; **m2p0** [pic-2*Tr ; pic]**)**

Les seuils de cumul journalier de forte pluie (FP) actuellement définis correspondent aux délimitations horizontales indépendantes de l'humidité des sols. Comme illustré avec la Figure 5, ces critères n'obtiennent pas de bonnes performances pour détecter des réactions hydrologiques. Leurs scores de CSI sont très faibles, quasi systématiquement inférieurs à 0,2, quel que soit la définition de crue.

Les abaques construits à partir des indicateurs de débits classés (DC), de niveau de réservoir de production (SJ) ou du SWI, obtiennent tous de meilleurs résultats que ceux des seuils de fortes pluies (FP). Parmi les abaques testés, celui s'appuyant sur le critère des débits classés se démarque légèrement des autres avec des scores globalement meilleurs.

Il apparaît que les crues de période de retour de 2 ans sont plus facilement détectables que les crues de période de retour 5 ans. Ceci est certainement lié à la différence de taille des échantillons : le nombre de crues Q5 est bien plus faible, ce qui ne permet pas de caler avec autant de robustesse les délimitations des abaques.

En comparant les différentes définitions de crue, il semblerait que considérer une crue comme étant une fois le temps de réponse avant le pic et deux fois après le pic de crue (m1p2) permettrait d'obtenir les meilleures performances. Or, en s'intéressant plus précisément au positionnement des points journaliers de crue, il en ressort qu'un grand nombre de point se retrouvent avec un fort indicateur d'humidité des sols, mais sans cumul de pluie associé. Ces points correspondent à la décrue : les pluies se sont arrêtées et les sols

sont saturés. Cette accumulation de points influence le calage des abaques. Ainsi les points de décrue de par leur grand nombre vont avoir tendance à être bien vus par les abaques et donc conduire à un grand nombre de bonnes détections lors du calcul des CSI. Il paraît donc cohérent qu'en enlevant les points de décrue (m1p0 et m2p0) les performances soient légèrement dégradées.

Par la suite, la définition m1p2 est mise de côté, car la prise en compte de la phase de décrue ne correspond pas aux attentes de cette étude, à savoir l'émission de vigilance *pluie-inondation* correspondant au déclenchement de cet aléa. Il est retenu de garder la définition de crue m2p0 afin de mieux englober les précipitations que m1p0 et ainsi d'avoir l'intégralité des montées de crue, sans prendre en compte la décrue.

IV.3 ANALYSES COMPLÉMENTAIRES

Répartition spatiale des critères de performances

Une différence de performances assez marquée est observée entre les zones AP selon la réactivité de leurs bassins [Figure 6].

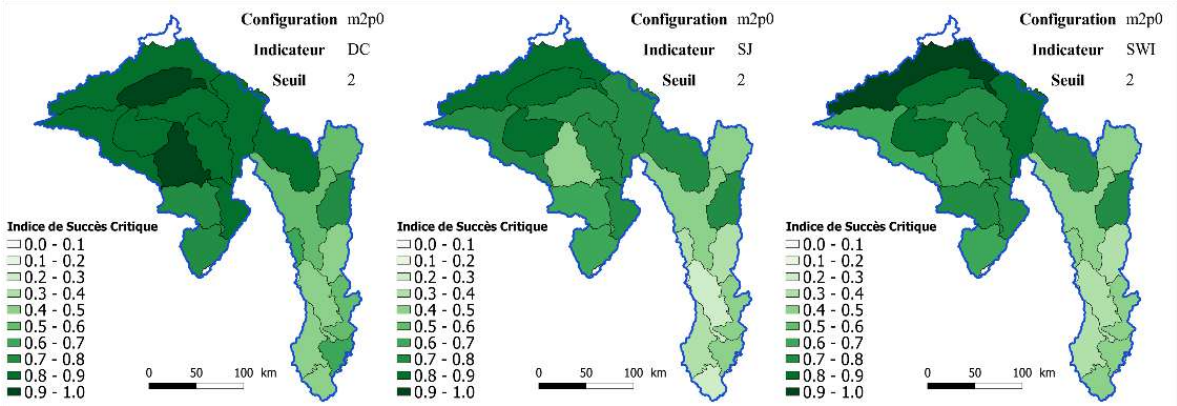


Figure 6: Performances des abaques (m2p0) selon les indicateurs hydrologique et les zones AP (en vert foncé : les CSI élevés ; en vert clair : les CSI faibles)

Les zones ayant des bassins plus lents (Sologne, Berry...) ont des abaques avec de meilleurs résultats que celles ayant des bassins rapides (Vivarais, Forez...), et ce quel que soit l'indicateur hydrologique. Deux explications sont envisagées. Cela peut venir des différences de l'échantillonnage : on détecte plus d'événements sur les bassins plus lents que sur les rapides au pas de temps journalier. Il se peut aussi que des indicateurs moyennés au pas de temps journalier ne conviennent pas aux bassins rapides. En effet, moyenner un indicateur sur 24h empêche de considérer sa variabilité pour un bassin rapide.

Censure des pivots horizontaux et verticaux

Les premiers résultats d'abaques aboutissent à un nombre assez important de droites pivot verticales. Le passage en vigilance *pluie-inondation* ne dépend, dans ce cas, que de l'état d'humidité des sols et non des cumuls journaliers de pluie. Or l'objectif ici est bien d'améliorer la vigilance actuelle avec le maintien des seuils de cumul de pluie journalier, en y associant un indicateur d'humidité, avec l'idée que l'humidité des sols conduise à un abaissement du seuil de pluie. Les droites horizontales ou verticales ont alors été mises de côté pour ne garder que les droites obliques donnant les meilleures valeurs de CSI. Les résultats sont assez variables selon les configurations d'abaques (la définition d'événement de crue, l'indicateur hydrologique). Dans certains cas, cela dégrade considérablement les performances des abaques. Dans d'autres cas, la perte de performances est peu significative. Il serait alors intéressant de prendre en compte la capacité des abaques à s'adapter aux pivots obliques pour le choix de la configuration à retenir.

IV.4 SUIVI DE L'EVENEMENT DE MAI-JUIN 2016

L'événement de mai-juin 2016 est marqué par une forte humidité des sols de la zone Cosson-Beuvron, avec des débits classés supérieurs à 0,8 [Figure 2]. Sont considérées comme étant en crue de période de retour supérieure à 5 ans, les journées du 27 mai au 2 juin 2016, selon l'approche m2p0.

	2016-05-27	2016-05-28	2016-05-29	2016-05-30	2016-05-31	2016-06-01
Etat cible (m2p0)						
Etat avec les seuils FP						
Etat avec l'abaque (m2p0; DC)						
Etat avec l'abaque (m2p0; SJ)						
Etat avec l'abaque (m2p0; SWI)						

Figure 7: Suivi des mises en vigilance obtenues avec les seuils FP et les abaques des différents indicateurs hydrologiques (DC, SJ et SWI)

Les abaques intégrant un indicateur hydrologique déclenchent tous une mise en vigilance orange pour cet événement. Le premier jour de l'événement est cependant sous-estimé en vigilance jaune avec l'abaque (m2p0, DC), ceci étant dû aux faibles cumuls de pluies de ce jour-là.

V CONCLUSION

La détection des événements d'inondation est nettement améliorée par la prise en compte de l'humidité des sols. En effet, il ressort que les phénomènes d'inondation surviennent très souvent pour des cumuls de pluie journaliers inférieurs aux seuils actuellement en vigueur. Introduire la connaissance de l'état d'humidité des sols permet en cas de contexte humide d'abaisser le seuil de cumul de pluie nécessaire au passage en vigilance (et inversement de l'augmenter en cas de contexte particulièrement sec).

Le système de détection de la vigilance *pluie-inondation* ici présenté ne cible que les aléas issus de débordement de cours d'eau et de ruissellement de versant. Le fait, d'utiliser des données hydrométriques ne permet pas d'étendre l'étude à d'autres aléas. Certains événements pluvieux d'origine orageuse ne sont pas bien détectés dans les abaques en raison d'une pluviométrie moyennée à l'échelle de la zone AP et sur 24h. Les fortes intensités locales ne sont alors pas prises en compte. D'autres vigilances existent, notamment la vigilance *orages,* qui couvre les événements pluvieux intenses et très localisés. Cette vigilance est complémentaire à la vigilance *pluie-inondation*.

Cette expérimentation est basée sur 15 ans d'observations (voire moins pour les stations récentes) et part du principe de reproductibilité des phénomènes de *pluie-inondation*. Or 15 ans de données ne permettent pas de couvrir l'ensemble des événements possibles. Malgré la longueur de la chronique, une sensibilité à l'échantillonnage est présente. Une piste d'amélioration pour ces abaques à faible nombre d'événements est de les fusionner avec d'autres abaques. Ceci ne peut se faire qu'entre zones étant soumises aux mêmes types de phénomènes hydro-météorologiques et réagissant hydrologiquement de manière similaire. Des tests de cohérences des abaques peuvent être conduits, afin d'associer au mieux les zones. Une autre possibilité réside dans l'utilisation de bases de données issues des déclarations aux assurances de dégâts causés par des inondations, en prenant soin de sélectionner les données les plus pertinentes [Le Bihan, et al., 2017]. Enfin, De plus, dans un souci d'apprentissage perpétuel du système de détection, les abaques devront être mises à jour régulièrement après l'occurrence d'événements marquants.

REFERENCES

Belin P., Verrhiest-Leblanc G. et Valantin P.-Y. (2019) – Exploitation des outils d'anticipation des phénomènes pour l'aide à la décision. *La Houille Blanche*, **3-4**, 31-38

Berthet, L. (2010). - Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), Paris, 603 pp.

Garandeau L., Belleudy A., Javelle P., Organde D., Janet B., Demargne J., de Saint-Aubin C. et Fouchier C. (2018) – Vigicrues Flash, un service automatique d'avertissement pour les crues rapides. Colloque SHF De la prévision des crues à la gestion de crise, Nov 2018, Avignon, France. pp.11

Habets F., Boone A., Champeau J.-L., Etchevers P., Leblois E., Ledoux E., Le Moigne P., Martin E., Morel S., Noilhan J., Quintana Segui P., Rousset-Regimbeau F. et Viennot P. (2008). – The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. Journal of Geophysical Research, 113, D06113

Laio F. et Tamea S. (2007). – Verification tools for probabilistic forecasts of continuous hydrological variables. Hydrology and Earth System Sciences 11(4), pp. 1267-1277.

Le Bihan G., Payrastre O., Gaume E., Moncoulon D. et Pons F. (2017) – The challenge of forecasting impacts of flash floods: test of a simplified hydraulic approach and validation based on insurance claim data. *Hydrology and Earth System Sciences*, **21 (11)**, 5911-5928

Leleu I., Tonnelier I., Puechberty R., Gouin P., Viquendi I., Cobos L., Foray A., Baillon M., Ndima P.-O. (2014) – La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques, *La Houille Blanche*, **1**, 25-32.

Leleu I., Janet B., Piotte O., Escudier A., de Saint-Aubin C., Souldadié J.-L., Rochet I., Jourdan D. et Paradis D. (2016) – Monitoring and anticipating floods in France. *E3S Web Conf.* **7 (18014)**

Mason I. B. (2003). Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science, Chapitre Binary Events, pp. 37-76

Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables (2008) – Circulaire du 31/01/08 relative aux avertissements pluviométriques et à l'information régulière pluviométrique transmis par Météo-France aux services de prévision des crues (SPC), NOR DEVO0802698C.

Naulin J.-P., Payrastre O. et Gaume E. (2013) – Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France. *Journal of Hydrology*, **486**, 88-99

Perrin, F., Sauzey, P., Menoret, B., and Roche, P.-A. (2017) – Inondations de mai et juin 2016 dans les bassins moyens de la Seine et de la Loire – Retour d'expérience, Inspection générale de l'administration, Conseil général de l'environnement et du développement durable, Rapport CGEDD n° 010743-01 et IGA n° 16080-R, 212 pp, 2017.

Mise en place d'une stratégie de gestion des eaux de ruissellement sur l'Eurométropole de Strasbourg (Grabenstaetter *et al.*)

Mise en place d'une stratégie de gestion des eaux de ruissellement sur l'Eurométropole de Strasbourg

Loïc GRABENSTAETTER[1], Bénédicte PETITJEAN [2], Rosalie VANDROMME[3], Valentin LANDEMAINE[4], Laurent SIRY[5], Rémy GENTNER[6]

[1]BRGM Grand Est – Délégation de Strasbourg, Parc d'Activité Porte Sud – Bât H1 – Rue du Pont du Péage – 67118 Geispolsheim, France, l.grabenstaetter@brgm.fr
[2] Eurométropole de Strasbourg – Service Gestion et Prévention des Risques Environnementaux – 1 Place de l'Etoile – 67000 Strasbourg, France, benedicte.PETITJEAN@strasbourg.eu
[3] BRGM – Direction Risques et Prévention, 3, av Claude Guillemin – 45060 Orléans La Source, France, r.vandromme@brgm.fr
[4] BRGM – Direction Risques et Prévention, 3, av Claude Guillemin – 45060 Orléans La Source, France, v.landemaine@brgm.fr
[5] Eurométropole de Strasbourg – Service Gestion et Prévention des Risques Environnementaux – 1 Place de l'Etoile – 67000 Strasbourg, France, laurent.SIRY@strasbourg.eu
[6] Eurométropole de Strasbourg – Service Gestion et Prévention des Risques Environnementaux – 1 Place de l'Etoile – 67000 Strasbourg, France, remy.GENTNER@strasbourg.eu

Les communes situées en bordure ouest de l'Eurométropole de Strasbourg sont caractérisées par leur localisation en aval de parcelles agricoles implantées sur des collines lœssiques. Dans le cadre du changement climatique, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes orageux, à une période où les sols des parcelles agricoles sont à nu, entraine une aggravation des coulées d'eaux boueuses et des inondations au sein des villages en aval.
Ce programme a pour objectif de limiter le transfert de sédiments et les eaux de ruissellement via l'installation d'ouvrages d'hydraulique douce et structurante (bassin de rétention, fossés...) afin de décaler l'onde de crue, et d'éviter au maximum d'impacter les ouvrages d'assainissement dans la gestion des ruissellements non urbains, ainsi que de protéger les zones urbaines.
Afin de proposer une stratégie de gestion, la modélisation des écoulements, l'évaluation des volumes et des débits parcourant la zone d'étude se doit d'être la plus fine possible. C'est pourquoi, la précision et la qualité des données entrantes est essentielle.
Pour ce faire, le BRGM utilise le modèle Watersed qui permet, à partir des données d'occupation et de texture du sol, des lignes d'écoulement issues d'un LIDAR et corrigées d'après des relevés terrain, d'obtenir les impacts d'évènements pluvieux en chaque point de la zone d'étude.
Une fois l'implantation théorique des ouvrages d'hydraulique réalisée, le modèle Watersed permet de modéliser leur influence sur les volumes de ruissellement et les débits de pointe. L'étude étant en cours, les premiers résultats sont attendus en septembre 2020.
Mots-clefs : ruissellement, coulée d'eau boueuse, gestion du risque, urbanisme, hydraulique

Implementation of a run-off water management strategy for the Eurometropolis of Strasbourg

The communes located on the western edge of the Eurometropolis of Strasbourg are characterised by their location downstream of agricultural plots on loessal hills. In the context of climate change, the increase in frequency and intensity of thunderstorm events at a time when the soils of the agricultural plots are bare leads to an aggravation of muddy water flows and flooding in the downstream villages.
The objective of this programme is to limit the transfer of sediment and runoff water through the installation of hydraulic works (retention basin, ditches...) in order to offset the flood wave, and to avoid as much as possible the impact on the wastewater facilities for the management of non-urban runoffas well as to protect urban areas.
In order to propose a management strategy, the modelling of flows, the assessment of volumes and flows through the study area must be as accurate as possible. For this reason, the accuracy and quality of the incoming data is essential.
To do this, BRGM uses the Watersed model, which uses land use and soil texture data, LIDAR-derived flow lines corrected according to field surveys, to determine the impacts of rainfall events at each point in the study area.
Once the theoretical implementation of the structural hydraulic structures has been determined, the WATERSED model can be used to model their influence on runoff volumes and peak flows. As the study is ongoing, the first results are expected in september 2020.
WATERSED model has already been used, in the same area, to develop a management strategy for muddy water flows using soft hydraulics structures, making it possible to limit sediment deposition on the stakes by more than 80%.
Key words: runoff water, muddy water flow, risk management, urbanism, hydraulic

INTRODUCTION ET OBJECTIFS

En cette période de changement climatique, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements orageux à une saison où les sols des parcelles agricoles sont à nu, engendre une aggravation des dommages liés aux coulées d'eaux boueuses et inondations sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) déjà sensible à ces phénomènes [Van Dijk et al, 2016]. Les événements de 2016 [Baierer, Troadec, 2016], 2017 et 2018 ont abouti à plusieurs demandes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

L'Eurométropole de Strasbourg s'est dotée de la compétence Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations (GEMAPI) ainsi que de la compétence complémentaire définie par l'alinéa 4 de l'article L.214-7 du Code de l'Environnement : « la maîtrise des eaux pluviales et de ruissellement ou la lutte contre l'érosion des sols » en date du 1er janvier 2018. De fait, l'Eurométropole a ainsi la responsabilité de réaliser des études et travaux pour la protection des biens et personnes contre les coulées d'eaux boueuses pour les 14 communes de son territoire concernées par ce risque.

Dans cette optique, une convention de recherche et développement partagés a été signée entre l'Eurométropole et le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) pour réaliser, en 2018, une étude prospective concernant la protection des zones urbaines vis-à-vis des coulées d'eaux boueuses à l'aide d'ouvrages d'hydraulique douce (bandes enherbées, fascines...) [Grabenstaetter et al, 2019]. L'utilisation de méthodes d'hydraulique douce s'est imposée compte tenu de la nature agricole des terrains entourant ces communes ; il est essentiel de développer des solutions conciliant agriculture et protection contre l'érosion des sols et ruissellement à l'échelle des bassins versants.

Les aménagements d'hydraulique douce jouent le rôle de frein et de filtre hydrauliques : ils permettent de ralentir les écoulements provenant des parcelles, mais également de favoriser le dépôt des sédiments charriés par les coulées d'eaux boueuses à leur amont.

Cependant, si l'implantation d'ouvrages d'hydraulique douce permet de diminuer significativement les volumes de boue déposés en zone urbaine, elle se révèle peu efficace pour stopper les eaux de ruissellement qui continuent à impacter les zones urbaines. Une étude est actuellement menée par le BRGM pour proposer une stratégie de gestion des eaux de ruissellement non chargées via la modélisation d'ouvrages d'hydraulique structurante. Compte tenu de l'environnement agricole au sein duquel les ouvrages doivent être implantés, il est essentiel de limiter l'emprise foncière des ouvrages proposés.

La mise en œuvre de l'ensemble des dispositifs (hydraulique douce ou structurante) doit être cohérente au regard du risque et du contexte du territoire concerné. Compte tenu du nombre important de bassins versants concernés (94), une priorisation des secteurs à traiter a été fournie à l'Eurométropole de Strasbourg par le BRGM afin d'aiguiller les investissements sur les secteurs les plus vulnérables.

METHODE ET VERROUS TECHNIQUES

Afin d'implanter les ouvrages de protection (hydraulique douce ou structurante) sur les secteurs les plus vulnérables, la connaissance des chemins d'eau se doit d'être la plus précise possible. Dans cette optique, les lignes de flux issues d'un traitement sur les données Lidar de l'Eurométropole ont été validées sur le terrain. Certaines spécificités locales telles que des merlons, voieries, fossés qui modifient le tracé issu du lidar ont été prises en compte afin d'obtenir le tracé « réel » des chemins d'eau sur l'ensemble de la zone d'étude.

En complément, les travaux de l'ARRA (Association pour la Relance Agronomique en Alsace) classifiant les différents types de sols de la zone d'étude en fonction de leur fraction sableuse, argileuse ou limoneuse [DREAL ALSACE, 2014] ont été réinterprétés pour définir la nature des sols.

La carte d'occupation des sols a été réalisée par compilation de différentes bases de données (registre parcellaire agricole - RPG, données Theia, BD TOPO...) afin de définir l'utilisation de chaque parcelle. Concernant les parcelles agricoles, l'exploitation des données RPG a permis de localiser l'ensemble des parcelles agricoles qui présentent, dans le cadre de la rotation culturelle, des cultures favorables à l'érosion des sols (correspondant dans le cadre de l'étude aux cultures de printemps et printemps tardif qui présentent un faible développement végétal lors de l'occurrence des orages de printemps). Lors de la réalisation de l'étude prospective concernant les coulées d'eau boueuses, l'occupation des sols utilisée a été volontairement considérée comme pénalisante afin de réaliser un inventaire de l'ensemble des bassins versants susceptibles de présenter des phénomènes de coulées de boue et de ruissellement.

Le croisement des cartes d'occupation et de nature des sols a permis de réaliser une caractérisation des états de surface sur l'ensemble des parcelles. Ces états de surface ont été convertis en propriétés physiques des sols qui ont permis de modéliser le ruissellement et le taux d'érosion des parcelles agricoles [Cerdan, et al, 2002]. Ces paramètres sont :

- La capacité d'infiltration du sol ;
- La capacité d'imbibition du sol ;
- La charge sédimentaire des eaux de ruissellement ;
- L'érodibilité des sols ;
- Le coefficient de Manning qui décrit la vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement en fonction de la nature et de l'occupation des sols.

La modélisation réalisée à partir du module Watersed [Landemaine et al., 2016] s'appuie sur le modèle de type expert STREAM [Cerdan et al, 2002] et a permis d'évaluer l'impact d'un évènement pluvieux de référence, qualifié selon des données Météo France, et d'en modéliser la réponse hydraulique. Concernant l'étude menée sur le territoire de l'Eurométropole, les évènements météorologiques de référence sélectionnés correspondent à un épisode pluvieux de période retour 10 ans, 30 ans et 50 ans se produisant entre les mois d'avril et mai. Cette période d'occurrence a été fixée suite à une analyse statistique des données disponibles au sein de la base de données GASPAR recensant les arrêtés de reconnaissance de catastrophes naturelles.

Méthodologie d'élaboration de la stratégie de gestion des coulées d'eaux boueuses

Le module Watersed fournit de nombreux éléments concernant la réponse hydrique. Dans le cadre de l'élaboration de la stratégie de gestion des coulées d'eaux boueuses, les indicateurs qui ont été utilisés sont les suivants :

- Le débit de pointe mesuré à l'exutoire du bassin versant $m^3.s^{-1}$;
- Le volume total de sédiments transitant à l'exutoire du bassin versant en kg.

Dans un premier temps, la réponse hydrique théorique, sur une occupation des sols pessimiste, a été réalisée afin d'établir un état initial. Dans un second temps, les ouvrages de protection existants ont été digitalisés et leur impact a été modélisé. Ces ouvrages avaient majoritairement été mis en place par les communes antérieurement à la prise de compétence GEMAPI par l'Eurométropole.

Sur la base des résultats de ces modélisations, le BRGM propose de compléter le dispositif en place sur les bassins versants où cela s'est avéré nécessaire. Pour ce faire, l'impact de plusieurs types d'ouvrages d'hydraulique douce a été modélisé :

- Fascines (mortes ou vivantes) ;
- Haies ;
- Bandes enherbées ;
- Chenaux enherbés.

Les règles d'implantation ont été les suivantes :

- Implantation des ouvrages en limites d'unité culturale (sur demande de l'Eurométropole pour limiter les contraintes agricoles) ;
- Les fascines sont installées dans le cas de figure où la pente est supérieure à 5% pour des aires contributives inférieures à 10 hectares ainsi qu'à l'entrée des zones urbaines ;
- Les bandes enherbées sont implantées au croisement des zones cultivées et des chemins d'eau pour des aires contributives inférieures à 20 hectares ;
- Les chenaux enherbés sont implantés le long des chemins d'eau, dans le sens de la pente dans le cas où les aires contributives sont supérieures à 20 hectares.

Sur l'ensemble des 14 communes de la zone d'étude, 94 bassins versants ont été identifiés. Afin de permettre un déploiement optimal des ouvrages de protection, le BRGM a procédé à une hiérarchisation des bassins versants afin de permettre aux services de l'Eurométropole d'orienter les budgets vers les secteurs sur lesquels le risque est prégnant.

Cette hiérarchisation a été basée sur la nature des enjeux affectés à l'aval des bassins versants et sur les volumes de sédiments transitant au droit de ces enjeux. Les zones à protéger de manières prioritaires sont caractérisées par la présence d'enjeux particulièrement vulnérables ou de réponse de crise (école, établissement médicaux, pompiers, mairies, services municipaux...), ou de zones résidentielles. Les bassins versants au sein desquels le volume de terre érodée est supérieur à 1 000 tonnes lors d'un évènement pluvieux de période de retour cinquantennale sont également considérés prioritaires.

Sur la base d'éléments de bibliographie [Pannet et al, 2012], un estimatif des coûts en termes d'investissement et de fonctionnement a été élaboré par le BRGM. Ces coûts ont été découpés par niveau de priorisation des bassins versants mais également par territoires communaux.

L'Eurométropole de Strasbourg établit sa stratégie et son programme d'actions de lutte contre les coulées d'eaux boueuses sur la base des préconisations de l'étude BRGM. De nombreux échanges avec la profession agricole sont indispensables à la déclinaison opérationnelle des préconisations du BRGM, et à leur traduction dans le contexte agricole local.

Afin d'évaluer l'effet des actions de lutte contre l'érosion des sols mises en œuvre, les données concernant les assolements, l'alternance des cultures et les dispositifs d'hydraulique douce, sont utilisées pour réaliser de nouvelles modélisations. Les résultats permettront de hiérarchiser et de planifier la suite du plan d'action., et apporteront un retour d'expérience afin de faire évoluer le plan d'actions de la façon la plus cohérente possible.

Méthodologie d'élaboration de la stratégie de gestion des eaux de ruissellement

L'objectif de l'étude prospective concernant la gestion du risque lié aux coulées d'eaux boueuses, réalisée par le BRGM en 2018 concernait uniquement la limitation du transfert de particules en suspension au sein des eaux de ruissellement. L'efficacité des ouvrages d'hydraulique douce sur les eaux de ruissellement reste très limitée.

Certes, les populations exposées sont réceptives à la limitation des volumes de terres déposés mais restent en attente d'une solution concernant les eaux de ruissellement. De fait, le BRGM a travaillé sur l'élaboration d'une stratégie de gestion des eaux de ruissellement, d'origine agricole, à l'aide des mêmes outils que ceux utilisés dans le cadre de la gestion du risque lié aux coulées d'eaux boueuses.

Les conditions d'implantation des ouvrages sont néanmoins différentes :

- Implantation d'ouvrages d'hydraulique structurante (fossés, bassins, réservoir...) ;
- Éléments de coûts à estimer dans le cadre d'une stratégie globale ;
- Objectif de résilience vis-à-vis d'un épisode pluvieux de période de retour cinquantennale.

Les contraintes techniques sont nombreuses et ont nécessité une réflexion approfondie sur le type d'ouvrages à mettre en place :

- Terrain en forte pente ;
- Emprise foncière la plus faible possible en domaine agricole ;
- Peu de foncier publique disponible ;
- Volume d'eau à traiter important.

La phase de recherche bibliographique a permis de recenser de nombreux type d'ouvrages dont l'implantation a été envisagée sur la zone d'étude :

- Fossés ou noues ;
- Bassins enterrés ou de surface ;
- Parkings ou voirie enherbé(e)s ;
- Chaussées à structure réservoir avec ou sans drain ;
- Seuils agricoles ;
- Toits stockants ou végétalisés
- Tranchées drainantes ;
- Puits d'infiltration.

Dans un premier temps, une étude approfondie des différents ouvrages et de leur pertinence dans le contexte de l'Eurométropole de Strasbourg a été réalisée. Plusieurs stratégies d'implantation ont été proposées afin de tenir compte des possibilités techniques offertes par les différents ouvrages. L'efficacité de chaque dispositif a été mesuré sur la base des indications de débits de pointe et de volume total d'eau modélisés via le module Watersed.

RESULTATS

Proposition d'une stratégie de gestion des coulées d'eaux boueuses

Sur la base des contraintes de positionnement des ouvrages d'hydraulique douce exposée précédemment, le BRGM a proposé l'implantation, en complément des ouvrages déjà en place, de 125 fascines ou haies et de

250 bandes et chenaux enherbés répartis sur les 14 communes. Les résultats ont été présentés, à l'échelle communale et du bassin versant sous la forme de cartes et de diagrammes (Figure 1).

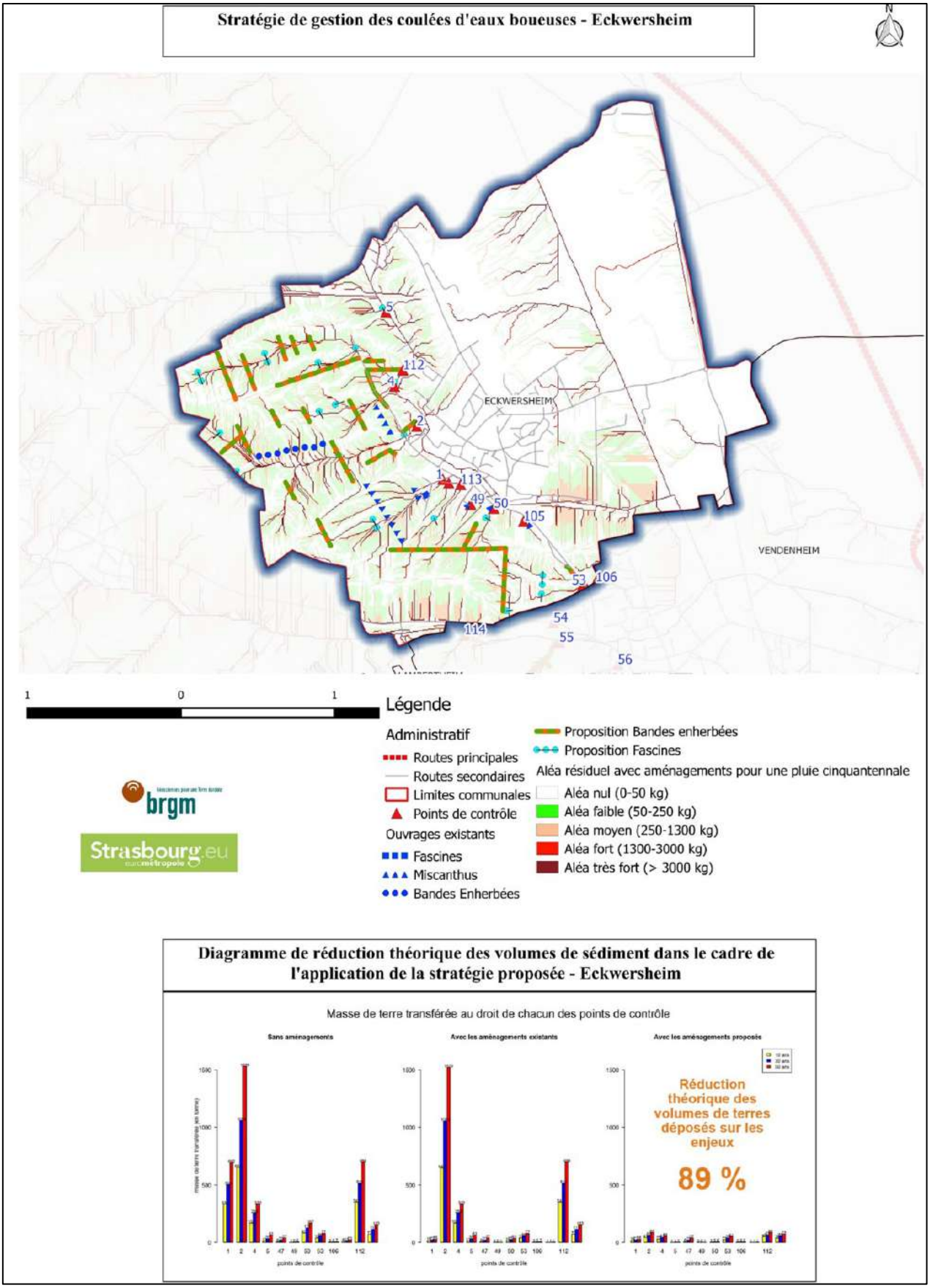


Figure 1 : Présentation des résultats sur la commune d'Eckwersheim pour une pluie de période de retour cinquantennale

Le taux de réduction théorique des masses de terre déposées en zone urbaine a été calculé pour l'ensemble des communes de la zone d'étude (Tableau 1). Sur l'ensemble de la zone d'étude, l'impact des ouvrages d'hydraulique douce proposés dans le cadre de l'étude prospective a permis d'espérer une réduction de 80% de volumes de terres transportés sur un épisode pluvieux de période de retour cinquantennale.

Commune	Réduction théorique du volume de terre déposé sur les enjeux
ACHENHEIM	49%
BLAESHEIM	1%
BREUSCHWICKERSHEIM	77%
ECKWERSHEIM	89%
HANGENBIETEN	73%
KOLBSHEIM	93%
LAMPERTHEIM	95%
MITTELHAUSBERGEN	87%
MUNDOLSHEIM	4%
NIEDERHAUSBERGEN	80%
OBERHAUSBERGEN	72%
OBERSCHAEFFOLSHEIM	64%
OSTHOFFEN	75%
VENDENHEIM	78%

Tableau 1 : Réduction théorique (%) des masses de terre transitant sur les enjeux pour une pluie cinquantennale si implantation de l'ensemble des ouvrages de protection proposés

La stratégie de gestion proposée promet de fonctionner sur la majorité des communes de l'EMS. Seules les communes de Blaesheim et de Mundolsheim ne présentent pas de résultats significatifs. L'explication à ce phénomène est à chercher sur le profil topographique des versants considérés.

En effet, au niveau de la commune de Blaesheim, les secteurs de fortes pentes sont occupés par des vergers et des prairies qui sont peu susceptibles à l'apparition de coulées d'eaux boueuses. Les secteurs sur lesquels les coulées d'eaux boueuses se sont déclenchées présentent des pentes beaucoup plus faibles ; de fait, les écoulements sont moins concentrés et l'efficacité d'ouvrages ponctuels est moins probante.

La commune de Mundolsheim présente un profil topographique similaire aux communes limitrophes fortement impactées par les coulées d'eaux boueuses. Cependant, très peu de parcelles agricoles se situent en amont de la zone urbanisée (qui remonte très haut sur les coteaux). Les parcelles agricoles sont localisées exclusivement sur la crête et présentent de pentes très faibles ; de fait, les écoulements sont moins concentrés et l'efficacité d'ouvrages ponctuels est moins élevée.

Pour les communes de Blaesheim et de Mundolsheim, compte tenu des spécificités locales, le BRGM a recommandé de mettre en place une réflexion sur le changement de pratiques agricoles (méthodes sans labour, semis sous couvert…).

Le coût d'installation (investissement), d'indemnisation des exploitants agricoles et d'entretien des ouvrages (fonctionnement) pour les 96 bassins versants identifiés a été estimé à environ 500.000 € dont 230.000 € pour les bassins versants en priorité 1 (150.000 € d'investissement et 80.000€ de fonctionnement).

Pour rappel, ces coûts estimés correspondent à la mise en place totale des ouvrages implantés sur la base d'une occupation du sol la plus défavorable possible. Celle-ci ne devrait pas être rencontrée en réalité en raison de la rotation des cultures, mais a permis d'appréhender l'ordre de grandeur global de la mise en place d'une stratégie de gestion du risque lié aux coulées d'eaux boueuses.

Proposition d'une stratégie de gestion des eaux de ruissellement

D'après les éléments obtenus en bibliographie, l'ensemble des ouvrages répertoriés en bibliographie n'aurait pas pu être déployé sur la zone d'étude. Le Tableau 2 répertorie les avantages et inconvénients recensés à l'heure actuelle.

Méthodologie	Avantages	Inconvénients
Noues ou fossés	Peu d'espace nécessaire	Impact localisé
Chaussées à structure réservoir	**Capacité réservoir importante**	Peut nécessiter un exutoire **Coût élevé** Entretien nécessaire Uniquement sur faible pente ***Sensible au colmatage***
Bassins enterrés ou non	**Capacité réservoir très importante**	**Coûts très élevé** Entretien nécessaire Espace nécessaire pour bassin aérien
Parkings ou voirise enherbé(e)s	**Coût peu élevé**	Résistance aux engins agricoles ?
Seuils agricoles	Facile à mettre en place	**Non compatible avec le passage de véhicule**
Toits stockants ou végétalisés	Possible sur certains bâtimens agricole? Possibilité de réutiliser l'eau pluviale	Volume limité
Tranchées drainantes	Volumes théoriques d'infiltration importants	Capacité d'infiltration des lœss limitée
Puits d'infiltration	Volumes théoriques d'infiltration importants	Capacité d'infiltration des lœss limitée

Tableau 2 : Tableau avantages/inconvénients des différents ouvrages d'hydraulique structurante sur la zone d'étude (travail en cours)

A l'heure actuelle, la stratégie de gestion des eaux de ruissellement n'exclue aucune typologie d'ouvrage. Des modélisations vont être réalisées à l'aide du module Watersed pour valider l'impact de plusieurs scénarii incluant différents type d'ouvrages.

L'étude étant en cours, aucun résultat ne peut être fourni en terme d'abattement des débits de pointe ou de volume d'eau. Les premiers résultats sont attendus pour le mois de septembre.

CONCLUSIONS

Concernant la gestion du risque lié aux coulées d'eaux boueuses, les modélisations réalisées par le BRGM à l'aide du module Watersed ont démontré que le déploiement d'ouvrages d'hydraulique douce permettrait de diminuer les dépôts de sédiment de plus de 80% sur la majorité des bassins versants concernés.

L'Eurométropole de Strasbourg, suite au rendu de l'étude prospective du BRGM a engagé 2 actions complémentaires.

Un partenariat avec la Chambre d'Agriculture a permis de faciliter les échanges entre la profession agricole et l'Eurométropole, qui a pu engager les négociations avec les exploitants afin d'engager l'implantation d'ouvrages d'hydraulique douce. Ceci s'est traduit par la mise en place de plus de 1200 ml de dispositifs d'hydraulique douce sur les communes concernées en 2020.

Dans un second temps, l'Eurométropole a mandaté le BRGM, dans le cadre de la mise en place d'une stratégie pluri annuelle de gestion du risque lié aux coulées d'eaux boueuses afin de prioriser chaque année, en fonction de l'occupation des sols réelle, de la prise en compte des ouvrages implantés et des évolutions de terrain l'implantation des ouvrages sur les secteurs prioritaires au regard de ces informations.

Ceci implique l'acquisition et le traitement de données satellites suffisamment tôt durant le cycle agricole pour identifier les parcelles susceptibles à l'érosion sur la période printanière de mai-juin. Cette étude a débuté en 2020, les premiers résultats seront observables dès l'année 2021.

Concernant la gestion des eaux de ruissellement d'origine agricole, les travaux en cours devront permettre de capter une part significative de ces eaux en aval des parcelles agricoles et en amont des zones urbaines à l'aide d'ouvrages d'hydraulique structurante. La typologie d'ouvrages à mettre en place n'est pas encore fixée car l'étude est toujours en cours. Les contraintes d'emprise limitée et de proximité des domaines agricoles peuvent limiter les possibilités techniques. De plus, compte tenu des investissements lourds probablement

recommandés, la mise en place d'une stratégie sur le long terme sera à envisager par les services de l'Eurométropole de Strasbourg.

NOMENCLATURE

ARRA : Association pour la Relance Agronomique en Alsace
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
EMS : Eurométropole de Strasbourg
GASPAR : Gestion ASsitée des Procédures Administratives relatives aux Risques
GEMAPI : Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations
LIDAR : LIght Detection And Ranging
RPG : Registre Parcellaire Agricole
STREAM : Sealing and Transfer by Runoff ans Erosion in relation with Agricultural Management

REFERENCES

Baierer, C., & Troadec, B. (2016). Avis technique dans le cadre d'une demande de reconnaissance de catastrophe naturelle suite aux inondations et coulées boueuses survenues le 25 juin 2016 sur la commune de Hangenbieten. BRGM/RP-66112-FR

Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A., & Le Bissonnais, Y. (2002). Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. Catena, 46 (2-3). p. 189-205

DREAL ALSACE. (2014). Risques naturels et hydrauliques : les coulées d'eau boueuse. Récupéré sur DREAL Grand Est: http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/les-coulees-d-eau-boueuses-dans-les-departements-a16758.htm

Grabenstaetter L., Vandromme R., Landemaine V., Masselis G. (2019) – Evaluation de l'aléa « coulées d'eaux boueuses » et stratégie de gestion sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg. Rapport final. BRGM/RP-68653-FR, 198 p., 24 ill., 17 tabl., 5 ann

Landemaine, V., Van Oost, K., Evrard, O., Mouchel, J., Souchère, V., Massel, N., Fournier, M. (2016). Erosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : Analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle

Pannet P., Noblat T., Delafenêtre C., Branellec M. (2012) – Cartographie de l'aléa érosion des sols, des enjeux et des zones à protéger sur le territoire du SAGE des bassins versants Cailly, Aubette, Robec. Proposition d'actions et de protections adaptées aux enjeux. Rapport final. Rapport BRGM/RP-60619-FR. 98p, 22ill., 5 ann., et 4 ann hors texte

Van Dijk, P., Rosenfelder, C., Scheurer, O., Duparque, A., Martin, P., & Sauter, J. (2016, juin). Une approche agronomique territoriale pour lutter contre le ruissellement et l'érosion des sols en Alsace. Agronomie environnement & sociétés, Volume n 6(Numéro 1). Récupéré sur www.agronomie.asso.frDelhaye J. M., Giot M., Riethmuller M. L. (1981). - *Thermal-hydraulics of two-phase systems for industrial design and nuclear engineering.* Hemisphere and McGraw Hill

Applicabilité des méthodes cartographiques par somme d'indicateurs dans le cadre de la mise en oeuvre de politiques publiques de gestion intégrée des risques ruissellement (Barjot)

APPLICABILITE DES METHODES CARTOGRAPHIQUES PAR SOMME D'INDICATEURS DANS LE CADRE DE LA MISE EN ŒUVRE DE POLITIQUES PUBLIQUES DE GESTION INTEGREE DES RISQUES RUISSELLEMENT

Guillaume BARJOT[1],

[1]ARTELIA Villes et Territoires, 21 Rue de la Haye, 67 300 SCHILTIGHEIM, France, guillaume.barjot@arteliagroup.com

Depuis plus de 150 ans la réponse traditionnelle de gestion des eaux pluviales en France consiste à les évacuer le plus rapidement possible des villes en utilisant des infrastructures lourdes. Ce mode de gestion, extrêmement couteux, occasionne également de multiples dysfonctionnements. Cette complexité est doublée de nouveaux enjeux, associés aux changements climatiques, des évolutions de gouvernance et une prise de conscience des populations, qui imposent une vision plus globale et mieux intégrée de l'eau à l'échelle d'un territoire. Parce qu'il fait consensus, le risque ruissellement est un élément fondateur de la gestion intégrée des eaux pluviales. Néanmoins, cette intégration dans une politique territoriale opérationnelle nécessite de disposer d'outils permettant le dimensionnement « a priori ». Outils présentant à la fois un caractère pragmatique, tout en conservant une justesse technique pour rester fiables, mesurables et reproductibles.

Les méthodes cartographiques à scores répondent à ces besoins en traduisant à la fois la réalité du terrain et en permettant l'action concrète sur l'aménagement du territoire. ARTELIA a conçu, validé et appliqué a deux territoires une méthode cartographique, dont l'objectif premier est de caractériser la susceptibilité à l'aléa ruissellement dans le cadre d'une gestion intégrée. Le travail a majoritairement porté sur le référentiel des indicateurs, largement retravaillé ; ainsi que sur la méthodologie générale et son usage, qui a été complétée. Nous avons pu mettre en place des plans d'actions scénarisés aux performances mesurables et objectivables, structurés pour répondre aux questionnements :

- *Où agir ?*
- *Quoi faire ?*
- *Avec quelle performance ?*

Mots-clefs : ruissellement, érosion, inondation, gestion intégrée, territoire.

APPLICABILITY OF SCORING CARTHOGRAPHIC METHODS IN THE CONTEXT OF PUBLIC POLICIES FOR INTEGRATED SURFACE RUNOFF RISK MANAGEMENT

For more than 150 years, the traditional response to managing rainwater in France has consisted in evacuating it as quickly as possible from cities using heavy infrastructures. This extremely expensive management method also causes multiple dysfunctions. This complexity is coupled with new challenges, associated with climate change, changes in governance and an awareness of populations, which impose a more global and a better-integrated vision of water management. Because there is consensus, surface runoff risk is a founding element of integrated rainwater management.

However, this integration into an operational territorial policy requires having tools allowing "a priori" design and engineering. These tools must, at the same time, be kept pragmatic, while preserving a technical correctness to remain reliable, measurable and reproducible.

Scoring cartographic methods meet these requirements by translating both the reality on the ground and allowing concrete action on regional planning. ARTELIA has designed, validated and applied a cartographic method, with the primary objective of characterizing the susceptibility to surface runoff risk within the framework of integrated rainwater management. The majority of the work focused on the benchmark for indicators, which has been largely reworked; as well as on the general methodology and its use, which has been completed. We were able to set up scripted action plans with measurable and objective performance, structured to answer the questions:

- *Where to act?*
- *What to do?*
- *With what performance?*

Key words : surface runoff, erosion, flood management, integrated management, territory.

LE RISQUE RUISSELLEMENT COMME ELEMENT FONDATEUR D'UNE POLITIQUE DE GESTION INTEGREE

Depuis plus de 150 ans la réponse traditionnelle de gestion des eaux pluviales en France consiste à les évacuer le plus rapidement possible des villes en utilisant des infrastructures lourdes (canalisations, bassins, …) qui, très souvent, recueillent également les eaux usées. Ce mode de gestion, extrêmement couteux, occasionne également de multiples dysfonctionnements : débordements des réseaux, inondations, rejets urbains, accélération de l'érosion des sols, vulnérabilité des ressources, …

Autant de signaux qui témoignent des difficultés de la gestion de l'eau : multiplicité des acteurs, foisonnement des solutions techniques, diversité des financements, …. Cette complexité est doublée de nouveaux enjeux, associés aux changements climatiques, mais aussi à des évolutions de gouvernance et une prise de conscience des populations, qui imposent une vision plus globale et mieux intégrée de l'eau dans et autour de la ville, mais aussi à l'échelle d'un territoire complet. Dans l'élaboration de nos schémas et plans directeurs, nous avons identifié quatre grands enjeux qui nécessitent une approche commune pour permettre un changement de paradigme en matière de gestion des eaux pluviales :

- L'enjeu d'une gestion intégrée d'abord, pour dépasser les classiques oppositions d'échelle en apportant une réponse multithématiques et multiniveaux à chacun des acteurs en présence.
- L'enjeu d'une gestion partagée, pour former consensus et susciter l'adhésion des acteurs autour d'une démarche durable, co-construite et partagée.
- L'enjeu d'une gestion au service de la population, pour répondre à l'impérieuse nécessité de disposer d'outils pédagogiques et techniques, directement au service des habitants, gratuitement.
- L'enjeu d'une gestion résiliente, prenant en compte les changements climatiques et leurs effets, pour positionner le territoire face aux questions de demain.

Parce qu'il fait consensus auprès des décideurs publics, des aménageurs mais aussi de la population, le risque ruissellement est un élément fondateur d'une politique publique intégrée de gestion de l'eau pluviale, au service d'un territoire et de ses habitants. Néanmoins, intégrer les enjeux de la gestion de l'eau dans une politique publique opérationnelle à l'échelle d'un territoire nécessite de disposer d'outils permettant le dimensionnement « a priori » des mesures de gestion et de protection. Ces outils doivent, en outre, présenter un caractère pragmatique, au service des décideurs et des citoyens, tout en conservant une justesse technique permettant d'orienter les choix de manière fiable, mesurable et reproductible.

METHODES CARTOGRAPHIQUES A SCORES ET GESTION INTEGREE DU RISQUE RUISSELLEMENT

UN EXEMPLE DE METHODE A SCORES, LA METHODE IRIP.

Le diagnostic proposé aujourd'hui pour les inondations par ruissellement repose sur des méthodes d'analyses hydrologiques qui ont été développées pour étudier les débits dans des cours d'eau, et ne permettent souvent pas de détecter les zones sensibles aux inondations par ruissellement, ni les axes de ruissellement qui sont parfois éloignés de tout cours d'eau ou talweg. L'inexistence de méthodes spécifiques liées aux inondations par ruissellement a été soulevée récemment par un groupe d'étude du Graie sur les eaux pluviales [Brelot et al. 2009]. Ce groupe de travail qui rassemble plusieurs acteurs de l'agglomération lyonnaise avait insisté sur la nécessité de développer une réponse scientifique globale aux problèmes rencontrés dans le diagnostic du ruissellement. Compte tenu de la difficulté à évaluer l'aléa inondation par ruissellement, il apparait pertinent

d'utiliser des méthodologies basées sur l'analyse d'informations géographiques et sur les connaissances disponibles sur la dynamique amont/aval des écoulements de surface.

L'objectif initial de développement de la méthode IRIP était de concevoir une méthode simple et robuste.

- Robuste dans le sens où elle pourrait s'appliquer sur tous types de territoires sans calage a priori et pour tous types d'échelles.
- Simple dans le sens où la méthode serait simple à implémenter et les cartes simples à interpréter. Pour cela, la méthode devait nécessiter peu de données d'entrée et des données accessibles sur tous les territoires.

Utiliser une méthode dite « sèche » présente en outre l'avantage du caractère résilient de la méthodologie face aux changement climatiques. En effet, l'évolution des facteurs influençant le ruissellement, et pris en compte dans la méthode, est bien mieux documentée que l'évolution des facteurs météorologiques. Dans ce cas précis, et à cette échelle de travail, « s'affranchir de la pluie » permet de mieux l'intégrer et de se doter d'un outil résilient vis-à-vis du changement climatique.

LES LIMITES DE LA METHODE IRIP ET LES MODIFICATIONS APPORTEES DANS LES PROJETS PILOTES

L'apport de la méthode IRIP, par rapport aux méthodes actuelles, est la possibilité de créer trois cartes représentant trois processus du ruissellement : production, transfert, accumulation. Les cartes obtenues facilitent la compréhension du comportement hydrologique d'un bassin versant. En combinant des informations du paysage elles font ressortir des particularités, des zones plus propices que d'autres au ruissellement intense, indépendamment de l'occurrence d'un épisode pluvieux intense. Ces cartes fournissent des informations supplémentaires pour l'aménagement du territoire et pour la gestion des risques. Connaître la répartition spatiale des différents processus de ruissellement peut permettre d'adapter les techniques de gestion des risques selon les zones.

Figure 1 - Exemple de cartes de Production, Transfert et Accumulation calculées pour un des territoire (1 500 km²)

Un travail de recherche a été effectué pour évaluer la pertinence des indicateurs pris en compte. La méthodologie a notamment été déployée, et ajustée, en lien avec la SNCF [Lagadec, 2017] et sur le bassin versant de la Lézarde [Patrice et al., 2015]. Il ressort de ces travaux les éléments suivants :

- Le caractère opérationnel de la méthodologie est particulièrement mis en valeur pour la construction de « scénario » d'aménagement qui permettent, à hypothèses constantes, d'étudier la variation de susceptibilité du territoire au ruissellement.
- La qualité des données d'entrée, notamment les données topographiques, influence de manière conséquente les résultats obtenus.
- Certains indicateurs, pour certaines échelles de travail, peuvent être problématiques. Dans ce cas, il y a lieu de s'interroger sur un indicateur de remplacement.
- La méthode ne prend pas en compte les ouvrages de protection d'origine anthropique.
- La méthode ne prend pas en compte l'influence de la géologie sur le ruissellement bien que son influence soit prépondérante sur certaines zones.

Ainsi, si le caractère opérationnel de la méthode est reconnu, notamment du fait de sa facilité de « scénarisation », dans sa conception initiale, elle n'adresse pas tous les enjeux liés à la gestion intégrée du risque ruissellement, au sens des collectivités.

Nous détaillons, dans la suite de cet article, les éléments qui nous ont permis de fournir un retour sur l'applicabilité des méthodes à score pour la gestion du risque ruissellement dans le cadre d'une gestion intégrée et globale des eaux pluviales, pour deux territoires (400 km² et 1 500 km²). Nous avons concentré nos développements sur deux axes principaux de travail :

- **Le référentiel des indicateurs**, qui a été retravaillé en fonction des limites précédentes, des données disponibles et des enjeux proposés par les différents territoires et acteurs de l'eau concernés par les études.
- **La méthodologie générale et son usage opérationnel** au sein des collectivités, qui a été complétée pour **proposer un circuit d'interprétation et d'utilisation des résultats**, au sein d'une gestion intégrée du risque, aux côtés d'autres thématiques (qualité, biodiversité, protection des ressources, …), et allant jusqu'à l'établissement de programmes d'aménagements du territoire pour un horizon moyen à long terme.

UN NOUVEAU REFERENTIEL D'INDICATEURS CARTOGRAPHIQUES A SCORES, ADAPTE A LA GESTION INTEGREE

IMPORTANCE DE LA RESOLUTION DE TRAVAIL

Le Modèle Numérique d'Elévation (MNE) est une des trois données d'entrée nécessaires à la construction des cartes. Il intervient dans la construction de dix indicateurs parmi les 17 que nécessite la méthode (pour le ruissellement). Le choix de la résolution de travail est donc largement conditionné par les choix effectués sur la donnée topographique. Dans le cadre de nos projets pilotes, nous disposons d'une donnée topographique LiDAR à très haute densité. Nous avons donc travaillé avec une résolution planimétrique de 5 m et altimétrique de 10 cm, sur base d'un MNE travaillé pour garantir une parfaite continuité hydraulique, et de grande qualité intrinsèque (pas de plateau, peu de bruit, …). Tous les indicateurs ont été calculés (et adaptés) à cette résolution planimétrique de 5 m (avec une méthode de ré-échantillonnage personnalisée en fonction des données).

AUGMENTER LE « POUVOIR DE RESOLUTION » POUR OFFRIR PLUS DE CAPACITE D'ACTION

La réponse à l'enjeu de gestion intégrée passe par la mise au point d'une méthodologie pouvant travailler à différentes échelles géographiques tout en gardant son caractère pragmatique et opérationnel. Lors des ateliers de concertation avec les acteurs de la gestion de l'eau sur les territoires étudiés, il est apparu que le « pouvoir de résolution » de la méthode IRIP ne permettait pas forcément d'obtenir des résultats sur des territoires hétérogènes (urbains, agricoles et viticoles par exemple).

Afin de donner plus de possibilités opérationnelles aux collectivités, ainsi que pour augmenter le « pouvoir de résolution » de notre méthodologie, nous avons :

- **Linéarisé / Catégorisé les indicateurs.** Pour ces indicateurs, les valeurs possibles ne seront plus 0 ou 1 mais toute une gamme de valeurs intermédiaires. Ce travail a notamment été effectué pour tous les indicateurs où une action anthropique est possible (urbanisation, pratiques agricoles, …) mais aussi pour tous les indicateurs où l'analyse statistique des paramètres faisait apparaitre de manière manifeste l'existence de plus de deux groupes.
- **Pris en compte de nouveaux paramètres de calculs**, voire de nouveaux indicateurs, pour s'adapter à la diversité de tout un territoire. C'est par exemple le cas de l'occupation des sols, où nous avons introduit des indicateurs de « qualité des sols », liés à une analyse détaillée des pratiques culturales.
- **Travaillé sur les niveaux de service intermédiaires** (NS2 et NS3) dans la prise en compte du ruissellement intense, et pas uniquement sur les épisodes les plus extrêmes.

REVUE GENERALE DE CONCEPTION DES INDICATEURS

En tenant compte des travaux de recherche précédents [Lagadec, 2017], mais aussi en considérant les données d'entrée à disposition dans le cadre des projets pilotes, ainsi que les éléments précédents, nous avons effectué une revue systématique des indicateurs proposés par la méthodologie IRIP. A l'issue de ce travail nous

proposons un nouveau référentiel de 17 indicateurs dont les modalités de calcul et de détermination ont été intégralement revues et adaptées.

Tableau 1 –Principaux indicateurs retenus – Hors indicateurs de correction et de forçage et hors zones humides

CARTE	INDICATEUR / SOUS-INDICATEUR		SOURCE PRINCIPALE
PRODUCTION	INFILTRABILITE	Pédologie / Composition des sols	Données pédologiques HD sur la composition des sols
		Zone non saturée	Données piézométriques
		Carte d'accumulation Orus amputée de la production amont	MNT LiDAR/: MNE
	Battance		Données pédologique HD sur la composition des sols
	Epaisseur		Données pédologique HD sur la composition des sols
	Occupation du sol		Données d'occupation des sols, y compris pratiques agricoles et parcelles en culture
	Analyse des géomorphons *[Gruber, 2009]*		MNT LiDAR:/ MNE (en zone urbaine)
TRANSFERT	Production amont		Carte de production
	Catégorisation des Pentes forte		MNE
	Rupture de pentes convexes		MNE
	Aire drainée		MNE
	Erodibilité		Données RUSLE pan-Européennes
ACCUMULATION	Production amont		Carte de production
	Pentes faibles		MNE
	Rupture de pentes concaves		MNE
	Aire drainée		MNE
	Indice topographique		MNT LiDAR

EXEMPLE – REVUE DE CALCUL DE L'INDICATEUR DE PENTES

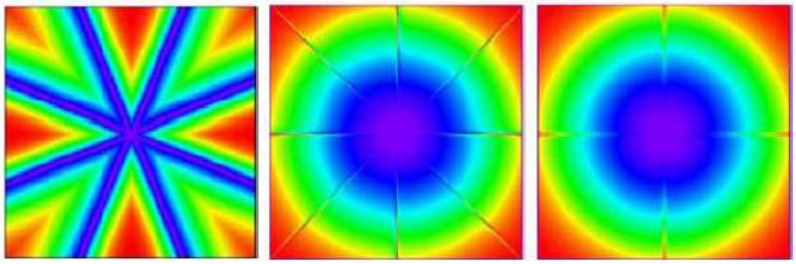
La pente est utilisée pour la genèse des trois cartes de susceptibilité et la construction d'autres indicateurs. La pente est générée directement depuis le modèle numérique d'élévation (MNE). De nombreuses méthodes de calcul de pentes existent et dépendent de la topographie de la zone étudiée. Avant de figer définitivement le choix de la méthode de calcul des pentes, un test de sensibilité a été effectué sur différentes zones d'études. A nos échelles de travail ces différences n'étaient pas significatives et nous avons retenu une méthode aux différences finies du 3ème ordre [Horn, 1981]

Passer de la pente à la valeur de l'indicateur de pente a été réalisé selon une fonction de classification en cluster des groupes de pixels dont les valeurs sont homogènes. La fonction employée se base sur une combinaison des algorithmes « Itérative Minimum Distance » [Forgy, 1965] (aussi appelé partitionnement en k-moyennes) et « Hill-climbing » [Rubin, 1967]. Le résultat est un partitionnement de la carte pixélisée en un certain nombre de groupes au sein desquels la variance est minimisée et entre lesquels la variance est maximisée. Pour la pente, seuls deux groupes ont été calculés. Ainsi, il n'existe pas de seuil fixe pour déterminer une pente forte ou une pente faible, mais il est possible, pour les deux groupes, de donner la variance et la valeur moyenne au sein d'un groupe, ainsi que son nombre de pixels.

EXEMPLE –CALCUL DE L'INDICATEUR D'AIRE DRAINEE ET AMORCE DE LA PRISE EN COMPTE DES OUVRAGES ANTHROPIQUES

L'aire drainée est le repère essentiel à tout calcul nécessitant une logique amont-aval, tel que les fonctions hydrologiques. De nombreuses méthodes de calcul existent pour caractériser l'aire drainée. L'algorithme le plus souvent utilisé, notamment dans la méthode IRIP, est celui dit de « D8 ». Nous avons réalisé une comparaison des résultats obtenus pour les méthodes D8, Dinf et MFM (de gauche à droite) :

Figure 2 – Méthode de calcul de l'accumulation différentes, de gauche à droite : D8, Dinf et MFM, du violet au rouge, par % de direction, sur MNT conique [Wood, 1996]



Dans le cadre de nos projets pilotes notre choix s'est arrêté sur la méthode dites « Mass Flux Method » (MFM), adaptée aux zones planes avec de faibles variations topographiques (de quelques centimètres) et donc applicable en contexte urbain (bordures, petits obstacles à l'écoulement, …). Cette méthode, possède également l'avantage de présenter des mécanismes pouvant intégrer les aménagements de gestion discernables sur le MNE. Le principe de la méthode MFM est de diviser chaque cellule de la grille en quatre quarts de pixel et de définir un angle directionnel d'écoulement pour chaque quart de pixel. Pour chaque quart de pixel, l'élévation du pixel complet et deux de ces voisins cardinaux déterminent la planimétrie, la pente et l'aspect correspondant. Cette méthode permet de résoudre les problèmes de correspondance planimétrique classiques mais également les instabilités de direction du flux pour chaque cellule de la grille correspondant aux crêtes et sommets, puisqu'elle permet au flux de chaque cellule d'être dispersée en différentes directions. A l'échelle du quart de pixel, cependant, le flux de chaque quart de pixel est autorisé à s'écouler uniquement vers un ou deux de ses voisins cardinaux. La fraction qui s'écoule vers les cellules voisines est déterminée en traitant chaque cellule comme un volume contrôlé. Le flux ne peut circuler que vers un côté de la cellule ; il ne peut pas s'écouler directement vers une cellule voisine diagonale. La fraction de flux s'écoulant depuis un côté est comptée comme un produit scalaire du vecteur normal de ce côté et de l'angle du vecteur de flux : ce qui équivaut à décomposer le vecteur de flux en deux vecteurs le long des axes de la grille MNE.

Une fois l'indicateur calculé, il convient d'adresser le problème de classification. Les valeurs minimales d'aires drainées, et par conséquent les plus courantes, équivalent à une dalle de MNE dont la résolution est de 5 m. Afin de maximiser l'identification des zones favorables à la production de ruissellement, il n'est pas judicieux de tenir compte des surfaces drainées trop faibles. De ce fait, les dalles de MNE, dont l'aire drainée est faible se sont vues affecter une valeur nulle. Les surfaces ont été catégorisées en 10 groupes dont les valeurs attribuées s'étendent jusqu'à un maximum de 1 (favorable au ruissellement). Les seuils et les groupes ont été fixés à l'aide d'un calcul des k-moyennes tenant compte de la répartition des valeurs de surface d'aire drainée et de sa nature logarithmique.

EXEMPLE – AUGMENTER LE POUVOIR DE RESOLUTION DE L'INDICATEUR D'OCCUPATION DES SOLS

L'indicateur d'occupation du sol caractérise la tendance au ruissellement d'une zone selon son type d'occupation du sol. Les zones fortement artificialisées ou imperméabilisées (centres urbains, etc.) disposent d'une tendance au ruissellement élevé, au contraire des zones naturelles (forêts, prairies, etc.). L'ensemble des catégories du territoire ont été pondérées afin d'illustrer ce phénomène. La notion de pente n'est pas prise en compte dans cet indicateur. L'indicateur d'occupation du sol a été généré depuis les données suivantes :

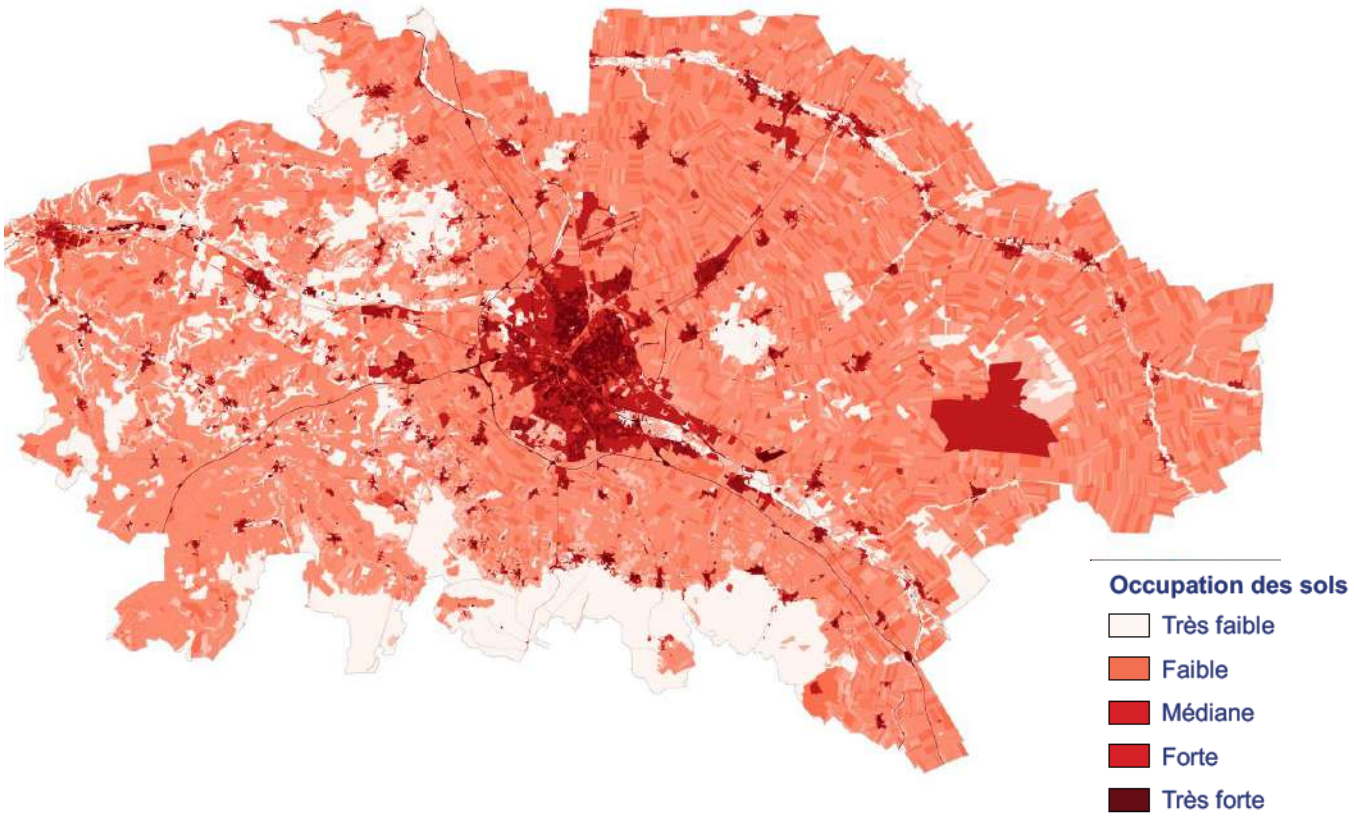
- La BD topo v3 de l'IGN, précise au mètre.
- L'atlas urbain, qui précise la nature de l'occupation du sol et dispose d'un niveau de détail important, notamment au niveau urbain ;
- Le registre parcellaire graphique (RPG), qui référence les types de culture des terres agricoles ;
- Les données issues de Corine Land-cover, qui malgré un niveau de détail plus faible, dispose d'une complétude totale, utilisée en comblement.

La tendance au ruissellement de chaque type d'occupation du sol a été estimée sur la base des coefficients d'imperméabilisation en usage. Dans le cas des cultures, la largeur de rang a permis de mieux discrétiser ces surfaces.

L'indicateur final « d'occupation des sols » est obtenu de manière indirecte, par croisement avec l'occupation du sol (premier indicateur) et un indicateur de présence de fonctionnalités modératrices / aggravantes sur le territoire. Ce second sous-indicateur, par nature discontinu, a été constitué en fonction :

- Des inventaires de zones humides, en tenant compte des fonctionnalités environnementales de zones humides inventoriées.
- De l'inventaire des mares inscrites dans les PRAM (Programme Régional d'Action pour les Mares)
- De la présence de sols fortement artificialisés, drainés, travaillés, …

Figure 4 – Indicateur combiné d'occupation des sols pour le territoire de 1 500 km – Extrait - [2]



METHODOLOGIE GENERALE AU SERVICE DES BESOINS OPERATIONNELS

L'évaluation de l'aléa ruissellement constitue le fondement d'une démarche intégrée. Le choix des méthodologies, des indicateurs, et leur mise en œuvre est donc une étape essentielle. La prise en compte des enjeux de concertation et d'acceptabilité sociale, ainsi que la garantie d'application opérationnelle par les collectivités reposent toutefois également sur la mise en œuvre d'une méthodologie d'application et de communication.

NOTION D'AMENAGEMENT ET D'OUVRAGE : SE DOTER D'UN REFERENTIEL PARTAGE POUR POUVOIR EVALUER LES AMENAGEMENTS EXISTANTS ET PROJETES

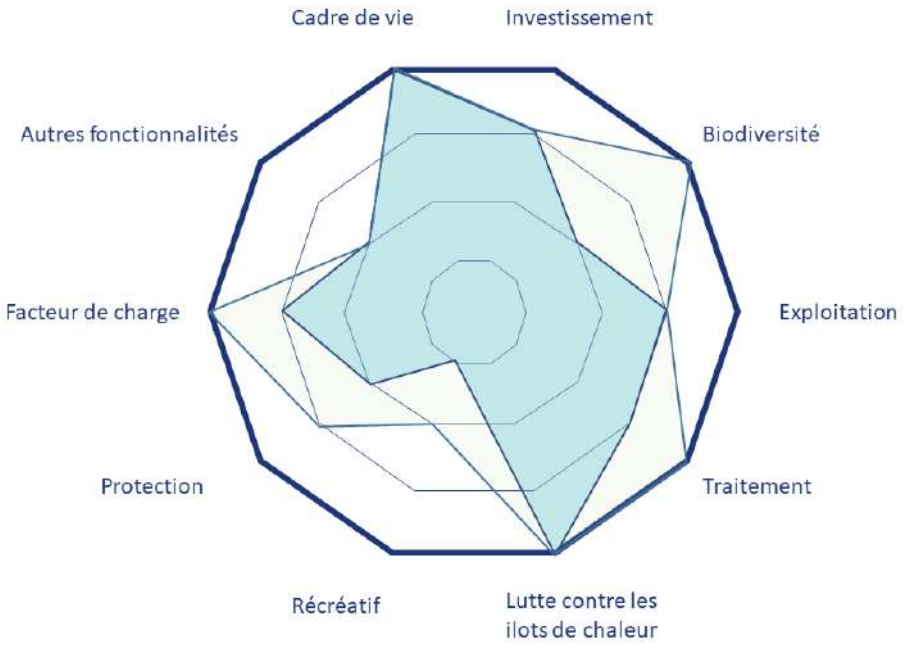
Pour garantir le caractère opérationnel, et surtout son aspect reproductible et mesurable, nous avons doté les collectivités d'un socle de définition permettant à la fois la caractérisation de l'état actuel de l'aménagement du territoire vis-à-vis du ruissellement, mais aussi l'évaluation ex-ante et a posteriori des politiques publiques scénarisées et mises en œuvre.

- *L'aménagement :* un aménagement regroupe un ou plusieurs ouvrages de gestion des eaux pluviales. L'aménagement sera décrit à travers les ouvrages qui le composent. L'aménagement permet l'agrégation d'indicateurs issus des ouvrages et des bassins versants (scores, valeurs moyennes, évaluation, …).
- *Le bassin versant :* chaque aménagement participe de la gestion de l'eau sur un ou plusieurs bassins versants. Le bassin versant n'aura pas d'autres caractéristiques que celles qui le définissent géométriquement, tenant compte des éventuels réseaux.
- *L'ouvrage :* un ouvrage est rattaché à un aménagement, ou pourra être lui-même l'aménagement s'il n'y a pas d'autres ouvrages liés. Chaque ouvrage est caractérisé par une typologie propre à la gestion des eaux pluviales. Les ouvrages sont des éléments de fonctionnalité hydraulique élémentaire, et nomenclaturés. Les ouvrages de gestion des eaux pluviales étant nombreux et de profils variés, pour assurer une nomenclature optimale, il a été choisi de se référer à la proposition d'une typologie systématique des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales [B.Chocat et F. Cherqui, 2017].

DETERMINATION D'UN PROFIL DE PERFORMANCE POUR LES AMENAGEMENTS

Pour chaque ouvrage, et donc pour chaque aménagement, il a été déterminé un profil de performance, introduisant les notions de multifonctionnalités des aménagements de gestion des eaux pluviales et permettant de positionner les ouvrages existants ainsi que de projeter un profil cible, issu des scénarios de gestion.

Figure 5 – Exemple de profil de performance réel (bleu) et cible (transparent) pour un aménagement



CONFRONTATION ET USAGE OPERATIONNEL

CONFRONTATION AU TERRAIN ET USAGE OPERATIONNEL

Pour offrir aux collectivités pilotes une dernière garantie d'applicabilité et d'opérationnalité, nous avons fiabilisé l'ensemble du processus par des campagnes massives d'inspections de terrain. Ces campagnes ont permis :

- Le relevé du profil de performance de tous les ouvrages existants sur les territoires.
- La prise en compte des informations de terrain, et notamment les zones sujettes à ruissellement intense fréquent. En tenant compte des indications fournies par les proxys de données historiques (plus de 3 000 enregistrements) nous avons pu mener un calage statistique de certains indicateurs.
- L'intégration, dans les indicateurs, des effets d'ouvrages présents sur les territoires, non vus par le MNE. C'est par exemple le cas des « Chevets Viticoles », largement présents sur un des deux territoires d'études, et influençant de manière sensible la carte de susceptibilité au transfert.
- La confrontation à des études hydrauliques et hydrologiques du ruissellement, réalisées sur des bassins versants échantillon (de manière indépendante de nos propres études). Ces études nous permettent de positionner notre méthode face aux niveaux de service attendus (NS2 et NS3 notamment, plutôt que NS4).

A l'issue de ces campagnes de terrain, nous avons été en mesure de produire un « état 0 » de la gestion du risque ruissellement sur les territoires, vu par le prisme des ouvrages et aménagements (et des scores de performance bassin versant par bassin versant), mais aussi par le prisme de cartographies générales à scores.

CONCLUSION SUR L'APPLICABILITE DES METHODES CARTOGRAPHIQUES PAR SOMME D'INDICATEURS DANS LE CADRE DE LA MISE EN ŒUVRE DE POLITIQUES PUBLIQUES DE GESTION INTEGREE DES RISQUES RUISSELLEMENT

A l'issue de toutes ces démarches, il a été mis en place, pour chacune des collectivités étudiées un plan d'action scénarisé dont les performances peuvent être évaluées au fur et à mesure de son déploiement opérationnel. Les plans d'action ont été structurés pour répondre aux questionnements opérationnels suivants :

- **Où agir ? :**
  Il est possible de cibler les zones prioritaires d'actions à l'aide des cartes générales et de concentrer l'action sur les bassins versants des aménagements dans les zones les plus problématiques.
- **Quoi faire ? :**
  Les scores construits sont scénarisables et permettent de mesurer les effets de politiques d'aménagement à grande échelle. Ainsi, la collectivité peut, soit à l'échelle de son territoire, soit pour des zones ciblées, décider d'une politique d'aménagement du territoire. Le travail de concertation accompagnant la démarche, ainsi que la prise en compte des logiques « amont/aval », permettent également de déployer ces leviers d'actions sur les zones existantes, en supplément des nouveaux projets d'aménagements.
- **Avec quelle performance ? :**
  Les scores peuvent simplement être recalculés, par simple actualisation des données d'entrées des modèles, et les résultats confrontés à des mesures in situ. La notion d'aménagement, comme collection d'ouvrages, permet en outre de tenir à jour l'évolution, critère par critère, de la performance de gestion d'un bassin versant, au fur et à mesure de son urbanisation.

Sous réserve d'une approche intégrée, concertée et résiliente, en lien avec la réalité du territoire, les méthodes cartographiques par somme d'indicateurs présentent un caractère opérationnel important et permettent d'asseoir une politique publique de gestion intégrée des eaux pluviales, y compris ruissellement intense, à l'échelle territoriale.

REFERENCES

Brelot, &. A. (2009). *Guide pour la prise en compte des eaux pluviales dans les documents de planification et d'urbanisme.*

Forgy. (1965). *Cluster Analysis of multivariate date : efficiency vs. Interpretability of classifications*. Biometrics(21).

Gruber, &. D. (2009). *Chapter 7 : Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology*, Developments in Soil Science - Volume 33 - Geomorphometry : Concepts, Software, Applications.

H. (1981). *Hill shading and the reflectance map*. Proceedings of the IEEE.

Lagadec, L.-R. (2017). *Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire.* Grenoble: Université Grenoble Alpes.

Natural Resources Conservation Service. (1986). *Technical Report 55 : Urban Hydrology for Small Watersheds.*

Patrice, P., Breil, P., & Poulard, C. (2015). *Evaluation de la méthode IRIP - Application sur le Bassin Versant de la Lézarde.* IRSTEA.

Rubin. (1967*). Optimal Classification into Groups: An approach for Solving the Taxonomy Problem*. Journal of Theoretical Biology(15).

Wood. (1996). *The Geomorphological characterisation of Digital Elevation Models.* Leicester.

Intégrer le risque ruissellement dans le Plan Local d'Urbanisme et de l'Habitat de la Métropole de Lyon pour prévenir les inondations urbaines (Valdelfener *et al.*)

Intégrer le risque ruissellement dans le Plan Local d'Urbanisme et de l'Habitat de la Métropole de Lyon pour prévenir les inondations urbaines

Maurane VALDELFENER[1], Elisabeth SIBEUD[2]

[1] Métropole de Lyon – Direction Eau et Déchets – 20 rue du lac 69505 Lyon CEDEX 03 – mavaldelfener@grandlyon.com
[2] Métropole de Lyon – Direction Eau et Déchets – 20 rue du lac 69005 Lyon CEDEX 03 – esibeud@grandlyon.com

Un zonage a été réalisé à l'échelle de la Métropole de Lyon et intégré au Plan Local d'Urbanisme et de l'Habitat (PLU-H) afin d'identifier et prévenir le risque d'inondation par ruissellement. Les secteurs générant un risque de ruissellement, les axes d'écoulement préférentiels de l'eau et les zones d'accumulation ont été identifiés, hiérarchisés et cartographiés. Désormais, tout projet de construction doit prévoir une gestion des eaux pluviales dite « à la parcelle » grâce à l'infiltration, la réutilisation ou le rejet dans un cours d'eau. Dorénavant, des volumes minimaux de rétention d'eaux pluviales sont préconisés pour compenser toute nouvelle imperméabilisation, des bandes d'inconstructibilité dans les talwegs et des règles de rehausse des accès ont été définis pour adapter les aménagements au risque d'inondation par ruissellement. Un accompagnement et une sensibilisation de l'ensemble des acteurs a été indispensable pour mettre en œuvre cette nouvelle réglementation à l'échelle de la Métropole.

Mots-clefs : réglementation *eaux pluviales, zonage ruissellement, gestion à la parcelle*

Integrate the risk of runoff into the Local Urban and Housing Plan for the Metropolitan Area of Lyon to prevent urban flooding

A zoning was carried out on the Metropolis of Lyon scale and integrated into the Local Urban and Housing Plan in order to identify and prevent the risk of flooding by runoff. The sectors generating a risk of runoff, the preferential axes of water flow and the accumulation zones have been identified, prioritized and mapped. Henceforth, any construction project has to keep its rainwater on its parcel thanks to infiltration, reuse or discharge into a watercourse. From now on, minimum volumes of rainwater retention are recommended to compensate any new waterproofing, inconstructibility strips in the talwegs and access enhancement rules have been defined to adapt the facilities to the risk of flooding by runoff. Support and awareness-raising for all stakeholders was essential in order to implement this new regulation across the city.
Key words: rainwater regulation, runoff zoning, rainwater management

INTRODUCTION

Le contexte de développement et de densification du territoire ajouté aux variables climatiques font de la nature en ville et de l'adaptation au changement climatique, des enjeux prioritaires pour la Métropole de Lyon. Inscrits au croisement de plusieurs politiques publiques métropolitaines, ces enjeux sont traduits à travers plusieurs plans et programmes : Plan Climat Air Énergie Territorial, Charte de l'arbre et Plan Canopée ou encore le Plan Local d'Urbanisme et de l'Habitat (PLU-H). C'est notamment au travers du règlement du PLU-H que sont traduites les politiques métropolitaines d'adaptation au risque et de réduction de la vulnérabilité liée aux inondations urbaines.

Une modélisation informatique complétée par des études de terrain ont permis de cartographier les principaux risques d'inondation par ruissellement (zone de production du ruissellement, axe d'écoulement, zone d'écoulement et d'accumulation). Un travail de concertation avec les urbanistes, les juristes, les communes et les services de l'eau a également été mené afin d'intégrer de nouvelles règles de construction dans le règlement du PLU-H (compensation de l'imperméabilisation, bande de recul, rehaussement des accès). Aujourd'hui le zonage ruissellement est intégré au nouveau PLU-H, opposable depuis le 18 juin 2019 et s'applique sur tout le territoire de la Métropole de Lyon.

Cette communication présentera dans un premier temps la méthode utilisée pour réaliser l'étude du ruissellement pour ensuite présenter les règles en matière d'urbanisme qui visent à prévenir les risques d'inondation par ruissellement. Enfin la dernière partie de la communication portera sur un retour d'expérience après bientôt une année de mise en œuvre de cette nouvelle réglementation.

METHODE DE TRAVAIL POUR LA REALISATION DU ZONAGE RUISSELLEMENT

Le principe de base de l'étude

Depuis 2012, la Métropole de Lyon a engagé la révision de son Plan Local d'Urbanisme (PLU) en y intégrant des objectifs forts en matière de gestion des eaux comme la préservation de la disponibilité et de la qualité des ressources en eau du territoire et la limitation des risques d'inondation pour les habitants. Un zonage a été réalisé en 2013 afin d'aboutir à une cartographie des principaux risques de ruissellement. Pour mener à bien cette production, la Direction de l'Eau a fait appel à un bureau d'études spécialisé en gestion de l'eau et en environnement. Les missions de l'assistant à maîtrise d'ouvrage comprenaient entre autres, la modélisation numérique représentant les différentes étapes de transformation de la pluie en ruissellement, des vérifications de terrain, des interventions en mairie lors des présentations du zonage aux communes et la réalisation d'une note pédagogique pour accompagner la lecture des cartes et améliorer leur compréhension.

Pour réaliser cette modélisation à l'échelle du territoire métropolitain (538 km²), trois mécanismes interdépendants qui influencent le ruissellement ont été identifiés : la production du ruissellement, la transmission et l'accélération des écoulements et enfin l'accumulation (Figure 1).

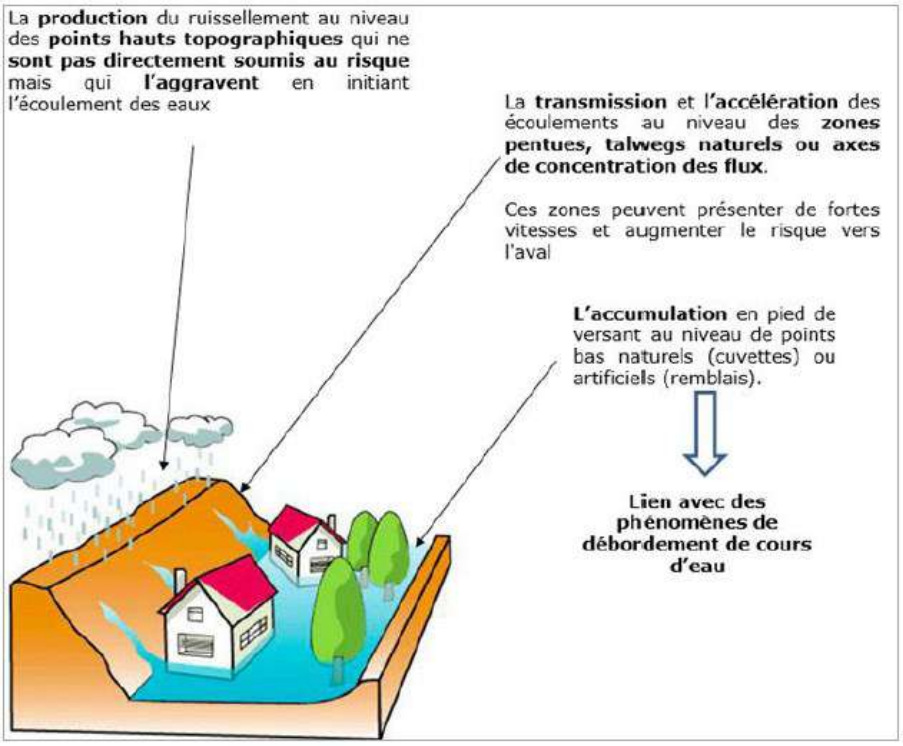


Figure 1 : Zones fonctionnelles du ruissellement

Afin de caractériser et cartographier les risques de ruissellement, il a été convenu de définir une pluie « théorique » de période de retour 100 ans, d'une durée totale de cinq heures (dont trente minutes intenses), générant une hauteur cumulée de 125 millimètres. L'intensité moyenne était de 25 mm/h et une intensité maximale sur 6 minutes de 140 mm/h.

Les données utilisées

La modélisation numérique du processus naturel de transformation de la pluie en écoulement superficiel tient compte de la topographie du terrain, de l'occupation du sol et de l'artificialisation du territoire.

La topographie générale de la zone d'étude a été définie à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) en s'appuyant sur un levé LIDAR (« LIght Detection And Ranging ») réalisé à l'échelle de la Métropole de Lyon en 2012 (Figure 2). Ce MNT fournit l'altitude du terrain naturel en tout point selon un quadrillage d'un mètre et affiche une précision altimétrique théorique de 10 cm.

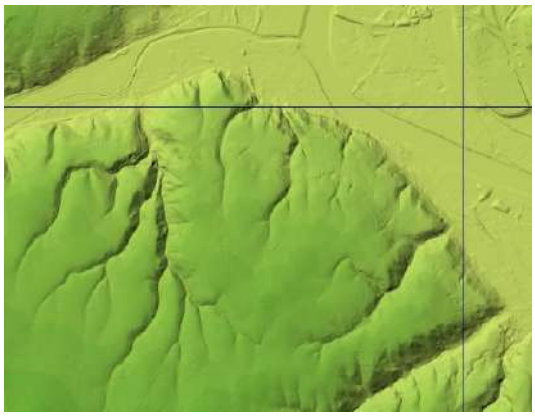


Figure 2 : Extrait du MNT Lidar de 2012

Les données relatives à l'occupation des sols ont été collectées à partir de la base de données « Corine LandCover » (version 2012) et des données cartographiques de la Métropole de Lyon, notamment celles relatives aux ruisseaux, aux zones humides et à la Trame Verte.

Enfin, les données relatives aux ouvrages structurants (remblais et points de passage) ont été collectées auprès des bases de données disponibles au sein de la Métropole et sur la base de reconnaissances de terrain. Les données relatives aux limites des parcelles cadastrales et au bâti ont également été intégrées à la modélisation comme obstacles aux écoulements en milieu urbanisé.

La modélisation

Après la collecte des informations et la définition des hypothèses de travail, la modélisation numérique a reposé sur une modélisation dite bidimensionnelle (2D) des phénomènes d'écoulement. La pluie de référence « brute » a été appliquée sur un maillage composé de mailles triangulaires irrégulières dont la taille s'ajuste aux variations topographiques. Sur chaque maille, la pluie « nette » a été calculée à partir d'un modèle d'infiltration qui tenait compte de l'occupation des sols (équation de Horton). Enfin, le modèle hydraulique a calculé l'écoulement de surface en fonction de la topographie, des obstacles intégrés au maillage, de la présence de talwegs… (Figure 3).

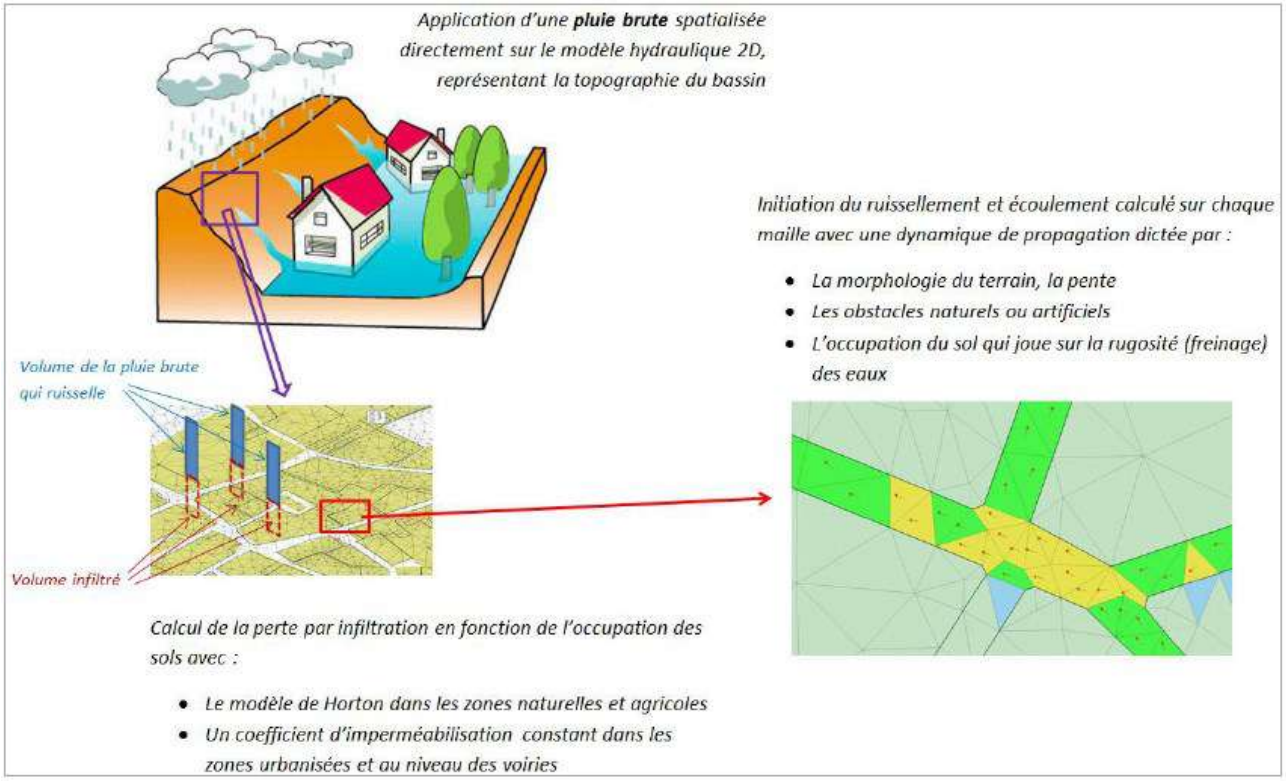


Figure 3 : Principe de modélisation appliqué pour évaluer les phénomènes de ruissellement

Le logiciel utilisé pour la réalisation de cette modélisation est INFOWORKS ICM (Integrated Catchment Modeling) développé par INNOVYZE. Ce logiciel est largement utilisé dans le monde entier pour la modélisation en hydraulique fluviale et urbaine et dispose d'un moteur de calcul robuste et de schémas éprouvés de résolution des équations de Barré-de-Saint-Venant.

À l'issue de cette étape de modélisation, chaque point du maillage bidimensionnel est associé à une hauteur de submersion (en mètre) et une vitesse d'écoulement (en mètre par seconde). Rappelons toutefois que la précision du modèle et des résultats obtenus dépend de différents paramètres dont :

- la précision des données topographiques : précision altimétrique théorique de 10 cm pour le LIDAR ;
- l'échelle de l'étude : la représentation des écoulements à l'échelle du Grand Lyon (538 km²) présente plus d'incertitudes qu'une étude à l'échelle locale (quartier ou parcelle par exemple) ; et enfin
- la donnée d'entrée de la pluie dans le modèle, qui pour ce zonage a été une pluie de projet centennale de forme double triangle et non une pluie réelle.

Les résultats bruts ont ensuite été traités pour caractériser les zones fonctionnelles du ruissellement.

CLASSIFICATION DES RISQUES ET REGLES ASSOCIEES

Les périmètres de production

Les zones dites de production, prépondérantes dans la prévention des risques, sont délimitées sur la base des bassins versants d'apport, puis hiérarchisées en fonction des zones à enjeux vers lesquelles leurs apports s'évacuent et de l'aléa calculé sur ces zones à enjeux. Ces zones recouvrent l'ensemble du territoire métropolitain. L'objectif de ce zonage est de compenser l'imperméabilisation en proposant différents dimensionnements pour les ouvrages de gestion des eaux pluviales selon le risque de ruissellement en aval. Plus le risque est grand, plus le volume d'eau à gérer à la parcelle est important. Trois périmètres sont distingués : les périmètres de production prioritaire, secondaire et tertiaire (Tableau 1).

Tableau 1 : Synthèse des règles associées aux périmètres de production du ruissellement

Périmètre de production – Art 1.3.2.2.2	
Prioritaire Art. 1.3.2.2.2.a	• Gestion a minima de 70 mm d'eaux pluviales par évènement pluvieux, • Cas dérogatoire sur la base d'une mesure in situ : dimensionnement pour gérer a minima une pluie de période de retour 30 ans, • Temps de vidange inférieur à 72 h.
Secondaire Art. 1.3.2.2.2.b	• Gestion a minima de 55 mm d'eaux pluviales par évènement pluvieux, • Cas dérogatoire sur la base d'une mesure in situ : dimensionnement pour gérer a minima une pluie de période de retour 10 ans, • Temps de vidange inférieur à 72 h.
Tertiaire Art. 1.3.2.2.2.c	• Gestion a minima de 45 mm d'eaux pluviales par évènement pluvieux, • Cas dérogatoire sur la base d'une mesure in situ : dimensionnement pour gérer a minima une pluie de période de retour 5 ans, • Temps de vidange inférieur à 72 h.

Les périmètres d'écoulement et/ou d'accumulation

Les secteurs où les vitesses sont importantes (> 0,2 m/s) représentent les zones d'écoulement, ceux où les niveaux de submersion sont prépondérants (> 50 cm) représentent les zones d'accumulation. Un croisement entre les résultats de la modélisation et la cartographie des zones humides a été effectué. Lorsqu'une zone humide se superpose avec une zone d'accumulation ou d'écoulement alors elle est classée comme une zone à préserver compte tenu de son rôle de régulateur hydraulique. Elles sont nommées « périmètres d'écoulement et d'accumulation prioritaire » (Tableau 2).

Tableau 2 : Synthèse des règles associées aux périmètres d'écoulement et d'accumulation

Périmètre d'écoulement et d'accumulation – Art. 1.3.2.2.4	
Écoulement et accumulation prioritaire Art 1.3.2.2.4.a	• Pas de nouvelle construction (sauf équipements publics), • Murets et clôtures pleines interdits.
Écoulement secondaire Art 1.3.2.2.4.b	• Prise en compte du risque dans l'implantation du bâti et des clôtures. Les clôtures doivent notamment permettre le libre écoulement des eaux, • Possibilité de déroger aux règles d'urbanisme pour adapter le projet au risque, sous réserve de la prise en compte de la morphologie environnante, • Rehaussement des accès de 20 cm au moins au-dessus de la chaussée ou usage de dispositifs adaptés pour la mise hors d'eau des accès.
Accumulation secondaire Art 1.3.2.2.4.b	• Rehaussement des accès de 20 cm au moins au-dessus de la chaussée ou usage de dispositifs adaptés pour la mise hors d'eau des accès.

Les axes d'écoulement

Les axes d'écoulements préférentiels de l'eau sont également identifiés. Ils correspondent aux lignes de collecte de l'eau où les eaux s'écoulent et rejoignent les points bas topographiques. Ils sont de trois types :

- « Axes prioritaires » lorsqu'ils sont soumis à des vitesses supérieures à 0,3 m/s et situés en amont d'une zone d'accumulation importante ou d'un secteur à enjeux,
- « Axes artificiels » lorsqu'il s'agit d'axes prioritaires situés sur des voiries ou lorsque les routes sont susceptibles d'accueillir plus de 15 cm d'eau en cas d'épisode pluvieux intense
- « Axes de vigilance » lorsque les vitesses sont faibles ou pas directement en amont de secteurs sensibles

Pour chaque axe d'écoulement sont associées des règles de construction (Tableau 3).

Tableau 3 : Synthèse des règles associées aux axes d'écoulement

Axes d'écoulement – Art 1.3.2.2.3		
Prioritaires Art. 1.3.2.2.3	**Règles communes** • Valeur indicative des axes sur la cartographie, la réalité physique et topographique fait foi • Murets et clôtures pleines interdits	• Recul minimal de **3 m** des constructions de chaque côté de l'axe, • Busage interdit, • Possibilité de déroger aux règles d'urbanisme pour adapter le projet au risque, sous réserve de la prise en compte de la morphologie environnante, *À titre exceptionnel* : • Dérogation pour un recul moindre si la sauvegarde des biens et la sécurité des personnes sont assurées, • Modification du tracé de l'axe possible si les points d'entrée et de sortie de l'axe sont conservés (sauf en zone de mouvement de terrain), • En centre urbain dense : possibilité de déroger à la bande de recul pour appliquer les règles morphologiques du PLU-H, le busage peut être autorisé.
Artificiels Art. 1.3.2.2.3		• Rehaussement des accès de 20 cm au moins au-dessus de la chaussée ou usage de dispositifs adaptés pour la mise hors d'eau des accès.
De vigilance		• Cf Règles communes.

Art. 1.3.2.2.3
••••••••••••••••••

Cette réglementation est le fruit d'une étroite collaboration entre des services qui portent des expertises différentes : le risque inondation, le code de l'urbanisme et l'aménagement urbain. Cette nouvelle réglementation est désormais mise en œuvre sur le territoire depuis le 18 juin 2019 et a modifié les pratiques d'instruction des demandes d'urbanisme.

MISE EN ŒUVRE DE CETTE NOUVELLE REGLEMENTATION

PLU ou PLU-H ?

La réalisation de cette étude a mis en évidence des risques à l'échelle de la Métropole. Durant la période transitoire, entre l'identification de ces risques et l'approbation du nouveau PLU-H, le zonage a été soumis à l'enquête publique et des demandes d'urbanismes ont continué à être déposées. Des interrogations sont nées sur les modalités d'instruction de ces demandes et de la prise en compte de ces nouveaux risques identifiés bien que le zonage ne soit pas encore opposable.

La gestion des eaux pluviales à la parcelle et la compensation de l'imperméabilisation liée aux périmètres de production du ruissellement était déjà une doctrine appliquée sur le territoire depuis plusieurs années. Le choix a donc été fait d'instruire les risques prioritaires (zones d'écoulement et accumulation prioritaires, axes d'écoulement prioritaires) au titre de la connaissance du risque. En parallèle, une mise à jour du règlement d'assainissement a été prévue afin de le rendre conforme du règlement du PLU-H.

La communication autour de ces évolutions

Ces nouvelles règles ont été partagées aux différents partenaires : aux instructeurs de la Direction de l'Eau, aux urbanistes et maîtres d'ouvrage de la Métropole, aux services d'urbanisme des communes ou encore aux professionnels de la construction. Un outil d'aide au dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux pluviales est également mis à disposition des maîtres d'ouvrages (privés ou publics) gratuitement par la Métropole : l'outil Parapluie. Une interface spécifique pour la Métropole de Lyon a été développée par l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Elle permet aux utilisateurs de retrouver les paramètres pluviométriques du territoire, la réglementation associée et un panel de solutions pour gérer les eaux pluviales de leurs projets. (Figure 4).

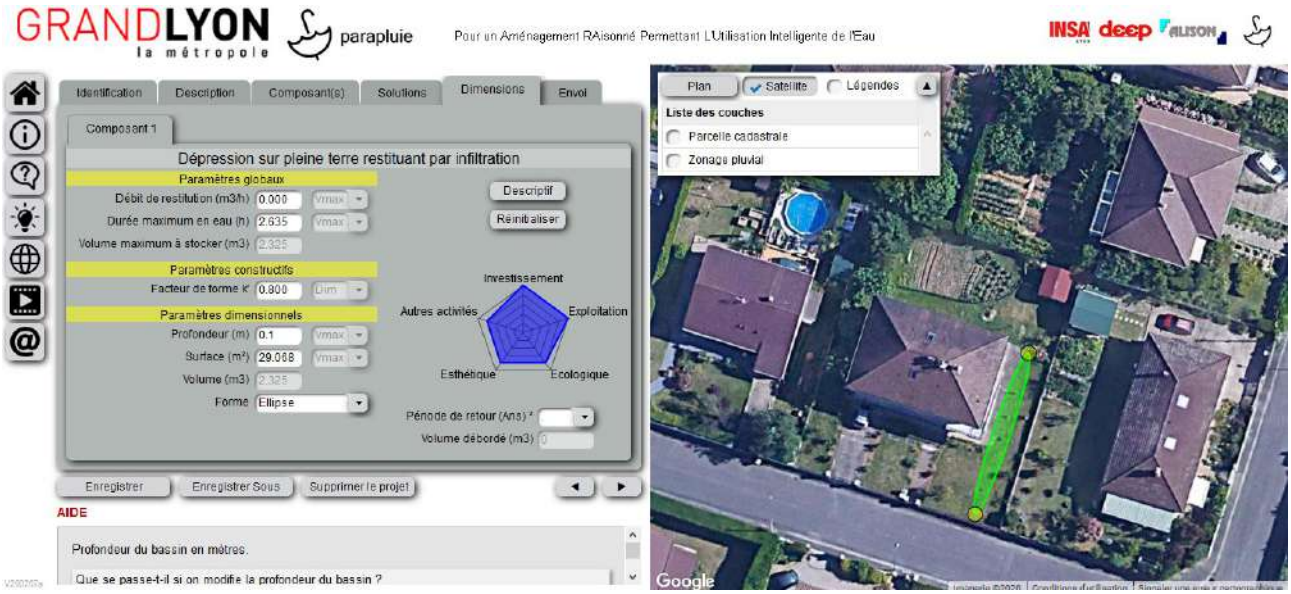


Figure 4 : Visualisation d'un projet réalisé avec https://www.parapluie-hydro.com/grandlyon/

La formation d'une unité qui instruit les dossiers construits dans un périmètre d'écoulement, d'accumulation ou à proximité d'un axe d'écoulement a été nécessaire pour rendre un avis technique sur la prise en compte des risques dans les projets de construction. Et enfin, lorsque nécessaire, une assistance technique est apportée par les instructeurs de la Direction de l'eau aux porteurs de projets afin de les accompagner dans la mise en œuvre de cette nouvelle politique.

CONCLUSIONS

La réalisation d'un zonage pluvial permet une meilleure connaissance du territoire et des risques associés. Néanmoins, pour l'intégrer à la révision d'un PLU, le temps consacré à l'étude et à la rédaction de son règlement doit être anticipé, d'autant plus si le périmètre est étendu. L'implication des différents acteurs du territoire doit également être recherchée dès les premières phases d'étude et animée tout au long du processus jusqu'à la rédaction du règlement pour une meilleure appropriation des enjeux et acceptation des nouvelles règles.

Gestion intégrée des eaux pluviales, l'exemple du bassin versant de la Nièvre (Mopty *et al.*)

Gestion intégrée des eaux pluviales, l'exemple du bassin versant de la Nièvre

Olivier MOPTY[1], Hervé DAVION[1]
Elodie LEVEAU[1]

[1] EPTB Somme - AMEVA – eptbsomme@ameva.org

Depuis 2017, l'EPTB Somme - AMEVA propose, en partenariat avec l'Association Somme Espace Agronomie (SOMEA), une mission d'assistance technique et administrative dénommée « Pôle érosion ». Les EPCI du bassin versant de la Nièvre (affluent rive droite du fleuve Somme), territoire agricole particulièrement exposé aux risques de ruissellement et d'érosion des sols ont sollicité cette assistance. En parallèle de l'intégration de la gestion des eaux pluviales dans les documents d'urbanisme, cet engagement des intercommunalités a permis d'aboutir à un programme d'actions de maitrise du ruissellement et de l'érosion des sols couvrant un territoire de plus en plus hydrauliquement cohérent. La concertation agricole et la mise en place de bonnes pratiques culturales sont également des éléments déterminant dans la réussite des projets et font de l'exploitant agricole un acteur incontournable. Autre élément indispensable de la gestion intégrée des eaux pluviales : les initiatives des communes. Elles permettent aux actions engagées sur les bassins agricoles de trouver un prolongement sur les secteurs bâtis.
Fort de l'implication des différents acteurs du bassin versant, des actions déjà engagées et des compétences exercées sur ce territoire, celui-ci a été choisi comme lieu d'expérimentation pour une opération pilote poursuivant cinq objectifs : renforcer l'animation agricole, évaluer l'impact des programmes d'aménagement de bassin (patrimoine sol, milieux aquatiques), impliquer les gestionnaires de voiries, favoriser la gestion alternative des eaux pluviales urbaines et réduire la vulnérabilité des biens et des personnes.
Mots-clefs : eaux pluviales, gestion intégrée, bassin versant

Integrated rainwater management: case of the Nièvre watershed

Since 2017, the EPTB Somme - AMEVA has offered, in partnership with the association "Somme Espace Agronomie" (SOMEA), a technical and administrative assistance mission called "Pole Erosion". The Nièvre watershed (a tributary on the right bank of the Somme river) is an agricultural area particularly exposed to the risks of runoff and soil erosion and composed of two groupings of communes. They requested this assistance. In parallel with the integration of rainwater management into town planning documents, this commitment from the inter-municipal authorities has led to a program of actions to control runoff and soil erosion covering an area of more in addition hydraulically coherent. Agricultural cooperation and the establishment of good farming practices are also determining factors in the success of projects and make the farmer a key player. Another essential element of integrated rainwater management: municipal initiatives. They allow actions undertaken in agricultural basins to find an extension on built areas.
With the involvement of the various stakeholders in the watershed, actions already undertaken and skills exercised in this territory, it was chosen as a place of experimentation for a pilot operation with five objectives: strengthen agricultural activities, assess the impact of watershed management programs, involve road managers, promote alternative urban storm water management and reduce the vulnerability of people and goods.
Key words : rainwater management, watershed

UNE MISSION D'INGENERIE DEDIEE A LA MAITRISE DU RUISSELLEMENT ET DE L'EROSION DES SOLS

En partenariat avec l'Association Somme Espace Agronomie (SOMEA), structure émanant de la chambre d'agriculture de la Somme et du département de la Somme, l'EPTB Somme - AMEVA propose depuis 2017, une mission d'assistance technique et administrative dénommée « Pôle érosion ».
Cette dernière s'adresse aux collectivités du bassin versant de la Somme, élargi aux territoires du Marquenterre et des Bas Champs et poursuit trois objectifs principaux :

- Favoriser l'émergence, la mise en œuvre opérationnelle, le suivi et l'entretien de programmes de lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols à des échelles pertinentes ;
- Inciter les EPCI à fiscalité propre à se doter d'une compétence ruissellement / érosion en complément de la GeMAPI et parvenir à terme à une couverture intégrale du bassin de la Somme en matière de maîtrise d'ouvrage sur cette thématique ;
- Sensibiliser les acteurs du territoire (élus, agriculteurs notamment) aux enjeux de la maîtrise des eaux de ruissellement et de l'érosion des sols.

Formalisé au travers d'une convention cadre entre l'AMEVA et SOMEA, le « Pôle érosion » se traduit par la réalisation d'éléments de mission relevant du cadre de l'intérêt général et complémentaires, l'AMEVA principalement sur le champ de l'assistance technico-administrative des maîtres d'ouvrage et SOMEA sur le volet animation-concertation avec la profession agricole et le suivi des programmes d'actions.
Ce dispositif mutualisé bénéficie du soutien financier de l'**Europe** (fonds **FEDER**), de **l'Agence de l'Eau Artois Picardie**, du **Département de la Somme** et de la **Chambre d'Agriculture de la Somme.**
À ce jour, 16 collectivités (majoritairement des EPCI-FP) ont sollicité la mission et 14 programmes d'interventions sont engagés sur plus 32 500 ha dont le territoire du bassin versant de la Nièvre.

LE BASSIN DE LA NIEVRE, UN TERRITOIRE EXPOSE AUX INONDATIONS PAR RUISSELLEMENT ET COULEE DE BOUE

Le bassin versant de la Nièvre (affluent rive droite du fleuve Somme) présente une superficie de plus de 27 000 ha répartie sur 50 communes et deux EPCI distincts : La Communauté de Communes Nièvre et Somme (CCNS) et la Communauté de Communes du Territoire Nord Picardie (CCTNP).

Ce territoire rural à dominante agricole reste très sensible aux inondations par coulée de boue et ruissellement avec un contexte propice : aléa érosion fort à très fort sur plus des ¾ du bassin (paramètre intra sec du milieu : pente, nature des sols, occupation des sols,…) et une nette tendance à l'augmentation des évènements ces dernières années (principalement au printemps) tant en fréquence qu'en intensité (pluies de retour cinquantennale à centennale pour les orages de mai-juin 2018).

Les impacts et préjudices sont nombreux : atteintes aux biens et personnes (cf. figure 1), du patrimoine sol, dégradation des cultures (cf figure 2) et autres activités économiques (pisciculture de Canaples par exemple), impacts sur les milieux aquatiques (cours de la Nièvre),…

Figure 1 : Véhicule emporté vers le cours d'eau lors des orages de mai 2018 – SOMEA

Figure 2 :Ravines sur culture, commune de TALMAS, mai 2018 – SOMEA

L'ENGAGEMENT DES EPCI POUR LA MAITRISE DES EAUX PLUVIALES

La mise en œuvre de programmes d'aménagement du bassin versant

Confrontées de manière endémique aux inondations par ruissellement / coulée de boue, les collectivités locales du bassin se sont très tôt saisies de cette problématique avec le portage d'études diagnostiques puis de maîtrise d'ouvrage de programmes d'aménagement à l'image de l'ex CC Bocage-Hallue pionnière en la matière sur le bassin de la Somme (2008).

Ainsi plus de 70 % de la superficie du bassin est à ce jour concernée par un programme d'actions.

Avec les travaux déjà réalisés (cf. figure 3) et les actions en cours, ce sont plus de 2,3 millions d'euros investis sur le bassin de la Nièvre.

Par ailleurs, les deux communautés de communes Nièvre et Somme et Territoire Nord Picardie disposent toutes les deux de la compétence facultative « Maitrise des eaux pluviales et de ruissellement, lutte contre l'érosion des sols ».

Figure 3 : exemples d'aménagements d'hydraulique douce (fascine, bande enherbée et haie)

Une évolution notable des échelles d'intervention : vers des démarches concertées à l'échelle du bassin hydrographique

Les actions engagées successivement sur le bassin de la Nièvre retracent l'évolution des échelles d'appréhension des phénomènes de ruissellement.

Au début des années 2000 et bien que respectant une certaine logique hydraulique, les démarches étaient très souvent appréhendées à l'échelon communal (cas de Pernois, Berteaucourt en 1995,…). L'implication des communautés de communes à partir de 2008 a permis un élargissement des approches aux territoires des EPCI (cas des programmes Bocage Hallue 2008, Bernavillois 2014 et Doullennais 2016). Un bénéfice certain pour la concertation intercommunale et l'émergence des maîtrises d'ouvrage mais se heurtant encore aux limites administratives.

Ce n'est que très récemment que des projets véritablement concertés à l'échelle de bassins hydrographiques cohérents ont émergé à l'image du programme d'aménagement de la tête de bassin de la Nièvre lancé par l'EPTB Somme-AMEVA par délégation de la CCNS (ex CCVNE) et CCTNP (ex CCBH, CC Doullennais et Bernavillois).

L'intégration de la gestion des eaux pluviales dans les documents d'urbanisme

Impulsée par une prescription du Schéma de Cohérence Territoire (SCoT) du Grand Amiénois puis progressivement renforcée (obligation des zonages d'assainissement, disposition de mise en compatibilité du SAGE Somme aval), la prise en compte de la gestion des eaux pluviales dans les documents d'urbanisme, de planification et d'aménagement apparait aujourd'hui comme une évidence, À l'échelle du bassin de la Nièvre et sur l'intégralité du territoire, cette obligation s'est traduite par la réalisation de Schémas Directeurs de Gestion des Eaux Pluviales (SDGEP) en lien étroit avec celle des Plans Locaux d'Urbanisme intercommunaux (PLUi). L'intérêt de ce type d'approche conjointe est multiple :

- Sur le **plan curatif**, elles permettent d'apporter des réponses vis-à-vis de désordres actuels et d'anticiper sur les emprises foncières nécessaires,
- Sur le **plan préventif**, elles visent à limiter les risques d'atteinte aux biens et personnes en adaptant l'urbanisation future,
- D'un point de vue **environnemental**, elles contribuent au respect des objectifs de qualité des milieux récepteurs, à la préservation de la biodiversité, des continuités écologiques terrestres et aquatiques (trame verte et bleue) ou encore de la ressource en eau.

LA CONCERTATION AVEC LE MONDE AGRICOLE

Un facteur déterminant pour la réussite des projets

Les mesures et travaux prescrits par les études d'aménagement de bassin versant intéressent majoritairement des espaces agricoles. Les démarches de sensibilisation et de concertation avec les exploitants et propriétaires de terrain sont donc essentielles pour la faisabilité des programmes. Ces démarches doivent être conduites à toutes les étapes des projets :

- Au **stade diagnostic avec la réalisation d'enquêtes agricoles** poussées (plus de 210 exploitations auditionnées à l'échelle du bassin).
- Lors de **l'élaboration des programmes** avec le recueil **d'accord de principe** sur les mesures et aménagements proposés, puis la **passation de convention** avec les exploitants et propriétaires (près de 700 aménagements et ouvrages conventionnés sur le bassin)
- Enfin pour la **mise en œuvre des opérations** (programmation, implantation des ouvrages, entretien pluriannuel).

L'ensemble de ces démarches constitue la mission centrale du « Pôle érosion » Bien que très chronophages, ces dernières restent néanmoins incontournables et finissent par porter leur fruit avec des taux d'acceptabilité croissants (de 54 à 63 % sur le bassin), reflets également d'une prise de conscience et d'une sensibilité accrue du monde agricole aux problématiques de ruissellement

L'exploitant agricole, un acteur incontournable pour la maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols.

Au-delà d'accepter les aménagements et ouvrages évoqués précédemment, l'exploitant agricole est un acteur majeur pour la maîtrise des eaux de ruissellement et de l'érosion des sols. Premier impacté, ce dernier dispose en effet de leviers d'actions au travers de ses pratiques agronomiques (semis sous couvert, assolement concerté,..).

Lorsqu'elles sont adaptées, celles-ci permettent de gérer et limiter les volumes ruisselés jusqu'à 10 m^3/ha. Loin d'être négligeable, cette marge d'action reste du seul ressort de l'exploitant. Pour faciliter la mise en place de ses « bonnes pratiques » seule une animation territorialisée, adaptée au contexte local s'avère efficace.

DES INITIATIVES DE COMMUNES EN MATIERE DE GESTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES

Au-delà des démarches portées par les EPCI, la commune reste un acteur essentiel en matière de gestion des eaux pluviales urbaines. Pour être pleinement efficaces, les actions engagées sur les bassins agricoles doivent trouver un prolongement sur les secteurs bâtis. Trois communes du bassin sont à l'origine d'initiatives particulièrement intéressantes (Cf. figure 4) :

- Domart-en-Ponthieu et Flesselles avec la réalisation de programmes de déconnexion et de traitement des eaux pluviales,
- La mise en œuvre de modes de gestion alternatifs en secteur urbain à l'image de Villers-Bocage : utilisation de revêtement perméable, l'aménagement d'espaces paysagers inondables à double vocation, l'implantation d'ouvrages d'hydraulique douce intégrés (noue, mare végétalisée,…).

Figure 4 : exemple d'aménagements de gestion des eaux pluviales urbaines : mares et noues végétalisées

Déployé au coup par coup, à l'opportunité (travaux de voirie, réseau d'assainissement,…), ce type d'action nécessite également une approche coordonnée à une échelle supra, celle du bassin hydrographique. Encore une fois l'EPCI y a toute sa légitimité au travers de la mise en œuvre et l'animation du SDGEP, document cadre local en matière de gestion des eaux pluviales.

LE BASSIN VERSANT DE LA NIEVRE, UN TERRITOIRE PILOTE

L'implication des différents acteurs du bassin versant, les actions déjà engagées et les compétences exercées sur ce territoire en font un lieu d'expérimentation idéal pour aller plus loin en matière de gestion intégrée des eaux pluviales.
A cette fin, une opération pilote a été lancée en partenariat avec la chambre d'agriculture de la Somme, l'AMEVA et les collectivités locales. Bénéficiant du soutien financier de l'Agence de l'Eau Artois Picardie, cette dernière poursuit 5 objectifs principaux.

Renforcer l'animation agricole

Sur les bassins ruraux comme celui de la Nièvre, l'agriculteur demeure un maillon essentiel pour la maîtrise des eaux pluviales. L'amélioration des pratiques agronomiques (Cf Figure 5), la mise en place d'assolement concerté, la rémunération des services rendus à la nature ou encore le développement de nouvelles filières et cultures moins érosives sont autant de pistes d'actions à faire émerger avec la profession agricole pour limiter efficacement les ruissellements et pertes de sols issus du parcellaire agricole.

Figure 5 : Semis sous couvert

Evaluer l'impact des programmes d'aménagement de bassin (patrimoine sol, milieux aquatiques)
Au-delà des impacts très palpables des programmes d'aménagement sur la protection des biens et personnes, les effets moins visibles mais tout aussi importants sur le maintien des sols et la préservation des milieux aquatiques (Cf Figure 6) sont généralement peu appréhendés et évalués. Afin d'y remédier, différents protocoles seront déployés sur le bassin comme la quantification des zones d'érosion et d'accrétion en parcellaire agricole ou le suivi en continu des MES sur le cours de la Nièvre.

Figure 6 : Confluence entre le Nièvre et la Somme après une pluie d'orage – Mai 2018

Impliquer les gestionnaires de voiries
L'effet voire la contribution des voiries dans les phénomènes de ruissellement sont souvent pointés du doigt. Cependant en matière de gestion et d'aménagement, ces réseaux et les accotements publics associés restent peu sollicités et valorisés. En impliquant les différents gestionnaires de voirie (Département, EPCI, communes, propriétaires privés,…), il est proposé d'identifier les principaux points d'interaction entre axes de ruissellement et réseaux routiers ainsi que les secteurs propices à l'implantation d'ouvrage d'hydraulique douce (haies, noues, fossés,…). Au-delà des gains attendus sur les écoulements, ce type d'aménagement contribuera également au renforcement des trames vertes et autres corridors biologiques à l'échelle du bassin versant.

Favoriser la gestion alternative des eaux pluviales urbaines :
Bien que le bassin de la Nièvre soit entièrement couvert par des SDGEP définissant les priorités d'action sur le territoire, les initiatives de commune pour améliorer la gestion de leurs eaux pluviales urbaines restent rares et isolées. Un accompagnement de ces dernières est donc indispensable pour faciliter l'émergence de ce type de projet, continuité naturelle des actions engagées sur les bassins versants.

Réduire la vulnérabilité des biens et des personnes :
Malgré les aménagements réalisés et l'adaptation des documents d'urbanisme, de nombreuses zones urbanisées demeurent fortement exposées aux inondations par ruissellement et coulée de boue (cf. figure 7).

Sur ces secteurs à risque, la réduction de la vulnérabilité des biens et personnes constitue une priorité d'action. Des diagnostics de vulnérabilité seront ainsi déployés sur les habitations et bâtiments les plus exposés afin de proposer des mesures préventives adaptées (mise en place de batardeaux provisoires rehausse des équipements électriques, utilisation de matériaux hydrofuges,…) permettant de faciliter la résilience et le retour à la normale après l'événement.

Figure 7 : Exemple d'une habitation sensible aux coulées de boues

Par sa multiplicité d'acteurs et par son échelle d'étude, cette opération pilote de gestion intégrée des eaux pluviales se veut expérimentale. Celle-ci semble transposable à de nouveaux bassins hydrographiques, dont les problématiques sont identiques relevant ainsi un objectif plus large : le maintien de la qualité écologique des cours d'eau du bassin versant de la Somme.

La feuille de route « risque liés aux ruissellements » des opérateurs du ministère de la Transition écologique (Gaume *et al.*)

La feuille de route « risque liés aux ruissellements » des opérateurs du ministère de la Transition écologique

Eric GAUME [1], Vazken ANDREASSIAN [2], Lionel BERTHET [3], Hortense BLANCHET [3], Olivier CERDAN [4], Véronique DUCROCQ [5], Bruno JANET [6], Abdel LAKEL [7], Boris LECLERC [8], Aurélie POYET [9], Gilles RAT [3]

[1] Université Gustave Eiffel, Bouguenais.
[2] Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), Antony.
[3] Ministère de la transition écologique (MTE), DGPR, Paris, La Défense.
[4] Bureau de la recherche géologique et minière (BRGM), Orléans.
[5] Météo France, Toulouse.
[6] Ministère de la transition écologique (MTE), SCHAPI, Toulouse.
[7] Centre scientifique et technique du bâtiment, (CSTB), Nantes.
[8] CEREMA, Brest.
[9] Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), Saint-Mandé.

La direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère de la Transition écologique (MTE) a demandé à ses principaux établissements publics (opérateurs) de mener en 2020 une réflexion, afin d'élaborer un programme concerté d'actions pour les cinq années à venir pour chaque type de risque naturel.
Les feuilles de routes par risque ainsi établies identifient 1) les besoins de la puissance publique tant en recherche, qu'en matière d'innovations technologiques et de missions d'appui scientifique et technique, 2) les actions engagées ou envisagées par les différents opérateurs et les services de l'État, ainsi que les synergies entre opérateurs, 3) les principaux verrous aux évolutions technologiques souhaitables et à l'amélioration des politiques de prévention des risques. Cet article présente la feuille de route consacrée aux risques associés aux ruissellements.

Mots-clefs : Ruissellement. Feuille de route nationale, politique publique

The surface runoff risk mitigation roadmap of the public institutes acting for the French ministry of the ecological transition

The French Ministry of the ecological transition, and more precisely its Directorate-general for risk prevention, has ordered in 2020 a coordinated action plan of its technical agencies and institutes for the next five years to improve the national risk management policies for each specific natural hazard, to its main public research and engineering institutes.
The elaborated roadmaps identify the needs for research and innovation activities as well as for scientific and technical support to the public administrations. They list the already ongoing or programed actions of the public institutes and State services and show the coherence and synergy between these actions. Finally, the roadmaps point out the remaining technological and scientific obstacles to the improvement of the national risk prevention and management policies.
A common strategic action plan has been elaborated by the institutes during the year 2020. The roadmap gives a clear overview of the foreseen scientific and technical evolutions and progress during the coming years.
Any inundation occurring within a catchment area with a time of concentration lower than two hours is considered in the surface runoff risk mitigation roadmap. The considered inundation processes comprise (1) diffuse runoff and associated mudflows, (2) water accumulation in low lying areas, (3) overflow of ditches and small intermittent or permanent streams, (4) overflow of urban sewers for rainfall events with return periods larger than 30 years.

Key words: Surface runoff risks, national roadmap, public policy

INTRODUCTION

La direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère de la Transition écologique (MTE) a demandé à ses principaux établissements publics (opérateurs[1]) de mener en 2020 une réflexion afin d'élaborer un programme concerté d'actions pour les cinq années à venir, pour chaque type de risque naturel. Les feuilles de routes ainsi établies se basent sur les besoins de la puissance publique tant en recherche, qu'en matière d'innovations technologiques et de missions d'appui scientifique et technique et ont pour but d'identifier 1) les actions engagées ou envisagées par les différents opérateurs et les services de l'État, ainsi que les synergies entre opérateurs, 2) les principaux verrous aux évolutions technologiques souhaitables et à l'amélioration des politiques de prévention des risques.

La feuille de route concernant les risques associés aux ruissellements était particulièrement attendue. En effet, comme l'a souligné la stratégie nationale de gestion du risque d'inondation SNGRI (MEDDE, 2014), la politique actuelle de gestion des risques a jusqu'à présent mobilisé d'importants moyens humains, techniques et financiers, en priorité sur les risques d'inondation par débordement de cours d'eau. Or il apparait aujourd'hui qu'une proportion importante des sinistres indemnisés au titre du régime des catastrophes naturelles - jusqu'à 50% pour certaines inondations, ne sont pas liés à des débordements classiques de cours d'eau, mais à une diversité de phénomènes diffus, se produisant sur les territoires touchés par les pluies intenses. Nous reviendrons dans la section suivante sur ces phénomènes qualifiés de « ruissellements ».

Le cadre législatif, réglementaire et la doctrine technique spécifiquement dédiés à la gestion des risques associés aux ruissellements restent relativement peu développés en France (cf. fig. 1).

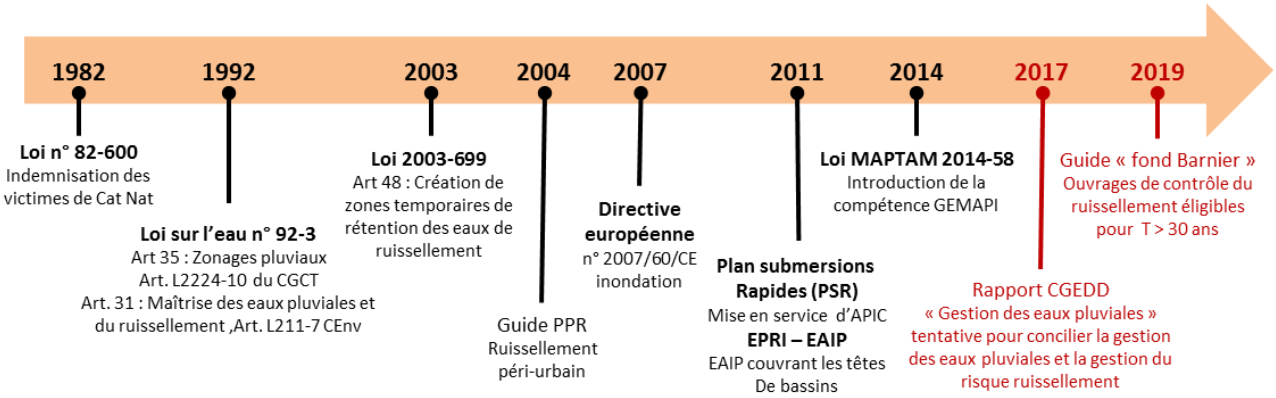


Figure 1 : principales évolutions législatives et réglementaires et documents techniques abordant la gestion des ruissellements.

Parmi les avancées les plus marquantes des dernières années, on peut citer la mise en service des Avertissements aux pluies intenses à l'échelle des communes (APIC), qui était l'une des actions du plan submersions rapides, PSR 2011-2016 (MEDDTL, 2011) et l'ouverture du service *Vigicrues Flash* qui le complète. L'enveloppe approchée des inondations potentielles (EAIP) de l'étude préliminaire des risques d'inondation de 2011 (EPRI), a aussi tenté de prendre en considération les risques associés aux ruissellements. Mais malgré les nombreuses propositions méthodologiques existantes, il n'existe pas aujourd'hui en France de doctrine établie sur l'élaboration des cartes d'aléa et de risques associés aux ruissellements et sur le niveau de fiabilité et l'usage possible de ces cartes. Il n'existe d'ailleurs pas non plus de vision unifiée et exhaustive de la nature et de l'origine des désordres provoqués par les ruissellements, qui peuvent être variables selon les territoires. Or la connaissance des aléas et des risques est l'étape initiale et essentielle à l'élaboration de toute politique de prévention et de protection, qu'il s'agisse d'aménagement du territoire, de régulation de l'occupation des sols ou de la préparation de l'organisation des secours. Dans le même ordre d'idée, il manque aujourd'hui en France un cadre méthodologique complet pour le choix, la conception, le dimensionnement et l'évaluation de l'efficacité des dispositifs techniques et aménagements,

1 BRGM, Cerema, CSTB, Météo-France, IGN, INRAE, Univ. Gustave Eiffel

qui peuvent être envisagés pour limiter les ruissellements et leurs impacts ; on peut penser notamment aux solutions fondées sur la nature.

La feuille de route « risques associés aux ruissellements » propose un programme d'actions concertées des opérateurs et des services de l'État pour les cinq années à venir. Elle donne un très bon aperçu des évolutions attendues, notamment sur les plans méthodologique, technologique, scientifique et technique. Son contenu est succinctement présenté dans ce qui suit.

DEFINIR LE RISQUE « RUISSELLEMENT »

« Ruissellement » est un terme générique[2], qui n'est visiblement pas compris de la même manière selon les acteurs, les territoires et les événements d'inondation considérés. Il est intéressant de noter d'ailleurs qu'il n'existe pas de terme exactement équivalent en langue anglaise[3]. Il était donc essentiel avant toute chose de définir ce terme et le périmètre de la feuille de route.

Pour certains, le ruissellement correspond à un écoulement direct et rapide, en surface, des eaux de pluie qui n'ont pas pu s'infiltrer dans les sols[4]. L'intensité de ces écoulements peut être renforcée par l'artificialisation des surfaces : imperméabilisation ou modification des pratiques agricoles (ruissellements sur sols battants). Mais dans de nombreux cas, le terme de ruissellement est utilisé pour désigner des écoulements provenant de territoires d'extension plus ou moins limitée, au réseau hydrographique plus ou moins marqué. Notons que cette acception plus large reste en accord avec la définition des dictionnaires usuels. Ainsi, les inondations du 23 octobre 2019 à Villeneuve-lès-Béziers, en grande partie provoquées par la crue exceptionnelle des ruisseaux d'Arièges et de Saint Victor, dont le bassin versant couvre une quinzaine de km^2, sont-elles qualifiées d'inondations par ruissellement par la population locale, les élus et les experts du MTES. Dans le même ordre d'idée, la note complémentaire, dite « guide PPR ruissellement »[5] (Baladès et al., 2004) définit comme suit le ruissellement : « On désigne sous les termes de ruissellement pluvial péri-urbain les apports d'eaux pluviales engendrés par les bassins versants naturels, ruraux ou urbains, dont la taille est inférieure à quelques dizaines de km^2 ».

Afin d'élaborer la feuille de route, le groupe de travail a opté pour la définition la plus englobante et exhaustive du terme de ruissellements : écoulements qui ne relèvent pas des catégories « débordement de cours d'eau » et « crues soudaines ». Dans la mesure où les crues soudaines « sont définies comme les crues survenant sur des bassins versants dont le temps de réponse est supérieur à deux heures » (DGPR, 2001, page 23)[6], c'est ce même critère qui a été retenu par le groupe de travail pour définir les ruissellements.

Est considéré comme « ruissellement », tout écoulement, surfacique (diffus), ou linéaire (concentré) concernant un territoire dont le bassin versant amont a un temps de réponse de moins de deux heures[7].

2 Selon le dictionnaire Larousse, le ruissellement est un écoulement instantané et temporaire, diffus ou concentré, des eaux sur un versant à la suite d'une averse (ou de la fusion nivale).

3 Le terme de runoff recouvre tous types d'écoulements et d'alimentation superficielle, sub-superficielle voire souterraine des cours d'eau (cf. par exemple la définition de l'encyclopédie Britannica). L'expression « surface runoff » parfois employée n'est pas non plus équivalente au terme français de ruissellement. Sa traduction la plus pertinente en français serait « ruissellement direct » : i.e. ruissellement en surface des eaux de pluie par refus d'infiltration dans le sol. La langue et ses limites forgent nos pensées et il faut croire que la notion même de ruissellement et de risques liés aux ruissellements est typiquement française ou francophone.

4 On peut noter que cette acception du terme ruissellement est très restrictive par rapport à la définition usuelle retenue dans les dictionnaires. Très souvent, ces phénomènes sont qualifiés de « ruissellement direct » et non simplement de « ruissellement ».

5 Seul le ruissellement pluvial urbain, (i.e. ruissellement issu des surfaces imperméabilisées) était considéré dans le guide méthodologique PPR de 1999.

6 Le même seuil a été initialement retenu lors de la mise en place du service Vigicrues Flash, ouvert aux collectivités en 2017. Le service n'est disponible que pour des tronçons de cours d'eau pour lesquels le temps de réponse aux pluies est supérieur à 2 heures. Des travaux sont en cours pour étendre le dispositif à des secteurs aux temps de réponse plus faibles.

7 Compte tenu des vitesses d'écoulement de l'eau en crues sur les versants et dans les réseaux hydrographiques – de 0.5 à 3 m/s – cela correspond à des bassins versants pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines voire une centaine de kilomètres carrés. Les deux définitions basées sur un seuil de temps de réponse ou de surface (Baladès, 2004) sont donc relativement équivalentes.

Cette définition n'est pas figée. Elle pourra évoluer à l'avenir et notamment le seuil de temps de réponse diminuer, en fonction du déploiement des dispositifs et services dédiés aux crues soudaines et débordement de cours d'eau (cartographie, avertissement). Mais au-delà du caractère subjectif de la définition et des seuils retenus, il est important de noter que les inondations liées aux ruissellements ainsi définies sont de natures variées. Elles peuvent être le fait de plusieurs processus :

- divers phénomènes d'inondation diffus, d'origines variées, mais dont la caractéristique est d'être dispersés sur le territoire, non nécessairement à proximité immédiate des cours d'eau permanents et thalwegs,
- accumulation d'eau dans des points bas sans exutoires de surface, quelle que soit l'origine de l'eau,
- débordement de fossés, thalwegs secs ou petits cours d'eau permanents ou non,
- dépassement des capacités des systèmes d'assainissement pluviaux urbains (pour des événements exceptionnels, de période de retour supérieure à 30 ans).

Ainsi, la feuille de route s'intéresse aux différents risques associés aux ruissellements, dès lors que des enjeux sont exposés, avec des niveaux présentant un danger (dommages ou vie humaine).

ÉTATS DES LIEUX ET PRINCIPAUX VERROUS

Au regard des enjeux et des travaux déjà réalisés ces dernières années sur les différents aspects du risque ruissellement, les besoins identifiés par l'État et ses opérateurs couvrent cinq grands champs d'activités :

a. la **compréhension (connaissance générique) des phénomènes de ruissellement et des risques associés :** ordre de grandeur des aléas (pluie, débits, charge solide), facteurs clefs favorisant la genèse de ruissellement(s) dangereux et l'exposition et la vulnérabilité des enjeux ;
b. la **cartographie de l'aléa de ruissellement** à des échelles adaptées dans une perspective de prévention et de prise en compte de l'aléa dans l'aménagement des territoires ;
c. l'amélioration de **l'observation et de l'anticipation des phénomènes de ruissellement** (qualitative, voire quantitative) par des moyens d'observation, de prévision des pluies et des écoulements et d'anticipation des désordres associés aux ruissellements ;
d. la production de vecteurs efficaces pour **porter cette connaissance** de l'aléa et des risques auprès des citoyens, des élus locaux et des gestionnaires de crise ;
e. la définition des **mesures adaptées de prévention ou de protection** : aménagement du territoire[8], principes d'urbanisme (le cas échéant, les mesures utiles à introduire dans le règlement d'un PPRi intégrant le risque de ruissellements) et ouvrages de protection.

Sur chacun de ces champs d'activité, il existe actuellement des verrous qui contraignent les développements technologiques et méthodologiques et dont certains pourraient être levés en partie ces prochaines années. L'un des principaux obstacles aux progrès des politiques de gestion des risques liés aux ruissellements est **l'extrême hétérogénéité et variabilité dans l'espace mais aussi dans le temps** des processus générateurs de ruissellements et des écoulements (Miquel et al, 2012). Cette grande variabilité a plusieurs conséquences :

1. Les désordres et sinistres associés aux ruissellements peuvent avoir des origines variées : ruissellements et coulées de boues localisés, d'origine naturelle ou artificielle, liés aux capacités limitées d'infiltration des sols amont, mais aussi ruissellements par saturation des sols, apparition de sources ou activation de résurgences, voire défauts de conception ou dépassement des capacités de systèmes d'assainissement pluvial individuels ou collectifs… Ces phénomènes n'ont pas les mêmes déterminants. Il est essentiel de pouvoir **analyser aussi systématiquement que possible les sinistres observés, afin d'identifier les processus générateurs dominants** et d'orienter le choix des outils de diagnostic et cartographie appropriés (actions A.2.1 à A 2.5). Il est indispensable de pouvoir définir précisément ce que l'on cherche à cartographier avant d'élaborer des cartographies…

8 Y compris des règles de construction pour réduire la vulnérabilité du bâti lorsqu'il est exposé à des pluviométries exceptionnelles (période de retour supérieure à 30 ans)

Ces données sur les sinistres sont aussi indispensables pour évaluer les outils de cartographie des aléas et des risques (action A 3.3 et A 3.4)

2. Les processus de génération des ruissellements sont susceptibles de varier selon les territoires, mais aussi selon l'intensité des événements pluvieux. Le développement des connaissances sur les ruissellements ne peut pas uniquement reposer sur des bassins versants expérimentaux, certes essentiels, mais représentatifs des territoires sur lesquels ils sont implantés et rarement affectés par des événements exceptionnels (action A 1.6). Les **retours d'expérience post-événements** constituent une approche complémentaire indispensable pour l'étude des ruissellements (action A 1.5 et A 1.7).

3. Les ruissellements et les désordres associés sont des phénomènes localisés, typiquement à l'échelle décamétrique. Les informations disponibles sur les territoires n'ont souvent pas un **niveau de précision spatiale suffisant pour soutenir une analyse diagnostique de risques** : nature et profondeur des sols, du sous-sol, niveau d'altération du substratum notamment. La perspective d'un relevé topographique Lidar de haute précision en France serait en ce sens une avancée substantielle (action A 3.2). La topographie conditionne en partie l'aléa : concentration des écoulements et points bas. L'exploitation des données Lidar sera l'un des enjeux des années à venir. La constitution et la valorisation de bases de données géographiques plus précises et détaillées seront un autre enjeu (action A 3.1). La généralisation de données topographiques de cette précision pose également la question de leur validité dans le temps.

Par ailleurs, la forte hétérogénéité spatiale des pluies génératrices de ruissellement, leur rapide évolution spatiale et temporelle, ainsi que les faibles temps de concentration des territoires concernés (inférieurs à 2 heures) sont autant de contraintes fortes pour le **développement de services d'avertissement et de prévision**. Un certain nombre d'actions des opérateurs viseront à améliorer des services opérationnels d'observation des pluies (actions A 1.1 et A 1.8), d'humidité des sols (action A 1.2), de la vigilance pluie-inondation (action B 2.1) et des services d'avertissement APIC et Vigicrues Flash (actions A.1.4, B 2.2 et B 2.5). Des travaux de recherches sont par ailleurs en cours afin de pouvoir proposer à terme des services allant au-delà des avertissements (constat de dépassement de seuils prédéfinis), afin de proposer des 'information en temps réel et notamment des scénarii de prévision des aléas et des impacts (actions B 2.3 à B 2.7).

Enfin, les opérateurs ont programmé des actions concertées afin de permettre l'élaboration d'une indispensable doctrine technique concernant deux points majeurs de la mise en œuvre des politiques de prévention contre les risques liés aux ruissellements : la cartographie de l'aléa et des risques, ses limites et ses usages possibles d'une part (actions A 3.3 et A 3.4) et les mesures de prévention et d'aménagement, leur utilité et leur efficacité d'autre part (action B 1.1 et B 1.2).

PROGRAMME D'ACTIONS

Les tableaux suivants décrivent les actions programmées par les opérateurs dans la feuille de route. Ces actions sont regroupées selon cinq grandes catégories d'enjeux :

- A1 : La connaissance de l'aléa
- A2 : La connaissance des risques
- A3 : La cartographie des aléas et des risques
- B1 : les stratégies de prévention et de mitigation
- B2 : les avertissements et l'anticipation

Certaines actions devraient conduire à une évolution de services opérationnels existants et d'autres relèvent, sur les cinq prochaines années, de la recherche et de l'innovation. Certaines actions ont été identifiées comme potentiellement utiles, mais ne sont pas programmées à ce jour, soit que leur utilité doive être confirmée (développement d'une lame d'eau radar à maille infra kilométrique), soit que les conditions de réalisation de l'action ne sont pas encore réunies (mise en place d'un partenariat avec les compagnies d'assurance afin d'étudier les causes précises des sinistres associés aux ruissellements).

Evolutions en vue d'améliorer les services opérationnels

Action	Description	Livrables	Echéance
A1 : Connaissance de l'aléa			
A1.1	Amélioration continue de la qualité des **produits « lame d'eau » radar** (maintenance réseau, renouvellement radars,…). Evaluation hydrologique des produits météorologiques.	• Renouvellement radar : 5 radars entre 2020 et 2023 • Nouveaux algorithmes améliorant la qualité de la lame d'eau radar	2023
A1.2	Evolution des produits d'humidité des sols de **SIM** (ré-analyse de surface à résolution plus fine (2-5km)	• Evaluation du système	2023
A1.3	Augmentation de la résolution spatiale du produit **SHYREG** afin de proposer des estimations de débits élémentaires de ruissellement à mailles infra kilométriques.	• Quantiles de débits SHYREG	2023
A1.4	Evaluation de **Vigicrues flash** et des APIC pour le ruissellement	• Bonnes pratiques d'utilisation	2023
A1.5	Documentation des inondations exceptionnelles par ruissellement au travers de campagnes de **retour d'expérience post-inondations.**	• Rapports post-événement • Base de données des événements extrêmes	2025
A2 : Connaissance du risque			
A2.1	Collectes d'informations sur les impacts du ruissellement : poursuite développement **MUREX** (CEREMA), Repères de crues (SCHAPI), Base de données **DAMAGIS** (INRAE), Appli tél. Mobile (Météo France), analyses post-événements (CEREMA), autres…	• Applications de collecte de données • Archives sur les impacts des ruissellements • Rapport sur l'utilité des données sur les impacts	2024
A2.2	Evaluation des **réseaux** (transport, eau potable) soumis au risque de ruissellement intense et réduction de leur vulnérabilité	• Rapport d'état des lieux • Guide méthodologique	2024
A3 : Cartographie de l'aléa et du risque			
A3.1	Etablissement de **modèles numériques de terrain** de haute précision sur la base de levés **Lidar** pour 10 départements (a minima) de l'arc Méditerranéen. En parallèle, extension envisagée à l'ensemble du territoire national (échéance cible : 2024).	• MNT Lidar • Evaluation des gains apportés par le MNT Lidar par rapport au MNT actuel	2022
A3.2	Déploiement pour l'ensemble de la France du référentiel **OCS GE** (Occupation des sols à grande échelle ; couverture de 40% à ce jour). Ce référentiel offrira une information à haute résolution et sera mis à jour tous les 3 ans	• Base de données cartographique OCS GE	2024 *(pour couverture France entière)*
A3.3	Développement concerté et mise à disposition de plusieurs **outils de cartographie de l'aléa ruissellement** et de test des aménagements (**Watersed, CRUS, IRIP, Cartino, Exzeco, SHYREG-Débits …**)	• Guide des bonnes pratiques de cartographie, • Outils de cartographie	2023
A3.4	Evaluation des performances et des limites des outils de **cartographie de l'aléa ruissellement**.	• Rapport sur l'évaluation et les limites des outils cartographiques.	2023
B1 : Stratégies de prévention et de mitigation			
B1.1	Rédaction d'un **guide sur les aménagements** pour la gestion du risque ruissellement (y compris les mesures d'aménagement du territoire et de réduction de vulnérabilité, PPR): conception, dimensionnement, efficacité selon la nature et l'intensité des événements, contexte, échelle et objectifs auxquels répondent ces aménagements.	• Guide méthodologique	2022
B.1.2	Rédaction d'une **boîte à outils** recensant les différents outils mobilisables – selon les échelles – dans le cadre de la **prévention** des inondations liées aux ruissellements : avantages et inconvénients, préconisations d'aménagements, préconisations constructives, réduction de la vulnérabilité	• Boîte à outils	2022
B2 : Avertissements et anticipation			
B2.1	Amélioration de la **vigilance pluie-inondation** (dans le contexte des évolutions à venir : J et J+1, infra-départemental) par une meilleure prise en compte de la sensibilité des territoires au ruissellement.	• Nouvelle version vigilance pluie-inondations	2021

Actions de recherche-développement

Action	Description	Livrables	Echéance
A1 : Connaissance de l'aléa			
A1.6	Mise en place d'**observatoires du ruissellement de terrain** afin d'approfondir la connaissance des processus.	• Rapport sur les connaissances acquises • Identification des processus clefs, de leurs dynamiques et de leurs interactions.	2025
A1.7	Développement de l'estimation de vitesses d'écoulement et de débits à partir de **vidéos amateur** par la technique **LSPIV**.	• Méthode de traitement des vidéos amateur	2024
A2 : Connaissance du risque			
A2.3	Collectes d'informations sur les impacts du ruissellement via la **science participative** : poursuite développement MUREX (CEREMA,, Appli tél. Mobile (Météo France), exploitation des réseaux sociaux (BRGM)…	• Rapport sur l'utilité de la science participative.	2023
A2.4	Evaluation de l'utilité des **images aéroportées et satellitaires** pour collectes des informations sur les épisodes de ruissellement et leurs impacts.	• Rapport sur l'utilité des images aéroportées ou satellitaires	2023
B2 : avertissements et anticipation			
B2.2	Avertissements pluies intenses **APIC** : extension aux premières échéances de la prévision immédiate (avec PIAF) Lien fort avec Vigicrues Flash co-développé avec le SCHAPI via AIGA.	• Evaluation quantitative	2023
B2.3	Développement de produits ensemblistes « sans couture » de **prévisions des pluies (Arome PI et Arome PE)** pour la prévision immédiate du ruissellement –crues soudaines (ANR PICS. liens forts avec l'action B2.4)	• Rapport sur l'évaluation des prévisions des pluies	2022
B2.4	Développement et test de méthodes de **prévision immédiate des ruissellements et crues soudaines** (programme ANR PICS)	• Proposition et évaluation de méthodes de prévision immédiate des ruissellements	2022
B2.5	Evolution de **AIGA** vers un modèle hydrologique hyper-distribué, pour le calcul "temps réel" d'une pluie efficace à haute résolution (infra-horaire / infra-km)	• En entrée des modèles de cartographie 2D	2025

Actions souhaitables, mais non programmées à ce jour

Action	Description	Livrables	Echéance
A1.8	Amélioration de la lame d'eau radar 500m (prise en compte du déplacement des précipitations) et Evaluation de l'utilité des **lames d'eau radar de résolution spatiale de 500 m**.	• Argumentaire pour le déploiement ou non des lames d'eau radar à haute résolution.	
A2.5	Analyse détaillée de la **nature et de l'origine des sinistres « ruissellement »**, notamment les sinistres situés hors des emprises de débordement de cours d'eau ou thalweg, afin de pouvoir mieux paramétrer les outils de cartographie et d'analyse.	• Rapport sur la nature des sinistres « ruissellement » en France	

CONCLUSIONS

La feuille de route 2020-2025 « risques liés aux ruissellements » implique les représentants de sept organismes ou instituts, opérateurs du Ministère de la transition écologique, ainsi que certains services du Ministère. Elle cartographie la mobilisation des opérateurs sur cette thématique en vue de répondre aux besoins de la direction générale de la prévention des risques et de ses services déconcentrés. Elle contribue ainsi à consolider l'action opérationnelle et la mobilisation de l'ensemble des acteurs de la prévention des risques, notamment des collectivités territoriales dont l'action et les questionnements ont été pris en compte. Cette feuille de route partagée propose une vision concertée et un cap clair des évolutions technologiques ; elle contribue ainsi aux évolutions de la doctrine technique de l'État pour les années à venir. La mise en place d'un comité de suivi auprès de la direction générale de la prévention des risques permettra de renforcer la collaboration entre ces opérateurs, pour une plus grande efficacité collective.

REFERENCES

Baladès J-D., Monfort M., Gaber J., 2004. *Plans de Prévention des risques naturels (PPR) Risques d'inondation (ruissellement péri-urbain). Note complémentaire*. Ministère de l'Écologie et du développement durable –Septembre 2004. 64 pages.

CEPRI, 2014. *Gérer les inondations par ruissellement pluvial*. Les guides du CEPRI. 92 pages.

Cerema, 2018. *Les territoires face au risque ruissellement. Analyse des dispositifs et enseignements tirés de 4 études de cas*. Guides du Cerema. 128 pages.

Gaber J, Renne M., 2006. *Les collectivités locales et le ruissellement pluvial.* Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables, coll. Risques naturels majeurs, 82 pages.

Journal officiel de la république française, 2019. *Décret no 2019-715 du 5 juillet 2019 relatif aux plans de prévention des risques concernant les «aléas débordement de cours d'eau et submersion marine»* NOR : TREP1909017D.

Le Quentrec, M., Ravard, J-L ., Verdeaux, P., 2009. *Le ruissellement urbain et les inondations soudaines. Connaissance, prévention, prévision et alerte.* Rapport du CGEDD, n.005487-01,février.2009. 68 pages.

Ministère de l'écologie du développement durable et de l'énergie, 2012. *Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en oeuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation*. NOR : DEVP1228419C

Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, 2011. *Plan submersions rapides. Submersions marines, crues soudaines et ruptures de digues.* DICOM – DGPR/COU/11003 – Février 2011, 80 pages.

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2014. *Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation.* DICOM-DGRP/COU/15024-Août 2015. 24 pages.

Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, 2017. *Cahier des charges PAPI 3*. 61 pages.

Ministère de la transition écologique et solidaire, 2019. *Guide relatif à la mobilisation du fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM)*. 11 février 2019. NOR : ECOT1904359C.

Miquel, J., Roche P-A., Gaume G., 2012. *Hydrologie quantitative*, ed. Springer., Paris, ISBN : 978-2817801056, 590 pages.

ONERC, 2019. *Des Solutions fondées sur la Nature pour s'adapter au changement climatique. Rapport au premier ministre et au parlement*. La documentation française, Paris, 2019. ISBN: 978-2-11-157004-7

Roche, P.-A., Velluet, R., Aujollet, Y., Hélary, J.-L., Lenouveau, N., 2017. *Gestion des eaux pluviales : Dix ans pour relever le défi - Tome 1 : Synthèse du diagnostic et propositions et Tome 2 : Diagnostic détaillé*, MTES, Rapport du CGEDD, avril. 2017.

Vigneron S., Guézo B. et al., 2006. *Les collectivités locales et le ruissellement pluvial.* Dossier de la collection Risques naturels majeurs, Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables. Paris, juillet 2006. 80 pages.

Mesure préventive de gestion du risque d'inondation par ruissellement (Delvaux)

Mesure préventive de gestion du risque d'inondation par ruissellement

Géraldine DELVAUX[1]

[1] Service Public de Wallonie – Agriculture, Ressources Naturelles, Environnement (SPW-ARNE) - Direction du Développement rural - Cellule GISER, Avenue Prince de Liège, 7, 5100 Jambes, Belgique, e-mail : geraldine.delvaux@spw.wallonie.be

La Wallonie, dont la densité d'habitat est relativement élevée, a intégré depuis 2017 une démarche de prévention contre les risques d'inondation dans le cadre de la délivrance de permis de construire. Cette démarche vise à intégrer, dès la phase de conception du projet de construction, le risque d'inondation lié au débordement d'un cours d'eau mais aussi au ruissellement en provenance de l'amont.

Mots-clefs : Prévention, Urbanisme.

Preventive measure to manage run-off flood hazard exposure

Wallonia, Belgium, is characterized by a high habitat density. Since 2017, the Regional administration has integrated a prevention approach against flood hazard within the delivery procedure for planning permits. This initiative aims to integrate, from the design phase of the construction project, flood risk related both to river overflowing and runoffs from upstream.

Key words: Prevention, Sustainable urban management

INTRODUCTION

Au premier semestre 2018, les assureurs opérant sur le marché belge ont pris en charge plus de 14000 demandes d'intervention liées à l'importante vague d'intempéries qui a frappé l'Europe. Plus de 50 millions d'euros ont ainsi été nécessaires à la couverture des dégâts. Bien que marquée par son caractère jusqu'à présent exceptionnel, cette situation pourrait à l'avenir se répéter voire s'aggraver au vu des modèles climatiques.

Parmi le panel de mesures mises en œuvre par la Wallonie pour maîtriser les risques d'inondation figure la prévention concernant les nouvelles constructions. L'objectif est de corriger d'éventuels points de vulnérabilité liés au site d'implantation et à la conception des bâtiments mais aussi de prendre en compte l'impact du projet sur les fonds voisins et inférieurs.

Cette analyse concerne les inondations par débordement de cours d'eau et est étendue à la problématique du ruissellement se produisant à l'échelle de l'amont de la parcelle, que nous exposons ici.

CADRE INSTITUTIONNEL

Depuis le 1er juin 2017, en réponse à l'article R.IV.35-1 du Code du Développement Territorial, les projets d'urbanisme et d'urbanisation sont soumis à une analyse obligatoire par rapport au risque naturel d'inondation par ruissellement concentré. Cela signifie que les Services d'urbanisme des administrations communales (mairies) doivent solliciter un avis technique auprès de la Cellule Gestion Intégrée Sol-Erosion-Ruissellement (GISER) du Service public de Wallonie pour toute nouvelle installation, construction, transformation et rénovation, ainsi que pour une modification du relief du sol, situés à proximité d'un axe de concentration naturel du ruissellement.

La procédure d'avis peut être étendue aux avant-projets via la procédure de certificat d'urbanisme. Des avis préalables et participation à des réunions d'avant-projets sont également prévus dans le cadre de projets publics ou sites problématiques précédemment étudiés par la Cellule GISER.

L'avis technique de la Cellule GISER est obligatoire et consultatif. La décision d'octroi de permis revient à l'autorité compétente.

OUTILS CARTOGRAPHIQUES

Le Service Public de Wallonie met à disposition des cartes spécifiques sur le Géoportail de la Wallonie WalOnMap afin de permettre au public et aux administrations communales de situer une parcelle par rapport au risque naturel d'inondation par ruissellement concentré.

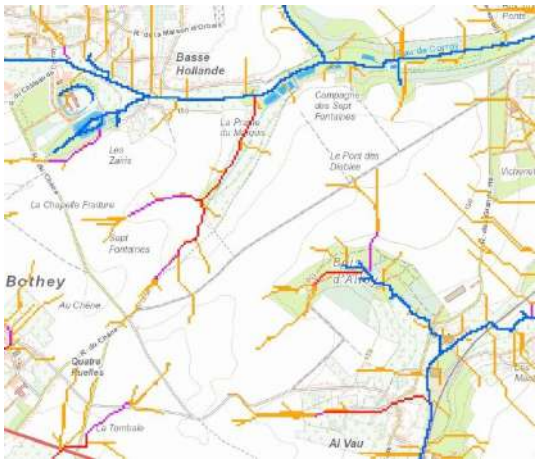


Figure 1 : Extrait de la cartographie des axes de concentration du ruissellement (modèle ERRUISSOL, 2009).

Les modèles ERRUISOL et LIDAXES, développés par la Wallonie avec l'aide des universités Gembloux AgroBioTech et UCLouvain, prédisent le tracé théorique des chemins naturels de concentration des eaux de ruissellement tenant compte de la topographie (Figure 1).

Les axes de concentration naturels de ruissellement correspondent aux thalwegs, vallées et vallons secs. Ces axes permettent d'évaluer le cheminement préférentiel de l'eau dans une zone donnée et le nombre d'hectares de surface drainée qui aboutit à un point donné ; et donc la quantité d'eau qui pourrait potentiellement atteindre ce point.

Le modèle ERRUISSOL correspond à un bassin versant nu et reprend le tracé naturel observé en cas d'orage. Le modèle LIDAXES tient compte du caractère éventuellement anthropisé du bassin versant (routes, fossés, constructions) et du tracé du ruissellement en cas de pluie 'normale'. Cette cartographie est mise à jour périodiquement et fait l'objet d'un processus d'amélioration continue sur base des évolutions de la technologie.

La carte de l'aléa d'inondation complète les informations précédentes. Elle représente des zones et des axes où il existe une probabilité d'inondation.

L'aléa d'inondation détermine les zones susceptibles d'inondations plus ou moins importantes et fréquentes, à la suite du débordement naturel d'un cours d'eau ou à la concentration de ruissellement naturel des eaux pluviales. Cet aléa est déterminé par la combinaison de deux facteurs : la récurrence (période de retour) d'une inondation ou d'une pluie à l'origine du ruissellement et son importance (profondeur de submersion ou débit de pointe). Les valeurs peuvent être : très faible, faible (jaune), moyenne (orange) ou élevée (rouge) (Figure 2).

Cette carte ne concerne pas les inondations trouvant leur origine dans du refoulement d'égout, de la remontée de nappe phréatique ou de phénomènes apparentés. Elle exclut également toute hypothèse d'inondation catastrophique, liée à un événement accidentel tel qu'une rupture de barrage ou de digue, une panne de système de pompage, et tout autre incident similaire. Seul le débordement « naturel » des cours d'eau est pris en compte dans la délimitation et seul le ruissellement « naturel » des eaux de pluie est représenté par des axes d'écoulement préférentiel.

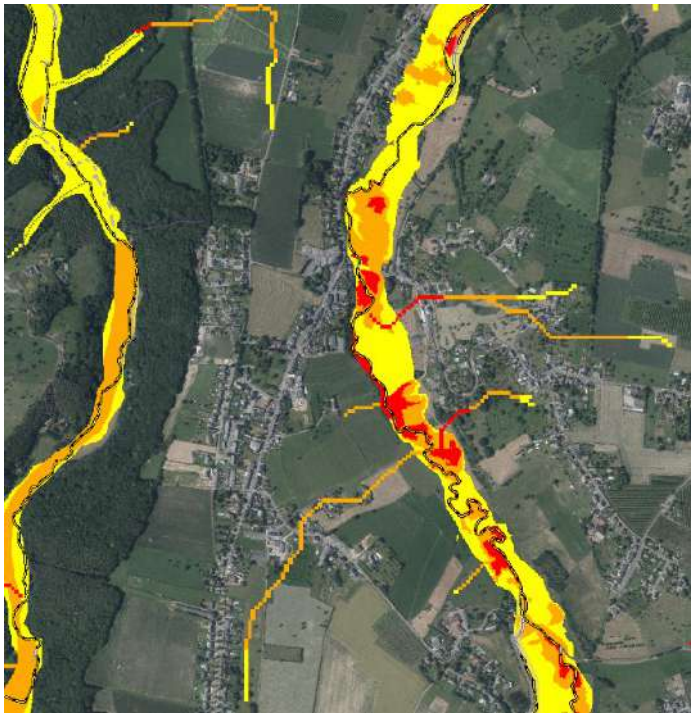


Figure 2 : Extrait de la carte d'aléa d'inondation (SPW, 2016).

PORTEE DE LA DEMARCHE

La démarche vise à informer, sensibiliser et guider le candidat bâtisseur afin de prévenir et d'intégrer au mieux, et ce, dès la conception du projet, le risque d'inondation par ruissellement.

En pratique, le candidat bâtisseur doit s'assurer que son projet ne risque pas d'être inondé lors d'un événement pluvieux extrême et qu'il n'est pas susceptible d'avoir un impact sur les écoulements et sur les parcelles voisines. Pour évaluer la situation de chaque projet urbanistique par rapport au ruissellement concentré, l'auteur de projet doit tenir compte des éléments locaux comme le relief, les infrastructures existantes, les terrains voisins et leurs constructions, ou l'existence de problèmes d'inondation antérieurs.

A noter que les projets n'impliquant pas une modification sensible des emprises et niveaux des bâtiments existants et qui ne modifient pas les écoulements sur le site sont considérés comme favorables de par la nature des travaux : placement de fenêtre de toit, isolation et modification de revêtement de façade, transformation de bâtiment ne modifiant pas l'enveloppe, modification de baies non-exposées au ruissellement.

Actuellement, la Cellule GISER traite approximativement 600 dossiers/mois. Ceci représenterait 15 % de l'ensemble des demandes de permis d'urbanisme et d'urbanisation introduites en Wallonie. Le délai de réponse prévu par le Code du Développement Territorial est généralement de 30 jours. En cas de dépassement de ce délai, l'avis est réputé favorable.

ELEMENTS PRIS EN COMPTE DANS L'ANALYSE

Le dossier transmis par l'administration communale doit comprendre idéalement :

- Le formulaire de demande de permis. Ce document permet d'identifier l'objet de la demande, le demandeur et de localiser le projet.
- Un plan du contexte urbanistique et paysager, un plan d'implantation et les plans de coupes. L'implantation précise des constructions et installations, localisée et cotée de manière très claire, est fondamentale. Ces plans permettent une interprétation des altitudes du projet par rapport au terrain naturel et au terrain après projet. : éléments marquants du relief, courbes de niveaux, végétation, constructions existantes (y compris murets et caniveaux), présence d'un cours d'eau ou tout autre

élément marquant sur le bien concerné dans un rayon de 100 mètres autour de celui-ci. Pour tous ces documents, nous insistons sur la lisibilité des éléments tels que le relief, la nature des matériaux potentiellement au contact de l'eau et les caractéristiques de surface et les éventuelles couches de fondation, les éléments de conduite des écoulements tels que caniveaux, avaloirs, bordures et talus, chenaux et fossés, bassins, canalisations, etc.

- Une description de la circulation des eaux de ruissellement. Pour les dossiers plus complexes, par leur ampleur ou par le niveau de risque élevé auquel ils sont exposés, il est conseillé au porteur de projet de présente de préférence un plan spécifique décrivant la circulation des eaux pluviales et du ruissellement avant et après projet. Les ouvrages de temporisation et de stockage des eaux pluviales seront indiqués, avec mention de leurs volumes utiles.
- Les volumes et nature des matériaux utilisés pour le remblai. Dans le cadre d'un projet de remblai, le dossier doit présenter les volumes et épaisseurs dans une série de plans et coupes, ainsi que la nature des matériaux. Il doit également être fait également mention des différentes phases et des modalités d'exécution. Si nécessaire, le demandeur joint un descriptif des méthodes de protection contre le ruissellement concentré (et l'érosion subséquente) en cours de chantier.
- Les volumes de temporisation ou de compensation. Dans le cas où le projet entraîne une imperméabilisation de surfaces, ou fait disparaître une zone de rétention naturelle, le demandeur doit prévoir un volume de temporisation des eaux issues des surfaces nouvellement imperméabilisées ou un volume de compensation des volumes comblés. Le volume destiné à la temporisation est différent d'un simple volume de stockage. Le volume dit « temporisé » est une réserve de volume destinée à se vider progressivement en l'absence de pluie extrême. Dans le cas d'une demande d'urbanisation, portant sur l'aménagement d'un lotissement, le demandeur peut proposer une gestion des eaux de ruissellement à la fois sur les parcelles individuelles et sur le domaine commun.

DEMARCHE D'ANALYSE

La démarche d'analyse de la Cellule GISER s'articule selon :

- La vulnérabilité du projet, résultant de la combinaison de l'exposition et de la sensibilité du projet aux écoulements.

L'exposition du projet au ruissellement concentré est évaluée selon sa localisation dans le vallon et sur base de l'intensité potentielle des écoulements sur le terrain. La sensibilité du projet est estimée selon la configuration et selon les choix architecturaux (niveaux de seuils, position des baies et portes, …).

- La solidarité amont-aval permettant de vérifier si les écoulements peuvent transiter sur la parcelle du projet sans impacter ou aggraver l'exposition des parcelles voisines ou des fonds inférieurs.

Ce principe de solidarité amont-aval est érigé en Droit 'napoléonien', donc autant belge que français, entre les parcelles voisines dans l'article 640 du Code civil. Concrètement, il convient de s'assurer que les écoulements naturels puissent transiter sur la (ou les) parcelle(s) concernée(s) par le projet après mise en place des constructions ou installations et des modifications éventuelles du relief. Les flux d'eau provenant de l'amont doivent pouvoir pénétrer sur le terrain comme à l'origine, et les flux reportés vers les fonds inférieurs ne peuvent être aggravés (accélérés, concentrés ou déplacés). La continuité hydraulique doit donc être assurée.

- La limitation de l'impact de l'imperméabilisation des surfaces engendrant l'accroissement des volumes ruisselés. Selon l'étendue et la nature des surfaces rendues imperméables par le projet, les écoulements vers l'aval peuvent être augmentés avec localement une aggravation de la servitude des fonds inférieurs vis-à-vis de l'écoulement et, à l'échelle du bassin versant, un impact potentiel sur la gestion des pics de crue dans les cours d'eau.
- La compensation des zones de rétention. Lorsque le projet implique le comblement partiel ou total d'une zone de stockage naturelle, comme une cuvette ou une zone en dépression traversée par un axe de concentration du ruissellement, une zone de compensation proportionnelle au volume comblé doit être mise en place afin de ne pas aggraver la servitude d'écoulement des fonds inférieurs du fait de la perte d'un élément naturel de temporisation.

En complément des documents fournis dans le dossier de demande transmis par l'administration communale, la cellule GISER utilise les outils cartographiques mentionnés plus haut pour l'analyse des dossiers plus complexes. Tous ces outils sont accessibles à chacun via https://geoportail.wallonie.be

Ces éléments peuvent également être complétés par une éventuelle visite sur place,

L'avis remis sur base de l'analyse issue de l'intégration de l'ensemble de ces éléments peut être :

- Favorable : dans la mesure où les dispositions prises et/ou les aménagements prévus, le projet ne semble pas être exposé à un risque naturel d'inondation par ruissellement et que la nature du projet n'accentue ni la sensibilité du site à un risque d'inondation par ruissellement, ni la servitude d'écoulement envers les fonds inférieurs,
- Favorable sous conditions ou partiellement favorable : dès lors que l'analyse montre que le projet ne semble pas totalement exempt d'un risque d'inondation par ruissellement et/ou que le projet pourrait impacter la servitude des fonds inférieurs. En ce cas les conditions sont clairement énoncées et des pistes permettant d'y répondre peuvent être proposées,
- Défavorable : s'il s'avère que le projet est soumis à un risque naturel majeur d'inondation par ruissellement ou impacte la continuité hydraulique ou la servitude des fonds inférieurs (ou autres).

Le projet modifié pourra être analysé à nouveau en tenant compte des recommandations mentionnées dans l'avis. Ces recommandations peuvent concerner des aménagements tels que :

- La mise en place de chenal enherbé large et peu profond pour conduire les écoulements sur le site et assurer ainsi la continuité hydraulique,
- La révision de niveau de seuils de porte et la protection des évents de caves,
- La protection des entrées de garage au moyen de léger dos-d'âne éventuellement complété d'une grille-avaloir,
- La limitation des surfaces imperméabilisés et la stabilisation des matériaux au sol,
- La temporisation des eaux issues des surfaces imperméabilisées,
- …

IMPACT DE LA DEMARCHE

Près de 6 000 demandes d'avis ont été traitées en 2019. La proportion de projets ayant nécessité un recadrement sur les 4 dernières années est de 30 %, majoritairement suite à un avis favorable sous conditions. La proportion d'avis défavorables est de 4 % (Figure 3). Les projets concernés portaient sur des habitations unifamiliales, des immeubles à appartements, des lotissements comprenant plusieurs logements ou des modifications sensibles du relief du sol.

La démarche s'accompagne d'un effort d'encadrement à l'attention des services d'urbanismes communaux (mairies), des architectes et des porteurs de projet : formations à l'attention des fonctionnaires, mise en ligne de vade-mecum à l'attention des services d'urbanisme et à l'attention des porteurs de projet.

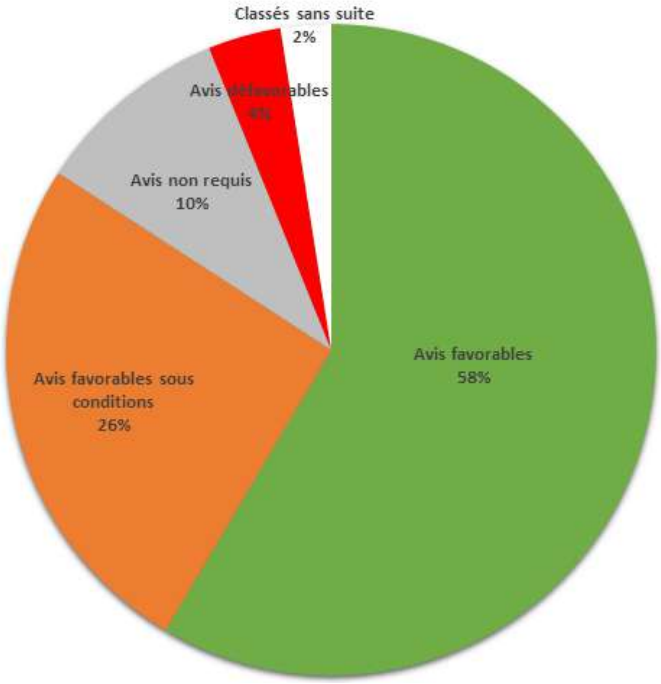


Figure 3 : Répartition des avis rendus par la cellule GISER sur des demandes de permis pour la période du 1er janvier 2016 au 1er mai 2020.

CONCLUSION

La procédure administrative mise en place par la Wallonie depuis 2017, basée sur une analyse du bassin versant dans lequel s'inscrit le projet de construction, offre une opportunité certaine de prévenir le risque d'inondation par ruissellement. Elle s'insère dans une stratégie globale de gestion du risque d'inondation (prévention, protection, préparation, réparation et analyse post-crise) et traduit la volonté des pouvoirs publics de protéger les personnes, les biens et l'environnement contre les risques naturels, dans une dynamique de développement harmonieux et durable de notre territoire.

La mise en œuvre de cette procédure est rendue possible par un investissement en ressources internes au niveau Régional (cellule d'expertise) et par la réalisation préalable de modèles permettant la localisation fiable du tracé du ruissellement pouvant survenir en cas d'orage.

REFERENCES

Géoportail Toute la Wallonie à la carte : https://geoportail.wallonie.be/walonmap

Cellule GISER : www.giser.be

Guide « Risque naturel d'inondation par ruissellement concentré. Les avis sur permis et autorisations en zone à risque - Informations à l'attention des communes » : https://www.giser.be/2019/03/vademecum-risque-dinondation-par-ruissellement-et-urbanisme-22/

Guide « Risque naturel d'inondation par ruissellement concentré. Les avis sur permis et autorisations en zone à risque - Informations à l'attention des porteurs de projet » : https://www.giser.be/2018/12/vademecum-risque-dinondation-par-ruissellement-et-urbanisme-12/

Portail Inondations : http://environnement.wallonie.be/inondations/

Diagnostic de l'exposition et de la vulnérabilité à l'aléa ruissellement. Adaptation aux enjeux du réseau ferroviaire de la région Provence Alpes Côte d'Azur (Moulin *et al.*)

Diagnostic de l'exposition et de la vulnérabilité à l'aléa ruissellement Adaptation aux enjeux du réseau ferroviaire de la région Provence Alpes Côte d'Azur

Loïc MOULIN[1], Lilly-Rose LAGADEC[2]
Marie-Anne MOULIN[3], Isabelle BRAUD[4], Pascal BREIL[4]

[1] SNCF Réseau – Direction Générale Industrielle et Ingénierie – Département Voie et Abords - 6, avenue François Mitterrand 93574 La Plaine St Denis Cedex, France –loic.moulin@reseau.sncf.fr

[2] SNCF Réseau – Direction Zone Ingénierie Atlantique – Pôle d'ingénierie de Bordeaux – 53bis rue Amédée St-Germain 33000 Bordeaux, France

[3] SNCF Réseau – Direction Territoriale Provence Alpes Côte d'Azur – Pôle Environnement et Développement Durable – Les Docks-Atrium 10.4 – 10 place de la Joliette -13567 Marseille, France

[4] INRAE, RiverLy, 5 Rue de la Doua, CS 20244, 69625, Villeurbanne, France

L'infrastructure ferroviaire est exposée aux aléas liés au ruissellement sur les territoires qu'elle intercepte, et les enjeux ferroviaires (disponibilité de l'infrastructure, régularité des circulations, sécurité des biens et des personnes) y sont vulnérables. Pour alimenter la gestion du risque à chaque stade de vie du système (construction, exploitation, maintenance), il est nécessaire n de connaître l'aléa ruissellement pour pouvoir anticiper ses conséquences potentielles via un zonage opérationnel. Celui-ci doit être adapté au caractère linéaire des enjeux et aux attentes en termes de fonctionnalités système du Gestionnaire d'Infrastructure. Cette étude/diagnostic ruissellement sur l'axe Marseille-Vintimille présente les difficultés que peuvent poser l'exploitation opérationnelle des cartes d'aléa ruissellement et l'évaluation de la vulnérabilité de l'infrastructure. L'article souligne la portée et les limites des résultats d'une analyse préliminaire concernant des aléas aussi divers, incertains et parfois fugaces que ceux générés par le phénomène de ruissellement intense. L'approche exploratoire présentée montre qu'il est possible de prendre en compte le risque ruissellement dans la gestion des actifs de l'infrastructure en ouvrant le champ des variantes méthodologiques.

Mots-clefs : infrastructure linéaire, exposition à l'aléa ruissellement, vulnérabilité des enjeux ferroviaires, traitement cartographique opérationnel

Diagnosis upon railway's exposure of vulnerability to water runoff. Adaptation to French Mediteranean rail network'stakes.

Railways are exposed to hazards provoked by water runoff on the landscapes and what is at stake could be infrastructure availability, punctual running of trains, safety of goods and people. To fuel risk management for the entire lifecycle of system (building, running, maintenance), water runoff must be known as an hazard, to ancipate its potential consequences with a zoning scheme. This one must reflect the linear characteristics of rail infrastructure, and the system functionalities expected by the Infrastructure Manager. This water runoff diagnosis affecting the rail area Marseille-Vintimille shows the challenges with the operational utlisation of runoff hazard mapping and with infrastructure vulnerability assessment. The article highlights reach and limits of preliminary assessment's results, considering diversity, uncertainty and fugacity of intense water runoff effects. Exploratory approach displayed here demonstrates that it is possible to take in account risks related to water runoff in railway asset management by opening field of methodology variations.

Key words : linear infrastructure, exposure to water runoff, vulnerability of railway's assets, workable map analysis

DROIT D'AUTEUR :

Le formulaire de transfert de droit d'auteur doit être retourné avec la version finale de votre texte.

Diffusable SNCF RESEAU

INTRODUCTION

De par son inscription dans les territoires, le système ferroviaire est exposé au ruissellement intense. Face à ces aléas, la vulnérabilité du système est à la fois fonctionnelle et physique.

La vulnérabilité fonctionnelle se traduit par des scénarii dominos, dans lesquels un incident ou un désordre sur un point du linéaire du réseau peut entraîner des perturbations généralisées des circulations, touchant à la disponibilité de l'infrastructure, voire à la sécurité des biens et des personnes.

Les fonctions de l'infrastructure sont assurées par de multiples composantes : la voie et ses supports, les ouvrages en terre et les ouvrages d'art, les installations de traction électrique, les équipements de signalisation, et les réseaux de télécommunication. Chacun de ces domaines a une vulnérabilité physique par rapport au ruissellement.

SNCF Réseau gère l'infrastructure ferroviaire nationale comme un système d'actifs. Derrière la stratégie unifiée de management des risques prenant en compte la vulnérabilité fonctionnelle du système, plusieurs activités, responsables de la gestion de l'Infrastructure tout au long de son cycle de vie, ont besoin d'une meilleure connaissance de l'exposition géographique et de la vulnérabilité physique de l'infrastructure au ruissellement [Lagadec et al., 2018].

Ce(s) diagnostic(s) des risques liés au ruissellement peu(ven)t être d'abord macroscopique(s) autour d'une cartographie de l'aléa et d'une identification de zones (tronçons) exposés et vulnérables, puis induire des analyses de risques plus détaillées autour des différentes conséquences induites par le ruissellement et des enjeux de chaque activité [Chazelle et al., 2014] :

- La conception pour les projets de développement, et parfois pour les travaux de régénération
- La surveillance du patrimoine existant
- La maintenance curative (et dans certains cas consignés, préventive) du patrimoine
- La régulation des circulations et l'exploitation

Les conséquences du ruissellement ne se limitent pas au domaine des ouvrages en terre, et ne s'arrêtent pas aux coulées de boue et inondations à cinétique rapide. Elles incluent aussi les glissements de talus sous l'effet de l'eau accumulée, les inondations au-dessus du champignon du rail conduisant à l'arrêt des circulations, mais aussi des effets moins visibles comme la mise en eau temporaire d'organes électriques ou la souillure du ballast et de la plateforme qui perdent en cohésion et en portance.

La gestion du risque ruissellement dans le système ferroviaire est donc tributaire de trois aspects :

- Le ruissellement est un phénomène qui peut être la cause – principale ou secondaire – d'une diversité d'aléas référencés (inondations, coulées de boue, glissements,…)
- L'infrastructure ferroviaire est un réseau linéaire, et les enjeux du système peuvent s'aborder au niveau de tronçons linéaires, de nœuds de réseaux, ou de composants essentiels
- Du point de vue des facteurs organisationnels et humains, les activités contribuant au management des risques naturels peuvent avoir des Maîtrises d'Ouvrages, des lignes budgétaires, et par là des objectifs différents.

En gardant comme fil rouge la problématique du large spectre des usages des diagnostics pour la gestion du risque ruissellement, , cette présentation balayera un certain nombre de questions méthodologiques autour d'une analyse de risque macroscopique.

ENJEUX DU CAS D'ETUDE

Le cas d'étude ici présenté, l'axe ferroviaire Marseille – Vintimille en région Provence Alpes Côte d'Azur permet de mettre en évidence les besoins en diagnostic ruissellement sous forme de cartes d'aléas ruissellement, mais aussi de zonages opérationnels. En effet, l'existence de risques liés au ruissellement intense sur le réseau ferroviaire des départements côtiers de la région est connue à travers le souvenir d'événements exceptionnels : on pourra citer pour les plus récents ceux de janvier 2014 dans le Var, en octobre 2015 dans les Alpes Maritimes, ou en décembre 2019 sur ces deux départements.

Diffusable SNCF RESEAU

Figure 1 : Zone d'étude : réseau ferroviaire régional organisé autour de la ligne structurante Marseille-Vintimille

Les risques liés au ruissellement des eaux pluviales sont pris en compte de façon disparate sur ce territoire à travers :

- Les études hydrauliques menées sur les projets impliquant de nouveaux ouvrages en terre, plateformes et drainages ferroviaires
- Les visites de surveillance et de maintenance des ouvrages en terre et hydrauliques répertoriés
- Les alertes météo déclenchant le ralentissement ou l'arrêt des circulations et les tournées intempéries sur les ouvrages connus pour leur fragilité lors des événements pluviométriques intenses.

Le diagnostic des risques liés au ruissellement présenté ici porte sur tout l'axe Marseille-Vintimille et est à destination de la Maîtrise d'Ouvrage Projet du Projet AZUR+ qui prévoit le déploiement d'une nouvelle génération de signalisation permettant l'amélioration de la performance (régularité, robustesse, sécurité) de l'axe Marseille-Vintimille, l'un des réseaux ferroviaires nationaux les plus chargés après l'Ile-de-France. Il répond à la volonté du Maître d'Ouvrage de s'assurer que le ruissellement intense ne fasse pas porter un risque accru sur les installations de signalisation projetées. Ce cas d'étude a l'avantage de porter sur un enjeu bien spécifique, à savoir les installations de signalisation qui sont sensibles à la mise en eau ou à l'emportement. Il a été proposé d'intégrer le diagnostic ruissellement dans le processus suivant :

1) Diagnostic macroscopique de l'exposition à l'aléa ruissellement, avec une analyse préliminaire de l'intensité de l'aléa et de la vulnérabilité d'un enjeu qui reste ici macroscopique : le tronçon, portion du linéaire ferroviaire. Le travail est réalisé à partir des données disponibles dans les bases de données internes et externes et avec un objectif de hiérarchisation des zones par rapport à un risque potentiel.
2) Identification des enjeux critiques (dans ce cas, les équipements de signalisation en projet) potentiellement touchés dans les tronçons.
3) Analyse détaillée du risque pour les points problématiques identifiés via la concomitance d'un enjeu pointé comme à préserver par la Maîtrise d'Ouvrage (Etape 2) et d'un tronçon évalué comme à risque potentiel dans le diagnostic macroscopique ruissellement (Etape 1). Le diagnostic détaillé implique un travail avec des données plus précises, y compris des études de terrain. A l'issue de celui-ci, la Maîtrise d'Ouvrage, décisionnaire *in fine* sur l'acceptabilité du risque, doit avoir toutes les cartes en main pour valider l'évaluation du risque et des propositions de traitement du risque (évitement de la zone à risque ou mesures de réduction de la vulnérabilité).

Diffusable SNCF RESEAU

Le déroulé du diagnostic se fait en parallèle du déroulé du projet, avec des études Avant-Projet (AvP) pour fixer la fréquence spatiale des installations de signalisation et des études PROjet pour déterminer leur position exacte et la consistance des travaux. Cela explique qu'il ait été fait le choix d'inclure une étape 2 de partage entre le bureau d'ingénierie et la Maîtrise d'Ouvrage entre les étapes 1 et 3 d'expertise et diagnostic des risques liés au ruissellement portés par le bureau d'ingénierie.

Par ailleurs, ce diagnostic ruissellement alimentera à terme la mise à jour du Plan de Continuité d'Activités (PCA) Inondations mis en place par SNCF au niveau de la région PACA. Le PCA couvre toutes les activités de l'Entreprise contribuant à la continuité d'activité. C'est un document opérationnel contenant plusieurs volets : l'identification des éléments vulnérables de l'infrastructure, un outil d'aide à la décision pour la gestion de la crise et la définition des investissements à mettre en œuvre pour réduire le risque. Le diagnostic ruissellement serait alors une contribution à l'analyse de la vulnérabilité fonctionnelle du système, pensé autour d'enjeux critiques.

Cet article porte sur le diagnostic macroscopique (étape 1) en amont de la focalisation de l'évaluation du risque sur des enjeux spécifiques.

DONNEES ET METHODES DE DETERMINATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE

L'analyse de la méthode est présentée sur la ligne Cannes-Grasse qui a souvent subi des incidents liés à l'eau, notamment dans les vingt dernières années (couvertes par un recensement des incidents dans une base métier « Ouvrages en Terre » OT), notamment lors des intempéries de 2015. Les aléas liés à l'eau observés sur cette ligne sont principalement du type glissements, coulées et inondations, et certaines chutes de blocs rocheux peuvent aussi avoir pour facteur une accumulation d'eau de ruissellement.

PRODUCTION DES CARTES D'ALEAS

Pour identifier les zones de susceptibilité au ruissellement, on travaille sur les cartographies issues du modèle IRIP [Indicateur de Ruissellement Pluvial Intense, Dehotin et Breil, 2011] :

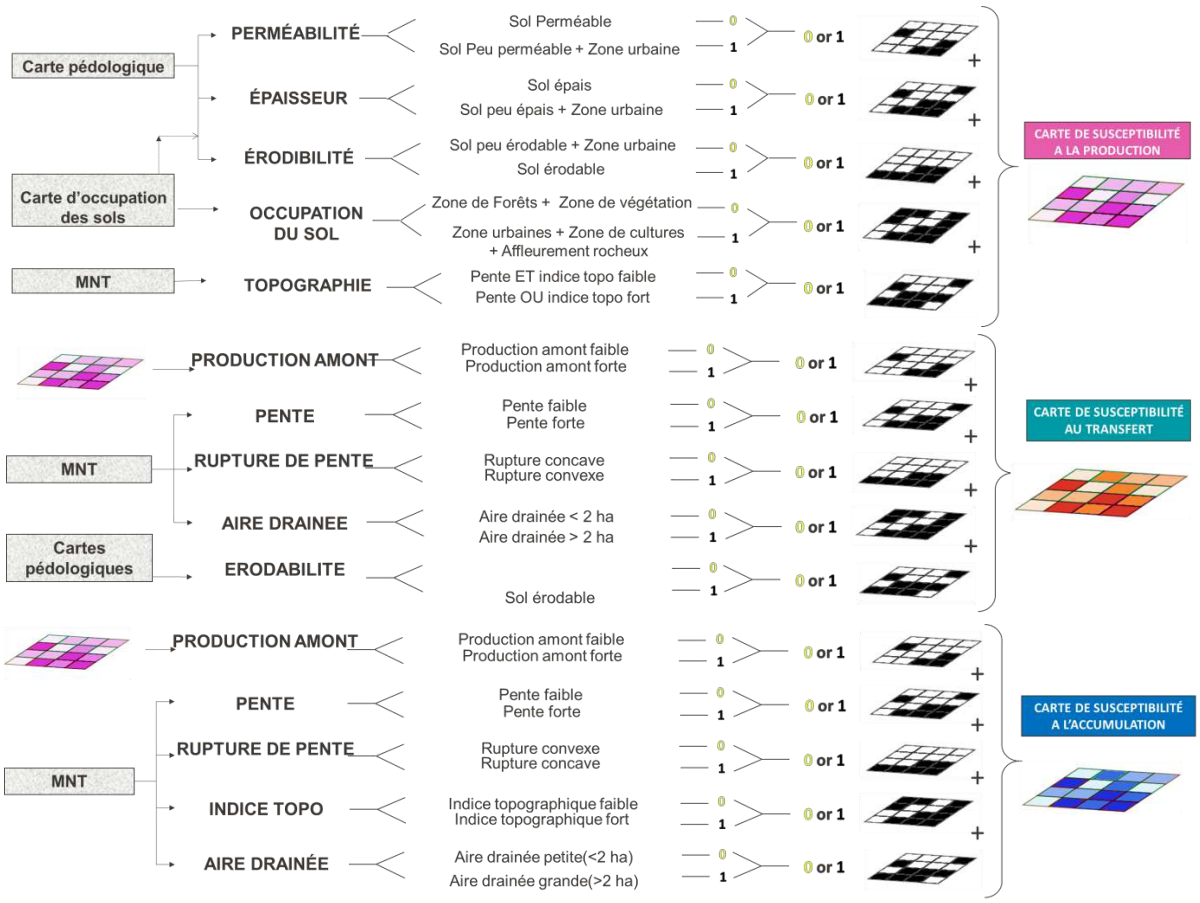


Figure 2 : Paramètres des cartes de susceptibilité au ruissellement IRIP : Production, Transfert, Accumulation

Diffusable SNCF RESEAU

Les cartes de susceptibilité à la production, au transfert et à l'accumulation du ruissellement, issues du modèle IRIP, peuvent être produites à partir de données d'entrée facilement accessibles :

- Un Modèle Numérique de Terrain : ici celui de l'IGN de résolution 25 m
- Des données de cartographie pédologiques : ici la base Infosol de l'INRA,
- Des données d'occupation du sol : ici Corine Land Cover 2012, 1/100000ème

Les cartes obtenues ont la même résolution que le MNT : 25 m.

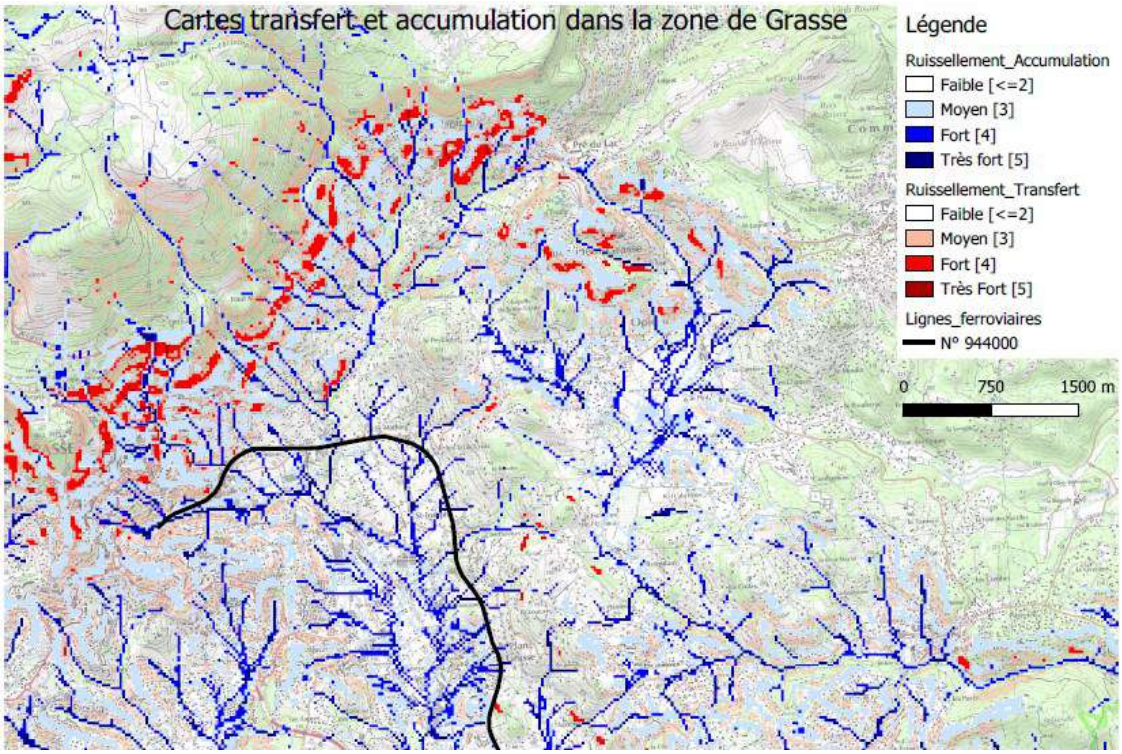


Figure 3 : Extrait des Cartes de Transfert et Accumulation autour de Grasse

Sur la base de la superposition des cartes d'aléas ruissellement avec la ligne ferroviaire, on peut identifier les zones où l'infrastructure est exposée au ruissellement [Dehotin et al, 2015, Lagadec, 2017] :

- Soit via les pixels forts d'accumulation du ruissellement, qui font ressortir des lignes d'écoulement et des étendues d'accumulation. Cela permet d'identifier des zones d'arrivées préférentielles de l'eau de ruissellement ou de charge solide sur l'infrastructure ;
- Soit via des amas de pixels forts de transfert du ruissellement au niveau de talus surplombant la voie ferrée où l'érosion peut générer des coulées de boue et des glissements.

EVALUATION DE LA VULNERABILITE

La vulnérabilité est l'incapacité d'un enjeu à résister à l'aléa. L'infrastructure ferroviaire peut faire transiter les eaux de ruissellement sans dommages grâce à son réseau hydraulique constitué de :

- La configuration géométrique OT (« Ouvrages en Terre ») de l'infrastructure par rapport à son environnement (et notamment les bassins versants) : selon qu'il s'agit d'une surélévation par rapport au terrain naturel (remblai) ou d'un creusement par rapport au terrain naturel (déblai)
- Le patrimoine « ouvrages hydrauliques » (dispositifs de drainage, ouvrages de continuité et de traversée), mais aussi les pistes, comme éléments collecteurs et évacuateurs des eaux de ruissellement vers un exutoire. Le choix des « ouvrages hydrauliques » mis en place doit être adapté à la configuration géométrique globale

Diffusable SNCF RESEAU

Dans une approche macroscopique, la vulnérabilité sera donc caractérisée par :

- La configuration OT (Figure 4) classée en 4 catégories :
  - Déblai : l'eau ruisselante peut y être piégée et s'écouler longitudinalement jusqu'à un exutoire. La longueur du déblai est un critère qui tend à augmenter sa vulnérabilité.
  - Profil mixte (déblai d'un côté, remblai de l'autre) : les eaux captées peuvent transiter longitudinalement mais aussi transversalement selon les conditions de transparence hydraulique
  - Remblai : l'eau ruisselante atteint le pied de talus bien avant les autres enjeux ferroviaires : la vigilance doit surtout porter sur la transparence hydraulique, pour éviter que ces ouvrages en terre constituent une barrière pour les écoulements. Cet effet « verrou hydraulique » est plutôt observé sur des courts remblais qui stockent peu de volume avant surverse
  - Profil rasant : cette catégorie distingue les remblais ou profils mixtes de faible hauteur, zones quasi-planes, où l'accumulation d'eau pourra plus facilement se traduire par une inondation (avec tous les désordres qui peuvent y être associés)

  La longueur de l'ouvrage en terre est donc un paramètre qui n'a pas la même influence selon la configuration [Lagadec, 2017].

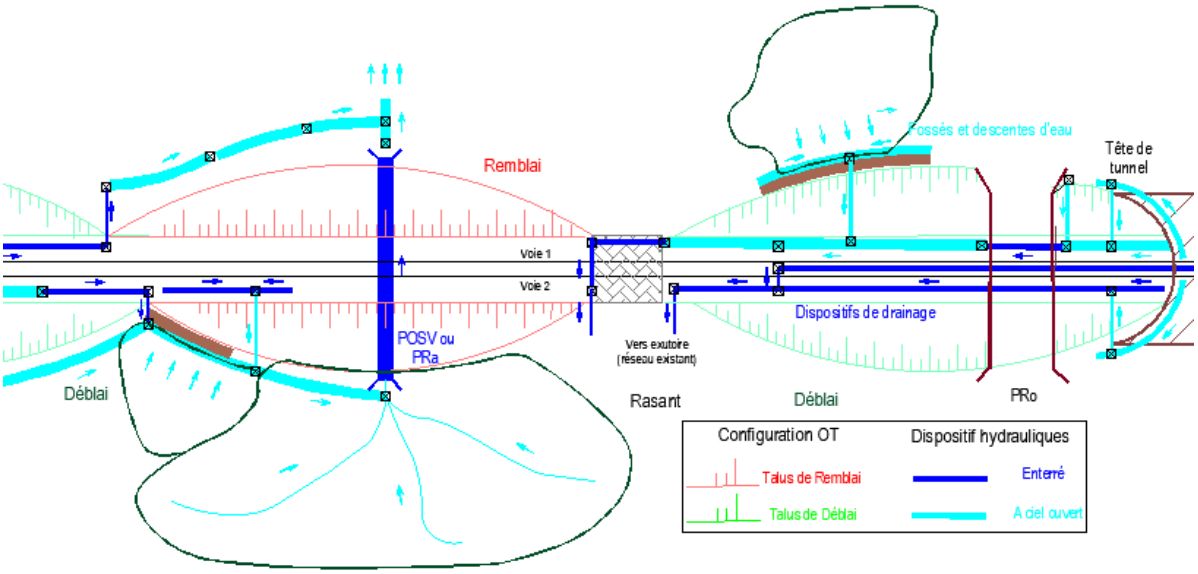


Figure 4 : Configurations de l'infrastructure et éléments de sensibilité aux écoulements extérieurs

- Les singularités macroscopiques : à défaut de connaître le détail des ouvrages hydrauliques et notamment les réductions de section du réseau, on identifie des zones de transition géométriques se traduisant souvent par des ruptures de continuité de l'écoulement, qui augmentent la vulnérabilité:
  - Ponts-Routes (PRo) : pistes et dispositifs hydrauliques voient souvent leur section réduite par la culée ou les piles du pont
  - Passages à Niveau (PN) : le passage planchéié et la chaussée peuvent réduire la continuité des dispositifs hydrauliques et cela peut créer un nœud de convergence des écoulements longitudinaux de la route avec ceux de la voie ferrée
  - Têtes de tunnel : une zone de transition d'ouvrages favorable à la discontinuité des dispositifs et à la convergence de plusieurs écoulements
- Les ouvrages contribuant à la transparence hydraulique : ici, dans la classification des ouvrages d'art recensés sur l'infrastructure, on ne prendra en compte que les Ponts-Rails (PRa). En général, il s'agit d'ouvrages d'ouverture supérieure au mètre, plus capables de faire passer un débit important d'eau. Leur absence peut donc augmenter la vulnérabilité. Les Petits Ouvrages sous Voies (POSV) également recensés dans la base de données ouvrages d'art, ne seront pas pris en compte, compte tenu de l'hétérogénéité de leur capacité à faire transiter les débits d'apport en cas d'événements extrêmes, comme le montre l'expérience (Lagadec, 2017, Lagadec et al., 2020).

Ces différents paramètres contribuent à fixer les niveaux de vulnérabilité selon l'arbre proposé en Figure 5.

Diffusable SNCF RESEAU

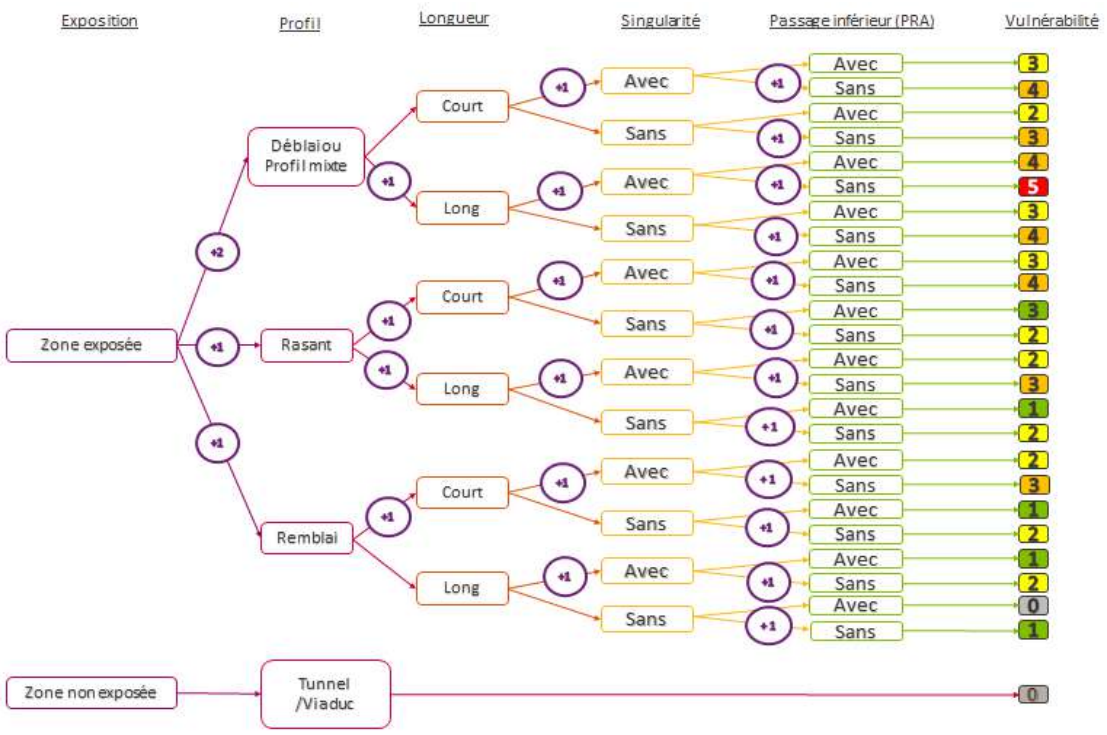


Figure 5 : Arbre de vulnérabilité

FINALISATION DE L'ANALYSE PRELIMINAIRE : VARIANTES METHODOLOGIQUES

COMMENT CROISER INTENSITE DE L'ALEA ET VULNERABILITE ?

La gravité d'un risque est abordée comme le produit de la vulnérabilité de l'enjeu avec l'intensité de l'aléa, défini comme la capacité de l'environnement avoisinant à générer l'événement redouté (aléa lié au ruissellement). La concrétisation du produit mathématique Vulnérabilité (V) x Intensité (I) par une matrice ne pose pas de problèmes, avec un curseur qui peut être ajusté en analyse de risque préliminaire (Figure 6).

I \ V	0	1	2	3	4 ou +
0		G4	G4	G3	G2
1		G4	G3	G2	G1
2		G3	G2	G1	G1

Figure 6 Proposition de matrice de croisement Vulnérabilité/Intensité, avec 4 niveaux de gravité : par la suite, dans une approche binaire on pourra considérer G1 et G2 comme potentiellement à risque

Cette gravité classée dans l'ordre décroissant du potentiel d'impact attendu (de G1 à G4) est qualifiée de « risque potentiel » car :

- Elle est issue du produit d'une évaluation macroscopique (donc grossière) de l'intensité et de la vulnérabilité
- Il faut qu'elle soit associée à une probabilité pour qu'elle se concrétise en risque. Le produit de la probabilité et la gravité est le risque. Pour le phénomène de ruissellement, on va associer la probabilité à celle de l'élément déclenchant, qui est la pluie. La susceptibilité au ruissellement ne se concrétisera par du ruissellement intense qu'en cas de pluie forte.

La difficulté réside surtout dans le croisement spatial. On dispose dans le projet SIG :

- D'une évaluation macroscopique de la vulnérabilité par tronçon
- De cartes d'aléa (susceptibilité au ruissellement) avec des pixels de valeurs qualitatives différentes qui permettent de mettre en évidence des points ou zones plus exposées au ruissellement

Pour croiser ces données de nature et de forme différentes, deux approches peuvent être retenues :

- Recenser tous les points ou zones potentiellement exposées au ruissellement, et étudier ce que cela peut générer au niveau du point d'arrivée d'eau, mais aussi de tout le système hydraulique jusqu'à

Diffusable SNCF RESEAU

l'exutoire. Le travail à l'échelle de cet ensemble peut s'appuyer sur le découpage en tronçons vulnérables, mais nécessite souvent des données plus précises de géométrie du réseau hydraulique, pour identifier tous les points du système impacté. Cette approche pourra être utilisée par la suite lors de visite terrain organisées sur les zones où des enjeux auront été identifiés par la maîtrise d'ouvrage.

- Evaluer par tronçons l'intensité de l'aléa pour la croiser avec la vulnérabilité et aboutir à une gravité macroscopique. Beaucoup de variantes de combinaisons sont possibles. A défaut d'être exhaustif, les paragraphes suivants s'attacheront à faire ressortir des familles méthodologiques de découpage et d'attribution de l'intensité aux tronçons.

QUEL EST L'IMPACT DE LA METHODE DE DECOUPAGE EN TRONCONS?

En dehors des ouvrages en terre qui font l'objet d'une surveillance spécifique, il n'existe pas de base de données vérifiée du découpage de la ligne en configuration OT. La délimitation des tronçons sur toute la ligne peut se faire par deux grands types de méthodes :

- Une méthode automatique : ici, une automatisation du découpage en ouvrages en terre a été réalisée sur la base des points topographiques du MNT 1 m (*Découpage 1*). Cependant, le calcul repose sur des a priori sur la représentativité des profils en travers pour un tronçon, et sur la position relative des points correspondants à l'axe de la voie et ceux correspondants aux abords. Le résultat obtenu pour un tronçon peut donc être sensible à certains artefacts du MNT (par exemple le nettoyage incomplet des pixels de végétation ou un décalage de géolocalisation avec l'axe de la voie ferrée).
- Une méthode visuelle, basée sur la confiance à l'œil de l'opérateur humain pour détecter les transitons déblai/remblai. Ici, le *Découpage 2* a été fait en exploitant une application interne SNCF qui permet de visualiser les lignes ferroviaires par des photos prises depuis les trains. Cette méthode n'est toutefois pas univoque et dépend de l'attention et la sensibilité de l'expert.

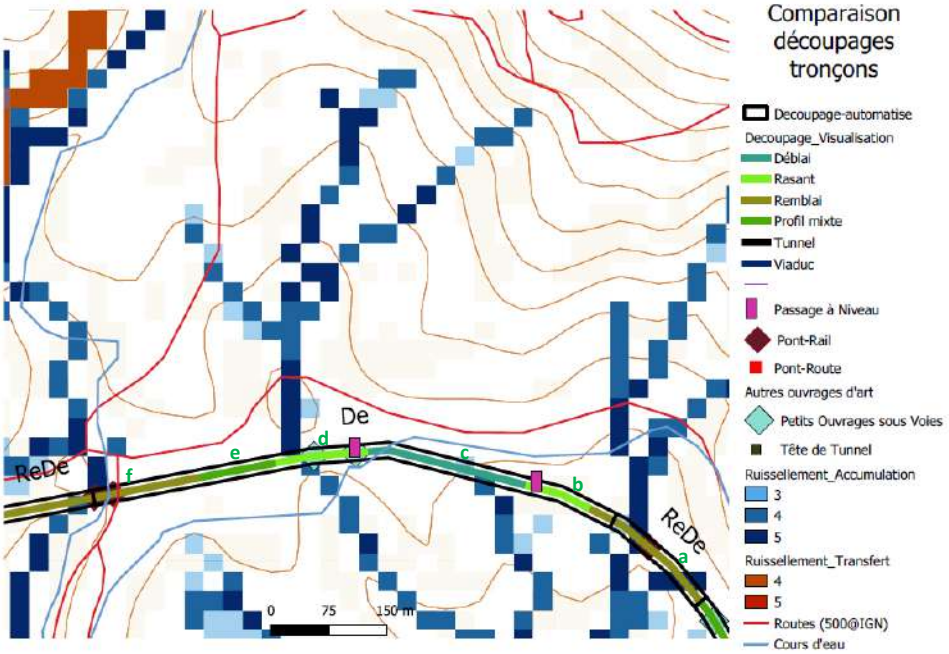


Figure 7 : Illustration de deux découpages différents des tronçons OT

Les deux approches génèrent des découpages qui diffèrent dans les détails, non sans conséquences. On peut ici illustrer ces distinctions par une statistique globale : les 16 km de la ligne Cannes-Grasse sont découpés en 48 tronçons avec le découpage automatisé (*Découpage 1*), et en 97 tronçons avec un découpage fait pas à pas par la visualisation des photos de la ligne (*Découpage 2*), ou par un cas illustratif ci-dessus (Figure 7) :

- L'approche automatisée identifie un tronçon de 500 m environ considéré comme en déblai et entouré de deux profils mixtes. En visualisant les images de la ligne, on se rend compte que ces tronçons encadrants sont plutôt des remblais (tronçons a et f) que des profils mixtes, ce qui fait varier le calcul de la vulnérabilité.
- En outre le remblai qui suit le tronçon d'intérêt, commence avant dans l'approche visuelle par rapport au résultat de l'approche automatisée, ce qui fait que les PRA et les zones d'écoulement mises en évidence par les cartes de ruissellement ne sont pas dans le déblai, mais bien dans une zone

Diffusable SNCF RESEAU

où ils peuvent passer sous une infrastructure surélevée. Le tronçon en déblai lui-même, est en fait constitué d'une succession de déblais, de profils rasants, et de profils mixtes de transition.

- La zone principale d'arrivées d'eau d'après les cartes de ruissellement se trouve dans un profil rasant avec un passage à niveau (tronçon d). Ce court profil en rasant ressortira à part dans l'analyse avec ce découpage, alors que le découpage automatisé conduira à attribuer une note de gravité commune aux 500 mètres considérés en déblai.

Les détails apportés par la méthode de vérification visuelle apportent en précision mais leur qualité et pertinence est pour l'instant tributaire de l'effort que peut consacrer un opérateur à balayer les images de pleine voie. L'impact possible du choix du découpage sur les conclusions de l'analyse macroscopique de risque notamment le nombre et le pourcentage de tronçons mais aussi sur le nombre de kilomètres qui peuvent être retenus pour une analyse détaillée, seront évoqués plus bas en discussions.

COMMENT TRADUIRE L'INFORMATION DES CARTES DE RUISSELLEMENT EN VALEUR D'INTENSITE PAR TRONÇON ?

L'intensité de l'aléa est évaluée selon l'analyse des pixels des cartes de susceptibilité au transfert et à l'accumulation du ruissellement au niveau du tronçon. Le passage d'une analyse visuelle à une analyse automatisée inclut la réalisation d'une zone tampon autour du tronçon, l'attribution à chaque pixel de cette zone de la valeur maximale des deux cartes : accumulation (A) et transfert (T), et l'extraction de la distribution statistique des valeurs de pixels (A U T) dans la zone tampon [Lagadec, 2017]. Pour attribuer ensuite une valeur d'intensité d'aléa au tronçon, il faut choisir les informations statistiques prises en compte : focalisation sur les seuls pixels forts et très forts (4 et 5) ou prise en compte aussi des pixels moyens (3), seuil absolu basé sur le nombre de pixels, ou seuil relatif basé sur la proportion de pixels. A titre d'exemple, on présentera deux choix de calcul de l'intensité :

- *Méthode statistique 1* : attribution d'une Intensité 2, dès qu'il y a un pixel 5 dans la zone tampon, et d'une Intensité 1 dès qu'il y a deux pixels 4 ou 5 dans la zone tampon. Cette méthode est assez proche de la méthode binaire (détection du tronçon si 1 pixel fort ou très fort selon sa vulnérabilité) retenue pour l'évaluation du modèle IRIP [Lagadec, 2017])
- *Méthode statistique 2* : attribution d'une Intensité 2, dès qu'il y a 15% de pixels 4 ou 5 dans la zone tampon, et d'une Intensité 1, dès qu'il y a 25% de pixels 3, 4 ou 5 dans la zone tampon.

Les trois exemples ci-dessous (Figure 8) illustrent visuellement la capacité de chacune des méthodes à attribuer des intensités à trois déblais ayant subi des glissements.

Dans le cas 1, la densité de pixels forts et très forts est suffisamment importante pour qu'une Intensité 2 soit attribuée au tronçon quelle que soit la méthode statistique utilisée. On notera qu'il s'agit d'un déblai ayant un historique de plusieurs glissements superficiels.

Dans le cas 2, le déblai, qui a connu un glissement, intercepte une arrivée d'eau bien nette, mais qui ne représente que 2 pixels forts et très forts. Il se voit donc attribuer une Intensité 1 avec la *Méthode statistique 1*, mais une Intensité 0 avec la *Méthode statistique 2* (faute d'une grande proportion de pixels au moins moyens dans la zone tampon)

Dans le cas 3, le déblai, qui a connu un glissement, est à l'écart de pixels forts d'accumulation d'eau, et au niveau de la zone d'incident, ne ressortent que quelques pixels moyens en transfert, qui représentent toutefois visuellement un amas. Il se voit attribuer une Intensité 0 avec la *Méthode statistique 1*, mais une Intensité 1 avec la *Méthode statistique 2*.

Diffusable SNCF RESEAU

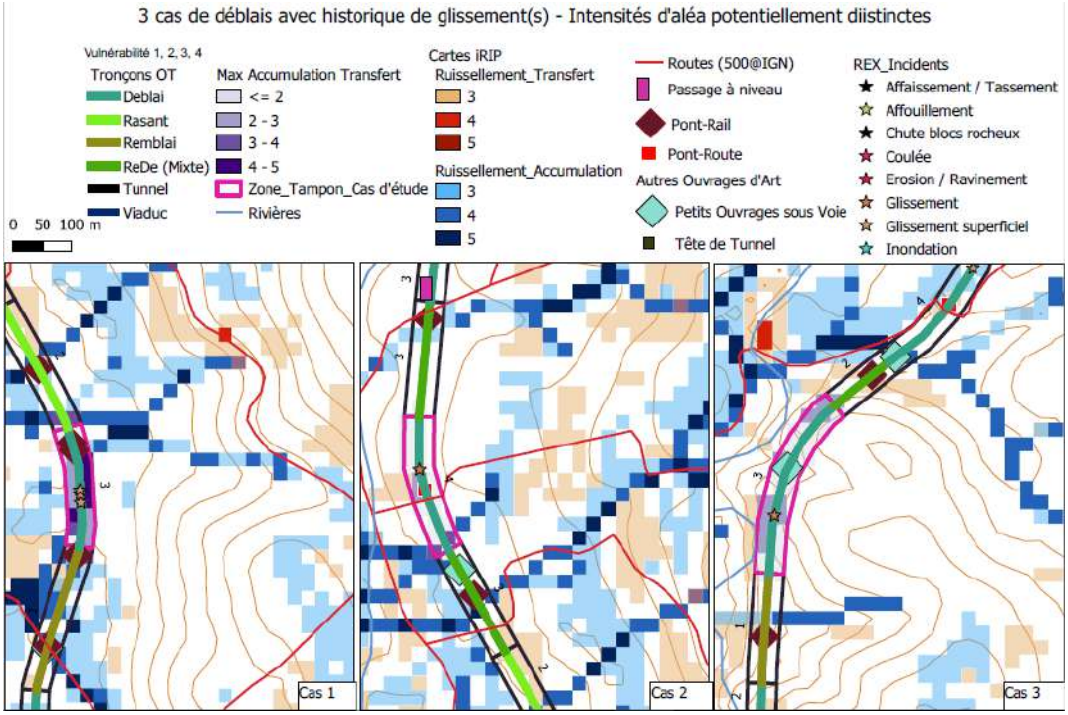


Figure 8 : Cas de déblais avec glissement(s) dont l'exposition à l'aléa ruissellement prend des formes différentes

DISCUSSIONS : LA PERTINENCE DES RESULTATS DE L'ANALYSE PRELIMINAIRE

Une fois l'intensité et la vulnérabilité croisées, les résultats de l'analyse préliminaire se présentent sous la forme de l'attribution de niveaux de gravité potentielle (classée de G1 à G4) à chacun des tronçons. La pertinence des résultats peut être analysée selon deux prismes.

On peut comparer les zones considérées comme à risque potentiel avec les données d'incidents, qui sont une *proxy-data* d'un risque avéré [Braud et al., 2020]. On s'appuie alors sur des tableaux de contingence, et on calcule des probabilités de détection (POD) et taux de fausses alarmes (FAR) (Figure 9)

Table de contingence

Potentiel risque	Gravités Retenues	Gravités Ecartées
Incident(s) recensé(s)	V+	F-
Pas d'incident recensé	F+	V-

Probabilité de détection

$$POD = \frac{(V+)}{(V+)+(F-)}$$

Taux de fausses alarmes

$$FAR = \frac{(F+)}{(V+)+(F+)}$$

Exemple : Découpage 1, Méthode Statistique 2

Potentiel risque	G1-G2	G3-G4
Incident(s) recensé(s)	7	0
Pas d'incident recensé	29	12

POD = 1

FAR ~0,8

Figure 9 : Rappel de la méthode d'évaluation par table de contingence

Ainsi, on constate des taux de fausses alarmes assez similaires (~0,8) quelle que soit la méthode de découpage ou la méthode statistique utilisée (Figure 9 et Figure 10). Du point de vue des probabilités de détection, c'est seulement avec le *Découpage 2* que la *Méthode Statistique 1* (Intensité attribuée en fonction du nombre de pixels forts ou très forts) n'arrive pas à détecter 3 zones à incidents recensés (dont le cas 3 de la Figure 8), bien détectés avec la *Méthode Statistique 2* (Intensité attribuée en fonction de la proportion de pixels). Mais les résultats dépendent de la combinaison de différents curseurs : ici, on ne regarde que les tronçons auxquels sont attribués la gravité G1 et G2, mais, en ne retenant que les tronçons à G1, tous les tronçons à incidents ne seraient pas dépistés avec la *Méthode Statistique 2*, sans que cela n'affecte la probabilité de détection avec la *Méthode Statistique 1*.

Diffusable SNCF RESEAU

Découpage 1, Méthode Statistique 1

Potentiel risque	G1-G2	G3-G4
Incident(s) recensé(s)	7	0
Pas d'incident recensé	27	14

POD = 1
FAR ~0,8

Découpage 1, Méthode Statistique 2

Potentiel risque	G1-G2	G3-G4
Incident(s) recensé(s)	7	0
Pas d'incident recensé	29	12

POD = 1
FAR ~0,8

Découpage 1, Méthode Statistique 2

Potentiel risque	G1-G2	G3-G4
Incident(s) recensé(s)	5	3
Pas d'incident recensé	27	62

POD = 0,63
FAR ~0,84

Découpage 2, Méthode Statistique 2

Potentiel risque	G1-G2	G3-G4
Incident(s) recensé(s)	8	0
Pas d'incident recensé	38	51

POD =1
FAR ~0,83

Figure 10 : Comparaison des tables de contingences obtenues avec la *méthode statistique 1* (Intensité attribuée en fonction du nombre de pixels forts ou très forts) et la *méthode statistique 2* (Intensité attribuée en fonction de la proportion de pixels)

Il est toutefois nécessaire de prendre du recul par rapport à la *proxy-data* « tronçons avec incidents ». On constate que toutes les méthodes parviennent à faire ressortir les tronçons *récidivistes* avec plusieurs occurrences d'incidents. Les zones d'incidents qui se voient attribuer un niveau de gravité plus bas correspondent à des incidents uniques de type glissements (dont le lien avec le ruissellement peut ne pas être direct) observés lors du même événement d'octobre 2015, où la pluviométrie a atteint des valeurs exceptionnelles (quantile horaire plus que centennal) sur la partie Sud de la ligne Cannes-Grasse. En outre, il faut être prudent avec le taux de fausses alarmes semblant élevé. La base d'incidents disponibles ne couvrant qu'une vingtaine d'années, certaines zones potentiellement à risques peuvent ne pas avoir subi d'incidents en l'absence, sur la période considérée d'une pluviométrie exceptionnelle liée à des orages localisés.

On peut aussi juger de l'efficacité de la méthode du diagnostic de risque macroscopique à sa sélectivité : arrive-t-on à écarter suffisamment de zones ou de kilomètres sur le linéaire étudié afin de pouvoir mieux concentrer l'effort des étapes suivantes du processus d'évaluation des risques. Sans surprise, le *Découpage 1*, moins fin, conserve les trois quarts du linéaire de la ligne (Figure 11). Le *Découpage 2* est plus sélectif, et encore plus quand on se concentre sur les pixels forts ou très forts (*Méthode Statistique 1*) avec moins de la moitié des tronçons retenus.

Méthode	Nombre de tronçons retenus (G1-G2)	Linéaire cumulé retenu (G1-G2)
Découpage 1, Méthode Statistique 1	34/48	14 km /16 km
Découpage 1, Méthode Statistique 2	36/48	13 km /16 km
Découpage 2, Méthode Statistique 1	32/97	7 km/16 km
Découpage 2, Méthode Statistique 2	46/97	9 km/16 km

Figure 11 : Bilan des tronçons qui pourraient être retenus à l'issue du diagnostic macroscopique pour une analyse plus détaillée

La prudence doit rester de mise avec des approches d'analyse de risque reposant sur un quota a priori de nombre de zones à risques. Le ruissellement pouvant se produire sur tout le territoire, il n'est pas anormal qu'une grosse proportion du linéaire puisse avoir un potentiel de risque (au moins à l'échelle macroscopique). Néanmoins, dans un processus de management de risque opérationnel, il pourra être apprécié par la Maîtrise d'Ouvrage d'avoir ce type d'indicateur, pour montrer qu'il peut appuyer ses décisions sur une hiérarchisation marquée des zones à risques proposées par le bureau d'études.

CONCLUSION : BILAN ET PERSPECTIVES

Les résultats préliminaires du diagnostic ruissellement présentés ici soulignent le caractère encore exploratoire de la démarche, qui ne se limite pas aux choix – déjà bien éprouvés à l'occasion d'autres études - des cartographies de l'aléa et d'arbres de vulnérabilité macroscopique de l'infrastructure ferroviaire. Le niveau de confiance accordé aux résultats du diagnostic ruissellement dépend beaucoup de la manière dont le bureau d'ingénierie et la Maîtrise d'Ouvrage co-construisent le processus d'évaluation du risque :

- Il semble incontournable de réaliser l'analyse de risque en deux étapes : l'une, préliminaire, macroscopique, basée sur des outils et méthodes de dépistages des zones à risque, l'autre, plus détaillée, incluant l'approche terrain. Mais les questions se posent sur l'articulation entre ces deux étapes, et l'implication de la Maitrise d'Ouvrage sur les jalons de passage de l'une à l'autre.
- Pour les analyses de risque préliminaires sur une infrastructure linéaire, le choix de travailler sur des tronçons, dans l'optique de couvrir toute la ligne, ce qui a été fait ici, prête à discussions : pertinence

Diffusable SNCF RESEAU

du découpage retenu, traduction géostatistique à l'échelle d'un tronçon ferroviaire de l'interprétation visuelle des cartes d'aléas. Avec des outils de bureau qui gagnent en performance (visualisation des voies ferrées et des routes à hauteur d'habitacle, efforts actuellement déployés à SNCF Réseau sur la connaissance du patrimoine, y compris hydraulique), il peut être envisagé de gonfler l'analyse préliminaire en travaillant directement sur des systèmes hydrauliques, basés non plus seulement sur l'analyse de la configuration OT mais aussi sur l'analyse des sens d'écoulements dans le réseau hydraulique

- Pour les analyses plus détaillées, on pourra continuer à faire appel à l'expertise locale, aux calculs d'ingénierie et à la modélisation physique fine [Astee, 2017]

Pour conclure, ce travail (en cours) montre pourquoi et comment exploiter les cartes d'aléa ruissellement dans le cadre d'un diagnostic de risque naturel sur des lignes ferroviaires. Il permet un retour d'expérience qui s'inscrit dans un processus d'amélioration continu des procédures opérationnelles, s'appuyant sur des outils et des briques méthodologiques en perfectionnement. L'apport de l'étude réside dans l'analyse technique proposée, et dans les perspectives opérationnelles offertes en mettant en évidence des zones qui étaient jusqu'alors dans l' « angle mort » du management du risque, mais qui pourraient être affectées par le ruissellement. L'objectif est de fournir une information nouvelle et exploitable aux Maîtrises d'Ouvrage travaillant sur de grands linéaires, que cela soit pour contribuer à l'analyse des risques sur un projet de développement de système de signalisation ou pour alimenter la mise à jour de Plan de Continuité d'Activité Inondations. Multiplier la mise en pratique des différents outils, méthodes, et résultats de diagnostic ruissellement permettra de progresser dans la prévention de ce risque via les retours d'expérience sur les résultats obtenus et surtout sur la fertilité des échanges avec le gestionnaire d'infrastructure.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier Malory Flipo, coordinateur du risque inondation à l'Infrapôle pour son partage de connaissances sur les portions de lignes interceptées par les Territoire à Risques d'Inondations (TRI) côtiers de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Les remerciements vont également à Alain Ducreau, Directeur Technique du projet Azur+ qui, par son partage des enjeux du projet et ses questionnements de non-hydraulicien a aidé de façon décisive à cadrer la commande de diagnostic hydraulique.

Une mention spéciale également à Blandine Chazelle qui a initié à SNCF Réseau le processus d'amélioration continue des méthodes de diagnostic des risques liés à l'eau et la prise en compte du ruissellement dans le management du risque ferroviaire, dont ce travail est héritier.

REFERENCES

Astee (Association Scientifique et Technique pour l'Eau et L'Environnement) (2017) – *Mémento Technique – Conception et dimensionnement des dispositifs de gestion des eaux pluviales et de collecte des eaux usées.*

Braud I., Lagadec L.R., Moulin L., Chazelle B., Breil P. (2020) - *A method to use proxy data of runoff-related impacts for the evaluation of a model mapping intense storm runoff hazard : application to the railway context* Natural Hazards and Earth System Sciences. *doi :10.519/nhess-20-947-2020*

Chazelle B., Lambert L., Capoccioni C.P. (2014) - *Railway vulnerability in case of extreme floods. Knowledge and risk management.* La Houille Blanche 48-54. *doi :10.1051/lhb/2014016*

Dehotin J., Breil P. (2011) - *Technical report of the IRIP project : mapping the flooding by runoff.* IRSTEA Hydrology-Hydraulic Research Unit, https://hal.inrae.fr/hal-02595951

Dehotin J., Chazelle B., Laverne G., Hasnaoui A., Lambert L., Breil P., Braud I. (2015) - *Mise en œuvre de la méthode de cartographie du ruissellement IRIP pour l'analyse des risques lies aux écoulements sur l'infrastructure ferroviaire*. La Houille Blanche 56–64. *doi:10.1051/lhb/20150069*

Lagadec L.R. (2017) - *Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire.* Université Grenoble-Alpes. Thèse de Doctorat.

Lagadec L.R., Moulin L., Braud I., Chazelle B., Breil P. (2018) - *A surface runoff mapping method for optimizing risk assessment on railways.* Safety Science. *doi : 10.1016/j.ssci.2018.05.014*

Diffusable SNCF RESEAU

Lagadec L.R., Moulin L., Braud I., Chazelle B., Breil P. (2020) - *Constitution et analyse d'une base de données historique d'incidents liés au ruissellement sur les voies ferrées,* Colloque Ruissellement SHF

Diffusable SNCF RESEAU

GERIMU – GEstion du Risque d'Inondation en Milieu Urbain (Saugnac *et al.*)

GERIMU – GEstion du Risque d'Inondation en Milieu Urbain

Julie SAUGNAC, Sylvain CHAVE[2], Alix ROUMAGNAC[3], Fabien CHRISTIN[4]

[1] Cereg – 589 rue Favre de Saint-Castor, 34080 Montpellier – j.saugnac@cereg.com

[2] PREDICT Services – Parc Jean Mermoz - 20 rue Daurat - 34170 Castelnau-Le-Lez – sylvain.chave@predictservices.com

[3] PREDICT Services – Parc Jean Mermoz - 20 rue Daurat - 34170 Castelnau-Le-Lez – alix.roumagnac@predictservices.com

[4] Cereg – 589 rue Favre de Saint-Castor, 34080 Montpellier – f.christin@cereg.com

De façon générale, la modélisation hydraulique en milieu urbain utilise des méthodes de simplification des processus physiques (1D, calculs en régime permanent, approximation de l'onde diffusive et de l'onde cinématique,…) ou des approches de simplification de la géométrie (changement d'échelle : upscaling).
Le projet GERIMU - GEstion du Risque d'Inondation en Milieu Urbain – a pour objectif de devenir un outil de prévision des pluies en milieu urbain. La limitation des modèles hydrauliques bidimensionnels est essentiellement située au niveau des temps de calculs dès lors que les espaces étudiés sont vastes avec des complexités géométriques importantes. L'opération de maillage du domaine pour créer le MNT est ainsi fastidieuse en milieu urbain en raison de la présence de nombreuses singularités géométriques liées aux bâtiments ou tout autre élément du mobilier urbain pouvant jouer un rôle sur les ruissellements.
Après parallélisation du code de calcul et mise en œuvre d'un nouveau maillage, le modèle GERIMU permet d'obtenir des temps de calculs divisés par 15 par rapport au code SW2D tout en conservant des résultats comparables sur le plan hydraulique (cote et vitesse).
Les applications de l'outil GERIMU pourraient être nombreuses : prédictives, opérationnelles voire pédagogiques. Les collectivités et les opérateurs intervenant sur la prévention, l'élaboration de documents et la gestion opérationnelle sont donc susceptibles d'être intéressés par l'outil GERIMU.
Mots-clefs : Ruissellement urbain, gestion temps réel, modélisation 2D, parallélisation des calculs

Use of the hydrogeomorphological approach to map areas flooded by runoff and regulatory integration in PLUs: feedback from experiences in the South of France

In general, hydraulic modeling in an urban environment uses methods to simplify physical processes (1D, steady-state calculations, approximation of the diffusive and kinematic waves, etc.) or approaches to simplify geometry (upscaling).
The GERIMU project - GEstion of the Risk of Flooding in Urban Areas - aims to become a tool for forecasting rain in urban areas. The limitation of two-dimensional hydraulic models is essentially located at the level of calculation times as soon as the spaces studied are large with significant geometric complexities. The operation of linking the domain to create the DEM is thus tedious in an urban environment due to the presence of many geometric singularities linked to buildings or any other element of urban furniture which can play a role on runoff.
After parallelization of the code of calculation and implementation of a new mesh, the GERIMU model makes it possible to obtain times of calculation divided by 15 compared to the code SW2D while preserving comparable results on the hydraulic level (dimension and velocity) .
The applications of the GERIMU tool could be numerous: predictive, operational or even educational. Local authorities and operators involved in prevention, document preparation and operational management are therefore likely to be interested in the GERIMU tool.
Key words : Urban runoff, real-time management, 2D modeling, parallel computing

INTRODUCTION – UNE VILLE « AUTO-INONDABLE »

En octobre 1988, la ville de Nîmes était ravagée par une crue liée à un évènement pluvieux paroxystique : cet épisode tragique venait rappeler aux aménageurs, urbanistes et décideurs, « endormis par plusieurs décennies de calme hydrologique », qu'il fallait encore compter avec les éléments naturels … Depuis cette date, une série d'épisodes pluvieux calamiteux a frappé le pays : septembre 1992 sur l'Ouvèze dans le Vaucluse, novembre 1999 dans l'Aude, septembre 2002 dans le Gard, décembre 2003 sur le Rhône… Désorientant les élus par leur fréquence, ils ont amené le législateur à promouvoir des outils réglementaires de connaissance et de gestion des zones inondables (les PPRi…).

Ces différentes catastrophes naturelles avaient toutes pour point commun des inondations provoquées par les débordements des cours d'eau et qui en s'étalant, viennent affecter principalement les zones urbanisées dans des secteurs de plaine.

En 20 ans, la connaissance et la prise en compte de ces phénomènes a considérablement évolué. L'ingénierie, appuyée par les laboratoires de recherche spécialisés a développé des méthodes à tous les niveaux de la genèse de ces catastrophes (meilleure connaissance de la pluie, de la topographie, d'outils de transformation de la pluie en débit, puis de débit en hauteur de submersion avec calcul des vitesses…). A ce jour, on peut considérer que le décideur dispose ainsi des outils et des données lui permettant d'aborder l'aménagement de l'espace en toute connaissance de cause, au regard du risque inondation.

Cependant, un autre phénomène vient encore menacer les collectivités notamment les plus importantes : il s'agit des inondations générées par le seul ruissellement pluvial sur l'impluvium urbanisé de la ville. A ce jour, les tailles de nos grandes villes (qui ne cessent d'augmenter depuis le XIX siècle) sont en soi suffisantes pour générer des débits importants par le seul jeu de la pluviométrie.

La surface imperméabilisée est le premier facteur de production de forte quantité d'eau ; le phénomène est exacerbé par les voiries qui concentrent et orientent les ruissellements de façon parfois imprévisible. Les vitesses et débits sont suffisants pour emporter voitures et piétons, et saturer les réseaux d'assainissement pluviaux souterrains qui ne sont pas dimensionnés, conçus pour de tels évènements : les dommages aux infrastructures sont importants. Les spécificités sont les suivantes :

- Les débits et les hauteurs de submersion sont a priori moins élevés que pour une inondation par débordement de cours d'eau ;
- Le phénomène est rapide ;
- Le phénomène peut affecter n'importe quel ilot, quartier ou zone d'activité de la ville qu'il soit résidentiel, de production ou tertiaire, commercial et/ou de loisir ;
- Le phénomène peut affecter n'importe quelle ville et se manifestera avec d'autant plus d'intensité, que les surfaces urbanisées sont importantes.

La ville est ainsi « auto inondable », le phénomène s'amplifiant au fur et à mesure que l'urbanisation se développe. Le changement climatique semble intensifier ces évènements et les exemples récents sont nombreux : Rio de Janeiro (2013) , Marrakech (2013), Draguignan (2010 & 2019), Montpellier (2014 & 2019). Les couts occasionnés sont très importants avec, par exemple, sur 9 communes situées aux alentours de Montpellier, 20 millions d'euros de dégâts pour l'évènement de 2014.

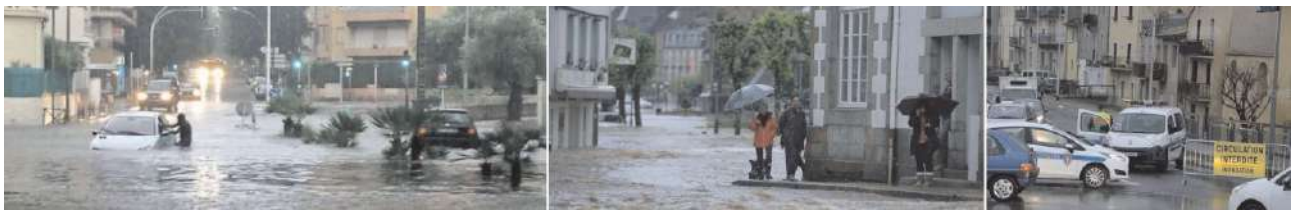


Figure 1 : Exemples de phénomènes de ruissellement (©Ville de Montpellier)

ETAT DE L'ART : MODELISATION DES PHENOMENES RUISSELLEMENT

Du point de vue de la modélisation hydraulique, les phénomènes d'inondations en milieu urbain présentent une spécificité par rapport aux zones moins anthropisées : la forte densité de singularités géométriques. Celle-ci génère une variabilité considérable dans les champs d'écoulement, avec l'apparition fréquente de discontinuités hydrauliques (ressauts, fixes ou mobiles, séries de réflexions d'onde au voisinage des intersections ou des changements de direction de rues, etc.)

Il est classiquement admis que les modèles 2D sont de bons outils pour la représentation des champs d'inondation. Ils représentent bien les mécanismes au niveau des ouvrages et potentiellement des autres singularités urbaines. L'offre logicielle, y compris commerciale, est importante (Telemac 2D, Delft Flooding System, Mike 21/Urban, etc.)

Cependant, ces outils ont été validés uniquement en régime permanent et pour des configurations géométriques de carrefours très limitées. En outre, les simulations ne concernaient que des carrefours isolés les uns des autres. Par ailleurs, les modèles 2D sont très consommateurs en données et temps de calcul. Simuler quelques heures d'une crue sur un quartier peut demander plusieurs semaines de temps CPU. Il peut alors devenir nécessaire de paralléliser les codes sources, en utilisant pour leur exécution des architectures matérielles lourdes – dont disposent rarement, sinon jamais, les bureaux d'étude et les acteurs engagés dans la prévention du risque.

C'est pourquoi une direction de recherche majeure au cours de 20 dernières années, a consisté à simplifier les outils de modélisation hydraulique 2D selon plusieurs principes :

- **La simplification des équations décrivant les phénomènes physiques** (Bates et al. 2010 ; Fewtrell et al. 2008). Ces approches ne semblent toutefois pas résoudre le problème des temps de calcul (Sanders et al. 2010 ; Yu 2010) alors même que les approches utilisant les équations de Saint Venant complètes permettent de rendre beaucoup mieux compte des phénomènes de transfert en milieu urbain.
- **La simplification de la géométrie des modèles avec les approches macroscopiques** du type porosité, volume élémentaire représentatif, séparation des échelles, …

Récemment, le modèle à porosité a connu une nouvelle étape de développement, à Hydrosciences Montpellier, par l'introduction d'un modèle à porosités multiples.

OBJECTIF DU PROJET GERIMU

L'ambition de GERIMU est de mettre la précision du calcul hydraulique en deux dimensions au service de la définition et de la prévision du risque inondation en milieu urbain en s'intéressant notamment aux phénomènes de ruissellement. Une amélioration des temps de calcul du logiciel SW2D, noyau hydraulique de GERIMU, a été réalisée afin que l'outil puisse devenir un outil de gestion de crise en temps quasi-réel à l'échelle d'une agglomération.

Ainsi, GERIMU, mis en œuvre à l'échelle d'une agglomération, pourrait fournir une quantification des hauteurs de submersion et des vitesses avec lesquelles se déplacent les ruissellements dans la ville. Concrètement, il permettra aux collectivités et au secteur privé (assureurs, aménageurs, unités de production, commerces, gestionnaire de ZA, ZI) de réaliser de la prévention et de déployer des plans de gestion de crise de façon anticipée.

Les étapes du projet GERIMU sont détaillées dans l'illustration suivante :

- Le développement d'un mailleur spécifique permettant de traiter les données LIDAR et d'adapter la représentation spatiale à la finesses des résultats attendus
- L'exploitation des images LIDAR, dont la qualité doit être excellente pour pouvoir être traitées. A l'heure actuelle, toutes les communes et agglomérations ne peuvent pas fournir des images LIDAR de leurs territoires.
- L'optimisation du modèle SW2D liée à une parallèlisation du code et à l'intégration d'une porosité afin d'effectuer des gains en termes de temps de calcul ;
- Une interface de visualisation des résultats afin de guider les décisions opérationnelles notamment celles du partenaire PREDICT Services en situation de crise.

DEVELOPPEMENTS SPECIFIQUES A GERIMU

OUTILS NUMERIQUES

La modernisation du code SW2D ainsi que la qualité de la parallélisation, et donc le gain en temps de calcul espéré, dépendent de plusieurs facteurs :

- La capacité des algorithmes implémentés à être effectivement parallélisables, c'est-à-dire lorsque les opérations effectuées par ces algorithmes peuvent être exécutées sur différents cœurs de calcul indépendamment les unes des autres.

- La structure de données choisie. Il s'agit ici d'utiliser des techniques pour optimiser l'agencement des données en mémoire afin de bénéficier au maximum des capacités de la machine cible.
- L'architecture de la machine cible sur laquelle le code va être exécuté. Le temps de restitution va fortement dépendre de la fréquence et du nombre de cœurs du ou des processeurs utilisés et le comportement du programme peut aussi fortement dépendre de la taille et de la qualité de la mémoire.

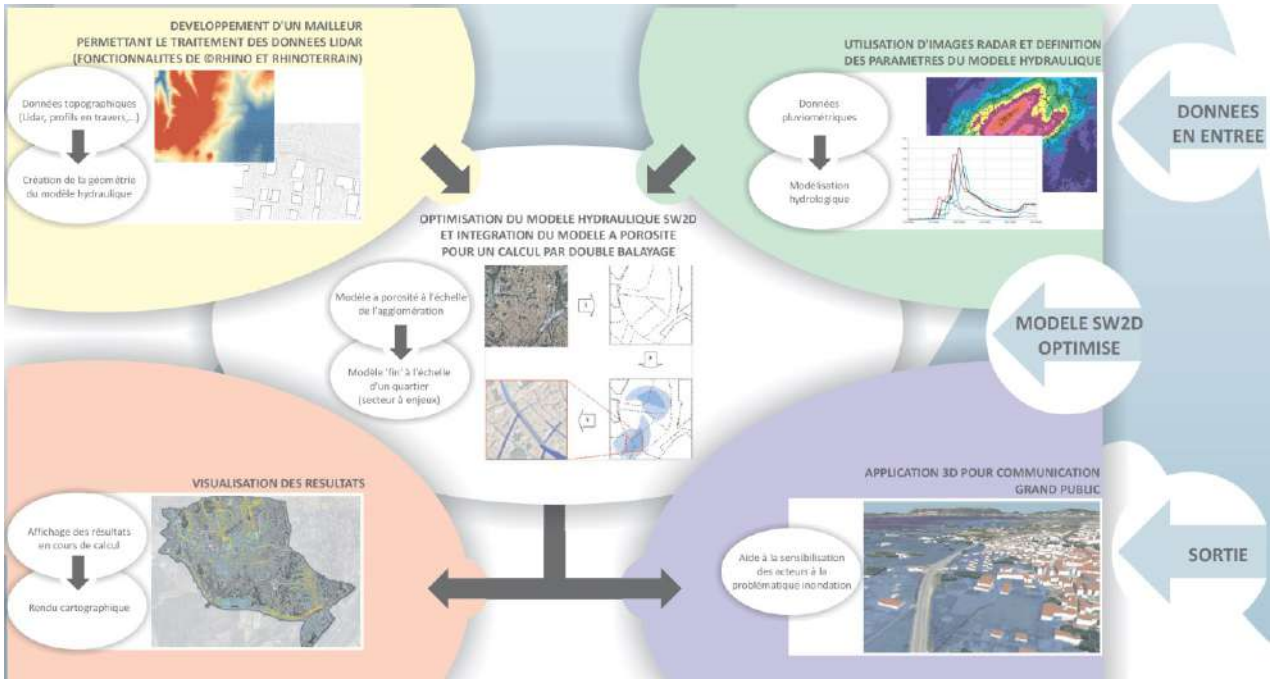


Figure 2 : Schéma fonctionnel du projet GERIMU

Outre la réécriture profonde du code qui a été effectuée avec notamment un changement du langage de programmation de Fortran à C++, de nombreuses améliorations ont été apportées afin d'améliorer la sécurité de l'exécution du programme, en particulier, la standardisation des fichiers d'entrée et de sortie du modèle grâce à des librairies externes permettant de rendre le code plus robuste et moins sensible à d'éventuelles erreurs de l'utilisateur.

Sur des cas tests, l'utilisation de la version parallélisée du code par Cereg a permis l'exécution des simulations jusqu'à 15 fois plus rapidement que selon une exécution séquentielle.

Sur les aspects de transferts d'échelle, deux orientations ont été testées : transfert d'échelle de la simulation hydraulique et désagrégation des champs de pluie.

En l'état actuel de la technologie sur ces deux aspects encore au stade de la recherche, il a été démontré que l'algorithme GERIMU est probablement le meilleur compromis entre précision et rapidité qui puisse être implanté dans une chaîne opérationnelle.

MAILLEUR HYDRAULIQUE

Le mailleur a été développé sur la base de l'outil « Rhinoceros » développé par RhinoTerrain. L'outil Rhino a été intégré dans l'interface de GERIMU. Les principales attentes de l'outil sont :

- La lecture des gros fichiers de topographie tels que le LIDAR ;
- La création du maillage au format 2dm qui est la base du modèle hydraulique SW2D.

La particularité du logiciel Rhino associé à RhinoTerrain est de pouvoir créer des maillages de grandes dimensions en quelques secondes grâce au support efficace de la totalité de la mémoire et des processeurs tout en travaillant en coordonnés géographiques.

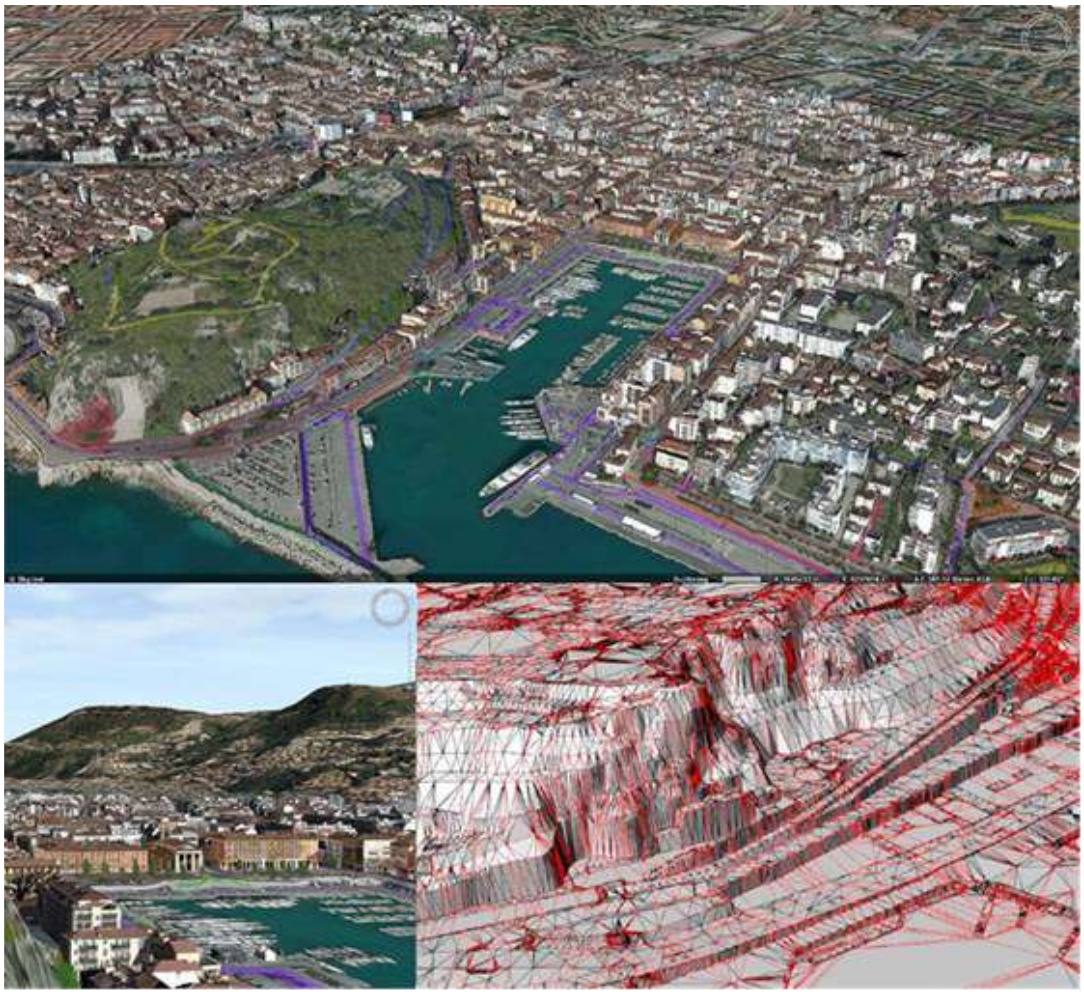


Figure 3 : Exemple de maillage obtenu à partir de GERIMU

Le mailleur RhinoTerrain s'appuie sur la base logicielle Rhino et permet d'appliquer une triangulation de Delaunay sur des données SIG. Ces données peuvent contenir :

- Des points ou des nuages de points tels que des relevés altimétriques provenant de relevés LIDAR
- Des polylignes représentant des routes, des cours d'eau, des voies ferrées, …
- Des polygones de surfaces de bâtiments, zonages, …

Des développements spécifiques ont permis d'ajouter à Rhino de nouvelles fonctionnalités :

- Lecture et écriture du maillage au format 2dm,
- Création d'ouvrages linéaires et surfaciques,
- Pointer les mailles contenant plus de N sommets,
- Communiquer avec l'interface GERIMU.

MISE EN ŒUVRE DE GERIMU SUR UN CAS CONCRET : LA LIRONDE A MONTPELLIER

La zone d'étude pour la mise en œuvre des tests de l'outil GERIMU concerne le bassin de la Lironde jusqu'à son entrée sur la commune de Lattes, soit un bassin versant de près de 500 ha.

L'objectif de cette simulation est de vérifier la mise en œuvre du modèle GERIMU pour comparer son fonctionnement à celui de SW2D mis en œuvre lors du dimensionnement des aménagements proposés et pour identifier la rapidité des calculs dans une démarche de gestion de crise.

Concernant la comparaison des résultats entre GERIMU et SW2D, les résultats sont comparables et valident les modifications réalisées et le gain de temps de calcul.

Concernant les scénarios de gestion en temps réel, les tests sont actuellement en cours avec PREDICT Services.

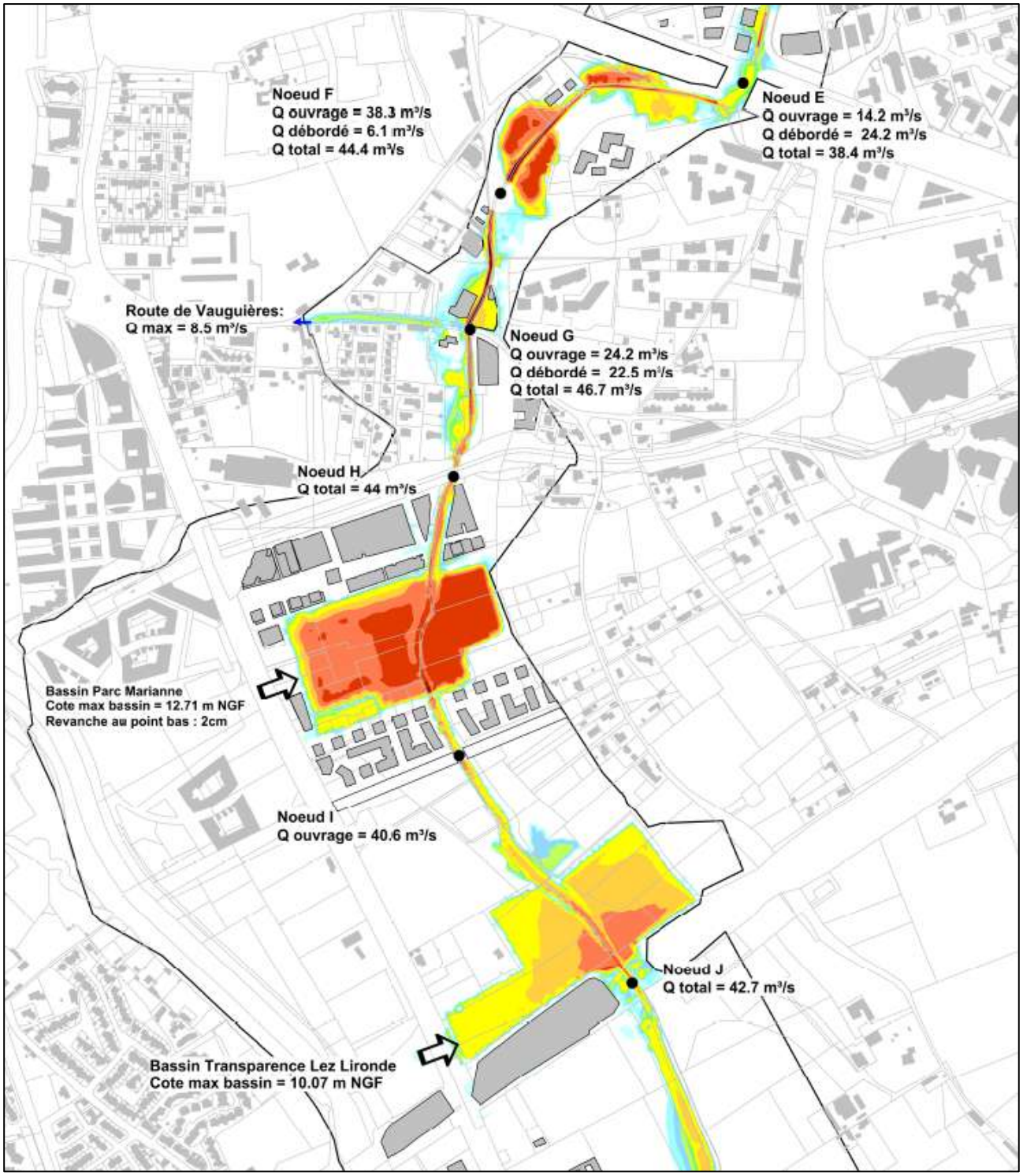


Figure 4 : Mise en œuvre de GERIMU sur le bassin versant de la Lironde

CONCLUSION

A minima, le modèle GERIMU permet d'obtenir des temps de calcul divisé par 15 par rapport au code SW2D. Concernant la comparaison des résultats entre GERIMU et SW2D, les résultats sont comparables sur le plan hydraulique (cote et vitesse).

La mise en œuvre d'un modèle à double porosité à l'échelle d'une métropole restera au stade de la recherche et ne sera pas opérationnel à l'échelle du projet GERIMU.

Néanmoins, les applications de l'outil GERIMU, dans sa configuration actuelle, pourraient être :

- Prédictives : son utilisation permettrait l'élaboration des Plans de Protection et des Cartographies détaillées des zones inondables ;
- Opérationnelles : son utilisation permettrait la prédiction, la supervision et l'alerte ;
- Pédagogique : l'outil GERIMU pourrait être utilisé à des fins de formations et de sensibilisation pour les gestionnaires de territoires.

Toutes les collectivités et les opérateurs intervenant sur la prévention, l'élaboration de documents et la gestion opérationnelle sont donc susceptibles d'être intéressés par l'outil GERIMU.

REMERCIEMENTS

Le projet GERIMU a reçu un financement de la part de Montpellier Méditerranée Métropole, du Fonds Européen de DEveloppement Régional (FEDER) et de la région Occitanie.

ANEB

ASSOCIATION NATIONALE
DES ÉLUS DES BASSINS

shf

LA SCIENCE AU SERVICE DE L'EAU