



LES

Rencontres

DE L'ONEMA

Téledétection : quel potentiel pour la caractérisation des corridors fluviaux ?

Une journée technique organisée le 10 juin 2016 par l'Onema¹ et le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.

Imagerie satellitaire, lidar aéroporté, capteurs *in situ*... La téledétection pourrait ouvrir un vaste champ d'applications pour la gestion et le suivi de l'hydromorphologie des cours d'eau. Confrontant les attentes du terrain aux solutions disponibles, la journée technique du 10 juin dernier a dressé un premier panorama des apports possibles de la téledétection fluviale appliquée aux différentes échelles de gestion : de la planification nationale au suivi local d'opérations de restauration.

Depuis le début des années 2000, le domaine de la téledétection (acquisition d'informations à distance via un capteur, Figure 1) connaît un fort développement. Le lidar (téledétection par laser), le radar, la thermographie infrarouge ou la photogrammétrie voient régulièrement leur résolution s'accroître et leurs coûts diminuer. Plus récemment, la démocratisation des drones a révolutionné la collecte de données aéroportées. Ces avancées, couplées à des capacités de traitement des données toujours plus performantes, profitent à de nombreux champs de recherche. Parmi ceux-ci, la caractérisation physique des cours d'eau : depuis quinze ans, le nombre d'articles traitant de rivières et de téledétection dans la littérature scientifique connaît une croissance exponentielle.

Au-delà des projets de recherche, dans quelle mesure ces outils peuvent-ils être mobilisés en France pour la gestion opérationnelle de l'eau et des milieux aquatiques ? C'était la question centrale de la journée technique du 10 juin 2016, qui a réuni à la Défense une centaine de participants, scientifiques et gestionnaires de milieux aquatiques, à l'initiative de l'Onema et du ministère en charge de l'environnement. Son introduction

par les organisateurs a rappelé l'étendue des enjeux hydromorphologiques pour la gestion des rivières et la reconquête de la biodiversité. Le régime hydrologique des rivières, leur continuité écologique,

la morphologie du lit et des berges, soutiennent la biologie et conditionnent l'atteinte du « bon état » des masses d'eau. Au cœur des objectifs des schémas directeurs d'aménagement et de gestion

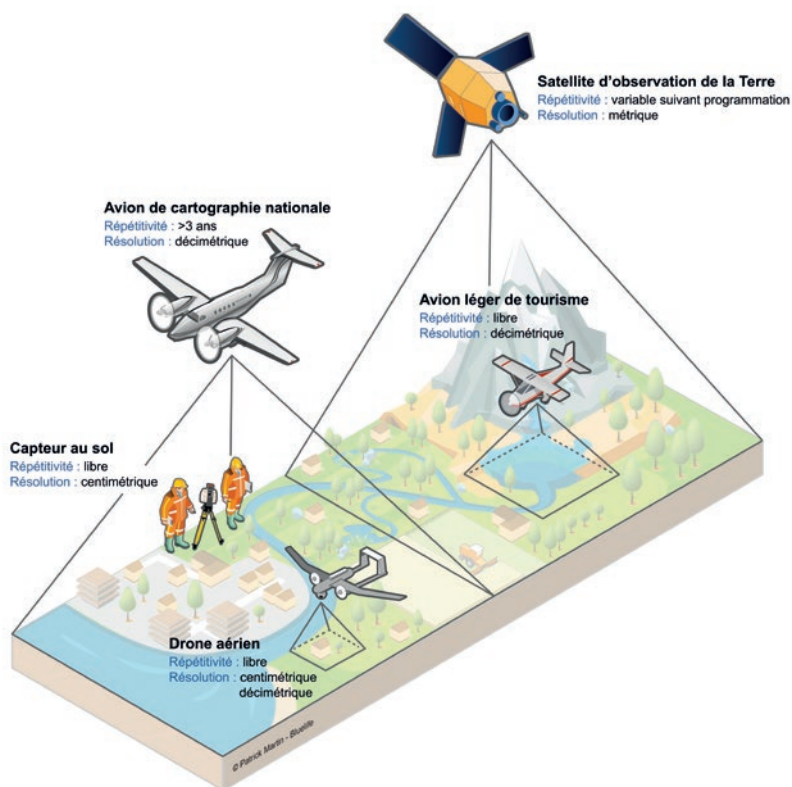


Figure 1. Différents modes d'acquisition en téledétection et précision attendue (d'après J.B. Henry *et al.*, 2002).

¹ Le 1^{er} janvier 2017, l'Agence des aires marines protégées, l'Atelier technique des espaces naturels, l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques et Parcs nationaux de France regroupent leurs compétences pour créer l'Agence française pour la biodiversité.

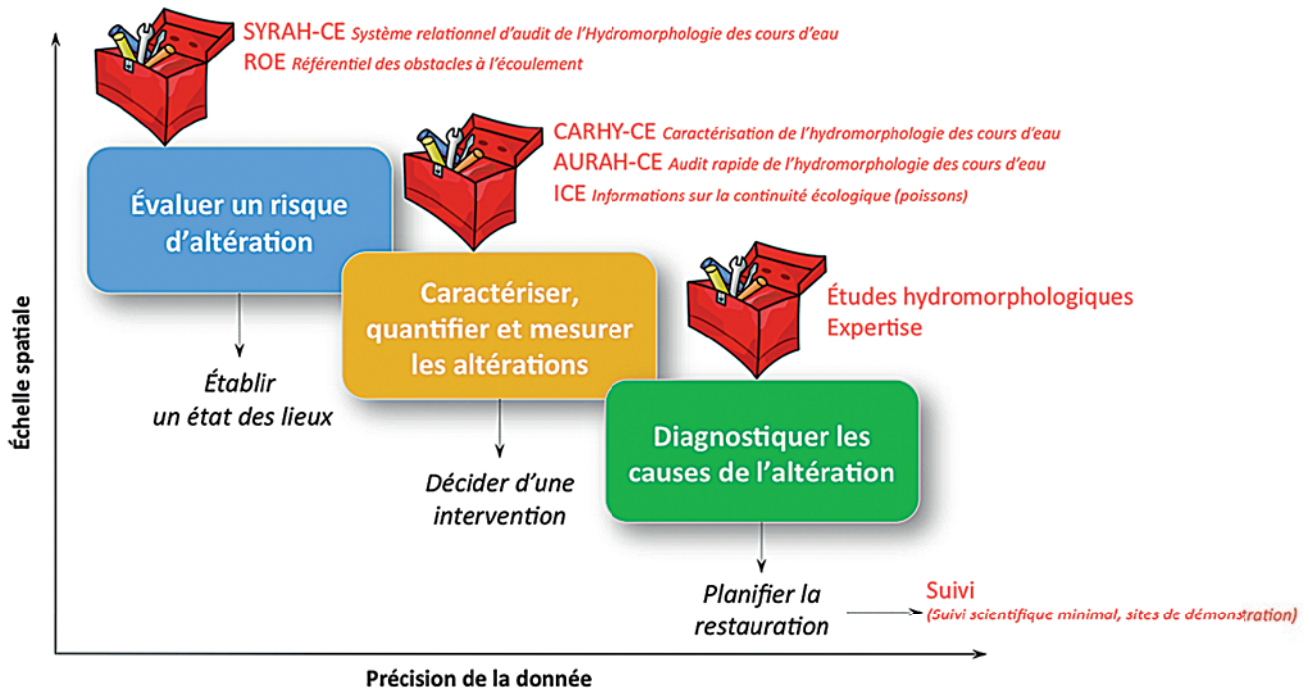


Figure 2. Typologie des besoins pour le suivi hydromorphologique des cours d'eau : échelles spatiales, précision attendue et protocoles associés (d'après Gob et al., modifié).

des eaux 2016-2021, les cours d'eau font l'objet de programmes de surveillance à différentes échelles spatiales, nécessitant une acquisition conséquente de données à différents niveaux de précision (Figure 2).

Cependant, l'approche actuelle ne rend pas suffisamment compte, ni de la variation temporelle des paramètres et des processus hydromorphologiques, ni d'une vision intégrée à l'échelle d'un bassin versant, faute d'outils objectifs et reproductibles dans le temps et l'espace.

En réponse, un rapide panorama des avancées de la télédétection (H. Piégay, ENS Lyon) suggère un éventail de solutions pertinentes à différentes échelles : de la planification régionale (plus de 100 km) au suivi local (1 km), en passant par les diagnostics hydromorphologiques (10 km). Reste à en préciser la faisabilité technique et économique : la quinzaine de projets présentés au cours de la journée a permis d'apporter un premier ensemble d'éléments concrets pour ouvrir cette réflexion au plan national.

À l'échelle régionale : lidar, orthophotos et approches orientées objet

En Wallonie, la mise en œuvre des politiques de l'eau, à travers les programmes d'actions sur les rivières par une approche intégrée et sectorisée (Programmes appelés Paris), a misé sur un déploiement à l'échelle régionale de la télédétection (A. Michez, Université de Liège) pour décrire l'hydromorphologie et les bandes riveraines des 12 000 kilomètres de cours d'eau gérés par l'État belge. Une campagne d'acquisition par lidar aéroporté a permis la construction d'un modèle numérique de terrain en haute résolution (1 pt/m²). En complément, le retraitement photogrammétrique de campagnes d'orthophotos a débouché sur un modèle numérique de surface de l'ensemble du territoire pour les années 2009 et 2012. Les paramètres collectés, physiques (hauteur émergée des berges, largeur du cours d'eau, sinuosité, etc.) et forestiers (dont continuité longitudinale du couvert, hauteur moyenne de la ripisylve), nourrissent un ensemble d'indicateurs calculés pour chacun des 6 000 secteurs de gestion des programmes Paris. Les résultats, sous forme cartographique multi-échelle (Figure 3) ou matricielle,

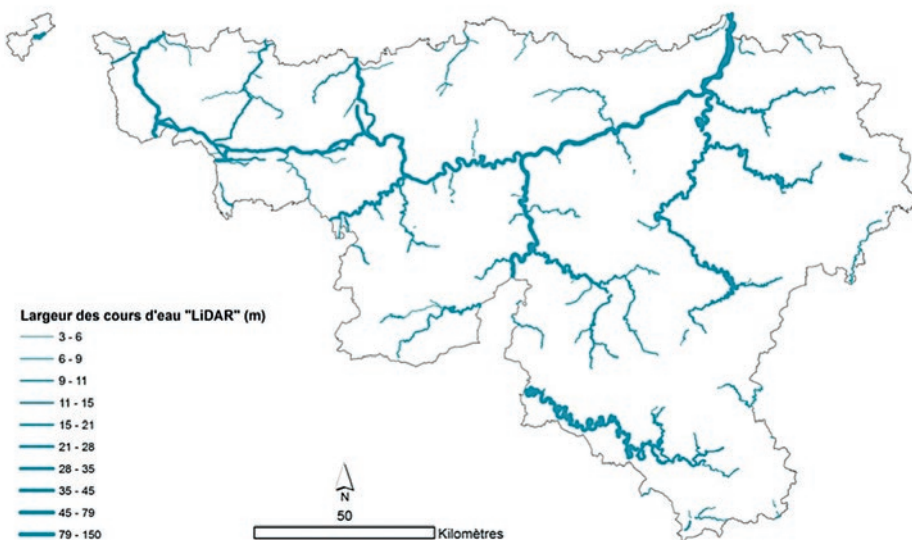


Figure 3. Exemple d'exploitation des campagnes lidar et photogrammétriques conduites en Wallonie : cartographie de la largeur des cours d'eau à l'échelle régionale (Source : A. Michez).

Francis Guyot,
IGN, Service d'appui
aux politiques publiques

Cette journée très riche témoigne de la variété des attentes que suscite la télédétection pour la gestion des corridors fluviaux. En réponse, l'IGN entend jouer pleinement son rôle de pourvoyeur de données, en appui aux politiques publiques. Depuis quelques années déjà, nous réalisons des opérations d'acquisition à grande échelle, à l'image de la campagne lidar conduite avec la Direction générale de la prévention des risques : 50 000 km² de cours d'eau levés à l'aide de la technologie lidar à 2 pts/m² entre 2011 et 2013. Ce type de coproductions est appelé à se multiplier à l'avenir : l'heure est maintenant à la construction d'un cadre technique et économique permettant une mutualisation accrue des coûts d'acquisition et de gestion des données, et favorisant leur exploitation par les différents acteurs concernés. C'est l'objet d'une réflexion que nous menons avec nos grands partenaires, dont l'Onema.

ont de nombreuses implications pour la gestion opérationnelle et la planification. Ils seront disponibles, pour les gestionnaires et le grand public, sur la plateforme internet Webgis développée en support des programmes d'actions sur les rivières par une approche intégrée et sectorisée. Les coûts d'acquisition des données sont de 17 €/km² pour la campagne lidar et 10 €/km² pour les campagnes d'orthophotos.

Un deuxième exemple d'utilisation à grande échelle des données de télédétection a été présenté (L. Demarchi, JRC) pour les 1 200 km de cours d'eau du Piémont italien. À partir d'une base de données régionale constituée en 2009 et 2010 par des campagnes d'acquisition par lidar (0,4 pts/m²) et imagerie proche infrarouge très haute résolution (0,4 m), une méthode d'analyse a été développée pour classifier de manière automatique les tronçons de cours d'eau en différents styles fluviaux (méandrique, tressé, sinueux...) à travers un ensemble de variables quantitatives. Baptisée RS-Geobia, cette méthode « orientée objet » (par opposition aux approches « orientées pixel », qui utilisent uniquement les valeurs

spectrales des pixels) débouche sur une représentation cartographique continue, objective et reproductible de l'hydromorphologie des cours d'eau. Sa réitération périodique pourrait contribuer à une meilleure compréhension de la dynamique des rivières et offrir de précieux éléments pour planifier leur suivi.

Enfin, la caractérisation fine des ripisylves peut également être menée sur de grands territoires par des approches orientées objet combinant plusieurs sources d'informations (T. Tormos, Onema). Les orthophotos des bases de données nationales (fonds de vallée, zones en eau, registre parcellaire graphique, etc.), hétérogènes dans leur contenu et prises à des dates différentes, sont analysées par combinaison de méthodes orientées objet pour délimiter la zone rivulaire potentielle puis en discriminer les patches arborés (bois dur, bois tendre, mélanges). À ce stade, la procédure doit encore être améliorée, notamment pour limiter la sur-détection, mais elle s'avère robuste, efficace et peu coûteuse. Plus généralement, la rétro-analyse des bases d'orthophotos constitue un point de départ puissant pour une grande variété de travaux en hydromorphologie, à l'image de l'approche mathématique développée sur le cours aval de l'Ain (M. Spitoni, CNRS-EVS) pour mesurer les impacts des barrages sur l'organisation longitudinale des habitats fluviaux.

Radar et lidar pour le suivi des zones humides

À une échelle intermédiaire (10 km), la délimitation, la cartographie et le suivi des zones humides sont des éléments indispensables pour l'évaluation de leurs

fonctions et la préservation de leur biodiversité. Là encore, l'utilisation du lidar pourrait constituer un apport décisif pour les gestionnaires. Une étude (S. Rapinel, CNRS Écobio) a précisé son intérêt pour délimiter et cartographier les 130 km² de canaux et de marais de la zone atelier Armorique, à partir d'une campagne lidar aéroportée en proche infrarouge (4 pts/m², 1 300 m d'altitude, 120 €/km²). Le prétraitement des données a d'abord permis de délimiter l'ensemble des zones humides potentielles, avec une précision de 87 %. Si la cartographie « automatique » du réseau hydrographique, menée par une approche orientée objet, restait entachée de quelques sous-détections, l'ajout d'une étape de photo-interprétation a offert un très bon résultat, jusqu'à la classification fine des zones en eau : canal, cours d'eau, fossé de drainage ou de circulation.

Un autre volet de l'étude s'est intéressé au potentiel du couplage de données multi-spectrales et lidar pour la cartographie et la caractérisation des communautés végétales des zones humides. Les premiers résultats sont encourageants : par exemple, sur le bassin versant de la Lizonne, une analyse orientée objet a permis de discriminer la bande rivulaire selon 10 types (feuillu indigène, fourré arbustif, friche herbacée, boisement artificiel, bâti...) avec une précision de 96 %.

En complément, une exploitation des données satellitaires radar pourrait permettre de mieux appréhender les dynamiques temporelles des zones humides. À partir des données (diffusées gratuitement, jusqu'à trois images tous les six jours) du programme Sentinel-1 (Figure 4) une étude (C. Cazals, IGN-UPEM) a cherché à caractériser les durées d'inondation des prairies du marais Poitevin,

Jean-Baptiste Fagot, Fédération du Jura pour la pêche et la protection du milieu aquatique

La fédération a récemment pu bénéficier des campagnes d'acquisition lidar menées par le Parc naturel régional du Haut-Jura, sur certains cours d'eau peu accessibles en tête de bassin : c'est une véritable mine d'information pour la définition de mesures de restauration comme le reméandrage. Nous avons également pu travailler sur des données aériennes acquises par le service inondations de la Dreal sur tout le cours du Doubs, qui nous aident à décider des actions sur les annexes fluviales. Nous ne manquons pas d'idées : par exemple, des acquisitions par drone seraient très adaptées au suivi des exutoires de lacs d'origine glaciaire. Mais le premier enjeu, pour des structures locales comme les fédérations, est d'avoir accès aux données acquises par d'autres acteurs du territoire : il faut faciliter la mutualisation des campagnes et le partage de l'information !

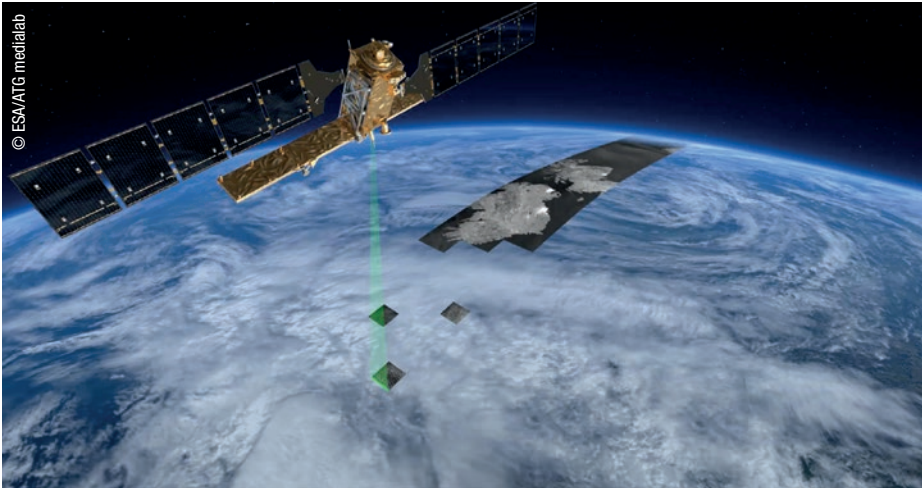


Figure 4. Modes d'acquisition du Satellite Sentinel 1.

contrôlées en parallèle sur le terrain. À ce stade, les résultats sont contrastés : la méthode proposée est peu coûteuse, mais ne permet d'estimer la durée d'inondation que pour des surfaces inondées de plus d'un hectare.

Par ailleurs, la haute résolution temporelle de l'imagerie radar apparaît adaptée pour le monitoring du marnage des lacs de retenue (suivis des masses d'eau fortement modifiées au titre de la DCE) : une méthode opérationnelle, en développement (T. Tormos, Onema), livre de premiers résultats encourageants.

Lidar topo-bathymétrique : un œil sous la surface

Mesurer la profondeur des cours d'eau par télédétection est longtemps resté une gageure. Alors que le lidar topographique en proche infrarouge n'offre aucune pénétration dans l'eau, les méthodes spectrales (aéroportées ou satellitaires) et les approches photogrammétriques sont limitées aux fonds visibles et sensibles à l'ombrage. L'émergence du lidar aéroporté topo-bathymétrique (Figure 5), associant une onde « rouge » topographique ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) et une onde « verte » bathymétrique (532 nm) change la donne. Les caractéristiques du lidar acquis conjointement par les universités de Rennes et Nantes ont été présentées au cours de la journée (D. Lague, CNRS) : nécessitant une altitude de vol entre 300 et 350 m, il permet en un passage l'acquisition de 10 à 20 pts/m² (bathy) et 30 à 40 pts/m² (topo). L'optimisation des périodes de vol est essentielle (eaux basses et claires,

faible végétation). La profondeur est mesurée à 10 cm près jusqu'à deux mètres lorsque le fond est clair, et jusqu'à quatre mètres lorsque l'eau et le fond sont clairs.

Si elle reste coûteuse (200 à 500 €/km² en configuration optimale), cette technologie ouvre des perspectives incomparables pour le suivi de l'hydromorphologie des grandes rivières, non prospectables à pied. Sur ce sujet, des éléments de réflexion ont d'ailleurs été présentés (N. Thommeret, CNAM-ESGT) pour une adaptation aux grands cours d'eau du protocole de terrain CarHyCE (mis en œuvre dans le cadre de la DCE) grâce

au lidar topo-bathymétrique. Des tests ont été menés sur trois sites pilotes. Il en ressort que, pour des configurations de rivière simples, une description complète de la géométrie du lit est possible de manière automatique, avec validation par un opérateur. Pour les cas plus complexes (îlots, bras morts) la détermination de points de plein bord par un opérateur reste cependant nécessaire, sur le terrain ou via un modèle numérique de terrain (MNT). À signaler également qu'outre la bathymétrie, la température des cours d'eau pourrait être cartographiée finement par télédétection infrarouge aéroportée : des approches concluantes ont été menées en ce sens (V. Wawrzyniak, Univ. de Lyon) sur le Rhône et la Loire.

À l'échelle locale : le suivi de restauration à l'heure de la télédétection

Le suivi dans le temps de l'efficacité des actions de génie écologique sur un site donné, enjeu central pour les gestionnaires de terrain, trouve lui aussi de nouvelles perspectives par l'emploi de capteurs aéroportés, par drone ou avion selon les distances à couvrir. Parmi les expériences présentées au cours de la journée, l'Onema et l'association Pélican

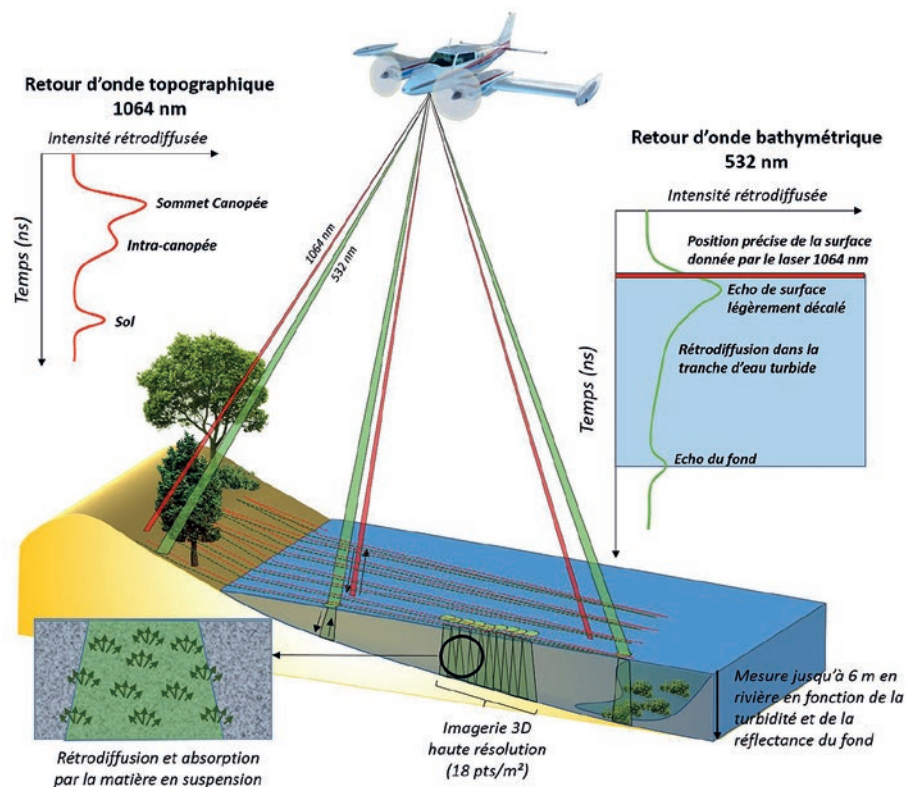


Figure 5. Principe de fonctionnement du lidar topo-bathymétrique bi-spectral (Source : D. Lague).

jaune (W. Sremski et B. Le Chevallier) proposent un outil de collecte de données environnementales par photogrammétrie sur des sites d'opérations de restauration, au moyen d'un avion de tourisme instrumenté (Figure 6). Depuis 2014, ils réalisent notamment le suivi d'un tronçon recréé de l'Artière à Lempdes (63). Des campagnes annuelles sont menées via un protocole léger associant prise de vue aéroportée, rectification par des cibles GPS au sol géoréférencées (GPS différentiel), tri et assemblage : l'information permet un monitoring précis de l'hydromorphologie, et contribue à l'étude des processus de recolonisation du secteur par les poissons. Cette initiative constitue un exemple d'outil de télédétection réactif, peu coûteux



Figure 6. Avion équipé d'un appareil photographique par l'association Pélican jaune.

Guy Pustenik, directeur de l'EPTB de la Dordogne

L'exploitation de campagnes lidar existantes, avec l'appui méthodologique de l'université de Rennes, a permis à Epidor de cartographier en seulement six mois l'ensemble des zones humides des 25 000 km² du bassin de la Dordogne : cette approche livre une bonne base de dialogue pour sensibiliser les communes. De même, nous avons développé l'utilisation du lidar pour délimiter le domaine public fluvial. Elle débouche sur une carte au 1/2 000 superposable au cadastre, sans valeur réglementaire mais précieuse dans les négociations avec les riverains. Ces usages « simples » de la télédétection, à compléter au besoin par l'expertise de terrain, nous font gagner beaucoup de temps : ils devraient se multiplier en France, à mesure notamment que les bureaux d'études monteront en compétences dans le domaine. Il reste aussi un effort à faire pour rapprocher les gestionnaires des universitaires spécialistes. À ce titre, une journée d'information comme celle-ci est très utile.

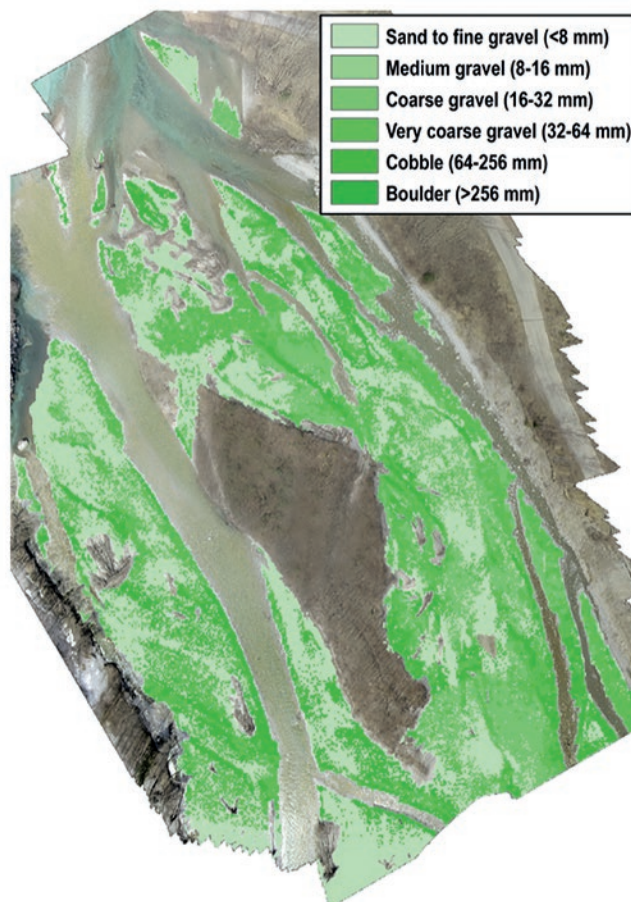
(780 € TTC pour la campagne 2016) et adapté aux besoins de suivi des syndicats de rivière et des contrats territoriaux.

Une autre approche locale basée sur l'imagerie aéroportée, par drone cette fois, a proposé un protocole simple pour extraire la granulométrie du lit de rivières en tresse à partir de la photogrammétrie SfM (Structure from Motion). L'étude (D. Vázquez-Tarrío, Irstea), menée sur un tronçon du Vénéon (38), donne des résultats prometteurs pour l'estimation de la rugosité du lit et la caractérisation de la mosaïque sédimentaire des cours d'eau en tresses (Figure 7).

Le déploiement de capteurs au sol offre quant à lui des possibilités incomparables pour suivre finement dans le temps des phénomènes très dynamiques. En Martinique, les données de géophones (capteurs sismiques) et de pluviomètres, couplées à des acquisitions lidar aéroportées, ont permis (A. Ville, CNRS-NGP) de caractériser les coulées torrentielles survenues en 2010 dans le torrent du

Prêcheur. Cette approche a notamment précisé les impacts des glissements de terrain sur la morphologie du fond de vallée (dépôt et érosion de sédiments), et identifié les événements pluvieux déclencheurs.

En Alsace, dans le cadre du projet Life + de remise en eau de l'annexe rhénane de l'île du Rohrschollen, une instrumentation *in situ* novatrice a été déployée sur trois tronçons actifs, en combinant plusieurs méthodes (M. Koehl, Insa) : lasergrammétrie pour la modélisation 3D de la morphologie initiale (avant injection d'eau), photogrammétrie pour la modélisation 3D post-cruée au cours du temps, complétées par des levés au tachéomètre. Le traitement des données permet de suivre les évolutions latérale et verticale des tronçons, et d'estimer précisément les volumes de sédiments déplacés entre chaque crue. Très riche au plan scientifique, une telle approche pose cependant la question de son transfert et de son appropriation par les gestionnaires.



Les couleurs indiquent la taille des sédiments, du plus clair au plus foncé : sable à gravier fin, gravier grossier, caillou fin, caillou grossier, pierres fines et grossières, bloc.

Figure 7. Cartographie de la granulométrie du lit en tresses du Vénéon par exploitation de la photogrammétrie SfM drone (Source : D. Vázquez-Tarrío).



Figure 8. Vallée de la Dordogne : expérimentation de délimitation du domaine public fluvial à partir de données lidar (télé-détection par laser).

Transfert aux gestionnaires et valorisation des données : une réflexion à construire

Les initiatives et projets présentés au cours de cette journée bien remplie témoignent de la diversité des usages possibles de la télé-détection pour le suivi et la gestion des corridors fluviaux. Nombre de ces outils, existants ou en gestation, restent cependant du domaine scientifique : la question de leurs conditions de transfert aux gestionnaires de terrain a été récurrente lors des débats.

Un exemple d'appropriation réussie a été apporté à ce sujet par le retour d'expérience de l'établissement public territorial du bassin de la Dordogne (G. Pustelnik, Epidor), qui a recours depuis 2015 aux données lidar de l'IGN, en complément aux approches terrain, pour délimiter le domaine public fluvial dont il est gestionnaire (Figure 8).

L'usage fait de la télé-détection par les gestionnaires du bassin de la Loire (A. Dionis du Séjour, Dreal Centre-Val de Loire) est également éclairant. Dans le cadre du Système d'information sur les évolutions du lit de la Loire et ses affluents (Siel), la Dreal réalise depuis 1995 des campagnes aéroportées régulières (répétition de 5 à 10 ans) sur les principales rivières du bassin : levés laser, orthophotographies et plus récemment imagerie infrarouge.

Ces acquisitions, dont le coût a tendance à diminuer (53 €/km en 2015 sur la Loire moyenne), alimentent un ensemble de cartographies et de modèles numériques de terrain directement utiles à la gestion : prévention du risque d'inondation et préconisations d'entretien associées, ou identification de chenaux préférentiels pour la restauration de frayères par exemple. Le Système d'information sur les évolutions du lit de la Loire et ses affluents (Siel), se distingue en outre par sa stratégie de valorisation de l'information : comme le WebGIS wallon déjà évoqué, il propose en téléchargement libre ou dédié un ensemble de produits, à différentes échelles spatiales (modèles numériques de terrain, lignes d'eau, mosaïques aériennes...).

Intervenant en clôture, Philippe Dupont (Onema) a rappelé la vocation de l'Onema à accompagner des avancées utilisables et utilisées par les acteurs du terrain, y compris les structures de petite taille, ainsi qu'à produire une information ouverte et adaptée aux différents types de publics. Les différents projets présentés lors de cette journée ont permis d'identifier un éventail d'applications prometteuses, susceptibles de répondre aux besoins des différents acteurs pour la caractérisation des corridors fluviaux. Ils alimentent également la réflexion en ce qui concerne le développement de partenariats avec les organismes producteurs de données comme l'IGN, en lien avec les attentes des politiques publiques et les besoins opérationnels des gestionnaires. ■

Pour en savoir plus

Page web du séminaire avec les présentations (vidéo et ppt) et les actes complets :

<http://www.onema.fr/avancees-apports-et-perspectives-de-la-teledetection-pour-la-caracterisation-physique-des-corridors>

Les actes complets de la journée seront aussi disponibles à cette adresse : <http://www.onema.fr/les-actes-des-seminaires>, et en recueil papier sur demande (anne.vivier@onema.fr), dans la limite des disponibilités

Organisation du séminaire

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer : S. Grivel, Onema : L. Breton, G. Melun, A. Vivier

LES RENCONTRES DE L'ONEMA

Directeur de publication : Paul Michelet
 Coordination : Véronique Barre (direction de l'action scientifique et technique) et Claire Roussel (délégation à l'information et à la communication)
 Rédaction : Laurent Basilico, Laurent Breton, Stéphane Grivel, Gabriel Melun et Anne Vivier
 Secrétariat de rédaction : Béatrice Gentil (délégation à l'information et à la communication)
 Maquette : Éclats Graphiques
 Réalisation : www.kazoar.fr
 Impression : CFI
 Impression sur papier issu de forêts gérées durablement
 Onema : 5 square Félix Nadar - 94300 Vincennes
 Disponible sur : <http://www.onema.fr/Les-rencontres-de-l-Onema>

