



***Groupe de Travail « Référentiel technique
digues maritimes et fluviales »***

Référentiel technique digues maritimes et fluviales

Version 1 – Janvier 2015

Avertissement

Ce document a été rédigé à la demande du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, service technique de l'énergie électrique, des grands barrages et de l'hydraulique (MEDDE/DGPR/SRNH/STEEGBH) par un groupe de travail qui a mené cette tâche sur la période de mars 2011 à août 2013. Cette première version du référentiel a vocation à être enrichie par des éléments complémentaires qui ne sont pas abordés dans cette première édition.

Liste des membres du groupe de travail :

- POULAIN Daniel Irstea Bordeaux Coordonnateur du Groupe de Travail
- CHASSE Patrick Cerema Direction Technique Eau, Mer, Fleuve - Compiègne
- DENIAUD Yann Cerema Direction Technique Eau, Mer, Fleuve - Brest
- GOUTALAND David Cerema Direction Territoriale Centre-Est
- KAHAN Jean-Marc DGPR / SRNH / STEEGBH
- LEBRETON Pascal Cerema Direction Technique Eau, Mer, Fleuve - Brest
- LEDOUX Patrick Cerema Direction Territoriale Méditerranée
- ROUXEL Nicolas Cerema Direction Territoriale Ouest
- SALMON David BETCGB
- TOURMENT Rémy Irstea Aix en Provence

Liste des contributeurs :

Préambule :

Responsable et auteur principal : Jean-Marc Kahan
Autres contributeurs : Gilles Rat et David Salmon

Chapitre 1 :

Responsable et auteur principal : Nicolas Rouxel
Autres auteurs : Alexis Bernard (Cerema), Rémy Tourment et Bruno Beullac (Irstea)
Autres contributeurs : Yann Deniaud

Chapitre 2 :

Responsable et auteur principal : Yann Deniaud
Autres auteurs : Daniel Poulain
Autres contributeurs : Pascal Lebreton, Patrick Ledoux, Nicolas Rouxel, Pierre Salomon (CETE Blois), Rémy Tourment

Chapitre 3 :

Responsable et auteur principal : Rémy Tourment
Autres auteurs : Patrick Ledoux
Autres contributeurs : Jean Maurin

Chapitre 4 :

Responsable et auteur principal : Daniel Poulain
Autres auteurs : Patrick Chassé, David Goutaland, Pascal Lebreton, Jean Maurin, Nicolas Rouxel

Autres contributeurs : Gilles Le Mestre (Cerema) et Rémy Tourment

Chapitre 5 :

Responsable et auteur principal : Patrick Ledoux

Autres auteurs : David Goutaland, Rémy Tourment

Autres contributeurs : David Goutaland, Jean Maurin, Patrice Mériaux (Irstea), Daniel Poulain

Relecture du référentiel :

Ce document a fait l'objet d'une première relecture (totale ou partielle) par des spécialistes français représentant les maîtres d'ouvrages et « l'expertise publique ».

- IGIGABEL Marc Cerema Direction Technique Eau, Mer, Fleuve
- MALLET Thibaut Symadrem
- MAURIN Jean DREAL Centre
- MERIAUX Patrice Irstea Aix en Provence
- PINHAS Michel AD Isère
- QUEFFELEAN Yann ONF Service RTM
- TRMAL Céline Cerema Direction Territoriale Méditerranée

Une seconde relecture a été menée par des spécialistes d'un panel d'organismes impliqués dans le domaine des digues (maîtres d'ouvrages gestionnaires, bureaux d'études, DREAL et DDT et experts indépendants). Ces relecteurs ont participé à une réunion de présentation du référentiel et d'échanges avec le groupe de travail qui s'est déroulée le 22 novembre 2013 ; nous remercions tous ceux qui ont participé à cette réunion et plus particulièrement ceux qui nous ont fait suivre une contribution :

- BECUE Jean-Pierre SAFEGE
- BRICHE Nathalie Conseil Général 33
- DEGOUTTE Gérard CFBR
- JACOPIN Bertrand SMAVD
- MALLET Thibaut Symadrem

Illustrations :

La plupart des photos, schémas et tableaux sont à porter au crédit des rédacteurs ou proviennent de la bibliographie référencée, sinon les auteurs sont mentionnés ; merci de contacter le coordonnateur (daniel.poulain@irstea.fr) si un oubli ou une erreur est constaté afin d'effectuer une correction sur la prochaine version du référentiel.

Coordination et élaboration du document final après relectures :

Daniel Poulain et Rémy Tourment

Sommaire

Préambule.....	10
Introduction.....	12
1. Fonctions et typologie des ouvrages.....	15
1.1. Analyse fonctionnelle.....	16
1.1.1. Définition du système objet de l'analyse fonctionnelle.....	16
1.1.2. Analyse fonctionnelle externe.....	19
1.1.3. Analyse fonctionnelle interne du système d'endiguement.....	20
1.1.4. Principaux composants des digues en remblai.....	25
1.2. Principaux types de digues.....	29
1.2.1. Remblai homogène.....	29
1.2.2. Remblai historique.....	30
1.2.3. Remblai zoné.....	31
1.2.4. Ouvrages rigides.....	34
1.2.5. Ouvrages composites.....	35
1.2.6. Tronçon résistant à la surverse.....	38
1.2.7. Tronçon déversoir en domaine fluvial [Degoutte, 2012].....	38
1.2.8. Passage batardable.....	39
2. Mécanismes de défaillance.....	40
2.1. Définitions.....	40
2.1.1. Défaillance, rupture, brèche.....	40
2.1.2. Mécanismes élémentaires, scénarios, modes de rupture.....	41
2.1.3. Modes classiques d'endommagement et de rupture des digues en remblais (mécanismes élémentaires).....	42
2.1.4. Modes classiques de rupture des digues mixtes.....	48
2.2. Analyse des mécanismes de défaillance et des scénarios de brèche sur la base de retours d'expériences.....	51
2.2.1. Rupture ou endommagement dues à l'érosion externe.....	51
2.2.2. Rupture par érosion interne ou sous-pression.....	58
2.2.3. Rupture par instabilité du remblai ou des fondations.....	60
3. Les diagnostics.....	62
3.1-Présentation de la démarche.....	62
3.1.1-Introduction et définitions.....	62
3.1.2-Les diagnostics : quand, pourquoi.....	64
3.1.3-Suites possibles à un diagnostic.....	65
3.1.4 – Résumé de la démarche de diagnostic.....	67
3.2-Recueil des données.....	68
3.2.1-Types de données, provenance des données, utilisation des données dans l'analyse.....	68
3.2.2-Recueil des données.....	70
3.2.3-La conservation des données.....	72
3.3-Analyse des données.....	73
3.3.1 - Analyses hydraulique, structurelle et de risque.....	73
3.3.2-Diagnostic hydraulique.....	74
3.3.3 - Diagnostic structurel (ou estimation des aléas de rupture).....	77
3.3.4 - Analyse de risques (diagnostic des conséquences de la défaillance du système d'endiguement).....	84
3.3.5 - Conclusions d'un diagnostic.....	88

4.	Conception, dimensionnement et exécution des travaux	90
4.1.	Définition des sollicitations.....	90
4.1.1.	Sollicitations hydrauliques	90
4.1.2.	Influence de la géomorphologie	103
4.1.3.	Sollicitations mécaniques	109
4.2.	Conception générale.....	110
4.2.1.	Étude géologique et géotechnique de la fondation	110
4.2.2.	Conception du corps de digue.....	114
4.2.3.	Protection contre l'érosion externe des digues en remblai.....	119
4.2.4.	Filtration et drainage.....	125
4.2.5.	Déversoirs de sécurité [Degoutte, 2012].....	127
4.2.6.	Organes annexes	129
4.3.	Justification des digues en remblai.....	130
4.3.1.	Bases de calcul	130
4.3.2.	Modèle hydraulique interne	132
4.3.3.	Justification de la sécurité	132
4.4.	Réhabilitations, confortements, modifications	135
4.4.1.	Confortements.....	135
4.4.2.	Les modifications liées à une augmentation de la cote de la crête	142
4.5.	Réalisation des travaux	145
4.5.1.	Contractualisation avec l'entreprise	145
4.5.2.	Exécution des travaux	148
4.5.3.	Réception de l'ouvrage.....	153
4.5.4.	Contrôle des travaux	154
5.	Vie de l'ouvrage	155
5.1.	La cohérence hydraulique du système d'endiguement	155
5.2.	Surveillance des digues en période normale.....	156
5.2.1.	Visites d'ordre réglementaire, périodicité et traçabilité des visites	156
5.2.2.	Justification, principe et méthode proposée pour l'examen visuel détaillé ...	157
5.2.3.	Conditions et moyens de mise en œuvre	158
5.2.4.	Limites de la surveillance visuelle.....	160
5.2.5.	Spécificités de la surveillance des murs en maçonnerie ou en béton	161
5.2.6.	Examen des déversoirs.....	161
5.2.7.	Examen des ouvrages d'accessibilité impossible sans moyen particulier ...	162
5.3.	Auscultation des digues.....	162
5.3.1.	Utilité et difficulté de l'auscultation des digues de protection	162
5.3.2.	Les dispositifs d'auscultation envisageables sur les digues.....	163
5.3.3.	Le suivi topographique des digues et de leur environnement	163
5.3.4.	Méthodes d'auscultation innovantes.....	164
5.4.	Entretien des digues.....	164
5.4.1.	Justification de l'entretien de la digue	164
5.4.2.	Principes généraux. Piste de service. Bornage	164
5.4.3.	La végétation.....	165
5.4.4.	Les animaux fouisseurs.....	167
5.4.5.	L'entretien des talus en enrochements	168
5.4.6.	L'entretien des perrés maçonnés	169
5.4.7.	Les ouvrages parafoilles.....	170
5.5.	Gestion des crues, des tempêtes ou d'événements particuliers.....	171
5.5.1.	Organisation spécifique en situations de crue ou de tempête marine	171
5.5.2.	Etats de vigilance et surveillance en situations de crise	174
5.5.3.	Actions d'urgence.....	179
5.5.4.	Dispositions post-événements.....	183
5.6.	Déclaration des Événements Importants pour la Sûreté Hydraulique	186
6.	Bibliographie.....	188

Table des matières des figures

FIGURE 1.1 : LES TROIS COMPOSANTES PRINCIPALES D'UN SYSTEME ENDIGUE FLUVIAL : MILIEU(X) EXTERIEUR(S) « COURS D'EAU », SYSTEME DE PROTECTION ET MILIEU EXTERIEUR « ZONE PROTEGEE » (D'APRES B. BEULLAC 2011).....	18
FIGURE 1.2: LES TROIS COMPOSANTES PRINCIPALES D'UN SYSTEME ENDIGUE MARITIME : MILIEU(X) EXTERIEUR(S) « MER », SYSTEME DE PROTECTION ET MILIEU EXTERIEUR « ZONE PROTEGEE »	18
FIGURE 1.3: LES TROIS COMPOSANTES PRINCIPALES D'UN SYSTEME ENDIGUE MIXTE : MILIEU(X) EXTERIEUR(S) « COURS D'EAU ET MER », SYSTEME DE PROTECTION ET MILIEU EXTERIEUR « ZONE PROTEGEE »	19
FIGURE 1.4 : EXEMPLE DE CROISEMENT ENTRE LIGNES D'EAU DE CRUE ET CRETES DE DIGUES. TRADUCTION SPATIALE DU RESULTAT (VALEURS DE HAUTEUR CORRIGEEES SUR LA BASE DE LA LIGNE D'EAU DE PERIODE DE RETOUR 100 ANS EGALE A ZERO). SOURCE DREAL CENTRE ET IRSTEA (ETUDE DE DANGERS DU VAL D'ORLEANS)	23
FIGURE 1.5 : EXEMPLE DE PROFIL EN TRAVERS DE COMPOSANTS GEOTECHNIQUES SOURCE DREAL CENTRE ET IRSTEA (ETUDE DE DANGERS DU VAL D'ORLEANS)	24
FIGURE 1.6 : PRINCIPAUX COMPOSANTS DE DIGUE EN REMBLAI (NOTE : LE SCHEMA PRESENTE LES DIFFERENTS COMPOSANTS POTENTIELS D'UNE DIGUE. L'ASSOCIATION DE COMPOSANTS CI-DESSUS NE CORRESPOND PAS A UN CAS REEL.).....	25
FIGURE 1.7 : DIGUE HOMOGENE SUR FONDATION IMPERMEABLE	30
FIGURE 1.8 : DIGUE HOMOGENE SUR FONDATION PERMEABLE SANS ANCRAGE ETANCHE	30
FIGURE 1.9 : DIGUE HOMOGENE SUR FONDATION PERMEABLE AVEC ANCRAGE D'ETANCHEITE	30
FIGURE 1.10 : COUPE TYPE D'UNE LEVEE DE LOIRE REPRESENTATIVE D'UNE DIGUE HISTORIQUE (CEMAGREF 2004 D'APRES DION 1927).....	31
FIGURE 1.11 : DIGUE ZONEE A NOYAU SUR FONDATION IMPERMEABLE	32
FIGURE 1.12 : DIGUE ZONEE A NOYAU SUR SOL PERMEABLE SANS ANCRAGE D'ETANCHEITE.....	32
FIGURE .1.13 : DIGUE ZONEE A NOYAU SUR SOL PERMEABLE AVEC ANCRAGE D'ETANCHEITE.....	32
FIGURE 1.14 : DIGUE ZONEE A MASQUE ETANCHE SUR FONDATION HOMOGENE ; A NOTER LA NECESSITE D'UNE PROTECTION CONTRE LA DESSICATION DU MASQUE EN ARGILE.....	33
FIGURE 1.15 : DIGUE CONFORTEE COTE EAU ET COTE PROTEGE PAR L'AJOUT DE RECHARGES.....	34
FIGURE 1.16: DIGUE REHAUSSEE PAR ELARGISSEMENT COTE PROTEGE	34
FIGURE 1.17 : DIGUE COMPOSITE AVEC SOUTÈNEMENT ANCRE COTE EAU	35
FIGURE 1.18 : DIGUE COMPOSITE AVEC SOUTÈNEMENT PAR UN MUR POIDS COTE EAU.....	35
FIGURE 1.19 : DIGUE COMPOSITE ASSOCIANT PARAFUILLE, PERRE, COURONNEMENT. CAS FREQUENT EN MARITIME.....	36
FIGURE 1.20 : DIGUE COMPOSITE ASSOCIANT PROTECTION EN ENROCHEMENT, MUR ANTI-FRANCHISSEMENT... CAS FREQUENT EN MARITIME.....	36
FIGURE 1.21 : DIGUES COMPOSITES AVEC MUR EN CRETE	37
FIGURE 1.22 : CAS COMPLEXE D'UNE DIGUE MELANT REMBLAI HOMOGENE, RIDEAU D'ETANCHEITE, BATIMENT.....	38
FIGURE 2.1 : ORIGINE DES DEFAILLANCES HYDRAULIQUES DES DIGUES.....	40
FIGURE 2.2 : RELATIONS ENTRE FORMES, FONCTIONS ET DEFAILLANCES DES DIGUES	42
FIGURE 2.3 : EROSION COTE TERRE	42
FIGURE 2.4: ÉROSION EXTERNE DU CORPS OU DE LA FONDATION D'UNE DIGUE EN TERRE (AFFOUILLEMENTS) COTE EAU.....	43
FIGURE 2.5 : ÉROSION EXTERNE ET ABAISSEMENT DU PROFIL EN AMONT DE LA DIGUE (AVANT PLAGE OU SEGONAL)	43
FIGURE 2.6 : PRINCIPE DE LA SURVERSE ET EXEMPLE DE BRECHE DANS UN OUVRAGE	43
FIGURE 2.7A : PRINCIPE DE L'ÉROSION REGRESSIVE	44
FIGURE 2.7B : PRINCIPE DE L'ÉROSION CONCENTREE	44
FIGURE 2.7C : PRINCIPE DE L'ÉROSION DE CONTACT	45
FIGURE 2.7D : PRINCIPE DE LA SUFFUSION.....	45
FIGURE 2.8 : ÉROSION INTERNE DU CORPS DE DIGUE (A), DE LA FONDATION (B) OU LE LONG D'UN OUVRAGE TRAVERSANT (C) UN OUVRAGE EN TERRE	45
FIGURE 2.9 : GLISSEMENTS SUPERFICIELS AFFECTANT UN CORPS DE DIGUE EN TERRE	46

FIGURE 2.10 : GLISSEMENT ROTATIONNEL PROFOND AFFECTANT UN CORPS DE DIGUE EN TERRE ET SA FONDATION	47
FIGURE 2.11: GLISSEMENT TRANSLATIONNEL AFFECTANT UN CORPS DE DIGUE EN TERRE.....	47
FIGURE 2.12: TASSEMENT AFFECTANT UN CORPS DE DIGUE EN TERRE.....	47
FIGURE 2.13 : POINÇONNEMENT D'OUVRAGES RIGIDES INCLUS DANS UNE DIGUE COMPOSITE	48
FIGURE 2.14 : GLISSEMENT SUPERFICIEL AFFECTANT UN OUVRAGE EN CRETE	48
FIGURE 2.15 : GLISSEMENTS SUR LA BASE D'OUVRAGES RIGIDES.....	48
FIGURE 2.16 : RENVERSEMENTS D'OUVRAGES RIGIDES	49
FIGURE 2.17 : AFFOUILLEMENTS ET DEFATS DE BUTEE DE DIGUES COMPOSITES.....	49
FIGURE 2.18 : GLISSEMENTS GENERALISES AFFECTANT DES OUVRAGES RIGIDES	49
FIGURE 2.19 : PRINCIPES DES FRANCHISSEMENTS	50
FIGURE 2.20 – A – EROSION D'UNE DIGUE NON PROTEGEE POURTANT CONSTITUEE DE MATERIAU CONTENANT DES ELEMENTS PIERREUX ; B – L'EROSION DU TALUS EST ICI RALENTIE PAR LES RACINES D'ARBRES MAIS CES DERNIERS SONT AINSI FRAGILISES EN EN CAS DE CHUTE PAR LE VENT LE DEPART DE LA SOUCHE CONSTITUERA UNE « ENCOCHE » DANGEREUSE POUR LA DIGUE.....	51
FIGURE 2.21 – DIGUE DES BAS-CHAMPS : ZONES INONDEES SUITE AUX BRECHES DE FEVRIER 1990	52
FIGURE 2.22 – DIGUE DU GENIE : ABRASION DES PIERRES COTE MER (LES JOINTS CIMENT RESTENT EN SAILLIE) ET EFFRITEMENT DE LA CRETE.....	52
FIGURE 2.23 – DIGUE DU GENIE : BETON PROJETE COTE ROUTE (ECLATE PAR ENDROIT SUITE AU GONFLEMENT DE LA MAÇONNERIE) ET REPARATION D'UNE BRECHE PAR DES ENROCHEMENTS LIES AU BETON COTE MER.	53
FIGURE 2.24 – DIGUE DE PORS KAÏG : EXEMPLE D'ABRASION DU BETON PAR LES GALETS	53
FIGURE 2.25 – A- SOUS-CAVAGE DE LA DIGUE D'ERROMARDIE (ESTRAN PRINCIPALEMENT SABLEUX)-B- DIGUE DE SAINT CLEMENT LES BALEINES : ABRASION DU PERRE ET BAISSSE DU "PLATIER" CALCAIRE NECESSITANT UN ENDUIT SUR LE PAREMENT ET DES RECHARGES EN PIED DE TALUS.	54
FIGURE 2.26 – DIGUES DU REYRAN : A- COUPE TYPE A LA CONSTRUCTION, ON REMARQUE QUE LES DALLES DE PROTECTION DU TALUS S'APPUIENT SUR UNE LONGRINE EN BETON POREUX ; B- L'EROSION A CAUSE L'ENDOMMAGEMENT ET MEME LA DISPARITION DE CERTAINES PORTIONS DE LONGRINES AVANT L'EVENEMENT ; C- PENDANT LA CRUE, EROSION DU TALUS QUI N'EST PLUS PROTEGE APRES LE GLISSEMENT DES PLAQUES BETON ; D-MISE EN PLACE APRES EVENEMENT D'UNE PROTECTION PROVISOIRE EN SACS REMPLIS DE TERRE.....	55
FIGURE 2.27 – DIGUE DU BOUIN : EROSION DU REMBLAI PAR SURVERSE (PHOTO A COTE ZP) JUSQU'A APPARITION DE VIDES SOUS LES PLAQUES QUI S'AFFAISSENT (PHOTO B COTE MER).	56
FIGURE 2.28 – DIGUE OUEST DE SAINT CLEMENT LES BALEINES : EFFONDREMENT DE LA DALLE DE CRETE (PHOTO A) QUI PEUT SE POURSUIVRE PAR UN EFFONDREMENT DE LA PROTECTION EN MAÇONNERIE DU TALUS JUSQU'A FORMATION D'UNE BRECHE (PHOTO B) – SOURCE DDTM 17.	56
FIGURE 2.29 -- DIGUE MAUBOUX (58) : RUPTURE DU REMLAI PAR SURVERSE AU DROIT D'UN PASSAGE A BOVINS AVEC UN AFFOUILLEMENT PROFOND AU NIVEAU DE LA RUPTURE	57
FIGURE 2.30 – CORDON DUNAIRE DE LA FAUTE SUR MER : A- PASSAGE PIETON ENGENDRANT UN POINT BAS SUR LA DUNE ; B- BRECHE DANS LA DUNE LORS DE LA TEMPETE XYNTHIA, AU DROIT D'UN PASSAGE PIETON AINSI QUE DE CABLES ET D'UNE CONDUITE.....	58
FIGURE 2.31 – AFFAISSEMENT PLATE-FORME DERRIERE LE QUAI DE BOYARDVILLE (PHOTO A) DETAIL DE L'EROSION ET DEFAT D'ETANCHEITE DU PAREMENT DE LA DIGUE DU NOULEAU (PHOTO B).	59
FIGURE 2.32 – DIGUE DE LA MOSSON APRES LA RUPTURE : CABLES MIS EN PLACE DANS LA TRANCHEE ET RESTES DE L'ANCIENNE FONDATION.....	59
FIGURE 2.33 – DIGUE DU REART : EROSION DU TALUS COTE COURS D'EAU ET PRESENCE DE TERRIERS COTE ZP. 60	
FIGURE 2.34 : A– DIGUE DE LA MOSSON RIVE GAUCHE APRES GLISSEMENT DU TALUS ; B- AFFAISSEMENT DE LA DIGUE DU RHIN DE 100 M DE LONGUEUR SUR 40 CM DE HAUTEUR	61
FIGURE 3.1 : EVALUATIONS DES DIGUES (EVALUATION DES PERFORMANCES, DIAGNOSTICS ET ANALYSES DE RISQUE) ET PRISE DE DECISION PAR LES GESTIONNAIRES DE DIGUES (SOURCE INTERNATIONAL LEVEE HANDBOOK [2013], CONTRIBUTION R. TOURMENT, IRSTEA).....	67
FIGURE 3.2 : UNE COPIE D'ECRAN DE L'APPLICATION SIRSDIGUES (SYMADREM).....	73
FIGURE 3.3 : EXEMPLE D'ANALYSE DES LIGNES D'EAU DE DIFFERENTES CRUES SUR LE VAL D'ORLEANS	75
FIGURE 3.4 : LES HYDROGRAMMES DES CRUES DU RHONE DE SEPTEMBRE ET NOVEMBRE 2002 ET DECEMBRE 2003 (SOURCE CNR ET IRSTEA).....	76
FIGURE 3.5 : EXEMPLE DE GRILLE D'INTENSITE DE L'ALEA D'INONDATION	86

FIGURE 3.6 : EXEMPLE DE CARTE D’ALEA D’INONDATION POUR UN SCENARIO DE BRECHE SUR LE SYSTEME DE PROTECTION D’ORLEANS.....	86
FIGURE 3.7 : EXEMPLE DE GRILLE DE CRITICITE	88
FIGURE 3.8: DIAGNOSTICS PERIODIQUES, NIVEAUX DE DETAIL ET FREQUENCES (SOURCE : ILH CHAPITRE 5)	89
FIGURE 4.1 : EXEMPLES DES DIFFERENTS NIVEAUX SUR UN TRONÇON DE DIGUE FLUVIALE (SOURCE R. TOURMENT).....	92
FIGURE 4.2 – DEPOT DANS L'ESPACE INTER-DIGUES ET APPROFONDISSEMENT DU LIT MINEUR CONSECUTIF A L’ELEVATION DU NIVEAU D’EAU DUE A LA SUPPRESSION DES DEBORDEMENTS DANS LE LIT MAJEUR	106
FIGURE 4.3 : PROTECTION EN ENROCHEMENT COTE RIVIERE ET MISE EN PLACE D'UN GRILLAGE ANTI-FOUISSEUR ET GEOSYNTHETIQUE DE RENFORCEMENT DE LA TERRE VEGETALE COTE ZONE PROTEGEE ...	124
FIGURE 4.4 : SCHEMA ECOULEMENTS AU TRAVERS D'UN REMBLAI NON DRAINE	125
FIGURE 4.5 : EXEMPLE DE RENFORCEMENT A LA SURVERSE D'UNE DIGUE HOMOGENE : TRONÇON DEVERSANT137	
FIGURE 4.6 : PRINCIPE DES DEUX TYPES DE SOLUTIONS PERMETTANT D’EVITER LE RISQUE D'EROSION INTERNE (SOURCE R. TOURMENT, FORMATIONS DIGUES).....	137
FIGURE 4.7 : EXEMPLE DE SOLUTION D'ETANCHEITE DU COTE EAU (SOURCE SYMADREM / EGISEAU)	138
FIGURE 4.8 : EXEMPLE DE SOLUTION DE FILTRATION ET DRAINAGE COTE ZONE PROTEGEE (SOURCE SYMADREM / ISL).....	138
FIGURE 4.9 : EXEMPLE DE CONFORTEMENT PAR PALPLANCHES POUR LUTTER CONTRE LES FFOUILLEMENTS EN PIED DE TALUS	139
FIGURE 4.10 : REMPIETEMENT D’UNE DIGUE EN MACONNERIE, SUITE A UNE BAISSSE DU NIVEAU DE L’ESTRAN, PAR LA REALISATION D’UNE BUTTEE EN BETON	139
FIGURE. 4.11 : EXEMPLE DE CONFORTEMENT D'UNE DIGUE DE COURS D'EAU PROTEGEE PAR DES PLAQUES EN BETON DETERIOREES LORS D'UNE CRUE	140
FIGURE. 4.12 : EXEMPLE 1 DE CONFORTEMENT D'UNE DIGUE A BUTS MULTIPLES	141
FIGURE. 4.13 : EXEMPLE 2 DE CONFORTEMENT D'UNE DIGUE A BUTS MULTIPLES	142
FIGURE. 4.14 : SURELEVATION D’UNE DIGUE AVEC RECHARGE COTE FLEUVE.....	143
FIGURE. 4.15 : SURELEVATION D’UNE DIGUE PAR UN MUR PARAPET	144
FIGURE 4.16 : EXEMPLE D’ORGANIGRAMME CHANTIER	149
FIGURE 5.1 : EXEMPLE DE SCHEMA ORGANISATIONNEL DE SURVEILLANCE ET D’INTERVENTION EN CRUE DU SYMADREM (SOURCE R. TOURMENT)	172
FIGURE 5.2 : POSE DE SACS AUTOUR DU DEOUCHÉ COTE VAL D’UNE CONDUITE TRAVERSANTE EN CAMARGUE181	
FIGURE 5.3 : DISPOSITION DE SAC EN STABILISATION PROVISoire DE TALUS AU DROIT D’UNE RESURGENCE COTE VAL	181
FIGURE 5.4 : CONFORTEMENT SOMMAIRE DE TALUS COTE FLEUVE REALISE ENCRUE.....	182
FIGURE 5.5 : VUE PANORAMIQUE DES REMBLAIS DE FERMETURE EN CRUE ET POST-CRUE DE LA BRECHE DE CLAIRE FARINE (PETIT RHONE RD, DECEMBRE 2003).....	182
FIGURE 5.6 : CONFORTEMENT PAR MISE EN PLACE D’UN REMBLAI PROTEGE PAR ENROCHEMENTS DE LA DIGUE DE COMPS (30) SUITE A LA CRUE DE 2002 – PHOTO IRSTEA.....	183

Table des matières des tableaux

TABLEAU 1.1 : EXEMPLE DE TYPOLOGIE DE FONCTIONS HYDRAULIQUES GENERIQUES DES SOUS-SYSTEMES DE DIGUES (SOURCE IRSTEА – METHODOLOGIE EN COURS D'ELABORATION)	21
TABLEAU 1.2 : LES PRINCIPAUX TYPES DE SOUS-SYSTEMES DE DIGUES ET LEURS FONCTIONS HYDRAULIQUES (SOURCE IRSTEА – METHODOLOGIE EN COURS D'ELABORATION)	22
TABLEAU 1.3 : EXEMPLE DE FAMILLES DE FONCTIONS GEOTECHNIQUES ET STRUCTURELLES DES COMPOSANTS DES DIGUES ET LEUR CARACTERISATION (SOURCE IRSTEА – METHODOLOGIE EN COURS D'ELABORATION)	24
TABLEAU 1.4 : LES PRINCIPAUX TYPES DE COMPOSANTS GEOTECHNIQUES DE DIGUES ET LEURS FONCTIONS ASSOCIEES (SOURCE IRSTEА – METHODOLOGIE EN COURS D'ELABORATION)	24
TABLEAU 1.5 – EXEMPLE DE RELATIONS COMPOSANTS - FONCTIONS INDIVIDUELLES POUR UNE DIGUE HOMOGENE	28
TABLEAU 3.1 : PRINCIPE D'AGREGATION DE L'ALEA DE RUPTURE POUR UN TRONÇON DE DIGUE	79
TABLEAU 3.2 : EXEMPLE D'ECHELLE DE PROBABILITES D'ALEA D'INONDATION	85
TABLEAU 3.3 : EXEMPLE DE GRILLE D'ENDOMMAGEMENT POUR UN TYPE D'ENJEU DONNE	87
TABLEAU 3.4 : EXEMPLE DE CLASSES DE GRAVITE DES SCENARIOS D'INONDATION	87
TABLEAU 4.1 – ADAPTATION DU REMBLAI A LA FONDATION (SI ETANCHEITE SOUHAITEE EN FONDATION, CAS LE MOINS FREQUENT)	117
TABLEAU 4.2 : RESISTANCE A L'EROSION D'UN SOL NU OU ENGAZONNE.....	122
TABLEAU 4.3 : CHOIX D'UN SYSTEME DE PROTECTION	123
TABLEAU 4.4 : RECAPITULATIF DES PRINCIPALES SITUATIONS DE PROJET POUR LES DIGUES DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS.....	131
TABLEAU 4.5: VALEURS INDICATIVES DES VITESSES CRITIQUES ET LIMITES DE COURANT POUR LES MATELAS GABIONS (GUIDE ENROCHEMENT, 2009).....	134
TABLEAU 4.6 : PRINCIPALES SOLUTIONS DE CONFORTEMENT. (D'APRES R. TOURMENT ET P. MERIAUX).....	136
TABLEAU 4.7 – SPECIFICATIONS RELATIVES AU BETON UTILISE POUR LES FONDATIONS D'OUVRAGES, VIS-A-VIS DES CLASSES D'EXPOSITION, ET DES RISQUES D'ALCALI-REACTION ET DE REACTION SULFATIQUE INTERNE	147
TABLEAU 5.1 : OBLIGATIONS DES PROPRIETAIRES DE DIGUE EN LIEN AVEC LA SURVEILLANCE DES OUVRAGES	156
TABLEAU 5.2 : SURVEILLANCE VISUELLE DE ROUTINE DES DIGUES EN REMBLAI – PRESENTATION SYNOPTIQUE DES POINTS A OBSERVER [MERIAUX ET AL, 2001]	159
TABLEAU 5.3 : SURVEILLANCE VISUELLE DE ROUTINE DES DIGUES EN MAÇONNERIE ET EN BETON – PRESENTATION SYNOPTIQUE DES POINTS A OBSERVER [MERIAUX ET AL, 2001].....	160
TABLEAU 5.4 : DEGRADATIONS, CAUSES PROBABLES ET REPARATIONS ENVISAGEABLES DES ENROCHEMENTS	169
TABLEAU 5.5 : SURVEILLANCE VISUELLE EN CRUE DES DIGUES EN REMBLAI - PRESENTATION SYNOPTIQUE DES POINTS A OBSERVER D'APRES [MERIAUX ET AL, 2001].....	178
TABLEAU 5.6 : SURVEILLANCE VISUELLE POST-CRUE DES DIGUES EN REMBLAI - PRESENTATION SYNOPTIQUE DES POINTS A OBSERVER D'APRES [MERIAUX ET AL, 2001].....	185
TABLEAU 5.7 : ÉCHELLE DE GRAVITE DES EVENEMENTS IMPORTANTS POUR LA SURETE HYDRAULIQUES	187

Préambule

Portée et objectifs du guide

Généralement, en France, les digues de protection contre les inondations sont des ouvrages hydrauliques de faible hauteur sur terrain naturel (<10m), et de grande longueur (plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres). Ils sont le plus souvent anciens (XIX^e siècle) voire très anciens (remontant jusqu'au Moyen Âge pour leur mise en place initiale). Ils sont fortement hétérogènes, de par leur construction à partir de matériaux prélevés à proximité immédiate, leur historique (rehausses successives, réparations, inclusions, ...), souvent mal connus et leur gestion souvent récente est encore dans beaucoup de cas perfectible.

Le but de ce document est de constituer une base technique commune permettant une compréhension mutuelle des acteurs du domaine (gestionnaires d'ouvrages, services de l'Etat, bureaux d'ingénierie, autres gestionnaire du risque inondation ou du territoire) au cours de leurs échanges ; il ne s'agit pas d'un document à caractère prescriptif ni réglementaire. Les concepts et principes présentés le sont dans un but de clarification et de partage de vocabulaire, voire de certaines méthodes. Nous avons tenté d'y apporter une certaine rigueur dans l'analyse, permettant que ces bases soient solides et justifiées.

On y traite des ouvrages de protection contre les inondations d'origine fluviale et/ou maritime, et donc du cas des estuaires également. A priori les spécificités des protections en milieu strictement torrentiel ne sont pas traitées, même si de nombreuses notions figurant dans ce guide peuvent leur être applicables. En ce qui concerne les rivières torrentielles, à forte vitesse, à lit fortement mobile et avec un fort charriage, en général non concernées par les phénomènes de laves torrentielles, les principes généraux exposés dans ce guide s'appliquent même si on n'y retrouve que peu d'exemples spécifiques, ce que l'on s'attachera à corriger dans une édition ultérieure.

Les digues de canaux ne sont pas directement concernées ; réglementairement ces ouvrages sont d'ailleurs assimilés à des barrages plutôt qu'à des digues. En revanche les digues de rivières canalisées (comme le Rhône ou le Rhin) pour lesquelles une tranche de la hauteur utile est dédiée au stockage et/ou au passage des crues sont partiellement concernées par beaucoup de notions abordées dans ce guide, bien que généralement considérées par la réglementation comme des barrages.

Les solutions proposées ne prétendent pas à l'exhaustivité et les principes généraux doivent être adaptées, notamment en termes de complexité des études (diagnostics, conception.....) au vu des enjeux protégés, de l'accidentologie d'ouvrages et de systèmes analogues, pour tenir compte de la diversité des systèmes, le présent document ne pouvant avoir pour vocation à être utilisé "clé en main" pour ces activités.

Des solutions innovantes "intelligentes" pourront par ailleurs être proposées, comme des solutions plus "rustiques" basées sur un retour d'expérience positif et des règles de l'art empiriques mais néanmoins partagées au sein de la communauté.

Contexte réglementaire

Ce document n'a pas vocation à contenir en tant que telles des prescriptions à caractère réglementaire, alors que la réglementation des digues, en tant qu'ouvrages de protection des populations contre les inondations fluviales et les submersions marines, est en train de connaître, à l'heure où ce présent référentiel technique est publié, une profonde évolution.

Sans anticiper sur la parution du décret très attendu par les acteurs en charge de ces ouvrages, le décret « digues », il convient de rappeler les avancées très importantes de la loi n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et

d'affirmation des métropoles pour ce qui est communément appelé « la gouvernance des digues ».

En effet, la loi confie une compétence obligatoire à compter du 1er janvier 2016 aux communes et aux établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre pour les actions de prévention des inondations.

Dans ce contexte, il appartiendra à ces acteurs publics, et à eux seuls ! d'organiser librement la gestion des digues souhaitée, dans le cadre plus général de la prévention des inondations. Cette action s'inscrit, naturellement, dans le respect de la réglementation. La loi sur l'eau, à cet égard, continuera de constituer un cadre général pour les digues, dont l'établissement ne doit pas porter atteinte à l'environnement ni avoir des conséquences négatives pour les territoires non protégés : chacun sait que l'endiguement d'une rive d'un cours d'eau ne peut se faire sans la prise en compte des territoires de la rive opposée ou des territoires en amont ou en aval de la partie endiguée.

Les digues resteront des ouvrages hydrauliques afin de continuer de bénéficier des principales règles qui ont été fixées par le décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 et donc de ce fait de limiter les risques de leur rupture.

Cependant, conformément aux dispositions de l'article L.562-8-1 du code de l'environnement sur la base desquelles le décret digues sera pris, la réglementation se focalisera sur la fonction de protection qui est apportée par les digues. Cette fonction sera déclinée à travers des paramètres essentiels du point de la sécurité des personnes :

- le territoire précisément délimité où la protection « pieds au sec » sera garantie ;
- le niveau de cette protection (la crue de période de retour « 100 ans », la tempête de type « Xynthia » etc.) qui sera décidé par la collectivité responsable ;
- en dehors du territoire protégé ou à l'intérieur de celui-ci mais en cas d'aléa plus intense que celui correspondant au niveau de protection, la cartographie des venues d'eau dangereuses.

Le but de cette réglementation sera donc de mieux connaître la consistance de la protection apportée aux personnes et ses limites, afin que les services en charge de la mise en sécurité préventive des personnes puissent intervenir à temps quand un aléa excédant les possibilités de protection est annoncé.

Dans ce contexte les concepts techniques présentés dans ce référentiel sont issus de l'état de l'art de l'ingénierie des ouvrages hydrauliques sans être nécessairement adossés directement à des obligations réglementaires ; par exemple les notions de niveaux de sûreté ou de danger d'une digue, issus du domaine des barrages et que le lecteur trouvera dans ce référentiel, présentent un intérêt pratique pour le concepteur de digues bien que non reliées à des définitions réglementaires.

De même, la notion de diagnostic se réfère à la phase préliminaire de tous les travaux qu'un maître d'ouvrage souhaite réaliser, ou à une opération régulière de connaissance de l'état de ses ouvrages lui servant d'aide à la décision, et non nécessairement à une phase obligatoire qui serait imposée par la réglementation.

Enfin, la criticité des scénarios d'inondation derrière la digue, qui est établie à l'occasion d'une étude de dangers, sera d'avantage un outil d'aide à la décision pour les services en charge de la mise en sécurité préventive des populations en cas de crise qu'une invite à renforcer la digue sur tel ou tel tronçon, décision qui restera, dans le cas général, du seul ressort de la collectivité territoriale responsable des actions de prévention au bénéfice de son territoire.

D'une façon générale, le contenu du présent référentiel technique pourra être utilement mis à profit par les gestionnaires des systèmes de protection et leurs maîtres d'œuvre, pour décrire, concevoir, réaliser et entretenir les ouvrages, dans le but de répondre à leurs obligations comme dans un souci de bonne gestion de leur patrimoine. Il appartiendra à ces gestionnaires et bureaux d'étude de choisir les normes, méthodes et justificatifs qu'ils jugent appropriés à chaque cas d'espèce.

Introduction - Éléments de contexte sur les digues et la protection contre les inondations

Au regard des dispositions de l'article L. 562-8-1 du code de l'environnement, les « digues » sont « les ouvrages construits en vue de prévenir les inondations et les submersions ». Elles sont conçues, entretenues et exploitées de façon à assurer la protection contre les inondations fluviales ou les submersions marines de zones généralement urbanisées pour lesquelles l'importance des enjeux justifie la présence de telles protections. La protection d'une telle zone potentiellement inondable est assurée par un ensemble d'éléments qui dans leur globalité constituent un système de protection. C'est ce système qui assure la fonction de protection, et doit donc faire l'objet des analyses techniques (analyse de risque ou étude de dangers entres autres).

Les systèmes de protection comprennent des ouvrages dont la vocation est la protection. Il s'agit de constructions établies au-dessus du terrain naturel : remblais, murs en maçonnerie ou en béton, quais, batardeaux... Notons que ces constructions peuvent être organisées en plusieurs « lignes de défense » délimitant des « casiers » dont le remplissage progressif permet de différer l'inondation de la zone principale à protéger et de modérer les vitesses d'écoulement et de montée du niveau de l'eau. C'est l'ensemble de ces ouvrages qui fait l'objet des prescriptions techniques définissant les « règles aptes à en assurer l'efficacité et la sûreté » mentionnées au premier alinéa de l'article L. 562-8-1 du code de l'environnement.

Les systèmes de protection peuvent également comprendre :

- des éléments du relief : collines, cordons dunaires, falaises ;
- des zones aménagées réservées au ressuyage des venues d'eau secondaires ou des « franchissements »¹ ;
- des zones (aménagées ou non aménagées) destinées à recevoir puis à écouler les eaux pouvant résulter du dépassement de l'objectif de protection (surverse) ou de dysfonctionnements (brèches) ;
- des organes de manœuvre (vannes, clapets, pompes...) destinés à gérer les eaux présentes à l'intérieur du périmètre englobé par le système de protection (ou zone protégée, voir plus bas) dans des conditions de sécurité suffisantes pour les personnes et les biens. Ces organes peuvent évidemment faire l'objet de prescriptions entraînant leur intégration au parc du gestionnaire de digues, mais il est aussi fort possible que leur gestionnaire soit différent de celui-ci ;
- des ouvrages dont la vocation n'est pas la protection mais qui assurent néanmoins cette fonction (infrastructures de transport, plateformes, ...) ;

assurant une continuité topographique permettant aux ouvrages de protection de remplir leur objectif.

Les systèmes de protection peuvent donc être des systèmes complexes dont le fonctionnement hydraulique et les performances géotechniques et structurelles doivent être soigneusement calibrés en fonction des enjeux à protéger. Pour cela, il est nécessaire de définir la zone géographique que l'on souhaite effectivement protéger, c'est ce que l'on

¹ Les « franchissements » sont couramment pris en compte pour les ouvrages littoraux situés en limite de l'estran. Ils correspondent aux déferlements d'une partie des vagues par-dessus les ouvrages. Pour les digues fluviales habituelles, une revanche suffisante est requise pour éviter de tels phénomènes de déferlement dont l'ampleur est fortement réduite.

appellera la « zone protégée » et le niveau d'eau² pour lequel on cherche à assurer la protection, c'est ce que l'on appellera « l'objectif de protection ».

Dans nombre de circonstances résultant d'une géographie complexe et de la nature des phénomènes hydrologiques constatés, pour une même zone géographique, certaines parties du territoire concerné pourront être inondées « avant d'autres » ou plus précisément pour des phénomènes météorologiques moins intenses et plus fréquents. Cela sera, par exemple le cas au voisinage d'une confluence entre un cours d'eau principal (qui va déterminer la démarche de prévention contre les risques d'inondation) et un de ses affluents, lorsque la zone protégée est en amont de la confluence. La nécessité de maintenir l'écoulement de l'affluent impose alors de laisser « libre » la partie aval de la zone protégée autorisant la remontée du niveau de l'eau par effet de remous par l'aval : la zone aval sera alors inondée pour des niveaux de crue inférieurs à ceux conduisant à une surverse à l'amont. Cela peut conduire à identifier au sein de la zone protégée des « secteurs » bénéficiant d'une certaine progressivité de la protection, y compris au-delà de l'objectif de protection défini par l'autorisation réglementaire.

Au-delà de l'objectif de protection défini pour un système de protection, il est nécessaire d'évaluer le comportement de ce système lorsque des phénomènes météorologiques de plus grande ampleur se produisent. Selon les cas, on peut avoir une rupture d'un tronçon de l'ouvrage ou un risque de rupture augmentant rapidement, le niveau atteint par l'eau correspond alors au niveau de sûreté de l'ouvrage (au sens technique habituel issu de l'analyse de stabilité traditionnelle des barrages). Dans d'autres cas, notamment en présence de déversoirs résistant à une certaine surverse, des quantités d'eau significatives s'écoulent vers la zone protégée sans pour autant générer des dommages importants aux tronçons de digues. Dans ce deuxième cas, on aura une inondation d'une certaine importance mais les ouvrages existants seront à nouveau disponibles dès la fin de cette inondation.

Dans tous les cas, et indépendamment de l'analyse des dommages matériels aux ouvrages, cette évaluation doit permettre de préciser le moment au-delà duquel le phénomène météorologique provoque des entrées d'eau dans la zone protégée d'une ampleur telle que le gestionnaire de ces ouvrages n'est plus en mesure de maintenir le niveau de l'eau ou les vitesses d'écoulement en dessous d'un niveau acceptable au regard de la sécurité des personnes dans cette zone protégée. Il est important que cette évaluation permette d'évaluer, pour des événements particulièrement importants, les marges dont on pourra disposer pour permettre la mise en sécurité de la population après les premiers déversements importants³.

Quelles que soient les circonstances qui pourraient entraîner des venues d'eau importantes dans la zone protégée, on doit considérer qu'une telle situation peut réellement se produire et qu'elle doit pouvoir être convenablement anticipée par le gestionnaire du système de protection. Cela ne peut être convenablement fait qu'avec l'aide d'un dispositif de prévision et d'alerte fiable et raisonnablement précis, et si les délais de prévision avant la concrétisation de la pointe de la crue au droit de la zone protégée sont compatibles avec ceux nécessaires à la mise en action des processus de mise en sécurité par les services chargés de l'organisation des secours (plus la population à mettre en sécurité est importante, plus les délais de mise en sécurité seront importants).

La définition de la zone protégée ne se limite pas à une simple analyse hydraulique des phénomènes d'inondation ou de submersion. Le choix et le dimensionnement du système de protection peuvent être largement influencés par la détermination de l'objectif de protection.

² Le terme « niveau d'eau » fait naturellement penser à une cote et peut conduire à confusion notamment pour le domaine maritime pour lequel on parlera plutôt d'aléas ; ces notions sont explicitées dans le présent document (§4.1).

³ Il convient de bien distinguer les notions de sûreté des ouvrages et de sécurité des personnes qui sont fortement liées mais ne s'appréhendent pas de la même manière.

Dans un contexte simple, l'analyse hydraulique rudimentaire indique que, pour une zone inondable de largeur limitée, en présence d'un remblai séparant « entièrement » les enjeux des zones de venues d'eau, la zone située à une altitude inférieure à celle du sommet de ce remblai formant « digue » (en tenant compte le cas échéant de la ligne d'eau naturelle en situation de crue) va être protégée des eaux⁴. Cette analyse élémentaire présente comme principal atout sa simplicité, à la fois pour tracer les limites concernées et pour expliquer le mécanisme théorique d'évaluation. Elle donne aussi une évaluation « enveloppe » des zones concernées lorsque le relief naturel est « marqué ».

Dans nombre de cas, cette approche est insuffisante, en particulier dans les zones de relief très plat ou pour les zones situées de part et d'autre de cours d'eau perchés. L'utilisation des données disponibles sur les crues historiques et la mise en œuvre de modèles numériques ou physiques deviennent alors nécessaires. L'utilisation des modèles sera souvent indispensable, même dans des cas simples lorsque la précision exigée sera élevée.

L'analyse hydraulique conduit à l'enveloppe des zones soustraites à l'inondation pour le phénomène correspondant à l'objectif de protection. La zone que l'on cherche à protéger est située à l'intérieur de cette enveloppe et peut ne comporter qu'une fraction limitée de cette enveloppe. Le gestionnaire peut, par exemple, utiliser des parties de cette enveloppe, lorsqu'elle ne comporte pas d'enjeu important, pour permettre le ressuyage ou pour assurer un stockage temporaire des venues d'eau. Dans le cas de phénomènes de courte durée, il est ainsi possible de traiter de façon séparée les phénomènes liés au niveau moyen de l'eau et les phénomènes de franchissement ou pour assurer une protection redondante destinée à prendre en compte des brèches limitées. C'est la notion de zone d'influence du système de protection

L'objectif de protection et l'objectif de sûreté d'un système de protection correspondent à des niveaux d'eau et/ou périodes de retour concernant globalement l'ensemble du système ou des grands sous-ensembles des systèmes particulièrement vastes (exemple de la Loire). Dans la mesure où le gestionnaire du système de protection doit être en mesure de justifier, a priori, l'absence d'inondation pour l'objectif de protection et l'absence de phénomène très dangereux pour l'objectif de sûreté, cette justification doit comporter des marges suffisantes pour tenir compte de la connaissance plus ou moins bonne des phénomènes extérieurs, de la connaissance plus ou moins bonne des conditions de réalisation des ouvrages (souvent anciens et mal documentés) et des évolutions naturelles du lit du cours d'eau ou de la zone côtière.

D'un point de vue technique, on identifie aussi parfois, pour un tronçon de remblai, le niveau de danger par analogie aux évaluations de stabilité des barrages. Cette notion, explicitement limitée tronçon par tronçon, traduit le niveau d'eau à partir duquel le risque d'apparition de phénomènes pouvant conduire à la rupture de l'ouvrage est significatif. Selon la structure du remblai et les dispositifs de protection ajoutés dans sa conception, la cinétique d'apparition d'une brèche est très variable. Par exemple, elle peut survenir pratiquement dès les premières surverses (cas des digues en terre « simples ») ou pour une hauteur de surverse nettement plus importante (cas des déversoirs qui sont des tronçons spécialement conçus pour résister – jusqu'à un certain point – à la surverse).

C'est pourquoi, la détermination des côtes de danger des tronçons ne peut être uniquement basée sur l'analyse hydrologique et hydraulique du système de protection. Elle doit être complétée par différentes études de stabilité de l'ouvrage prenant en compte les divers modes de rupture possible.

⁴ Naturellement les zones situées au-dessus de la crête ne sont pas inondables pour des crues de moindre importance.

1. Fonctions et typologie des ouvrages

Une digue est un ouvrage linéaire, en surélévation par rapport au TN, faisant partie d'un système de protection contre les inondations de cours d'eau ou de mer. Elle permet avec les autres structures de défense de protéger des zones inondables de la submersion. Sa fonction principale de protection est réalisée par le système dans son ensemble. Elle réalise sa fonction avec d'autres éléments tels que déversoirs, vannes, bassins tampons, stations de pompage, aires d'expansion des crues, barrages écréteurs, ... Des éléments naturels peuvent aussi participer au système de protection (terres, marais, cordons dunaires, plateformes rocheuses, berges hautes ...). Une digue de protection contre les inondations peut parfois s'intégrer dans un programme d'aménagement plus global du fleuve ou de la côte (aménagement hydroélectrique, navigation, alimentation en eau, protection du trait de côte...).

En principe, une digue est dimensionnée en cohérence avec le système dans son intégralité pour une crue ou un événement de projet de protection. Pour déterminer celle-ci, les chroniques des débits ou des hauteurs d'eau sont analysées statistiquement. Il est difficile pour la plupart des ouvrages historiques de savoir sur quel événement ils ont été dimensionnés. En cas de changement intervenant dans l'environnement du système (incision du lit du cours d'eau, fréquence des crues, subsidence, hausse du niveau marin...), le niveau de protection du système doit éventuellement être révisé. Les notions de niveaux de protection, sûreté et danger et d'événements associés sont explicitées au chapitre 4. La crue de référence des PPRI n'est en général pas liée directement à l'un ou l'autre de ces niveaux ; elle peut éventuellement coïncider avec l'un d'entre eux.

Pour réaliser sa fonction au sein du système, une digue peut agir de trois façons différentes :

- elle peut empêcher le passage de l'eau en retenant celle-ci en dehors de la zone protégée (fonction principale d'une digue de protection) ;
- elle peut canaliser le flux d'eau vers une zone non protégée pour éviter l'inondation dans la zone protégée ;
- elle peut contenir l'eau dans une zone tampon située en amont pour réduire l'inondation en aval. Dans ce cas, il peut s'agir d'un barrage (au sens réglementaire).

En domaine fluvial, une digue permet de canaliser le flux vers l'aval ainsi que de faire obstacle à l'écoulement pour protéger les zones adjacentes situées dans le lit majeur.

Dans un système de gestion des crues⁵, d'autres digues peuvent retenir l'eau en délimitant des zones tampons dans une partie du lit majeur à moindre enjeu volontairement prévue à cet effet, on parle alors de bassins, assimilables réglementairement et même techniquement à des barrages. Les zones d'expansion de crues, délimitées par des digues ne sont en revanche pas des zones où l'eau est retenue, mais bien des zones protégées, avec un niveau moindre que certaines des zones situées à l'aval

En domaine maritime, une digue ne joue pas le rôle de canalisation des flux ni de retenue mais uniquement d'obstacle aux intrusions d'eau.

Une digue, selon l'environnement dans lequel elle est située peut-être :

⁵ système d'étendue beaucoup plus large qu'un système de protection ou que le système endigué correspondant ; en général à l'échelle d'un bassin versant ou d'un sous-bassin.

- en eau en permanence ⁶ ;
- majoritairement sèche et en charge pendant les épisodes de hautes eaux ;
- alternativement sèche et en charge (principalement pour les digues en environnement maritime ou estuarien).

1.1. Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle permet la compréhension et la description synthétique du fonctionnement du système de protection étudié. Elle établit de façon formelle et exhaustive les relations fonctionnelles à l'intérieur et à l'extérieur du système. Il est proposé de mettre en œuvre la méthode APTE⁷ (Application aux Techniques d'Entreprise) [Bertrand de la Bretesche, 2000] qui a déjà été utilisée et adaptée avec succès pour les systèmes de génie civil.

La démarche d'analyse fonctionnelle comprend trois phases : la définition du système ; l'analyse fonctionnelle externe ; l'analyse fonctionnelle interne.

Le système est alors analysé à différentes échelles spatiales appelées granularités :

- Granularité 1 : le système de protection dans son ensemble et son environnement (pour l'analyse fonctionnelle externe) ;
- Granularité 2 : les sous-systèmes de digues (et éventuellement d'autres types d'éléments) constituant le système de protection, ils sont définis par leurs fonctions hydrauliques (pour l'analyse fonctionnelle interne) ;
- Granularité 3 : les composants structurels des différents tronçons de digues se définissent par leurs fonctions géotechniques ou structurelles qui peuvent être mécaniques ou d'hydraulique interne (pour l'analyse fonctionnelle interne).

1.1.1. Définition du système objet de l'analyse fonctionnelle

La première étape de l'analyse fonctionnelle consiste en la définition du système que l'on souhaite étudier. Il s'agit tout d'abord de clairement définir le système de protection, (ses limites, les ouvrages qui le composent, le contexte de sa construction et ses objectifs initiaux). Les fonctions d'un système de protection sont directement liées aux conditions de l'environnement dans lequel il s'inscrit. Pour cette raison, on s'attache ensuite à définir l'environnement proche du système de protection par l'identification des milieux extérieurs qui lui sont interfacés.

Avertissement - Considération sur les systèmes.

Nous avons pris le parti dans ce référentiel de considérer les systèmes suivants :

- système de protection (défini plus haut). Ce système est celui dont la défaillance ou la rupture conduit à l'inondation de la zone protégée (également définie plus haut).
- système endigué = système de protection + zone protégée. L'introduction de ce système est nécessaire car c'est à cette échelle que se mène l'analyse des modes de défaillance hydrauliques et de leurs conséquences en terme d'inondation (voir plus loin).

Nous avons volontairement essayé d'éviter d'utiliser les mots "système d'endiguement". En effet :

⁶ Peut être suivant les cas, au sens de la réglementation, soit un barrage (ex digues du Rhône ou du Rhin participant aux aménagements hydroélectriques et de navigation) soit une digue (cas des rivières canalisées, exemple le Vigueirat)

⁷ La **Méthode APTE®** a été créée par Gilbert Barbey en 1964, elle a été formalisée par Bertrand de la Bretesche dans le livre *La méthode APTE*

- il était difficile, suivant les acceptations personnelles, de différencier ou pas le système de protection et le "système d'endiguement" (digues uniquement ou bien tous les éléments du système de protection ?),
- un "système d'endiguement", différent du système de protection et ne comprenant que les digues et les éventuels autres ouvrages spécifiquement dédiés à la protection, à l'exclusion des éléments naturels et autres éléments cités plus haut ne remplit pas de rôle effectif de protection. En corollaire, il n'est pas nécessaire ou possible de l'étudier en terme d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance. Et donc le dénommer "système" n'est pas nécessaire en terme d'analyse système. En revanche on peut avoir besoin de dénommer cet ensemble d'ouvrage, par exemple comme "parc des ouvrages de protection d'un gestionnaire", ou encore "ensemble de digues.
- enfin, l'utilisation dans le même document des termes système d'endiguement (ou système de digues) et de système endigué peut conduire, comme nous l'avons constaté lors de la relecture du document à perturber le lecteur non familier avec les analyses développées dans ce chapitre 1.

Pour autant, nous n'allons pas jusqu'à recommander de bannir l'utilisation du terme "système d'endiguement", largement utilisé par ailleurs, comme celui de "système de digues", mais attirons l'attention sur une éventuelle ambiguïté, surtout s'il est utilisé par ailleurs dans le même document ou contexte les termes "système de protection" et/ou "système de digues", avec des significations pas toujours cohérentes.

1.1.1.1. Définition du système de protection

Le système de protection est le système qui fera l'objet de l'analyse fonctionnelle. Un tel système est principalement défini par l'implantation et la nature des ouvrages qui le constituent. Il peut également être défini par un gestionnaire d'ouvrages comme les ouvrages qu'il gère en propre (sens non conforme à la réglementation qui insiste sur le côté cohérent du système, et qu'il n'est pas non plus possible d'étudier de manière analytique en terme de fonction ni de défaillance), ou par le responsable de l'étude, comme l'ensemble des ouvrages et autres éléments assurant la protection de la zone protégée.

Un système de protection, constitué par la présence de digues, est composé d'une ligne de défense principale, qui correspond au linéaire d'ouvrages de protection de référence du point de vue du gestionnaire et constitue généralement la limite entre la zone protégée et le milieu extérieur cours d'eau. L'analyse de la configuration de la ligne de défense principale vis-à-vis du cours d'eau ou la mer et de la zone protégée permet d'identifier la nature du système considéré. Différents cas de figure existent pour les systèmes de protection fluviaux, et notamment : les systèmes fermés ; les systèmes ouverts en partie aval ; les systèmes ouverts en partie amont (rare, type barrage ou port fluvial par exemple).

Le système de protection peut également comprendre des ouvrages secondaires et des éléments naturels constituant des ramifications de la ligne de défense principale. Ils sont principalement situés dans la zone protégée, mais peuvent dans certains cas se trouver côté cours d'eau par rapport à la ligne de défense principale (ancien tracé de digues ; ouvrages de protection indirecte : épis, protections de berges, rechargements de plage, ...). Seuls les ouvrages secondaires présentant un potentiel de rupture et/ou ayant un rôle de protection avéré ou formant une continuité dans la protection sont à considérer. Ils font partie du système lorsqu'ils impliquent de fortes différences dans les scénarios de propagation des inondations dans la zone protégée selon qu'ils rompent ou non, ou si la pérennité de la protection dépend indirectement de leur intégrité. Les ouvrages structurants qui n'auront pas été intégrés dans le système de protection devront constituer des éléments de ses milieux extérieurs zone protégée ou cours d'eau.

On peut également considérer un système de protection comprenant également en plus des lignes de défense proprement dit, coté eau des ouvrages et organes de protection indirecte

(ex : barrage écrêteur, épis, seuils, brise-lames, ségonal, plages, ...) et des ouvrages de gestion de l'eau dans la zone protégée (digues de second rang, stations de pompage, réseaux d'assainissement, ...), ainsi que les ouvrages dont la rupture ou la défaillance pourrait avoir un impact sur les sollicitations sur les digues. L'important est que ces éléments soient inclus dans l'analyse sans qu'une position dogmatique n'amène à les rattacher soit au système de protection, soit suivant le cas au milieu eau ou au milieu Zone Protégée.

1.1.1.2. Définition des milieux extérieurs

Les milieux extérieurs à considérer sont les milieux localement en interaction avec le système de protection objet de l'analyse fonctionnelle. On distingue deux principaux types de milieux extérieurs pour un système de protection comprenant des digues :

- le milieu extérieur zone protégée
- le(s) milieu(x) extérieur(s) cours d'eau ou mer.

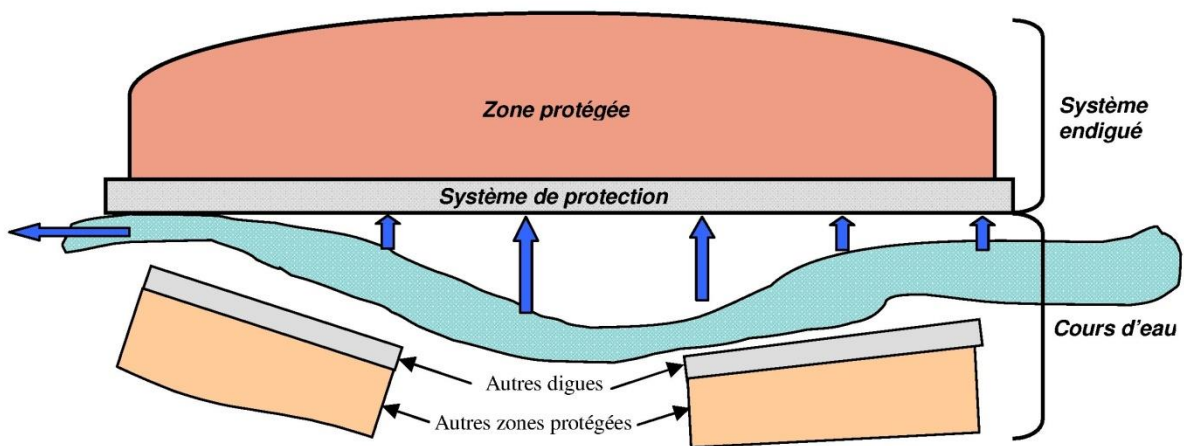


Figure 1.1 : Les trois composantes principales d'un système endigué fluvial : milieu(x) extérieur(s) « cours d'eau », système de protection et milieu extérieur « zone protégée » (d'après B. Beullac 2011)

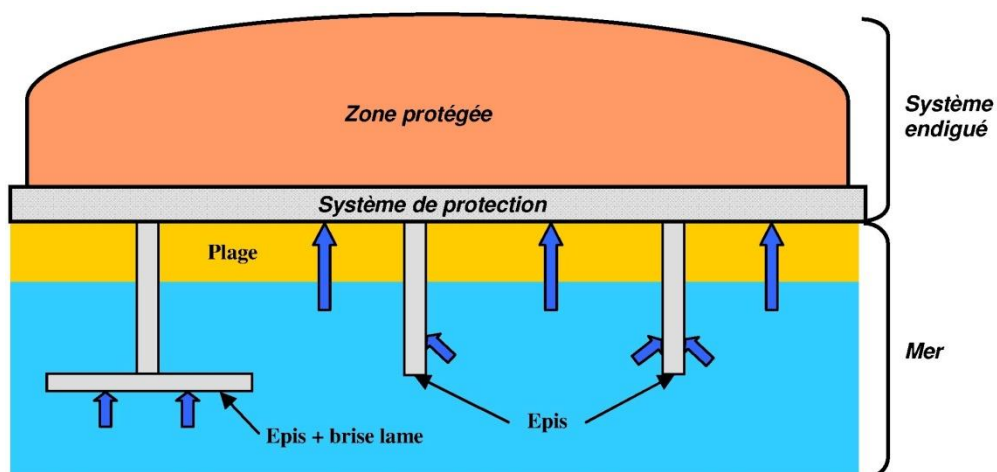


Figure 1.2 : Les trois composantes principales d'un système endigué maritime : milieu(x) extérieur(s) « mer », système de protection et milieu extérieur « zone protégée »

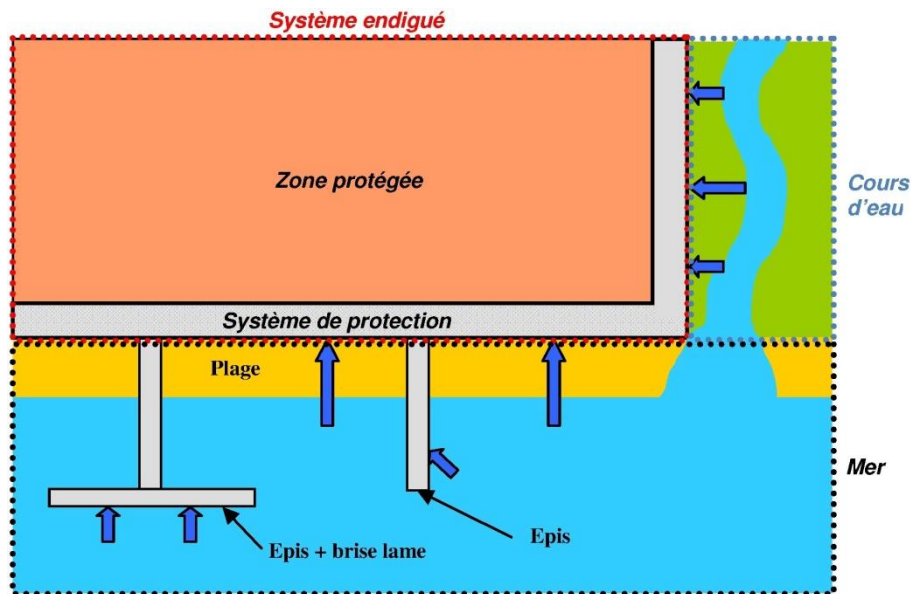


Figure 1.3: Les trois composantes principales d'un système endigué mixte : milieu(x) extérieur(s) « cours d'eau et mer », système de protection et milieu extérieur « zone protégée »

On peut également considérer d'autres milieux extérieurs aux impacts non négligeables sur le système de protection et sa fonction de protection de la ZP, notamment les milieux extérieurs : souterrain (karst, fracturation, évolution tectonique) ou encore atmosphérique (pluie, gel...). On peut aussi citer les barrages écrêteurs de crue dont la rupture pourrait augmenter le débit, les plages de dépôts.

A ce stade, on s'intéresse aux limites entre les différents milieux extérieurs mis en évidence. Elles doivent être clairement définies et expliquées. Leur établissement relève directement des choix des responsables de l'étude.

1.1.2. Analyse fonctionnelle externe

Menée à la granularité 1, elle identifie, décrit et analyse les interactions existantes entre le système de protection et les différents milieux extérieurs de son environnement et détermine les fonctions principales et techniques du système de protection. Un milieu extérieur cours d'eau ou mer s'analyse plutôt en termes d'impact potentiel sur le système de protection. Le milieu extérieur zone protégée est quant à lui principalement analysé en termes de conséquences hydrauliques dues à la défaillance de l'ouvrage de protection. Le modèle conceptuel développé par ailleurs dans le projet Européen FloodSite (Source Pathway Receptor) aboutit à la même analyse.

1.1.2.1. La fonction principale du système de protection

La connaissance de la configuration du système de protection et des interactions qui existent avec son environnement permettent l'identification de sa fonction principale.

De manière générique, la fonction principale d'un système de protection est une fonction de protection de la zone protégée contre les inondations fluviales ou submersions marines. Elle peut se décliner en différentes sous-fonctions de protection qui dépendent du type de système endigué considéré et sont identifiées en examinant les milieux extérieurs en interaction entre eux, via ou à travers le système de protection.

Exemples :

- pour un système de protection fermé : empêcher complètement l'entrée d'eau dans la zone protégée jusqu'à une crue ou un niveau d'eau déterminé ; permettre la mise en sécurité des populations présentes dans la zone protégée ;
- pour un système de protection fluvial ouvert en partie aval : empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée par la partie amont du système de digues jusqu'à une crue ou un niveau d'eau déterminé et minimiser les effets de l'inondation en imposant une inondation par remous en partie aval ; permettre la mise en sécurité des populations présentes dans la zone protégée ;
- pour un système de protection contre les submersions marines : empêcher l'entrée d'eau massive dans la zone protégée, (c'est à dire sans pour autant empêcher complètement les embruns ou projections dues aux vagues, dans la mesure où ces quantités sont gérables par le système d'assainissement et de drainage de la zone protégée).

D'autres fonctions principales associées à la protection sont possibles comme par exemple : la navigation (chenalisation) ; l'hydroélectricité ; la lutte contre l'érosion des berges, la protection du trait de côte...

On peut distinguer les vocations d'un ouvrage, qui résultent des objectifs de son Maître d'Ouvrage, de ses fonctions, qui voulues ou non peuvent être constatées ou déduites au cours d'une analyse fonctionnelle.

1.1.2.2. Les fonctions techniques du système de protection

Les fonctions techniques du système de protection sont celles qui permettent la réalisation de la fonction principale du système étudié et également celles qui permettent la surveillance et l'entretien. Il s'agit donc des fonctions qui garantissent la pérennité du système de protection et la réalisation de ses objectifs hydrauliques, en faisant face aux contraintes imposées par les milieux extérieurs. Ce sont principalement des fonctions de résistance aux sollicitations extérieures identifiées lors de l'analyse des milieux extérieurs : être suffisamment étanche ; être stable ; résister aux phénomènes d'érosion externe ; résister aux chocs ; ...

L'étanchéité absolue n'est pas une nécessité d'une digue de protection. La perméabilité de l'ouvrage devra être adaptée aux besoins du cas particulier (limnigramme des événements contre lesquels on veut se protéger et débits admissibles au sein de l'ouvrage en lien avec la résistance aux différents mécanismes de dégradation en particulier l'érosion interne et la stabilité au glissement).

1.1.3. Analyse fonctionnelle interne du système de protection

L'analyse fonctionnelle interne s'applique à décrire et analyser le fonctionnement intrinsèque au système de protection au travers des différents éléments qui le composent. Elle se décompose en deux étapes : l'analyse des fonctions hydrauliques des sous-systèmes de digues et l'analyse des fonctions géotechniques et structurelles des composants de digues.

1.1.3.1. Analyse des fonctions hydrauliques des sous-systèmes de digues

Cette première analyse permet d'identifier le rôle hydraulique porté par les différentes parties du linéaire de digues pour permettre la réalisation de la fonction principale du système de protection. Ce travail est mené à la granularité 2 et conduit au découpage du système de protection en sous-systèmes homogènes du point de vue de leurs fonctions hydrauliques.

A - Les fonctions hydrauliques des sous-systèmes de digues

Les sous-systèmes de digues sont soit linéaires (tronçon de digue, tronçon de digue résistant à la surverse, déversoir avec ou sans fusible, réservoir, passage batardable, tronçon correspondant à la limite de la zone protégée ouverte au Terrain Naturel -TN-), soit ponctuels et inclus dans les sous-systèmes linéaires (ouvrages de vidange et de ressuyage, ouvrages de transparence). Ils peuvent porter une ou plusieurs fonctions hydrauliques spécifiques à leur nature linéaire ou ponctuelle. Le Tableau 1 expose une possible typologie des différentes fonctions hydrauliques génériques pouvant être associées aux sous-systèmes de digues. Cette liste n'a pas pour vocation d'être exhaustive et peut être complétée pour coller au système de digue considéré. Le Tableau 1.2 donne un exemple de combinaison de fonctions hydrauliques pour les principaux types de sous-systèmes pouvant composer un système de protection.

N°	Fonction hydraulique	Caractérisation de la fonction	Paramètres du sous-système	Type de sous-système
1	Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, jusqu'à sa crête	- niveau de la crête du tronçon (crue ; hauteur d'eau)	- cote de la crête du tronçon - cote du TN - longueur	Tronçon
2	Contrôler les inondations dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, après le dépassement de sa crête	- niveau de la crête du tronçon (crue ; hauteur d'eau)	- cote de la crête du tronçon - cote du TN - longueur	Tronçon
3	Ecrêter les crues en aval du tronçon	- niveau de la crête du tronçon (crue)	- cote de la crête du tronçon	Tronçon
4	Permettre l'évacuation de l'eau d'inondation, de la ZP vers un cours d'eau, après le dépassement de la crête du tronçon	- niveau de la crête du tronçon (hauteur d'eau ; crue)	- cote de la crête du tronçon - longueur	Tronçon
5	Résister à la surverse	- niveau de sureté de la fonction de résistance à la surverse		Tronçon
6	Ne pas résister à la surverse et être érodable par surverse jusqu'à un niveau résistant donné	- niveau de la crête résistante (crue ; hauteur d'eau)	- cote de la crête résistante - cote du TN	Tronçon
7	Ne pas résister à la surverse et être érodable par surverse jusque sous la fondation du tronçon			Tronçon
8	Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, jusqu'à un niveau de crête fixe, prévu pour être élevé temporairement jusqu'à un niveau de crête haut donné	- niveau de la crête fixe (crue ; hauteur d'eau) - niveau de la crête amovible (crue ; hauteur d'eau)	- cote de la crête fixe - cote de la crête amovible - cote du TN - longueur	Tronçon / ponctuel
9	Fractionner hydrauliquement le territoire et influencer la propagation de l'eau dans la ZP (fonction de fait, différente de la vocation de l'ouvrage)	- niveau de la crête du tronçon (hauteur d'eau) - fonction du tronçon (autoroute, voie ferrée, route...)	- cote de la crête du tronçon - cote du TN - longueur	Tronçon
10	Permettre un écoulement d'eau ponctuel, d'un côté à l'autre d'un sous-système de digues linéaire	- dimension ouverture (Q max) - niveau de fonctionnement (crue ; hauteur d'eau) selon le sens d'écoulement	- géométrie - cote de l'ouvrage - cote du TN	Ponctuel
11	Maitriser l'écoulement d'eau ponctuel (débit, sens d'écoulement, niveau de fonctionnement)	- maîtrise du niveau de fonctionnement (crue ; hauteur d'eau) - maîtrise du sens d'écoulement - contrôle du débit	- type d'installation - conditions de fonctionnement	Ponctuel
12	Contrôler la charge hydraulique sur un tronçon	- Efficacité de l'installation (en fonction du remblai et des conditions hydrauliques)	- géométrie - débit max - débit de mise en charge du remblai	Ponctuel

Tableau 1.1 : exemple de typologie de fonctions hydrauliques génériques des sous-systèmes de digues (source Irstea – méthodologie en cours d'élaboration)

Sous-système de digues (tronçon ou ouvrage ponctuel)		Fonctions hydrauliques
Digue		1. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, jusqu'à sa crête
Digue résistante à la surverse		1. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, jusqu'à sa crête 2. Contrôler les inondations dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, après le dépassement de sa crête 5. Résister à la surverse
Déversoir	sans fusible	1. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, jusqu'à sa crête 2. Contrôler les inondations dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, après le dépassement de sa crête 3. Ecrêter les crues en aval du tronçon 5. Résister à la surverse
	avec fusible	1. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, jusqu'à sa crête 2. Contrôler les inondations dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, après le dépassement de sa crête 3. Ecrêter les crues en aval du tronçon 6. Ne pas résister à la surverse et être érodable par surverse jusqu'à un niveau résistant donné
Passage batardable	résistant à la surverse	8. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, jusqu'à un niveau fixe, prévu pour être élevé temporairement jusqu'à un niveau haut donné 5. Résister à la surverse
	non résistant à la surverse	8. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, jusqu'à un niveau fixe prévu pour être élevé temporairement jusqu'à un niveau haut donné
Réversoir		4. Permettre l'évacuation de l'eau d'inondation, de la ZP vers un cours d'eau, après le dépassement de la crête du tronçon 5. Résister à la surverse
Limite de la zone protégée ouverte au TN en partie aval		1. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, jusqu'à sa crête 2. Contrôler les inondations dans la zone protégée ou le casier situé en arrière du tronçon, après le dépassement de sa crête
Remblai sans vocation de protection		9. Fractionner hydrauliquement le territoire et influencer la propagation de l'eau dans la ZP (fonction de fait, différente de la vocation de l'ouvrage)
Ouvrage de vidange (ressuyage, drainage, pompage)		10. Permettre un écoulement d'eau ponctuel, d'un côté à l'autre d'un sous-système de digues linéaire 11. Maîtriser l'écoulement d'eau ponctuel (débit, sens d'écoulement)
Ouvrage de transparence		10. Permettre un écoulement d'eau ponctuel, d'un côté à l'autre d'un sous-système de digues linéaire 12. Contrôler la charge hydraulique sur un tronçon

Tableau 1.2 : les principaux types de sous-systèmes de digues et leurs fonctions hydrauliques (source Irstea – méthodologie en cours d'élaboration)

B - La décomposition en sous-systèmes de digues

Le découpage du système de protection en sous-systèmes de digues constitue le résultat de cette première analyse fonctionnelle interne. Au-delà du type de fonctions associées aux sous-systèmes, ce découpage repose également sur leur caractérisation. Un sous-système de digues doit donc être homogène en termes de fonction et de caractérisation.

- *La caractérisation des niveaux de crête des sous-systèmes de digues linéaires, par comparaison avec les niveaux de sollicitation*

L'identification des niveaux de crête des sous-systèmes de digues linéaires permet la caractérisation de leurs fonctions hydrauliques. Pour les ouvrages de premier rang, le niveau de crête correspond à la crue au-delà de laquelle, en l'absence de brèches, un tronçon n'empêche plus l'entrée d'eau dans la zone protégée.

Dans le cas de l'analyse fonctionnelle d'ouvrages neufs, le niveau de crête est un objectif de conception, l'information est donc connue du maître d'ouvrage.

Dans le cas de l'analyse fonctionnelle d'ouvrages existants, le niveau de crête effectif est à vérifier ou déterminer.

Pour les ouvrages de premier rang, l'identification des niveaux de crête est réalisée par le biais du croisement entre les différentes modélisations ou constat en crue de lignes d'eau de crues sans brèches disponibles et les cotes de crête des ouvrages qui composent la ligne de défense principale. Un tronçon correspond à un grand linéaire de digues dont la crête a une pente globalement parallèle et au-dessus d'une ligne d'eau de crue qui en est proche, et dont le niveau de crête correspond à celui de son point le plus bas.

Cette méthode est également applicable à la caractérisation des niveaux intermédiaires d'ouvrages linéaires (pied de fusible, pied de batardeau...), du niveau du terrain naturel (TN).

- *Les caractéristiques techniques des sous-systèmes de digues ponctuels*

Chaque sous-système ponctuel est défini par les caractéristiques techniques qui décrivent son mode de fonctionnement (Q max, niveau de fonctionnement, sens d'écoulement, paramètres maîtrisés, conditions de fonctionnement...). Ces caractéristiques doivent être identifiées pour chaque sous-système de digues ponctuel du linéaire de digues.

Le niveau de fonctionnement correspond au niveau de crue ou de hauteur d'eau à partir duquel un écoulement est possible dans un sens donné. Dans le cas d'un ouvrage neuf, il est connu. Dans le cas d'un ouvrage existant il peut être déterminé par l'application de la méthode utilisée pour la détermination du niveau de crête.

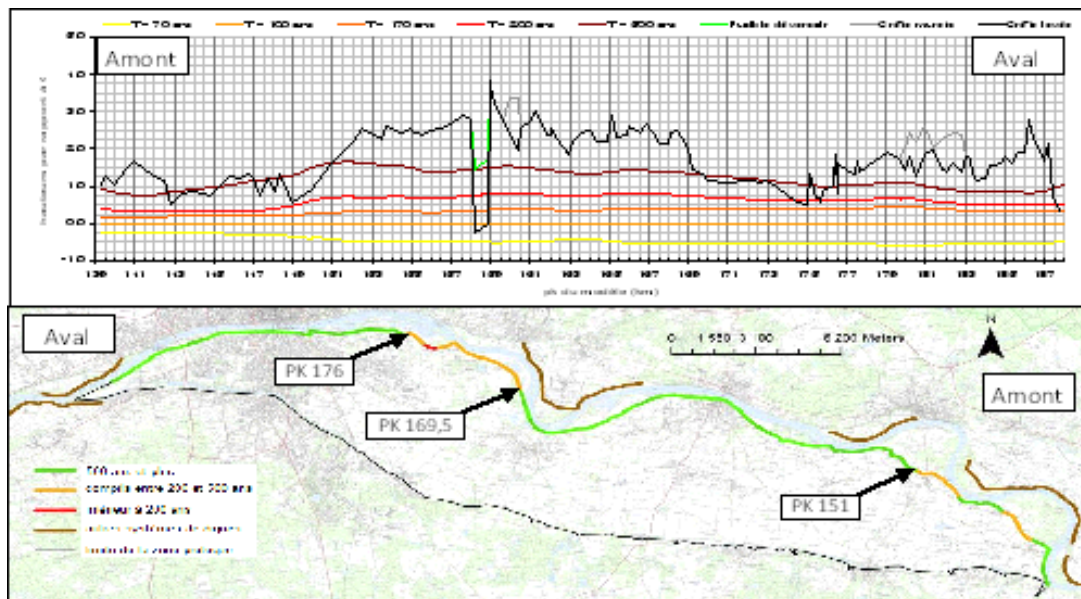


Figure 1.4 : Exemple de croisement entre lignes d'eau de crue et crêtes de digues. Traduction spatiale du résultat (valeurs de hauteur corrigées sur la base de la ligne d'eau de période de retour 100 ans égale à zéro). Source DREAL Centre et Irstea (Etude de Dangers du Val d'Orléans)⁸

1.1.3.2 - Analyse des fonctions géotechniques et structurales des composants de digues

Cette analyse se fait à la granularité 3, c'est-à-dire celle des composants structurels qui composent les différents tronçons de digues et sont identifiés lors de l'analyse structurale du système de protection. Elle a pour objectif d'identifier et de caractériser les fonctions géotechniques que remplissent ces composants géotechniques au sein des différents types de profils en travers de digues que l'on trouve sur le système de protection. Cela conduit à une décomposition du linéaire en tronçons géotechniquement homogènes.

A- Les fonctions des composants géotechniques de digues

La pérennité d'un tronçon de digues donné et la réalisation de ses fonctions hydrauliques dépendent directement de la réalisation des fonctions géotechniques que ses composants doivent remplir de façon générique. Ces fonctions géotechniques peuvent se classer en plusieurs familles et se caractérisent par les différents seuils qui décrivent leur état de fonctionnement (Tableau 1.3).

⁸ Echelle de la carte non respectée sur l'axe nord-sud

N°	Famille de fonction géotechnique	Caractérisation de la fonction (seuils de dégradation et de perte de la fonction)	Paramètres du composant permettant la caractérisation de la fonction
1	Stabilité mécanique d'ensemble (conditionne la stabilité mécanique du tronçon)	- intégrité géométrique	- géométrie - propriétés géo mécaniques
2	Etanchéité (limite les écoulements vers les autres composants)	- coefficient de perméabilité (m/s)	- granulométrie / propriétés mécaniques - épaisseur
3	Drainage (capte les écoulements internes au tronçon et les évacue)	- capacité de débit de drainage	- coefficient de perméabilité (m/s) - géométrie
4	Non entrainement des particules en interface (empêche la migration des particules à l'interface des composants granulaires)	- état vis-à-vis des conditions de non entrainement des particules	- granulométries des composants interfacés - ouverture de filtration (géotextile) ou porosité (granulaire) - épaisseur
5	Auto-filtration (empêche la migration des particules, au sein d'un composant granulaire)	- continuité de la granulométrie	- granulométrie
6	Résistance à l'érosion externe (eau, autres agents)	- qualification de la résistance mécanique ou géo mécanique en fonction de l'épaisseur	- propriétés mécaniques ou géo mécaniques - épaisseur
7	Résistance aux agressions externes intrusives (animaux fouisseurs, racines...)	- résistance mécanique et objectif de protection	- propriétés mécaniques - maille (géotextile, grillage, géo grille)
8	Écoulement (laisser passer l'eau)	- état vis-à-vis des conditions d'écoulement	- coefficient de perméabilité (m/s) (granulaire) ou permittivité (s ⁻¹) (géotextile) - épaisseur

Tableau 1.3 : exemple de familles de fonctions géotechniques et structurales des composants des digues et leur caractérisation (source Irstea – méthodologie en cours d'élaboration)

B - Les composants structurels de digues

L'analyse structurale du système de digues permet d'identifier les différents profils en travers de composants géotechniques qui le composent.

Profil en travers Orléans type 4 :

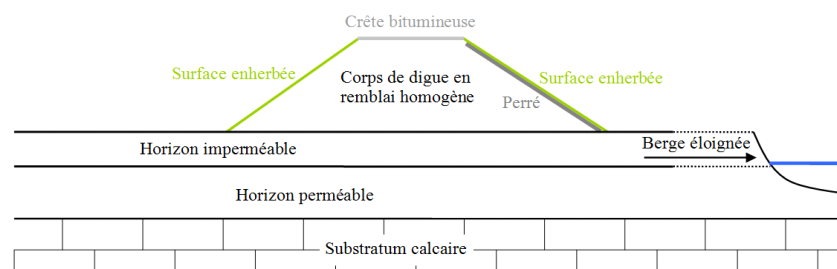


Figure 1.5 : exemple de profil en travers de composants géotechniques Source DREAL Centre et Irstea (Etude de Dangers du Val d'Orléans)

Selon le profil en travers de digues considéré, chaque composant géotechnique remplit une ou plusieurs fonctions géotechniques appartenant à des familles de fonctions différentes.

Composant géotechnique	Fonctions géotechniques possibles
Corps	1. Stabilité mécanique d'ensemble 2. Etanchéité 5. Auto-filtration
Organes d'étanchéité (de l'ouvrage, de la fondation)	2. Etanchéité
Organes de drainage (de l'ouvrage, de la fondation)	1. Stabilité mécanique d'ensemble 3. Drainage
Organes de filtration (aux interfaces : drain, étanchéité...)	4. Filtration 8. Écoulement
Organes de protection (d'un talus, de la crête, de la berge, de la fondation)	6. Résistance à l'érosion externe 7. Résistance aux agressions externes intrusives
Structure type mur ou poids	1. Stabilité mécanique d'ensemble 2. Etanchéité
Fondation (pouvant comprendre la berge si elle est proche)	1. Stabilité mécanique d'ensemble 2. Etanchéité 5. Auto-filtration

Tableau 1.4 : les principaux types de composants géotechniques de digues et leurs fonctions associées (source Irstea – méthodologie en cours d'élaboration)

De la même façon, des fonctions d'une même famille peuvent se retrouver dans différents composants d'un même profil en travers de digues, mais avec des applications différentes.

Par exemple, un tronçon peut comprendre un organe de filtration à l'interface d'un organe de drainage ainsi qu'un organe de filtration à l'interface d'un organe d'étanchéité. Ce sont bien deux fonctions de filtration, mais leurs applications et leurs caractéristiques diffèrent.

1.1.4. Principaux composants des digues en remblai

Une digue, selon le type et l'environnement considérés est composée de tout ou partie des éléments suivants associés aux fonctions correspondantes :

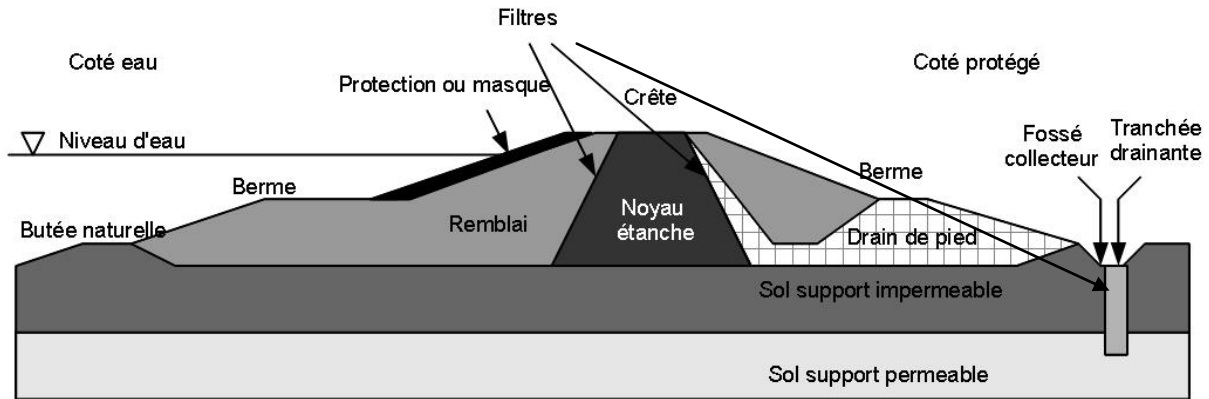


Figure 1.6 : Principaux composants de digue en remblai (Note : le schéma présente les différents composants potentiels d'une digue. L'association de composants ci-dessus ne correspond pas à un cas réel.). Traduit et adapté de l'ILH [2013]

- **La fondation ou sol support**

C'est un élément qui n'appartient pas directement à la digue mais plutôt à son environnement. Cependant elle joue un rôle fonctionnel important et doit être traitée avec attention. La fonction principale de la fondation est de jouer le rôle de support de la digue. Elle est donc déterminante pour se prémunir des mécanismes de déstabilisation géotechnique (glissement, tassement, poinçonnement, rupture circulaire profonde...). La fondation est aussi sujette aux circulations d'eau et aux phénomènes d'érosion interne. La gestion des écoulements et des pressions est déterminante pour d'une part éviter les écoulements trop importants favorisant l'érosion interne et d'autre part éviter les surpressions sous la digue favorisant les glissements. Classiquement, pour les ouvrages hydrauliques en remblai, la fondation est traitée comme partie de l'ouvrage, à la différence du bâtiment.

- **Le corps de digue**

Sa fonction principale est d'assurer la stabilité propre de la digue. Il mobilise les volumes les plus importants. Il est très souvent constitué de matériaux prélevés à proximité immédiate du site (argile, limon, sable, graves...) ou de maçonnerie ou de béton pour les ouvrages rigides. Les propriétés géotechniques et hydrauliques de ce matériau influencent considérablement sur le type d'ouvrage retenu et la forme de celui-ci. Dans certains cas, quand les matériaux constitutifs sont peu perméables, le corps de la digue assure aussi la fonction d'étanchéité. Aussi, les matériaux cohésifs (argiles, limons) sont moins perméables et moins sensibles à l'érosion interne que les matériaux granulaires (sables). Dans le premier cas, la conception sera simple avec un corps de digue en remblai argileux qui sera stable, imperméable et peu sujet à l'érosion (donc plus simple à protéger). Les matériaux argileux sont par contre sensibles à la teneur en eau à la construction ainsi qu'aux cycles de mise en charge et décharge de l'ouvrage et aux cycles saisonniers (sensibilité aux sécheresses prolongées). Dans le cas de matériaux granulaires grossiers, une étanchéité suffisante (pour à la fois retenir l'eau et ne pas provoquer l'érosion interne) ne peut être assurée qu'en « allongeant » le chemin hydraulique d'où une diminution du gradient. De plus, les matériaux sableux sont plus sensibles aux différentes formes d'érosion et nécessitent une forme de protection supplémentaire (filtre...).

- **Le noyau ou masque étanche amont**

Contrairement au corps de la digue, le noyau ou le masque sont des éléments que l'on trouve ou non selon le type de digue considéré. Ils assurent la fonction d'étanchéité. Le noyau est constitué d'argile ou limon compactés et le masque de béton ou d'autre matériau de faible perméabilité. Lorsqu'il est présent, suivant les conditions de site le noyau peut être ancré et/ou prolongé par un écran d'étanchéité jusqu'à la couche de sol imperméable (si la digue est fondée sur une couche perméable). Cependant, l'étanchéité de la fondation n'est pas un objectif nécessairement recherché (à la différence des barrages). Par contre, la maîtrise des écoulements souterrains et leur absence d'effet néfaste est dans ce cas indispensable. L'utilisation d'un noyau étanche est dans les faits rare pour les digues (cette pratique étant plus fréquente pour les barrages en remblai). Par contre en cas d'hétérogénéité du matériau, il est nécessaire de placer le matériau le moins perméable coté eau.

Une pratique très répandue aux Pays-Bas et en Allemagne (notamment pour les digues maritimes et avec des pentes relativement douces) est la mise en place d'un masque d'argile pour assurer l'imperméabilité et la protection contre l'érosion externe du corps de la digue constitué de sable.

- **Les protections (mécaniques) :**

Quel que soit le cas considéré, une digue n'est jamais un remblai hydraulique laissé à nu. Une digue est protégée de l'action défavorable des agents extérieurs. Les protections peuvent être plus ou moins résistantes (de l'herbe jusqu'au caparaçonnage béton). L'ouvrage est soumis de manière générale aux actions des agents atmosphériques, environnementaux (faune fouisseuse, flore...) et anthropiques (quad, motocross, équitation,...), en plus des cations de l'eau qui sont détaillées ci-dessous selon la partie de l'ouvrage.

- Côté eau :

La digue peut être en permanence ou exceptionnellement soumise aux actions de l'eau (statique et surtout dynamique). Les vagues et le courant induisent des contraintes sur l'ouvrage (la section 4.1 traite des sollicitations). La protection peut être assurée par enherbement ou par une carapace (en enrochement libre ou lié, maçonnerie de pierre sèche ou jointoyée, béton, gabions ou avec des sacs géotextiles). La protection côté eau par sa rugosité et/ou sa porosité influence considérablement la perte d'énergie et en domaine côtier le franchissement par les vagues. Une protection offrant une forte rugosité et/ ou porosité dissipe plus d'énergie et réduit les volumes franchissants. Par contre, cette dissipation d'énergie est synonyme de contraintes plus fortes sur la protection. La forme et notamment la pente du talus coté eau et les caractéristiques de l'estran ou du ségonal peuvent avoir une influence sur les sollicitations hydrauliques au niveau de l'ouvrage (hauteur, vagues, ...).

La protection des talus des digues fluviales est en général assurée par un enherbement côté fleuve ; un perré en maçonnerie, parfois caché sous des dépôts de limons et de la végétation, assure la protection des sections en contact avec le lit mineur.

Pour les digues maritimes, la carapace forme la première défense contre l'action mécanique des vagues et représente aussi une protection pour les sous-couches. C'est en effet entre les blocs de la carapace que l'essentiel de l'énergie contenue dans les vagues va être dissipée, avant de rentrer en contact avec les sous-couches.

Les protections externes peuvent être construites le plus couramment avec :

- des enrochements naturels,
- des blocs artificiels massifs en béton,
- des perrés ou maçonneries de pierres de taille.

On peut également trouver dans le cas de houles peu agressives et pour des pentes

d'ouvrage faibles :

- des dalles en béton,
- des gabions ou matelas gabions,
- des enrochements liaisonnés par du mastic bitumineux,
- des sacs géotextiles remplis de sable (attention à la protection anti-UV),
- etc.

- Crête :

La crête de l'ouvrage intègre aussi un rôle de protection. Elle est soumise à l'action des agents atmosphériques (pluie). Elle peut être sollicitée par les courants en situation de surverse ou les vagues en situation de franchissement. La crête de la digue assure généralement une autre fonction : celle de voie de circulation pour la surveillance et la maintenance. Elle est également souvent soumise à d'autres usages n'intervenant pas dans la fonction de protection contre les inondations (voirie, aire récréative...), ce qui peut poser un certain nombre de contraintes spécifiques en terme de conception, d'exploitation, voire de travaux de confortement.

- Côté zone protégée :

Le talus côté ZP est sollicité exceptionnellement et de façon intense par les forts courants en cas de surverse ou de franchissement par les vagues. Les types de protections retenus sont aussi divers et variés que côté eau. Des digues enherbées et bien entretenues peuvent résister à l'érosion pour des volumes franchissants et surversants parfois importants. Lorsque les digues disposent de déversoirs, les écoulements sont concentrés sur ces dispositifs appropriés et le côté protégé des digues adjacentes n'est pas sollicité. Lorsqu'une digue est éventuellement sujette à la surverse ou au franchissement, la protection côté zone protégée (talus + TN) est un élément déterminant.

- **Les filtres**

Les phénomènes de dégradation d'une digue sont parfois lents par migration progressive des fines : mécanisme d'érosion interne. Comme leur nom l'indique, les filtres jouent un rôle de filtration des matériaux. Leur but est d'éviter la fuite de matériaux (généralement fins) pour maintenir l'étanchéité et l'intégrité structurale de l'ouvrage. Les filtres sont placés entre les éléments constitutifs d'une digue zonée au contact d'éléments de granulométrie très différente. Les géotextiles sont de plus en plus largement utilisés en tant que filtre, leur dimensionnement est abordé au §4.2.4.2.

- **Les drains**

Les digues sont soumises à l'action de l'eau. Sa présence au sein de l'ouvrage peut provoquer des phénomènes de sur-pression, gonflements-retraits, déstabilisation géotechnique. Le drainage de l'ouvrage permet de contrôler ces actions internes. La fonction drainante est assurée par plusieurs éléments. On trouve parfois des couches drainantes (drains, couches permettant la circulation d'eau, nappes drainantes...) associée à d'autres dispositifs (tranchée drainante, pompage...). Pour ces dispositifs, on parlera de drainage interne ou profond. Aussi, dans le cas d'ouvrages maçonnés, la circulation d'eau est favorisée par des barbacanes pour éviter les déséquilibres de charges hydrauliques. On parle alors de drainage externe ou superficiel.

- **La butée de pied ou parafouille**

Présente sur certains ouvrages, la butée de pied côté eau contribue aux fonctions de stabilité et/ou de protection. Elle assure la jonction entre l'ouvrage et son environnement. Dans le cas d'une carapace en enrochement, elle stabilise cette dernière. Dans les zones les plus exposées aux affouillements, des protections parafouilles ont parfois été réalisées, constituées le plus souvent de pieux jointifs en bois, ou de palplanches métalliques. Elle permet de se prémunir contre les phénomènes d'affouillement en pieds d'ouvrage. On trouve

aussi parfois, en pied d'ouvrage, des dispositifs prolongeant l'étanchéité en profondeur (par des palplanches, tapis d'étanchéité...). Il s'agit parfois d'augmenter le chemin hydraulique à parcourir (et donc augmenter la dissipation)

Côté zone protégée, la butée de pied contribue à la stabilité mais aussi à la canalisation et au drainage des eaux.

- **Les risbermes**

Une risberme peut être initialement un élément de la digue ou être créée en ajoutant une recharge pour conforter celle-ci. Côté eau, la risberme peut jouer un rôle de protection (confortement suite à un mécanisme d'érosion externe), un rôle de stabilité (en reprenant les glissements rotationnels profonds ou superficiels) et un rôle d'étanchéité (en augmentant la longueur du chemin hydraulique).

Côté zone protégée, une risberme peut jouer un rôle de stabilité et un rôle de filtration et drainage. La risberme côté protégé, éventuellement prolongée par un tapis, peut aussi permettre de contrôler les phénomènes d'érosion interne du sol support et/ou de sous-pression en fondation (sand boil).

- **muret de couronnement (pare-vagues et rehausses)**

On trouve sur les digues notamment en domaine maritime des structures de couronnement. Le couronnement joue un rôle de protection de l'ouvrage en limitant le franchissement des vagues. Dans certains cas il peut aussi être destiné à retenir de l'eau. Il prend souvent la forme d'un mur parapet en maçonnerie ou béton dont le design permet de dissiper ou réfléchir l'énergie des vagues. Le mur de couronnement est ancré à la digue pour résister au glissement et renversement provoqués par l'effort induit par l'impact des vagues et/ou un niveau d'eau. De nombreux ouvrages historiques disposent de rehausses qui augmentent la côte de protection de la digue. Ces dispositifs sont présents lorsque l'augmentation de la crête de l'ouvrage se fait sans élargissement de la digue.

Ces organes ont également un rôle de parapet (chute des personnes et des véhicules).

Fonction principale	Support	Stabilité	Étanchéité	Filtration	Drainage	Protection	Soutènement
Composant							
Fondation							
Corps							
Noyau							
Protection contre l'érosion externe							
Filtres							
Drains							
Crête							
Berme							
Masque							
Murs ou palplanches							

Tableau 1.5 – Exemple de relations composants - fonctions individuelles pour une digue homogène

1.2. Principaux types de digues

Note : Les schémas représentés dans cette partie le sont à titre d'illustrations et de principe didactique, ils ne constituent pas des profils types de conception ; en particulier les pentes des talus et échelles des différents éléments et/ou constituants ne sont pas respectées. Ces schémas sont traduits et adaptés de l'ILH [2013].

La plupart des digues sont des ouvrages en remblai de terre (allant du limon au sable, parfois même au gravier). L'histoire de leur construction et leur position géographique expliquent largement leur constitution.

Divers remblais peuvent en outre être amenés à jouer le rôle de digue, sans qu'ils aient été initialement conçus à cet effet. Tel est le cas de certains remblais routiers (2 fonctions) ou ferroviaires, voire de remparts protégeant une ville ou de canaux en remblai. Dans ces cas, il est parfois difficile d'identifier un propriétaire et un gestionnaire. La conception, la surveillance et l'entretien ne sont pas toujours appropriés. A l'inverse, de nombreux ouvrages initialement conçus en tant que digues sont les « supports » de voies de communication. Il est important, dans les deux cas, de rendre compatibles ces superpositions d'utilisation.

1.2.1. Remblai homogène

Les digues en terre homogènes sont des digues en remblai compacté (ou consolidé au cours du temps). Le corps du remblai est constitué d'un sol homogène généralement pris sur place (argile ou limon) suffisamment imperméable pour éviter les infiltrations. La carapace joue alors son rôle de protection mécanique mais aussi un rôle de filtre en empêchant le départ des matériaux de la digue. Dans ce cas, les fonctions d'imperméabilité et de stabilité sont assurées par le même composant (le corps).

La variabilité des matériaux pourra être grande, y compris le long d'un même cours d'eau (matériau sableux le long du bassin moyen et matériau limoneux en approchant de l'embouchure) ; mais dans une section, il s'agit généralement de remblais homogènes sans zonage et sans dispositifs particuliers de drainage interne. La caractérisation géotechnique de tels matériaux peut être délicate et nécessite précaution. Du fait de l'absence de moyens lourds de compactage et d'excavation lors de l'édification des digues anciennes, les remblais sont parfois de relativement faible compacité sans ancrage particulier dans la fondation. Parfois, cette dernière n'a pas fait l'objet de traitement particulier pour assurer son étanchéité.

Souvent, on trouve des digues constituées de remblai homogène de plus fortes perméabilités (sable, gravier...). Ce cas est commun en milieu maritime où la digue s'appuie sur un ancien cordon dunaire remodelé et où une carapace en maçonnerie ou en béton (ou enrochement) joue alors un rôle de protection mécanique mais aussi un rôle d'étanchéité en empêchant le départ des matériaux de la digue (rôle de conteneur). Dans le domaine fluvial, c'est le cas par exemple de certaines digues du Rhône constituées de remblais en gravier ; la conception prend en compte les écoulements engendrés par cette forte perméabilité au niveau de la stabilité de la digue et de la gestion des flux de percolation (drainage, contre-canal...) [Tratapel].

Les figures 1.7 à 1.9 donnent des exemples de digues homogènes ; il est rappelé qu'il s'agit de schémas de principe, en particulier les conditions de filtre doivent être vérifiées aux contacts entre les différents matériaux, ce qui suppose la mise en place de filtres si nécessaire.

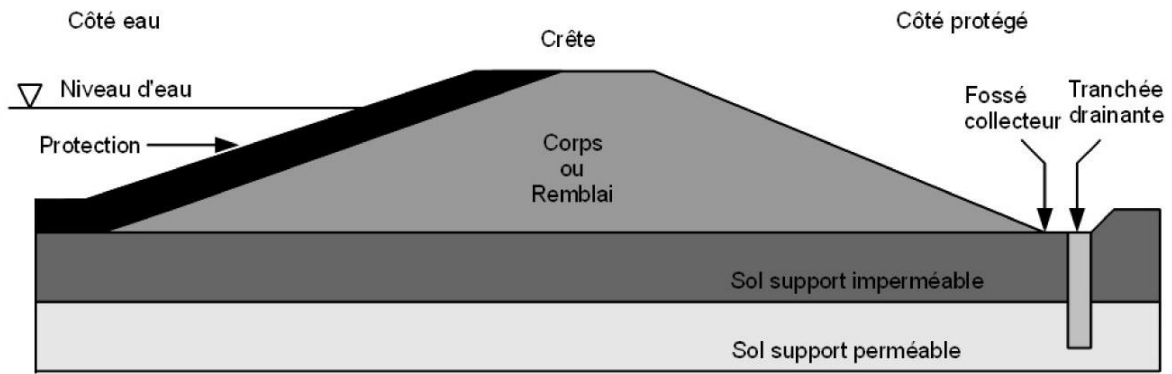


Figure 1.7 : Digue homogène sur fondation imperméable

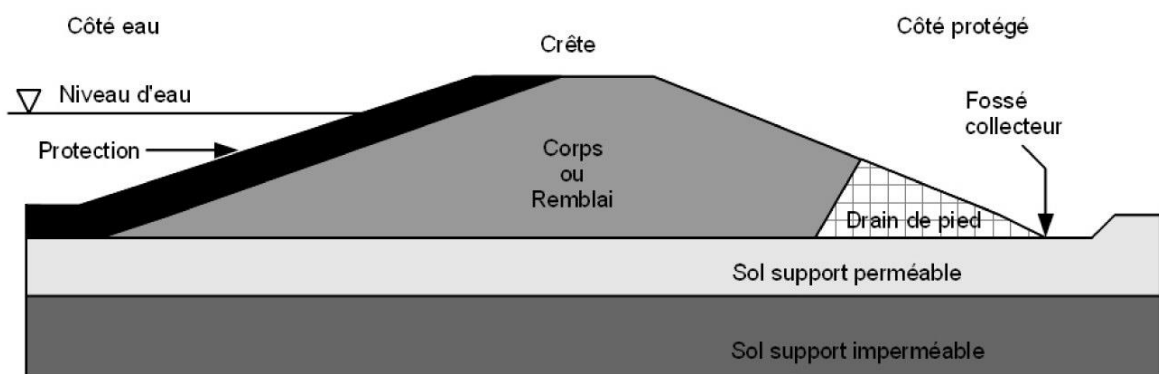


Figure 1.8 : Digue homogène sur fondation perméable sans ancrage étanche

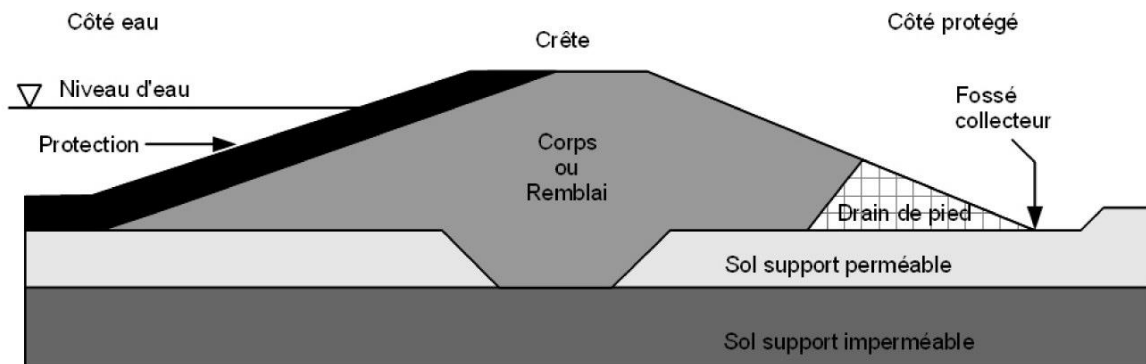


Figure 1.9 : Digue homogène sur fondation perméable avec ancrage d'étanchéité

1.2.2. Remblai historique

« *Homogène par son hétérogénéité* » :

Ce sont souvent des ouvrages construits par étapes à plusieurs périodes, en fonction de l'évolution des usages du fleuve ou des besoins de protection. Plus d'étapes il y a eu dans la construction de la digue et plus celle-ci sera complexe. C'est le cas le plus commun en France. Leur construction complexe est souvent synonyme d'une grande hétérogénéité au sein même d'une section. L'hétérogénéité rend l'analyse du niveau de sûreté de la digue délicat devant la multiplicité des scénarios pouvant conduire à la défaillance et devant les fortes incertitudes sur les mécanismes en jeu.

Il est souvent difficile de qualifier ces ouvrages et d'identifier leurs zones de fragilité. Cependant, les jonctions si elles sont identifiables constituent le plus souvent des points faibles. Les transitions entre couches avec des matériaux parfois légèrement hétérogènes et inégalement compactés ou de granulométries incompatibles peuvent favoriser la concentration de circulation interne d'eau néfaste.

Il est important pour de tels ouvrages de disposer d'archives de bonne qualité, ce qui facilite la caractérisation et les diagnostics réguliers de l'ouvrage mais c'est malheureusement rarement le cas.

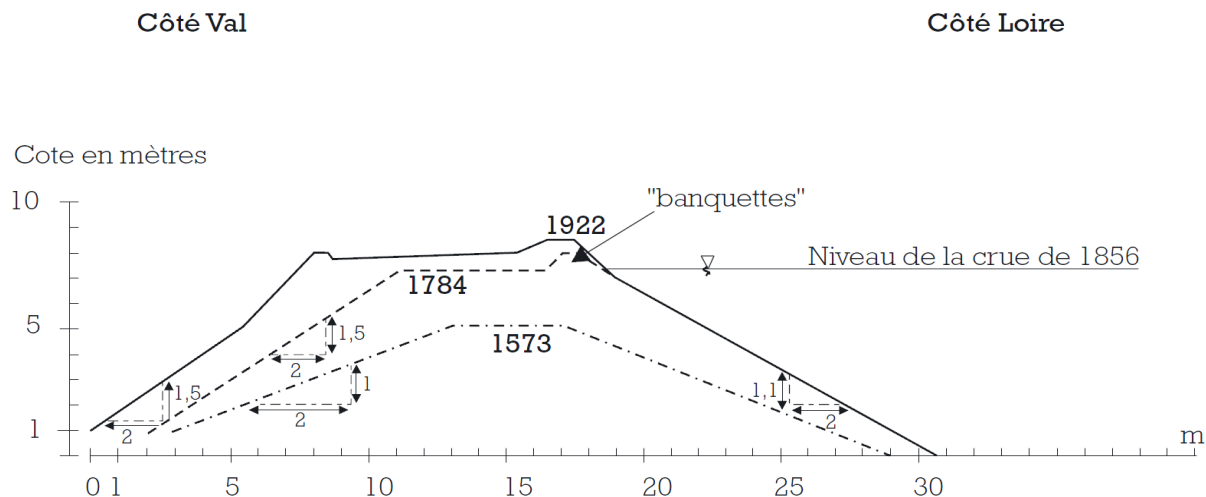


Figure 1.10 : Coupe type d'une levée de Loire représentative d'une digue historique (CEMAGREF 2004 d'après Dion 1927)

1.2.3. Remblai zoné

1.2.3.1. Remblai zoné d'origine

Les digues les plus récentes (depuis une cinquantaine d'années) font souvent appel à des conceptions se rapprochant de celles des barrages en terre. On y retrouve alors un zonage des matériaux avec séparation des fonctions d'étanchéité et de drainage. L'étanchéité est souvent assurée par un noyau en matériau limoneux ou argileux situé au centre ou côté eau de la digue. Lorsque ce matériau est introuvable sur le site, on peut avoir recours à des matériaux de substitution tels qu'une paroi moulée ou bien une superposition de couches de béton bitumineux ou d'asphalte. Le corps de la digue en matériau plus grossier assurera uniquement la fonction de stabilité. Des couches filtres sont mises en place pour éviter l'érosion des matériaux du noyau. La transition entre deux zones aux granulométries distinctes est assurée, si nécessaire, par une couche filtre de transition. L'étanchéité de l'ouvrage ne se limite pas au noyau. Une parafouille d'étanchéité, un tapis étanche ou un écran étanche peut permettre la jonction étanche avec les couches sous-jacentes si cela s'avère nécessaire.

Les zones encadrant le noyau imperméable sont en tout venant compacté. Elles assurent la résistance et la stabilité de la digue.

On retrouve ce type de digue lorsque les matériaux de faible perméabilité sont rares ou absents du site. Dans le même temps, les matériaux du site aux qualités hydrauliques inférieures, peuvent être utilisés pour assurer la fonction de stabilité.

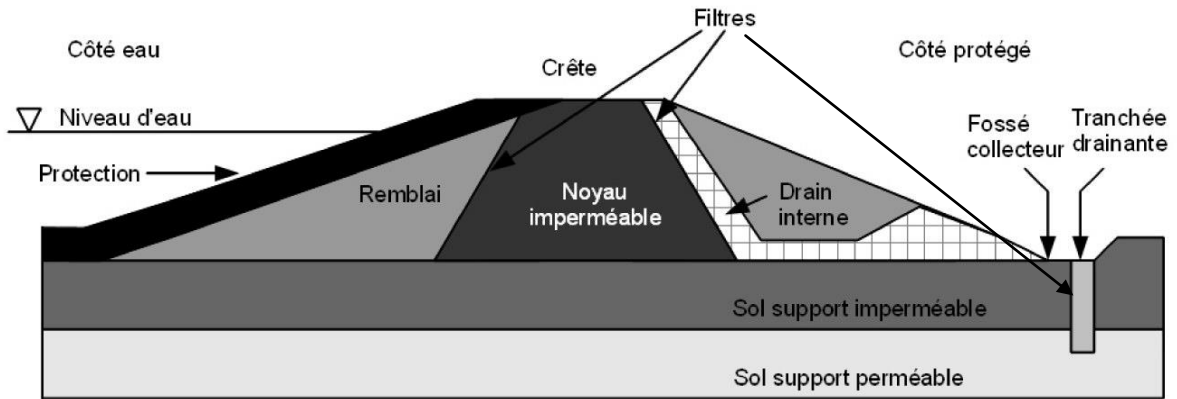


Figure 1.11 : Digue zonée à noyau sur fondation imperméable

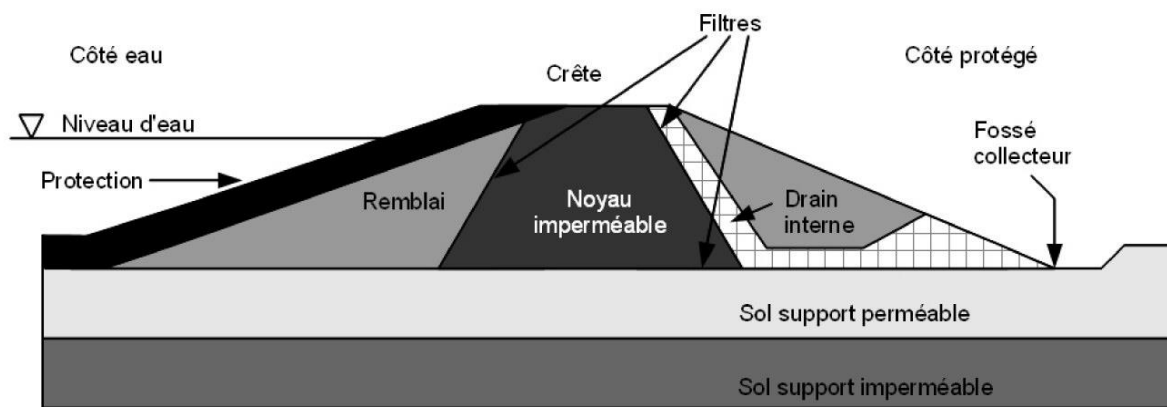


Figure 1.12 : Digue zonée à noyau sur sol perméable sans ancrage d'étanchéité

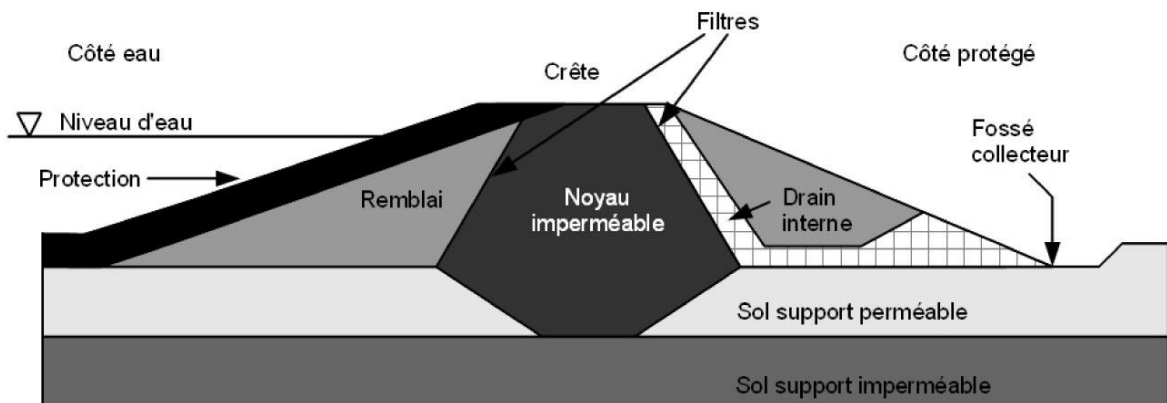


Figure 1.13 : Digue zonée à noyau sur sol perméable avec ancrage d'étanchéité

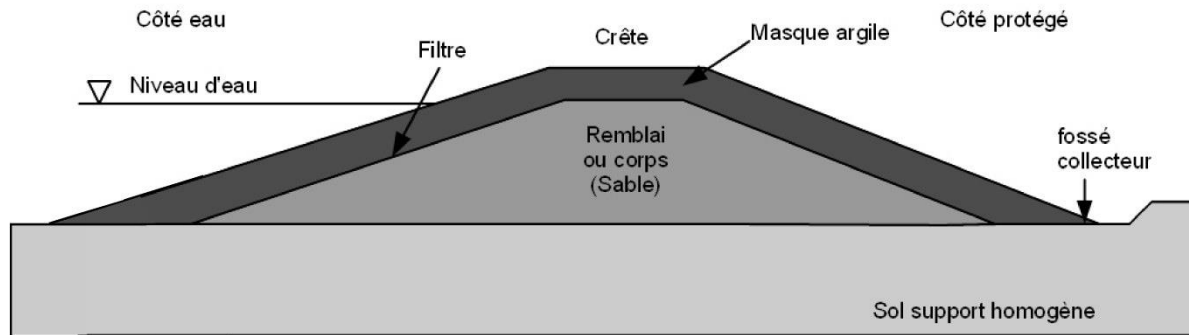


Figure 1.14 : Digue zonée à masque étanche sur fondation homogène ; à noter la nécessité d'une protection contre la dessiccation du masque en argile

Les digues zonées présentent des points particuliers à prendre en compte. La jonction entre les composants de la digue est un point important. En tant que surface de discontinuité du matériau, la transition granulométrique doit être prise en compte via la règle de filtre. La continuité verticale de l'étanchéité peut être assurée jusqu'aux fondations. Par ailleurs, l'ouvrage étant étanche, les gradients de pression s'exerçant sur l'ouvrage en charge sont importants. Dans le cas, de digues zonées étanche sur un sol perméable, les sous pressions déstabilisantes pour l'ouvrage doivent être contrôlés par des systèmes de drain-étanchéité.

1.2.3.2. Remblai zoné suite à un confortement ou rehaussement

Une digue est souvent confortée par étapes successives. Les ouvrages peuvent avoir été confortés pour améliorer leur stabilité et/ou leur niveau de protection. Le niveau de protection d'une digue peut aussi être modifié au cours de son histoire. On rehausse alors la cote de la crête de l'ouvrage par confortement - rehaussement. De nombreux ouvrages se trouvent ainsi zonés par les travaux de confortement successifs.

- Confortement remblai drainant coté zone protégée

Le confortement d'une digue côté zone protégée permet d'améliorer la stabilité du versant. Un filtre interposé permet de lutter contre l'érosion interne. Un tel confortement est parfois retenu pour reprendre des mécanismes de déstabilisation de l'ouvrage. Aussi le confortement côté zone protégée par une berme « allonge » le chemin hydraulique à parcourir au sein de l'ouvrage et agit en qualité de filtre retenant le départ des fines.

- Confortement remblai étanche coté eau

Une digue peut être confortée du côté eau pour améliorer la stabilité du versant étanche ou rehausser une digue sans pouvoir intervenir côté val drainant (pression urbaine) ou simplement pour améliorer son étanchéité. Dans un tel cas, la réduction éventuelle de la section d'écoulement doit être prise en compte pour le calcul des hauteurs d'eau.

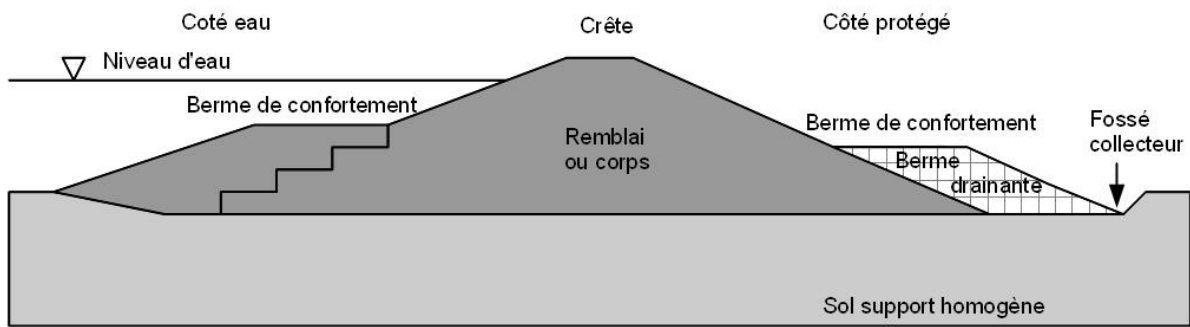


Figure 1.15 : Digue confortée côté eau et côté protégé par l'ajout de recharges

- **Remblai rehaussé**

Il faut distinguer cette notion de confortement pour remédier à un problème de stabilité géotechnique du rehaussement pour que l'ouvrage assure sa fonction de protection hydraulique (niveau de protection supérieur). Une digue peut être rehaussée de différentes façons :

- Par le côté zone protégée : la digue est rehaussée en augmentant sa section par le parement protégé

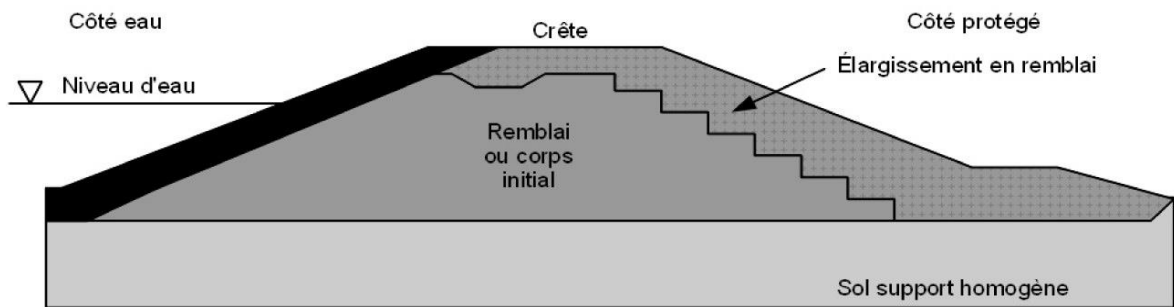


Figure 1.16: Digue rehaussée par élargissement côté protégé

- Par le côté eau : la digue est rehaussée en augmentant sa section par le parement « eau »
- Par la crête :
 - en ajoutant une rehausse,
 - en rehaussant la crête et réduisant sa largeur (mêmes pentes),
 - en rehaussant la crête et en augmentant les pentes de part et d'autre,
 - en ajoutant des matériaux de part et d'autre pour rehausser la crête en conservant les pentes,
 - en augmentant les pentes (non souhaitable mais fréquent).

1.2.4. Ouvrages rigides

Les systèmes d'endiguements incluent aussi d'autres ouvrages rigides répondant différemment aux sollicitations extérieures. On citera les ouvrages poids (en béton, maçonnerie, pierres sèches...), les ouvrages encastrés (rideaux de palplanches, murs bétons en I...). Les ouvrages amovibles (y/c rehausses mobiles) font aussi partie de ces ouvrages rigides et semi-rigides.

Leur conception et leur dimensionnement ne sont pas abordés dans le présent guide.

1.2.5. Ouvrages composites

Les ouvrages composites ont à la fois une composante géotechnique (matériaux issus du sol répondant aux sollicitations par un comportement « souple ») et une composante structurale (répondant la plupart du temps aux sollicitations par un comportement rigide ou cassant voire semi-rigide).

A -Mur de soutènement (fréquemment côté eau)

Les digues dites « classiques » dont la stabilité est assurée par un remblai ou corps ont une emprise au sol importante. Dans les cas où celle-ci est limitée, des structures rigides permettent d'atteindre des pentages quasi-verticaux. Ceci permet des gains importants d'espace par rapport aux ouvrages auto-stables. La stabilité de l'ouvrage est assurée par des murs poids (maçonnés ou en béton) ou ancré (palplanche, ancrages...). On retrouve majoritairement ces structures de soutènement côté eau où elles assurent la fonction de stabilité de l'ouvrage ainsi que celle d'étanchéité et/ou de protection.

La plupart du temps, les structures rigides sont peu perméables. Elles doivent alors être associées à un système de barbacane favorisant l'équilibre des niveaux d'eau afin d'éviter les pressions différentielles qui pourraient déstabiliser l'ouvrage.

Souvent, ces murs, au parement fortement pentu côté fleuve ou mer, sont épaulés côté ZP par un remblai en terre ou en matériau grossier qui, par exemple, supporte une voie de circulation. Dans la technique moderne, le béton a remplacé la maçonnerie en laissant parfois encore une place à cette dernière comme traitement esthétique des parements vus.

On peut aussi, localement, rencontrer des structures en gabions, ou en palplanches utilisées en protection de parement côté rivière d'une digue en remblai.

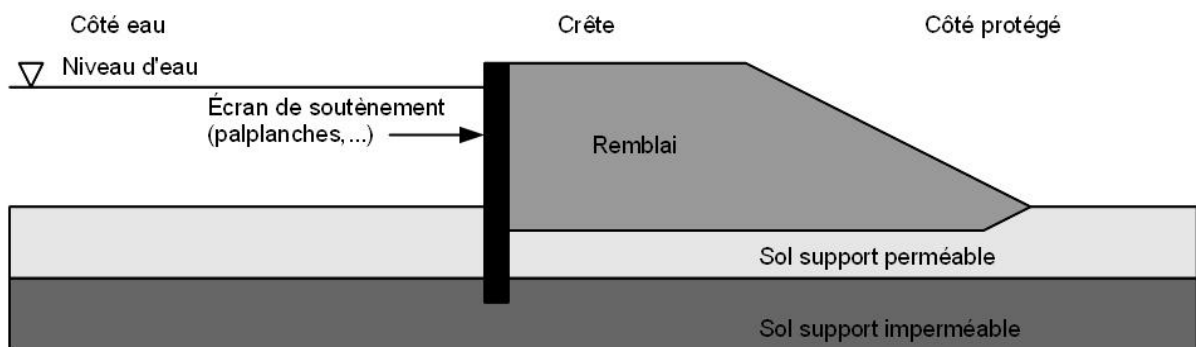


Figure 1.17 : Digue composite avec soutènement ancré côté eau

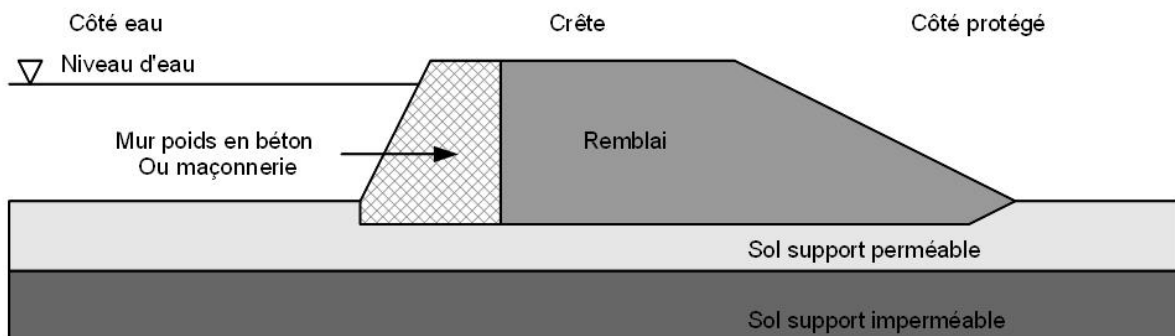


Figure 1.18 : Digue composite avec soutènement par un mur poids côté eau

B - Ouvrage composite incluant des éléments rigides en crête

- *Digue surmontée d'une structure (éventuellement amovible)*

Elles sont composées d'une partie inférieure à la conception proche d'une digue à talus surmontée par une structure verticale (mur ou caisson). L'objectif d'augmenter la revanche (ou la sécurité vis à vis de la surverse ou des franchissements) a parfois conduit à surélever la crête des digues par des rehausses étroites par exemple une murette en maçonnerie, implantées sur le couronnement, en général côté fleuve.

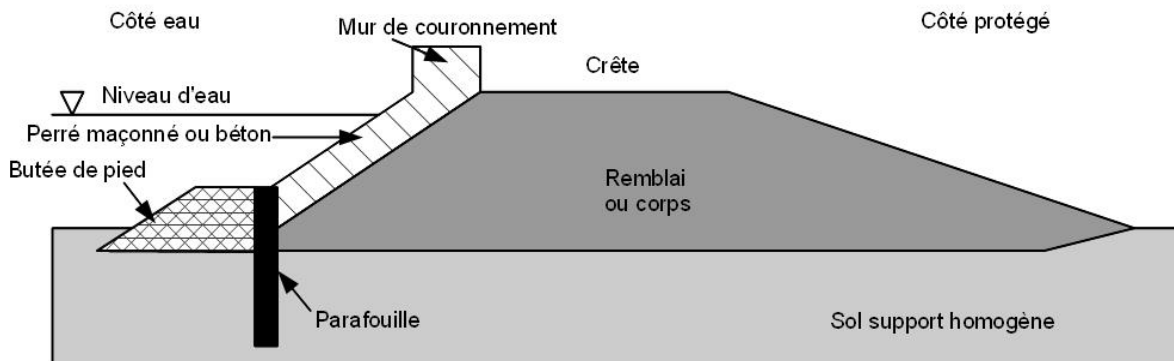


Figure 1.19 : Digue composite associant para fouille, perré, couronnement. Cas fréquent en maritime

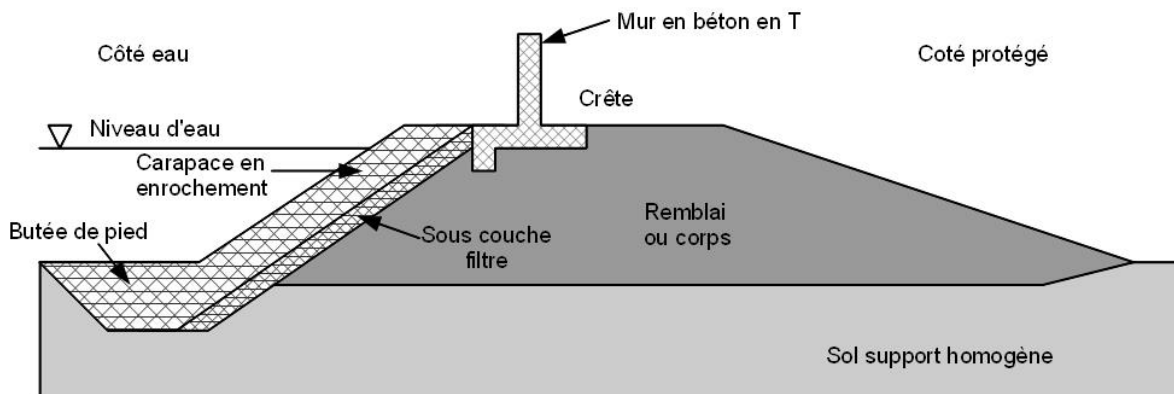


Figure 1.20 : Digue composite associant protection en enrochement, mur anti-franchissement... Cas fréquent en maritime

En domaine maritime, la partie inférieure peut provoquer le déferlement des houles de tempête ce qui réduira l'impact mécanique sur la partie supérieure de l'ouvrage par dissipation de l'énergie. En associant une partie inférieure « à talus » et une partie supérieure verticale, l'emprise au sol de l'ouvrage est réduite. On trouve ces structures très fréquemment pour les ouvrages soumis à la houle où le franchissement par paquets de mer est limité par un couronnement vertical.

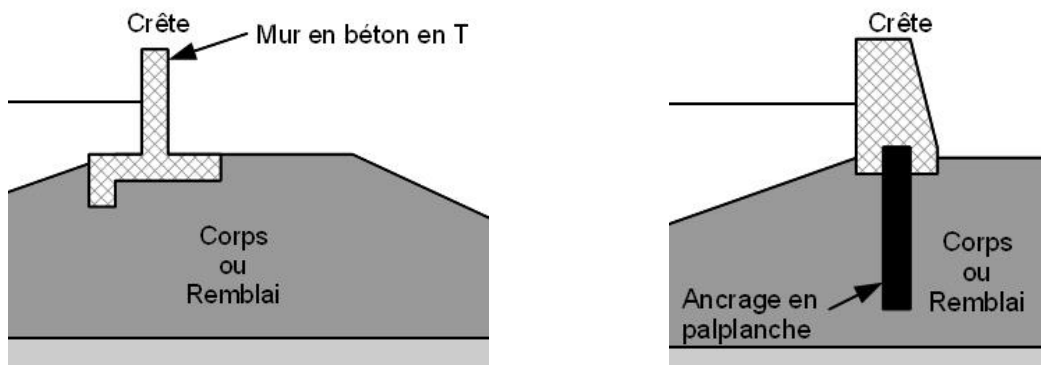
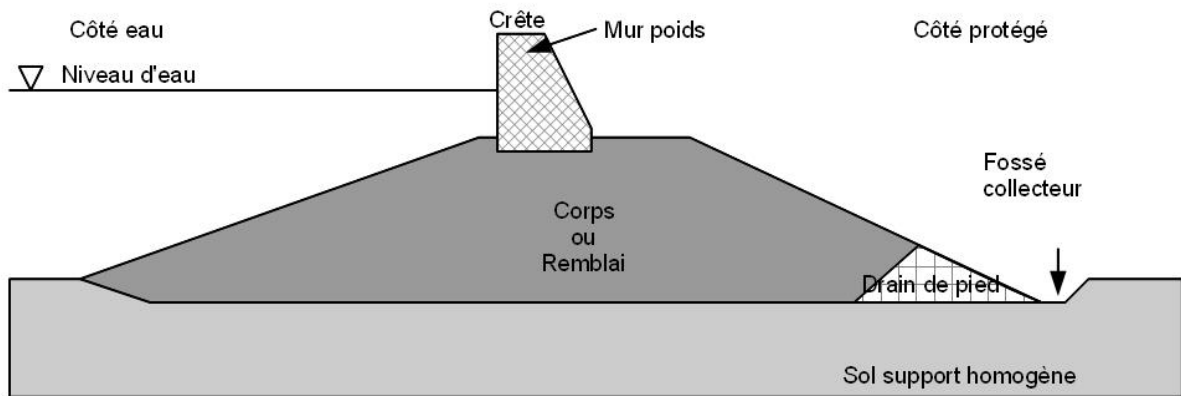


Figure 1.21 : Dignes composites avec mur en crête

Dans certains cas, le niveau du talus est arasé à un niveau voisin des basses mers, et est surmonté d'un parement de hauteur parfois importante, appelé également muraille.

Ces digues mixtes fonctionnent à marée basse comme des digues à talus normales. Lorsque le niveau du plan d'eau est plus haut, leur fonctionnement s'apparente à celui des digues verticales, la houle déferlant sur le soubassement.

On rencontre généralement ces ouvrages dans les mers à fort marnage dans les zones où la morphologie de la côte et du fond limitent leur exposition à la houle.

Ces ouvrages peuvent également être réalisés lorsque l'emploi d'une digue à talus pose trop d'inconvénients, soit à cause du volume de matériaux très important nécessaire pour la construction, soit lorsque l'emprise en pied de la digue ne correspond pas aux exigences de la zone à protéger, ou si le poids de l'ouvrage sur le sol de fondation est trop important.

De même des digues mixtes sont réalisées lorsque la construction d'une digue verticale ne peut être envisagée (problème de stabilité de la muraille sous les effets de vagues).

- *Digue avec voile étanche interne*

Certaines digues dont l'imperméabilité est détériorée au cours du temps sont « réparées » par inclusion de voile étanche (rideaux palplanches ou parois au coulis comme l'illustre la Figure 1.22).

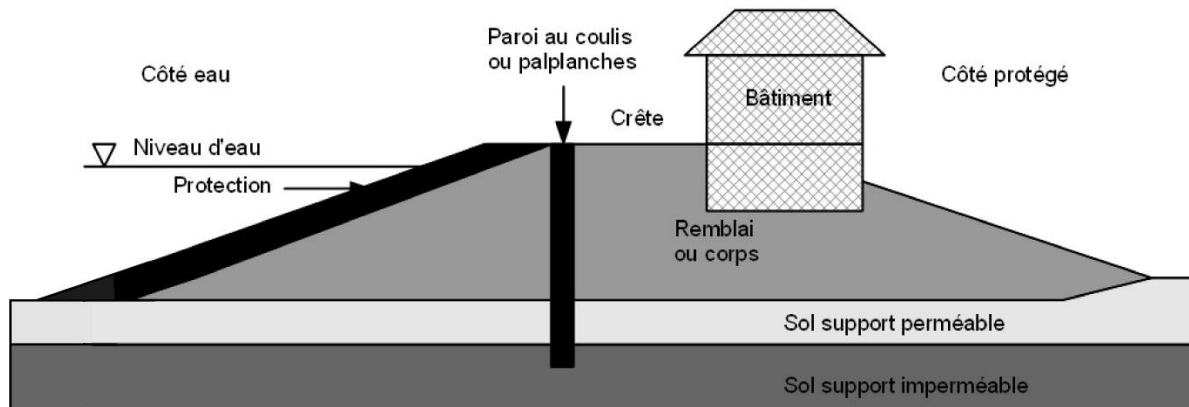


Figure 1.22 : Cas complexe d'une digue mêlant remblai homogène, rideau d'étanchéité, bâtiment...

1.2.6. Tronçon résistant à la surverse

Un tronçon de digue, quelle que soit sa typologie peut-être conçu pour résister à la surverse. Dans de tels cas, la digue du côté protégé doit être en mesure de résister aux sollicitations induites par la surverse. De la même manière, le pied de l'ouvrage doit être protégé pour éviter l'érosion externe qui serait induite par les vitesses importantes et la présence d'un éventuel ressaut hydraulique. Le côté protégé de la digue peut être constitué d'asphalte, d'enrochements mais peut aussi être protégé par enherbement.

1.2.7. Tronçon déversoir en domaine fluvial [Degoutte, 2012]

Les digues sont conçues pour contenir les événements jusqu'à un certain niveau correspondant à une période de retour. Dans le cas où les tronçons ne sont pas résistants à la surverse, pour se prémunir contre le risque de surverse, qui entraînerait de façon quasi certaine leur rupture brutale, on aménage, dans certains cas, des déversoirs dont la cote est calée quelques décimètres (classiquement de l'ordre du mètre pour les déversoirs de Loire) en dessous de la crête de digue. Leur fonction est de permettre l'épandage de la pointe de crue dans un champ d'inondation, a priori peu vulnérable. Ainsi, on espère maîtriser voire éviter la surverse au-dessus (et par voie de conséquence la destruction) des digues.

Ces déversoirs peuvent être constitués de simples zones basses aménagées dans le terrain naturel, mais il s'agit le plus souvent de seuils déversants avec une carapace en maçonnerie de pierres appareillées recouvrant la partie en remblai.

Le profil du seuil se poursuit par un radier aval, faisant office de zone de dissipation de l'énergie de l'eau.

Parfois, le seuil en maçonnerie est surmonté d'un merlon en terre (localement dénommé fusible), calé à une cote légèrement inférieure à la crête de digue ; ce dispositif fusible est censé être rapidement érodé dès le début de la surverse, libérant ainsi une section plus grande pour l'écêtement de la crue. L'intérêt d'un dispositif fusible est de retarder, autant que faire se peut, l'entrée en fonction du déversoir ; l'inondation de la zone protégée se produit donc moins fréquemment et les capacités de stockage du val restent disponibles pour le plus fort de la crue. De plus, la lame d'eau après effacement du fusible est plus importante améliorant ainsi la fonction d'écêtement de la crue.

Ce type de tronçon existe uniquement en milieu fluvial. Dans le cas maritime, on ne peut « délester » le système des sollicitations par un tel procédé la source d'eau étant « infinie ».

1.2.8. Passage batardable

Les digues sont des ouvrages linéaires. Cependant leur homogénéité longitudinale est loin d'être la réalité. En effet, de nombreux ouvrages singuliers y sont implantés, soit qu'ils concourent à l'aménagement, soit qu'ils relèvent de mesures compensatoires. Il en est ainsi des passages batardables et rampes d'accès au fleuve, des traversées par aqueducs, galeries et conduites, équipées ou non de clapets. Ces ouvrages singuliers parfois particuliers nécessitent une analyse au cas par cas dans le cadre de l'analyse du système de protection dans son ensemble.

2. Défaillances et mécanismes de détérioration et de rupture

2.1. Définitions

2.1.1. Défaillance, rupture, brèche

La défaillance peut être définie comme la perte de l'aptitude d'une unité fonctionnelle (un système ou un composant) à accomplir une fonction requise. La défaillance est l'inverse de la performance ; l'étude des défaillances permet de qualifier la performance.

NB : dans ce guide nous n'abordons que les aspects techniques et analytiques consacrés par l'Analyse de Fiabilité (AF) et l'Analyse des Modes de Défaillances (AMD), sans donner de valeur juridique au terme défaillance, ni de recherche de responsabilité.

La détérioration peut être définie comme une évolution non souhaitable d'un objet physique (ouvrage ou composant), due par exemple au vieillissement ou à un endommagement. Les détériorations peuvent être causées par des mécanismes (voir 2.1.2) à cinétique lente ou rapide.

Un tronçon ou segment de digue, de structure et de fonction homogènes, est en état de défaillance lorsque sa situation et/ou son état ne lui permettent plus d'assurer la fonction de protection contre les inondations pour laquelle il a été dimensionné. Deux origines peuvent être distinguées dans la nature cet état de défaillance :

1) Une défaillance hydraulique se produit lorsque l'ouvrage, bien qu'en état structurel interne conforme, n'est pas à même de remplir sa fonction hydraulique. Elle est donc liée à une défaillance de la performance hydraulique du tronçon ou segment de digue. Cette défaillance peut se produire en raison :

- de situations nouvelles liées à des modifications des conditions environnementales extérieures au tronçon de digue considéré : modification des écoulements en aval ou en amont du fait d'aménagement postérieur au tronçon par exemple ;
- de situations non prévues dans la conception de l'ouvrage ou d'erreurs dans la conception de l'ouvrage ;
- de défaillance ou dysfonctionnement d'organes hydrauliques (vannes, clapets, batardeaux, déversoirs...),
- d'une défaillance hydraulique d'un autre tronçon ou segment de digue.

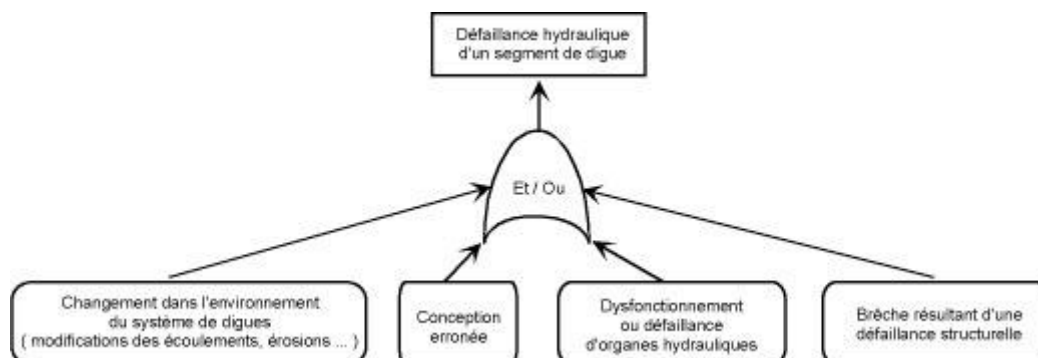


Figure 2.1 : Origine des défaillances hydrauliques des digues (R. Tourment, [ILH])

2) Une défaillance structurelle (ou défaillance interne du système) se produit lorsque un ou plusieurs composants, dont les fonctions propres assurent la tenue de la structure du tronçon de digue, sont dans un état de défaillance altérant la pérennité structurelle de l'ouvrage. La pérennité de l'ouvrage n'étant plus assurée, la fonction de protection contre les inondations ne peut plus être garantie. Un tronçon ou segment de digue peut être dans un état de défaillance structurelle avant sa ruine totale (brèche).

Les processus de défaillance d'un tronçon ou segment de digue peuvent être lents ou rapides :

- Les processus de détérioration, de dégradation ou d'endommagement sont des processus généralement lents et dépendant du temps. Ils conduisent à une altération de l'état des propriétés des composants structurels d'un tronçon ou segment de digue. Cette altération peut se traduire par une rupture du composant qui se caractérise par un seuil au-delà duquel les propriétés de celui-ci chutent brutalement et ne sont plus à même d'assurer sa fonction voire son intégrité. Les processus de détérioration, de dégradation ou d'endommagement mènent ainsi à une défaillance structurelle du tronçon ou segment de digue et peuvent déboucher sur des processus de brèche généralement sous l'effet d'évènement ou sollicitations externes (crue ou franchissements de vagues par exemple).
- La brèche est un effondrement catastrophique qui résulte d'une perte significative de matériaux en crête ou dans le corps de digue, qui provoque un déversement non contrôlé d'eau dans la zone protégée. Elle correspond à un état ultime de défaillance et caractérise un état de rupture de l'ouvrage dans son ensemble. Elle se développe lors d'un processus généralement rapide de ruine et de destruction. Le déclenchement de ce processus peut cependant être précédé d'une phase d'initiation, en relation avec des processus de détérioration, dont la durée est variable mais peut être parfois assez longue. Les processus de brèche les plus fréquents sont liés à des mécanismes de franchissement de vagues, de surverse ou d'érosion interne des ouvrages.

Il est à noter qu'un ouvrage ne résistant pas à un événement dont les sollicitations dépassent celles ayant été définies lors de sa conception ne peut pas être considéré comme défaillant.

2.1.2. Mécanismes élémentaires, scénarios, modes de rupture

Les mécanismes élémentaires de détérioration ou de dégradation, présentés dans la section suivante, agissent sur les composants individuels qui participent de la structure du tronçon ou segment de digue. Ils impliquent des processus physiques ou chimiques tels que des chocs, des cisaillements, des flux d'eau, l'effet de pressions interstitielles, la dissolution ou la corrosion...

Ces mécanismes conduisent à une altération de l'état des propriétés des composants structurels du tronçon ou segment de digue. Ils produisent des dommages qui se manifestent par des fissures, des venues d'eau, des départs de matériaux etc. Cependant, les symptômes observables de ces détériorations, dégradations, ou endommagements peuvent être attribués à différents mécanismes tandis qu'un même mécanisme peut initier ou être initié par la détérioration d'un ou plusieurs composants.

L'enchaînement des mécanismes de détérioration, dégradation ou endommagement dans une combinaison ou scénario d'événements conduit à la défaillance structurelle des composants du tronçon ou segment de digue. La combinaison ou scénario d'événements qui affecte un tronçon ou segment particulier de digue, dépend de sa forme, de ses composants, de la nature et de la composition des structures qui lui sont associées, des sollicitations auxquelles il est soumis et de leurs évolutions au cours du temps.

On dénomme généralement "mode de rupture" des scénarios de rupture qui mettent en œuvre un certain nombre de mécanismes qui peuvent se succéder ou se produire en

parallèle ; le "mode du rupture" est généralement dénommé par le mécanisme initiateur ou prépondérant au cours du scénario.

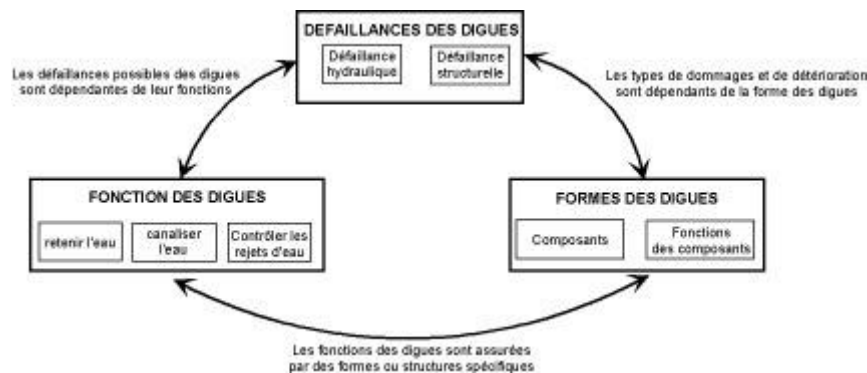


Figure 2.2 : Relations entre formes, fonctions et défaillances des digues (Y. Deniaud, [ILH])

2.1.3. Modes classiques d'endommagement et de rupture des digues en remblais (mécanismes élémentaires)

Les mécanismes individuels de détérioration, dégradation ou d'endommagement des digues en remblai peuvent être regroupés en des termes génériques décrits ci-dessous. Cependant, il est important de conserver à l'esprit, que le processus de dégradation d'un segment spécifique de digue combinerait différents mécanismes individuels lesquels dépendront de ses composants, de son environnement et des sollicitations qui l'affecteront. Il existe ainsi une relation très forte entre les formes, les fonctions et les modes d'endommagements et de ruptures des digues.

2.1.3.1. L'érosion externe

L'érosion externe regroupe tous les mécanismes qui provoquent des départs de matériaux sous l'effet de sollicitations s'appliquant sur la surface extérieure de la digue. Ces départs de matériaux induisent une diminution de la section de la digue, un raidissement des talus et conduisent à saper sa résistance. Ils conduisent à l'apparition de creusement dans les matériaux érodés dénommé affouillement.

a) L'érosion côté zone protégée

L'érosion côté zone protégée se développe sous l'effet des interactions avec le milieu environnement de la digue et les usages qu'elle supporte. Les agressions météoriques (pluie, gel, ruissellement), la présence d'animaux fouisseurs, la déambulation d'animaux d'élevage, les activités humaines et notamment le passage d'engins motorisés peuvent générer d'importants départs de matériaux et l'apparition d'instabilité de surface. Leur répétition et leur effet cumulatif peuvent être à terme préjudiciable pour l'intégrité de l'ouvrage. Le parement coté eau subit ce même type d'érosion mais elles ne sont généralement pas "dimensionnantes"

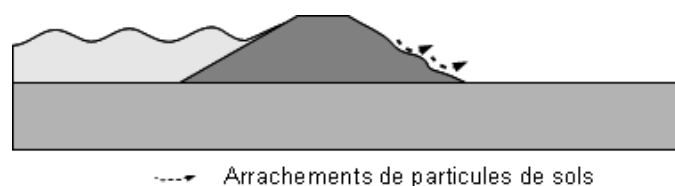


Figure 2.3 : Erosion côté terre (Traduit et adapté de l'ILH)

b) L'érosion côté eau

En plus des mécanismes présentés dans le a) ci-dessus, des affouillements se développent sous l'effet de l'action des vagues, des courants et des turbulences. Ces sollicitations peuvent être frontales ou obliques à l'ouvrage (vagues, houles, érosion de méandres) mais également longitudinales (courant d'une rivière, dérive littorale). Les affouillements sapent la base des ouvrages et conduisent à leur déchaussement lorsqu'ils affectent les sols supports (avant plage, berges). Ils peuvent aussi démanteler la protection puis altérer directement le corps des ouvrages. Les dommages liés aux affouillements sont généralement associés à l'évolution morphodynamique de la rivière ou du secteur de côte dans lequel s'insère l'ouvrage. Ils induisent souvent des phénomènes d'instabilité de la digue à différentes échelles (glissements superficiels ou profond affectant l'ouvrage du fait du départ de matériaux en butée de pied). Ils culminent dans une érosion généralisée de l'avant digue (abaissement de l'avant-plage ou du ségonal) qui tend à déstabiliser l'ouvrage dans son ensemble ou à augmenter les sollicitations qui l'affectent.

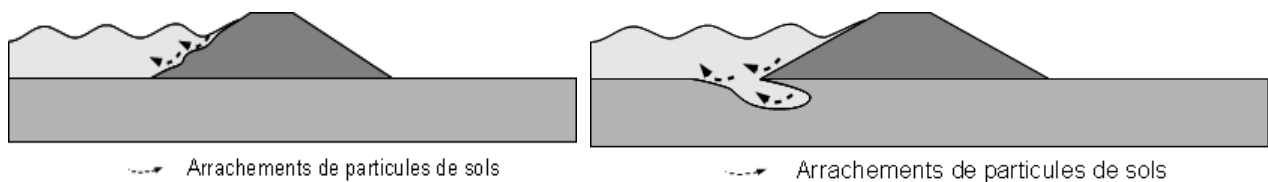


Figure 2.4: Érosion externe du corps ou de la fondation d'une digue en terre (affouillements) côté eau (Traduit et adapté de l'ILH)

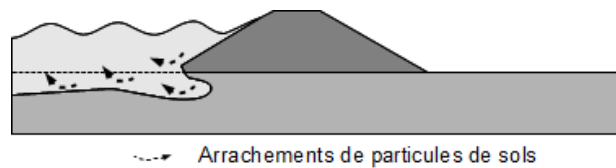


Figure 2.5 : Érosion externe et abaissement du profil en amont de la digue (avant plage ou ségonal) (Traduit et adapté de l'ILH)

c) La surverse

La surverse, lorsqu'elle est incontrôlée, est un des facteurs d'érosion externe les plus importants et les plus dévastateurs. Ce mécanisme constitue une des causes principales des ruptures de digues en remblai. Le débordement d'eau par-dessus la crête de la digue conduit à des écoulements à forte vitesse sur la crête et le versant aval de la digue (côté val ou terre). Cet écoulement incontrôlé génère une érosion régressive du talus pouvant rapidement conduire à la brèche. Ce phénomène est notamment décrit dans le guide sur les déversoirs sur digues fluviales [Degoutte, 2012, p 19 à 22].

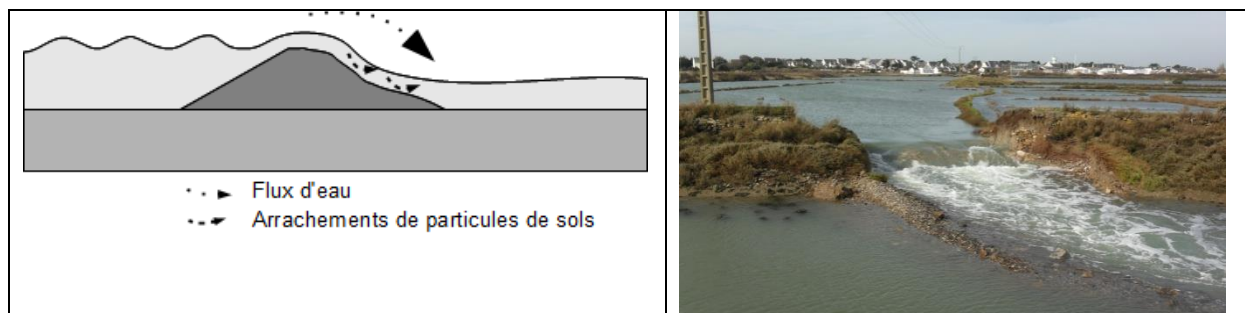


Figure 2.6 : Principe de la surverse et exemple de brèche dans un ouvrage (Traduit et adapté de l'ILH)

2.1.3.2. L'érosion interne

De nombreux travaux récents ont été menés pour caractériser ce phénomène et développer des essais représentatifs en laboratoire et in situ ; on peut particulièrement citer les références suivantes : bulletin 164 de la CIGB [2013], le projet ERINOH [2009] et ses recommandations [Deroo et al, 2013] ainsi que les publications de Bonelli et al [2011, 2012, 2013].

Lorsque la digue est en eau (crue, marée haute), il se produit des écoulements d'eau au travers du corps de l'ouvrage en remblai, ou dans les sols de fondations ; ces écoulements peuvent être à l'origine de départ et de migration de matériaux lorsque le gradient hydraulique atteint un seuil appelé gradient critique des matériaux constituant la digue ou sa fondation. Ces phénomènes sont particulièrement sensibles aux hétérogénéités de perméabilité, les secteurs les plus perméables concentrant les flux et accroissant les gradients et vitesses des écoulements.

Le terme d'érosion interne regroupe ainsi plusieurs phénomènes différents d'entraînements de particules liés aux écoulements à l'intérieur d'un massif de sols :

- L'érosion régressive : les matériaux sont arrachés en sortie du réseau d'écoulement lorsque le gradient d'écoulement excède le gradient critique de flottabilité du sol. Un conduit se crée progressivement de l'aval vers l'amont amplifiant au cours du temps le gradient et les vitesses d'écoulement.

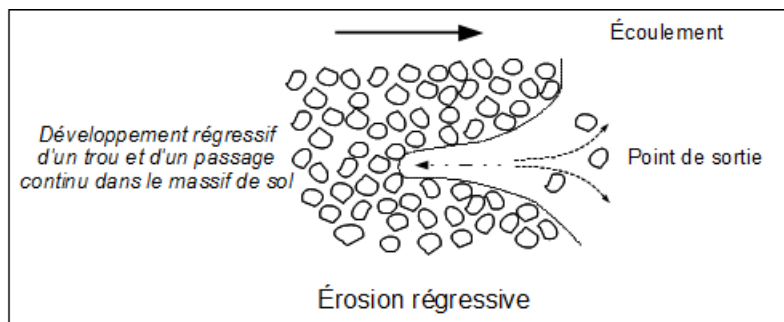


Figure 2.7a : Principe de l'érosion régressive

- L'érosion concentrée ou de conduit : Les départs de matériaux se produisent le long des bords d'une fissure ouverte ou de vides interconnectés lorsque les forces de cisaillements induites par le courant sont supérieures à une valeur critique liée aux caractéristiques des matériaux. Ce type d'érosion peut particulièrement se développer le long de structures associées telles que des conduites enterrées ou des murs.

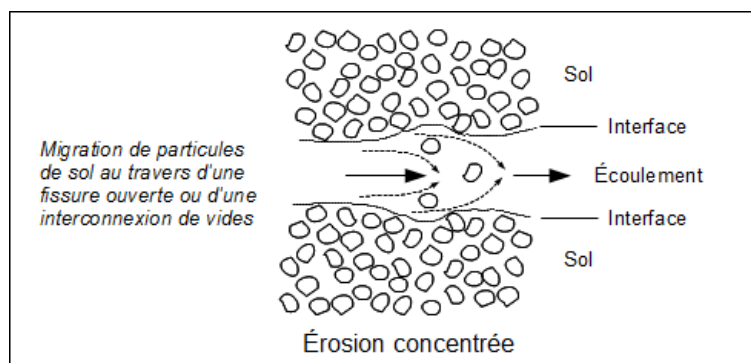


Figure 2.7b : Principe de l'érosion concentrée

- L'érosion de contact : ce type d'érosion se développe à une interface horizontale entre deux matériaux granulaires ou entre un matériau granulaire et un matériau fissuré. Les particules les plus fines sont entraînées par l'écoulement dans l'espace poreux de la couche de matériaux grossiers ou dans les fissures ouvertes du matériau fissuré.

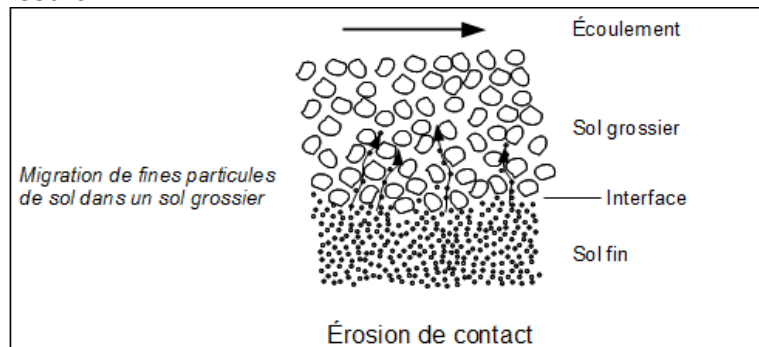


Figure 2.7c : Principe de l'érosion de contact

- La suffusion est un phénomène affectant certains types de sols instables où les particules les plus fines sont entraînées au sein du squelette du sol que constitue les matériaux les plus grossiers.

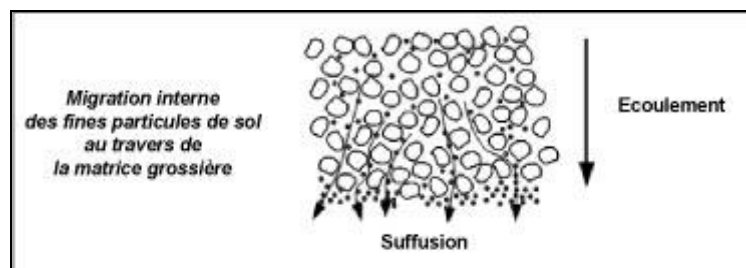
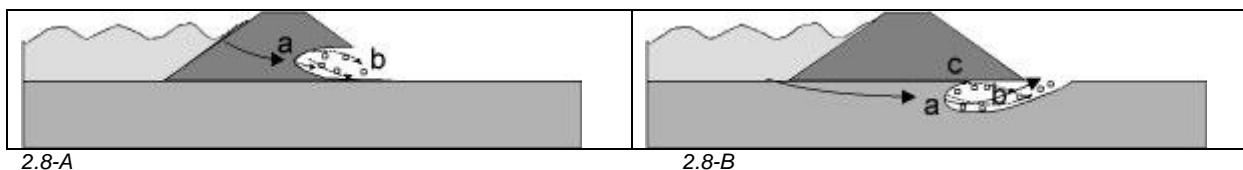


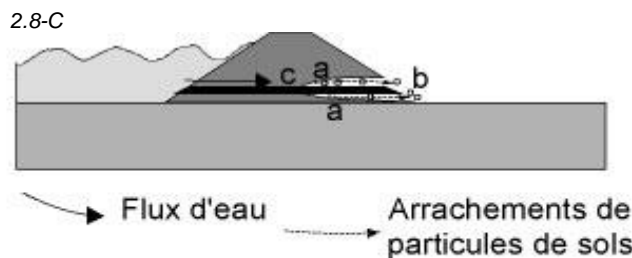
Figure 2.7d : Principe de la suffusion

Ces différents mécanismes se combinent bien souvent pour générer des érosions dans le corps ou les sols de fondations des ouvrages en terre. Ils se localisent préférentiellement aux interfaces avec les ouvrages traversants, portés ou constitutifs de la digue.



2.8-A

2.8-B



2.8-C

a - érosion régressive ; b - érosion concentrée ; c - érosion de contact

Figure 2.8 : Érosion interne du corps de digue (A), de la fondation (B) ou le long d'un ouvrage traversant (C) un ouvrage en terre (Traduit et adapté de l'ILH)

2.1.3.3. Les instabilités des digues en remblai

La stabilité des talus des ouvrages doit normalement être assurée par une conception et un dimensionnement respectant les règles de l'art géotechnique de la construction des ouvrages en terre. Cependant, l'évolution des sollicitations au cours du temps, notamment en période de crue, peut conduire à des instabilités liées en particulier :

- à l'accroissement des pentes de talus sous l'action de phénomènes d'érosion externe (suppression de la butée de pied) ;
- à l'augmentation des pressions hydrauliques au sein de l'ouvrage suite à des défaut de drainage et/ou à la présence de couches hétérogènes à comportements hydrauliques contrastés ;
- à l'augmentation des charges sur l'ouvrage ou les sols de fondation (nouvelle construction, rehausse, élargissement...);
- à l'évolution défavorable des caractéristiques des matériaux de constitution ou de fondations des ouvrages au cours du temps (cycle de dessiccation-imbibition, fluage, liquéfaction...).

Les principaux mécanismes d'instabilité des ouvrages en terre sont ainsi :

- les glissements superficiels : Sous l'effet des agents météoriques, les caractéristiques mécaniques des matériaux situés en surface du corps de digue peuvent se dégrader. Des glissements superficiels intéressant les matériaux altérés du corps de digue peuvent alors apparaître lorsque la résistance au cisaillement de ces matériaux sera insuffisante à leur tenue dans la configuration géométrique des pentes de talus initiales de l'ouvrage.

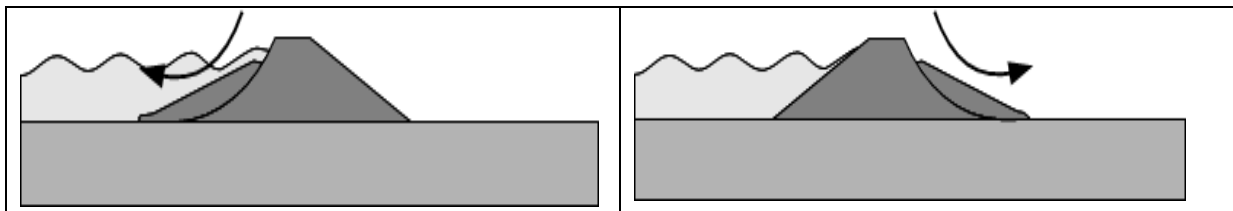


Figure 2.9 : Glissements superficiels affectant un corps de digue en terre (Traduit et adapté de l'ILH)

- Les glissements rotationnels ou translationnels : L'augmentation des charges hydrauliques liée à un épisode de crue ou l'augmentation des charges liées à une rehausse ou à une modification substantielle du profil de la digue ou de l'usage de sa crête, peuvent conduire à l'apparition de glissements rotationnels ou translationnel de grande ampleur intéressant l'ensemble des matériaux constitutifs de l'ouvrage. Ces phénomènes seront également susceptibles d'affecter les sols de fondations, particulièrement si ils contiennent des niveaux à faibles caractéristiques mécaniques de cisaillement (argiles plastiques ou organique, tourbes...). Des mouvements rotationnels apparaissent ainsi lorsque les résistances au cisaillement des matériaux constitutifs du corps de digue et/ou de certains horizons argileux du sol de fondation sont inférieures aux charges motrices appliquées par le poids des matériaux, les forces hydrauliques et les surcharges de service. Les mouvements translationnels de blocs sont susceptibles de se produire lorsque la résistance au cisaillement d'un horizon de sol de fondation est insuffisante devant les efforts apportés par les forces hydrauliques appliquées sur le corps de digue. Ces mouvements translationnels peuvent également affecter le corps d'un ouvrage, particulièrement lorsque celui-ci présente une stratification marquée de ses caractéristiques mécaniques ou une surface horizontale singulière (limite de reprise d'ouvrage, crête d'un ancien ouvrage rehaussé...).

Les glissements se traduisent généralement par le développement de fissurations, l'apparition de déplacements verticaux en crête de talus et l'apparition de bourrelet en

pied de talus. Ces manifestations peuvent être masquées ou érodées par les effets d'une crue.

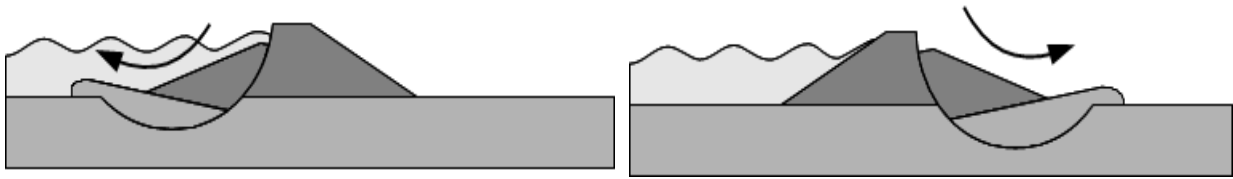


Figure 2.10 : Glissement rotationnel profond affectant un corps de digue en terre et sa fondation (Traduit et adapté de l'ILH)

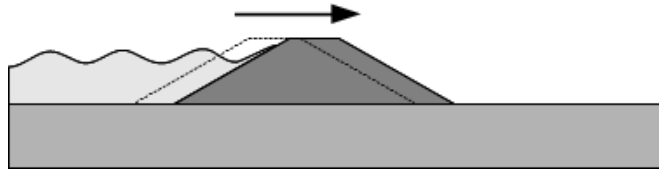


Figure 2.11: Glissement translationnel affectant un corps de digue en terre (Traduit et adapté de l'ILH)

- Les tassements : L'apparition de tassements peut être liée à de mauvais compactage des matériaux mis en œuvre lors de la réalisation du corps de digue ou à des phénomènes de consolidation et/ou de fluage associés à la présence de niveaux compressibles dans les sols de fondation de l'ouvrage, par exemple, le phénomène se rencontre fréquemment lorsque la digue traverse un ancien chenal ; l'érosion interne peut également être à l'origine de tassements en crête. L'abaissement de la topographie de la crête induite par ces tassements diminue la hauteur de protection effective de l'ouvrage qui sera alors susceptible d'être affecté plus rapidement par une surverse. Les distorsions du profil en long et la fissuration générées par les tassements, fragilisent par ailleurs certains composants de l'ouvrage qui deviennent ainsi plus perméables et plus sensibles à l'apparition de phénomènes d'infiltration et d'érosion interne.

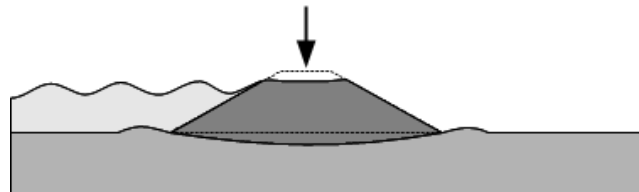


Figure 2.12: Tassement affectant un corps de digue en terre (Traduit et adapté de l'ILH)

- La liquéfaction : Dans certaines conditions de sollicitations notamment cycliques (séismes, houles...), certains matériaux particuliers peuvent voir leurs caractéristiques mécaniques de cisaillement se dégrader brutalement. La liquéfaction de certains sols supports de fondations sous l'effet de telles sollicitations peut ainsi conduire à l'effondrement des corps de digue qui les surmontent, par un effet de sape ou de sous-minage.
- Les effondrements : La présence et l'instabilité de cavités préexistantes dans le substratum de fondation des ouvrages peut conduire à d'importantes détériorations associées à des montées de fontis dans le corps de l'ouvrage. Le soutirage de matériaux constitutifs de l'ouvrage vers la cavité sous-jacente peut conduire à des affaissements localisés ou à des effondrements brutaux. Ces phénomènes sont régulièrement masqués lorsque des revêtements rigides de surface sont présents (dalles béton, chaussées bitumineuses etc...).

2.1.4. Modes classiques de rupture des digues mixtes

Les digues mixtes sont des digues en remblai qui incorporent des éléments rigides de type murs, soutènements, ou protections qui peuvent être perreyés, maçonnés ou bétonnés. Les mécanismes classiques de détérioration, dégradation ou d'endommagement de ces structures comprennent :

2.1.4.1. Les détériorations externes liées aux sollicitations mécaniques

Les détériorations externes sont générées par des actions mécaniques extérieures à l'ouvrage.

A. Les instabilités externes

Ces instabilités recouvrent les phénomènes suivants :

- Le poinçonnement : Lorsque la capacité portante des sols de fondation est insuffisante par rapport au poids de l'ouvrage, l'enfoncement excessif de la base de l'ouvrage a un effet déstabilisant provoquant le basculement et la ruine de ce dernier. Pour un ouvrage en crête, la faible capacité portante du corps de digue peut également se traduire par l'apparition de glissement superficiel emportant l'ouvrage qui le surmonte.

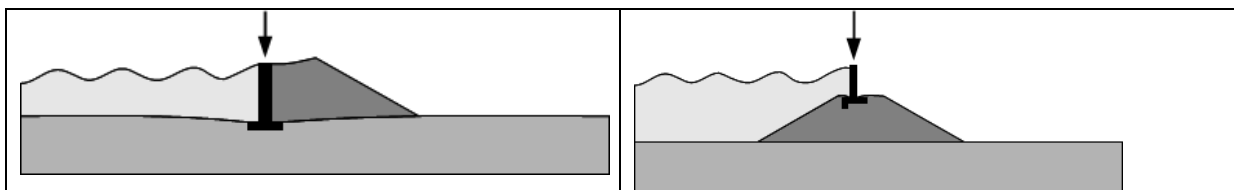


Figure 2.13 : Poinçonnement d'ouvrages rigides inclus dans une digue composite (Traduit et adapté de l'ILH)



Figure 2.14 : Glissement superficiel affectant un ouvrage en crête (Traduit et adapté de l'ILH)

- Le glissement sous la base : Pour un ouvrage de soutènement, lorsque les poussées sur l'ouvrage sont élevées, la fondation d'un ouvrage de type mur peut glisser sur sa base. Le déplacement induit conduit généralement à la ruine de l'ouvrage rigide qui n'est pas dimensionné pour de telles sollicitations.

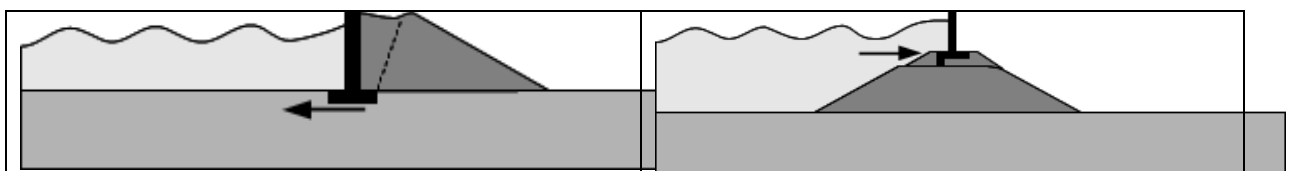


Figure 2.15 : Glissements sur la base d'ouvrages rigides (Traduit et adapté de l'ILH)

- Le renversement : Un excès de poussée à l'amont d'un ouvrage de type mur ou soutènement correctement fondé, peut conduire à un déplacement excessif de la tête de l'ouvrage. Ce déplacement peut culminer par un renversement et un basculement complet de l'ouvrage.

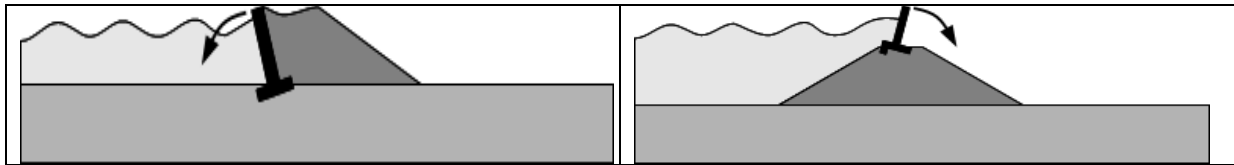


Figure 2.16 : Renversements d'ouvrages rigides (Traduit et adapté de l'ILH)

- Le défaut de butée : Le défaut de butée des ouvrages rigides, par conception ou plus généralement par affouillement, conduit à la ruine de ces ouvrages, par déversement des soutènements ou par déchaussement et glissement des murs et talus perreyés.

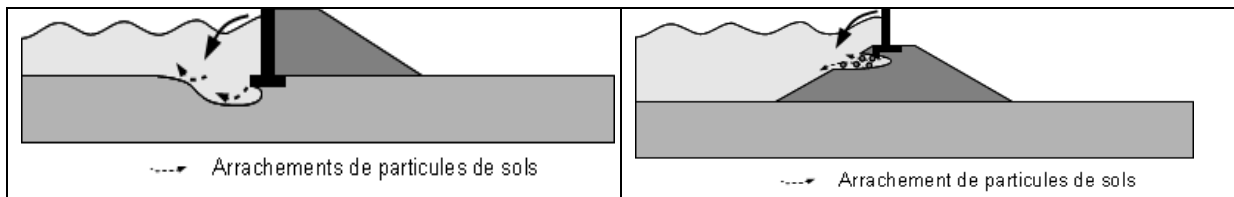


Figure 2.17 : Affouillements et défauts de butée de digues composites (Traduit et adapté de l'ILH)

- Le soulèvement : Le soulèvement de la base des ouvrages rigides, est généré par des excès de pressions interstitielles ou par des défauts de butée.

B. L'instabilité générale

Un ouvrage et son terrain d'assise forment un ensemble. Lorsque les caractéristiques mécaniques du terrain sont médiocres, un glissement général de cet ensemble peut se produire.

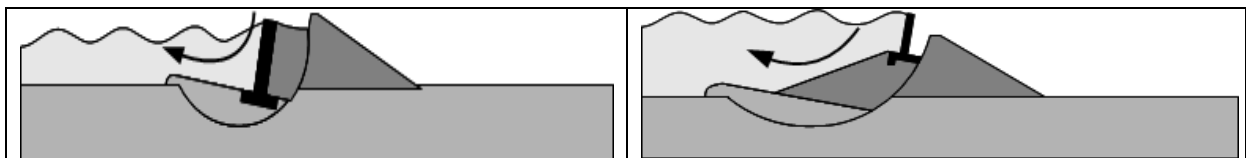


Figure 2.18 : Glissements généralisés affectant des ouvrages rigides(Traduit et adapté de l'ILH)

2.1.4.2. Les détériorations internes liées à l'altération des matériaux constitutifs de la digue

Les détériorations internes entraînent une diminution de la résistance de la structure. A partir d'un certain seuil de détérioration interne, la résistance de la structure est insuffisante pour l'usage prévu et l'ouvrage peut se ruiner. L'insuffisance de résistance interne de la structure, peut provenir d'un mauvais dimensionnement initial mais elle provient généralement d'une détérioration au cours du temps des matériaux composant les structures (maçonnerie, béton, acier). Il est important de noter à cet égard que toute structure rigide est dimensionnée pour une durée de vie donnée.

Parmi les phénomènes de détérioration interne, il convient de citer :

- L'usure : L'usure est un phénomène de détérioration au cours du temps des matériaux, liée aux frottements exercés par le milieu sur l'ouvrage.
- Les chocs : L'altération d'une structure par des chocs revêt deux aspects :
 - un phénomène d'usure généré par des chocs de faible amplitude mais répétés,

- une rupture générée par un choc de forte amplitude supérieur à la résistance du matériau.
- Les actions chimiques (solubilisation, gonflement, corrosion...) En présence de certaines substances chimiques présentes dans le milieu naturel environnant l'ouvrage, des réactions chimiques peuvent dégrader les capacités mécaniques des matériaux constitutifs de l'ouvrage.
- Les actions biologiques : le développement racinaire (ouvrages fluviaux) et la colonisation des ouvrages par des espèces incrustantes (ouvrages maritimes) peuvent favoriser le développement de fissures et de fracturation ou la désagrégation progressive des matériaux.

2.1.4.3. Les spécificités des digues maritimes

Les digues maritimes présentent un contexte environnemental particulier caractérisé par des sollicitations spécifiques souvent cycliques (houle, marées, surcotes de tempêtes) pouvant générer des mécanismes particuliers de rupture des ouvrages.

Le franchissement des ouvrages côtiers par des paquets de mer issus du déferlement de la houle à la côte est ainsi susceptible de générer d'importantes érosions externes sur les versants arrières des ouvrages, avant même que ceux-ci soient submergés par surverse. Ils peuvent concourir à une détérioration et à une ruine accélérée de l'ouvrage. Ces franchissements génèrent des volumes parfois non négligeables occasionnant des inondations importantes lorsque leurs stockages et évacuations ne sont pas correctement gérés. Par ailleurs, les brèches peuvent survenir ou être amplifiées lors de la vidange des secteurs inondés ou simplement lors de la marée descendante, particulièrement dans les secteurs à marnage importants.

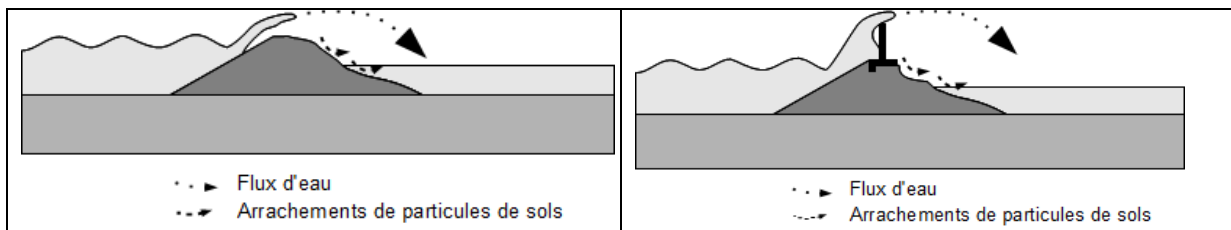


Figure 2.19 : Principes des franchissements (Traduit et adapté de l'ILH)

L'action mécanique des vagues sur les versants maritimes des ouvrages peut également concourir à des affouillements en pied d'ouvrage par abaissement de l'avant-plage ou à des dégradations des couches de protection par des chocs répétés.

En cas d'infiltration des eaux dans le corps de digue, l'oscillation des charges en arrière des couches de protection peut provoquer la désagrégation des matériaux constitutifs du corps de digue par liquéfaction ou par aspiration des fines vers l'extérieur de l'ouvrage et la dislocation des couches de protection par sous-pression et effets de piston ; ce phénomène également rencontré dans le domaine fluvial est généralement amplifié en maritime par le caractère cyclique des sollicitations.

Enfin, la composition chimique particulière de l'eau de mer peut également conduire à l'apparition de pathologies particulières d'altération des matériaux constitutifs de la digue, notamment sur ses parties rigides maçonnées ou perreyées.

2.2. Analyse des mécanismes de détérioration et des scénarios de brèche sur la base de retours d'expériences

2.2.1. Rupture ou endommagement dues à l'érosion externe

2.2.1.1. Erosion digue fluviale en terre

Les exemples d'érosion par le cours d'eau des digues fluviales sont fréquents notamment sur les digues en remblai avec une protection limitée généralement à un enherbement. Les phénomènes d'érosion peuvent être progressifs (figure 2.19) ou au contraire plus brutaux et conduire à une brèche au cours d'une seule sollicitation.



Figure 2.20 – a – Erosion d'une digue non protégée pourtant constituée de matériau contenant des éléments pierreux ; b – L'érosion du talus est ici ralentie par les racines d'arbres mais ces derniers sont ainsi fragilisés en cas de chute par le vent le départ de la souche constituera une « encoche » dangereuse pour la digue

2.2.1.2. Erosion digue maritime en galets

La digue des Bas-Champs est un cordon naturel de galets (mélange galets+sable) aménagé par des rechargements et la réalisation d'épis. Cette digue protège non seulement un polder naturel mais également la ville de Cayeux. La pente "naturelle" d'équilibre face à la mer est relativement raide et les sollicitations dues à la combinaison des phénomènes de marée+surcote+houle lors d'épisodes de tempête a conduit à plusieurs reprises à des formations de brèches. L'action mécanique des vagues est dans ce cas à l'origine de la rupture. En effet, la taille des galets était trop faible compte-tenu de l'énergie des vagues lors de cet épisode tempétueux. Le confortement a consisté en des rechargements de la digue et en des renforcements des épis existants ainsi qu'en la construction de nouveaux épis plus longs et plus hauts afin de stabiliser le cordon longitudinalement et d'augmenter sa largeur transversale.

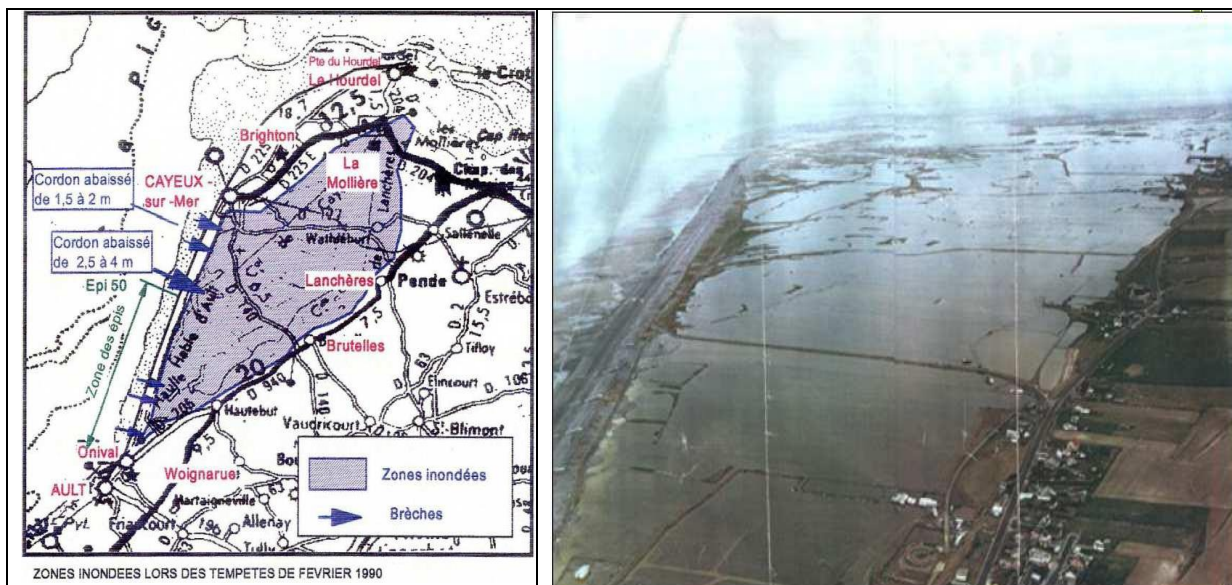


Figure 2.21 – Digue des Bas-Champs : zones inondées suite aux brèches de février 1990 - Source Cerema.

2.2.1.3. Erosion/abrasion digue maritime en maçonnerie

La digue du Génie à L'Aiguillon (85), lieudit les Sablons dans l'embouchure du Lay est une digue de plusieurs kilomètres et de hauteur maximum 2,50 m, coté zone protégée, au-dessus de la route qui la longe sur toute sa longueur. Cette digue construite en maçonnerie au 19^{ème} siècle connaît deux principaux types de désordres :

- une érosion externe par abrasion de la maçonnerie côté mer et par effritement due aux conditions météorologique sur la crête et le parement coté zone protégée ;
- la formation d'ettringite dans les ciments anciens (aggravée par le contact avec l'eau de mer ?) induisant des gonflements et par conséquent des déformations et fissurations accélérant l'action des agents de dégradation atmosphérique.

A plusieurs reprises la digue a connu des brèches, certes limités en largeur compte tenu de la nature rigide de la digue. Les réparations et confortements réalisés sont les suivants :

- comblement des brèches par des enrochements liés au béton ;
- mise en place d'une recharge en enrochement côté mer pour éviter l'érosion du parement et briser l'énergie des vagues ;
- mise en place d'un enduit en béton projeté coté ZP pour limiter l'effritement et l'action des agents atmosphériques sur la maçonnerie dégradée.



Figure 2.22 – Digue du Génie : Abrasion des pierres coté mer (les joints ciment restent en saillie) et effritement de la crête - Source Irstea.



Figure 2.23 – Digue du Génie : Béton projeté coté route (éclaté par endroit suite au gonflement de la maçonnerie) et réparation d'une brèche par des enrochements liés au béton côté mer - Source Irstea.

A noter que les vitesses d'abrasion des maçonneries sont variables selon la nature des matériaux constituant la digue mais également en fonction de la force de la houle (niveau de sollicitation de la digue) et de la nature de l'estran, des vitesses d'abrasion du béton pouvant atteindre 1 cm par an ont été constatées dans certaines situations ; on peut voir sur la figure 2.24 la digue de Pors Kaïg sur l'île de Sein où l'abrasion par des galets a mis les fers du béton à nu en certains endroits.



Figure 2.24 – Digue de Pors Kaïg : Exemple d'abrasion du béton par les galets - Source Cerema.

2.2.1.4. Erosion pied de digue en maçonnerie ou remblai caparaçonné

L'érosion coté fleuve ou mer du béton ou de la maçonnerie peut se manifester sur le parement comme décrit précédemment mais le pied de talus (liaison digue-fondation) reste le point souvent le plus vulnérable aux phénomènes d'érosion (mais pas systématiquement) notamment lors d'une baisse de la cote du terrain naturel du côté fleuve ou mer ; ces

érosions, si elles ne sont pas stoppées par une réhabilitation adéquate, peuvent évoluer vers une excavation sous la maçonnerie dans le cas de digues rigides mais également d'une partie du matériau constituant la digue dans le cas d'un remblai protégé par une carapace rigide. Les exemples sont nombreux.

La digue d'Erromardie (figure 2.25 a) à Saint Jean de Luz (64) est un ouvrage de faible hauteur en maçonnerie qui protège notamment un camping. La baisse de l'estran à favorisé l'érosion du pied de l'ouvrage jusqu'à créer un "sous-cavage" de la fondation de la maçonnerie.

La digue ouest de Saint Clément des Baleines (figure 2.25 b) sur l'île de Ré (17) fait aussi l'objet d'une érosion par abrasion du perré constituant le parement mais également en pied de parement en liaison avec la baisse de l'estran, des confortements réguliers des zones les plus dégradées doivent être effectués en pied ou sur le parement (enduit béton dans le cas présent).



Figure 2.25 – a- Sous-cavage de la digue d'Erromardie -estran principalement sableux- Source Cerema ;b- Digue de Saint Clément des Baleines : Abrasion du perré et baisse du "platier" calcaire nécessitant un enduit sur le parement et des recharges en pied de talus - Source Irstea.

La digue du Reyran, fleuve côtier du Var protégeant un quartier de Fréjus, est un ouvrage en terre dont le parement coté fleuve est protégé par 2 rangées de dalles en béton et le fond par un radier également en béton.

Lors de la crue des 5 et 6 novembre 2011, environ 400 m de protection (dalles, longrines et radier) en plusieurs tronçons répartis sur près de 3 km ont été détruits ou fortement endommagés, laissant le remblai sans protection avec un phénomène d'érosion accéléré. Le mécanisme d'endommagement est consécutif à la disparition de la longrine bien avant la crue (phénomène qui a demandé plusieurs années), entraînant un sous-cavage sous le radier, ainsi qu'une migration des matériaux du corps de digue créant des vides sous le parement, et donc fragilisant les dalles de protection. Par ailleurs, il est possible également qu'il y ait dans le processus de dégradation une part d'érosion interne par entraînement de matériau de la recharge sous la dalle du parement vers le gravier de fondation (figure 2.26 a). On peut ajouter que la végétation (enherbement des joints et racines des peupliers s'insérant sous les dalles) a pu également jouer un rôle défavorable.

Lors de la crue, les dalles de protection ont cassé ou glissé : le corps de digue s'est alors trouvé directement exposé à l'érosion du Reyran (figure 2.26 c). A noter que les dalles qui avaient été réparées avant l'événement ont plus ou moins bien résisté, mais les dalles voisines ont été détruites. Ce constat laisse supposer que l'étendue des désordres était plus grande que l'étendue des réparations (présence de vides sous des dalles ne montrant pas encore de signe d'endommagement).

Après la crue, des venues d'eau se développent au niveau des fissures et des joints dans la partie hors d'eau, signe que le corps de digue a été en charge.

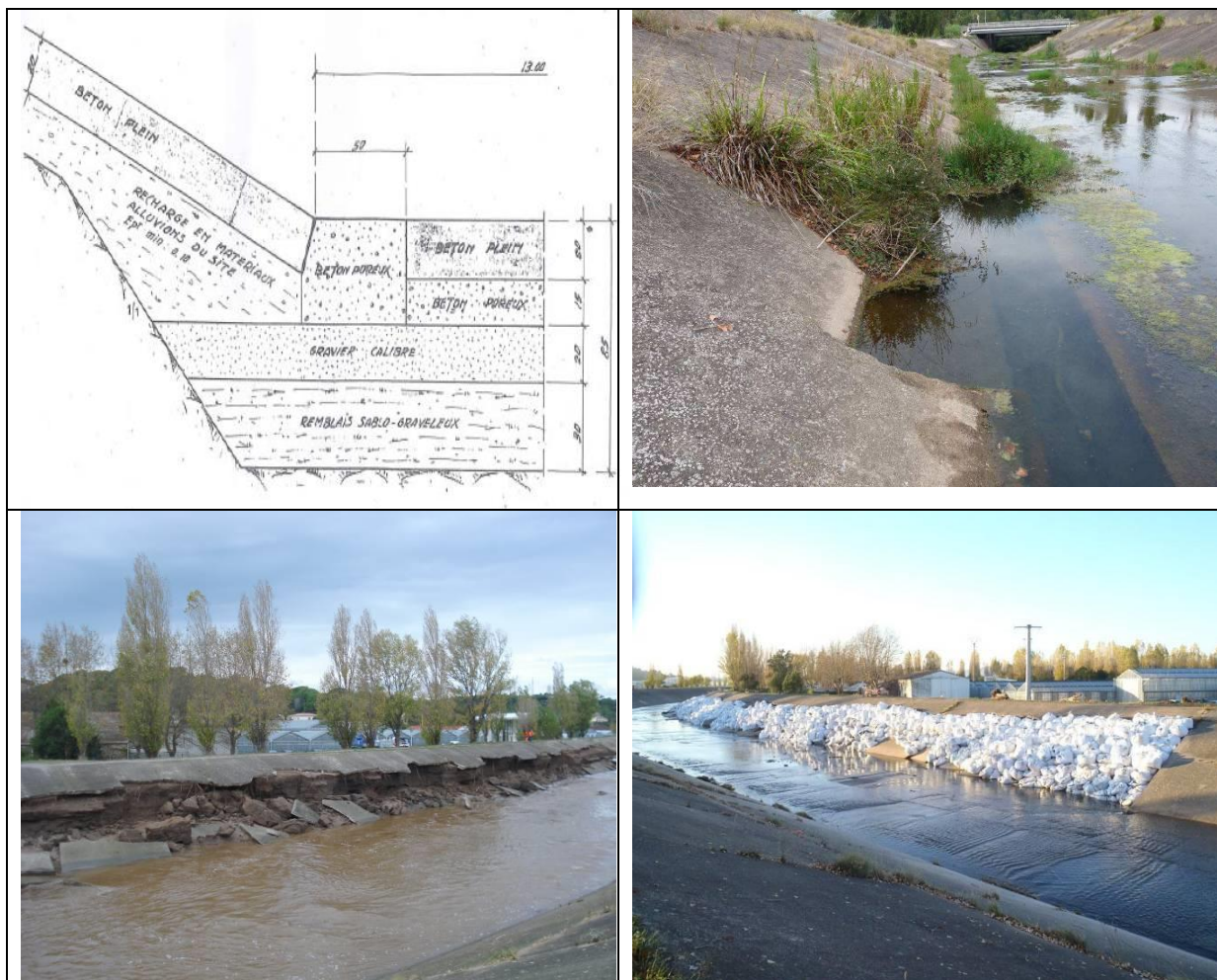


Figure 2.26 – digues du Reyran : a- coupe type à la construction, on remarque que les dalles de protection du talus s'appuient sur une longrine en béton poreux ; b- L'érosion a causé l'endommagement et même la disparition de certaines portions de longrines avant l'évènement ; c- pendant la crue, érosion du talus qui n'est plus protégé après le glissement des plaques béton ; d- mise en place après évènement d'une protection provisoire en sacs remplis de terre.
Sources : Hydratec, Cerema et Irstea

2.2.1.5. Erosion par surverse ou franchissements

Lors de la tempête Xynthia, des digues en remblai dotées d'une protection rigide (béton ou maçonnerie) côté mer ont connu des ruptures suite aux surverses (généralisées ou par "paquets" de mer). Ces surverses ont entraîné l'érosion du parement coté zone protégée, qui a conduit à créer successivement des vides sous la structure rigide côté mer, puis un effondrement de cette structure et par conséquent des brèches dont l'ouverture n'était limitée que par la résistance de la protection (le remblai souvent sableux était très rapidement emporté). Deux exemples sont ici présentés :

- La digue du Bouin (85) est un remblai en terre protégé côté mer par des plaques en béton et surmonté en crête d'un mur parapet (à priori simple pare-vagues) ; la surverse au-dessus de ce parapet a conduit à l'érosion du remblai cohésif jusqu'à apparition de vides sous les plaques qui se sont alors affaissées (figure 2.27) ; à certains endroits le phénomène est allé jusqu'à l'effondrement des dalles béton provoquant ainsi l'ouverture de brèches.
- La digue Ouest de Saint Clément des Baleines (Ile de Ré -17-) est un remblai en sable doté côté mer d'une protection en maçonnerie surmonté en crête d'un mur parapet jouant un rôle de pare-vagues (à priori non dimensionné pour contenir un

niveau d'eau permanent), la crête est protégée par une dalle béton. La surverse a entraîné l'érosion du sable constituant la digue avec création de vides sous la dalle de crête qui s'est affaissée (figure 2.28 a), puis le phénomène s'est poursuivi sous la protection jusqu'à son effondrement en certains endroits avec par conséquent formation d'une brèche (figure 2.28 b).



Figure 2.27 – Digue du Bouin : Erosion du remblai par surverse (photo a côté ZP) jusqu'à apparition de vides sous les plaques qui s'affaissent (photo b côté mer) – Source Irstea.



Figure 2.28 – Digue Ouest de Saint Clément des Baleines : Effondrement de la dalle de crête (photo a) qui peut se poursuivre par un effondrement de la protection en maçonnerie du talus jusqu'à formation d'une brèche (photo b) – Source DDTM 17.

2.2.1.6. Erosion par surverse localisée (point bas correspondant à des zones de passage)

Les ruptures de digues en remblai suite à une surverse localisée au niveau d'un point bas résultant de passages fréquents ayant entraîné une érosion ne sont pas anecdotiques. Pour exemples :

- La levée de Mauboux en rive droite de l'Allier (58) est une digue en terre de près de 2 m de hauteur assurant la protection des hameaux du val de Livry contre les crues de l'Allier. Suite à la crue du 4 au 10 décembre 2003, dont la période de retour est estimée entre 20 et 30 ans, une brèche de 70 m de longueur avec une érosion de la

fondation de 5 à 6 m de profondeur dans les graves alluvionnaires du sol support a été constatée.

L'analyse des photographies aériennes antérieures montre la présence d'un passage de bovins en limite amont de la brèche (figure 2.28). Le diagnostic visuel approfondi a montré que ce type de passage à bovin est associé à un point bas de la crête de l'ouvrage. La rupture de l'ouvrage est vraisemblablement associée à une surverse préférentielle au niveau du point bas, suivi d'une érosion des matériaux constitutifs de la digue (favorisée par l'absence locale du couvert herbeux due au passage à bovins). L'érosion régressive a conduit à l'apparition d'une brèche dans l'ouvrage, ainsi qu'à l'affouillement du sol support.

La fosse d'érosion est observable sur sa partie émergée puisque l'essentiel de son volume est occupé par la nappe d'accompagnement de l'Allier et est constamment sous eau. Elle a une forme générale d'ellipse avec un resserrement des bords en son centre. Les extensions amont et aval sont respectivement de 10 à 12 m et de 16 à 18 m par rapport à l'axe de la digue. L'estimation de la surface au niveau du TN est d'environ 1900 m² et celle du volume est d'environ 4500 m³. Il n'existe pas de traces de dépôts en aval de la fosse de dissipation, les matériaux mobilisés sont assez fins et ont entièrement été évacués par les eaux de la crue.

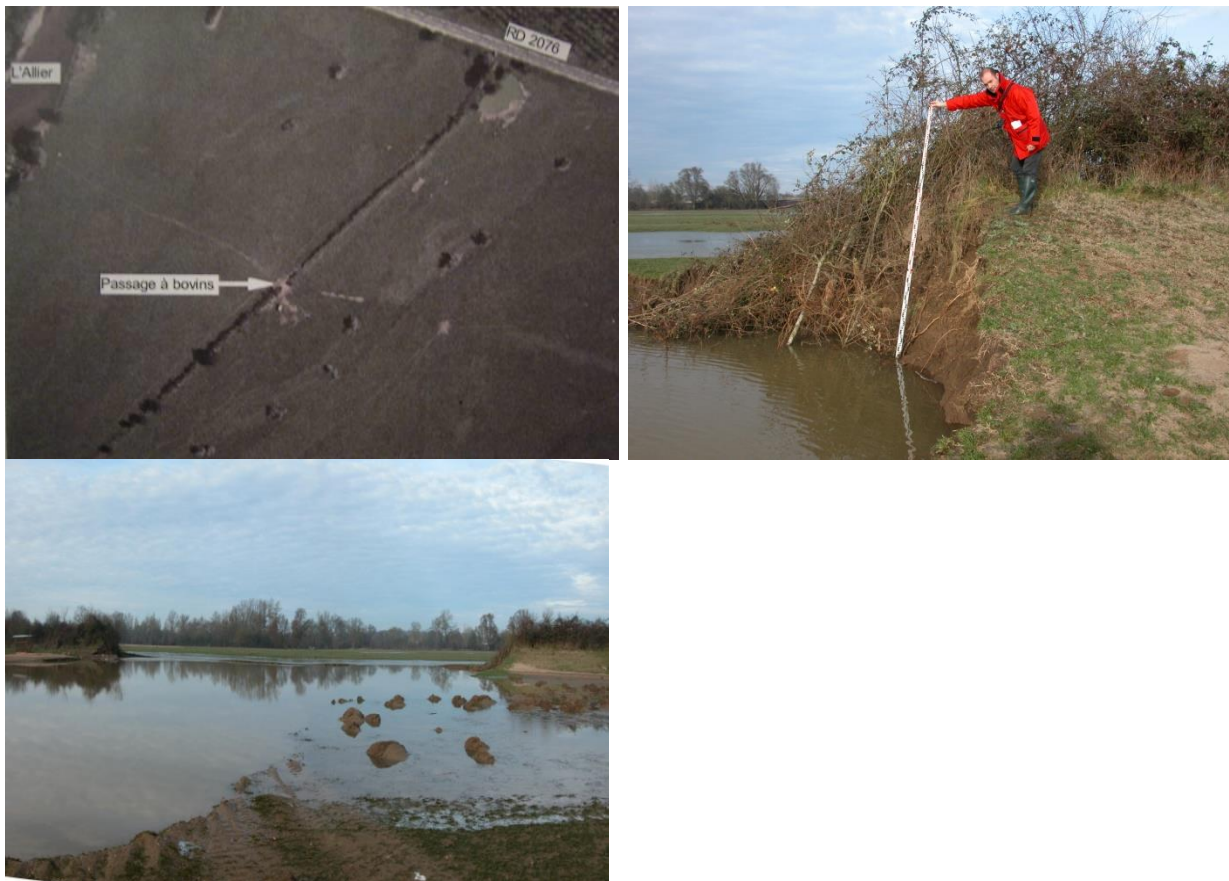


Figure 2.29 – Digue Mauboux (58) : Rupture du remblai par surverse au droit d'un passage à bovins avec un affouillement profond au niveau de la rupture – Source Cerema et DREAL Centre.

- Le cordon dunaire à l'ouest de la Faute sur mer n'est pas une digue à proprement parler mais constitue un élément naturel constitutif du système de protection des zones habitées. Ce cordon large de quelques dizaines de mètres est traversé par les piétons qui se rendent sur la plage, créant ainsi des points bas par érosion et entraînement du sable (figure 2.30 a). Lors de la tempête Xynthia ce cordon a connu

deux ruptures dont l'une face au bourg à l'endroit de l'accès principal à la plage. A cet endroit existaient non seulement un passage piéton mais également des réseaux (notamment électriques) qui alimentaient probablement quelques constructions commerciales légères à usage estival. La rupture à cet endroit (figure 2.30 b) est probablement due à l'existence d'un point bas (passage piéton) qui a concentré les premières surverses. La présence d'une tranchée avec un sol moins compact et la possibilité d'écoulements préférentiels le long des réseaux ont pu constituer des facteurs aggravants dans la formation de la brèche.



Figure 2.30 – Cordon dunaire de la Faute sur mer : a- Passage piéton engendrant un point bas sur la dune ; b- Brèche dans la dune lors de la tempête Xynthia, au droit d'un passage piéton ainsi que de câbles et d'une conduite – Source Irstea.

2.2.2. Rupture par érosion interne ou sous-pression

2.2.2.1 *Entraînement de particules fines du remblai au travers de la protection du talus.*

Nous avons vu précédemment que lors de surverses l'érosion du remblai coté ZP peut conduire à un départ de matériaux support de la protection entraînés par le courant vers la ZP et créant ainsi des vides sous la structure rigide en crête ou sur le parement coté eau. La formation de vides sous la protection peut également être créée par érosion interne par entraînement de particules au travers du système de protection dont la fonction de filtration est inexistante ou défailante. La formation de cavité sous la protection côté mer ou rivière peut conduire à des ruptures brutales dans le cas de masques rigides.

Le processus d'entraînement des particules fines vers le côté "eau" se produit lors de la baisse du niveau de crue de la rivière ou de la marée descendante en maritime. A ce moment-là le niveau piézométrique est plus haut dans le remblai s'il a été saturé à la montée des eaux et l'écoulement s'inverse pour aller du remblai vers le cours d'eau ou la mer. Ce phénomène est surtout important dans le domaine maritime où les cycles de marées induisent une répétition de ce phénomène comme en témoignent les deux exemples suivants :

- La digue du Nouleau, partie des digues ouest de Saint Clément des Baleines (17) est un remblai en sable doté sur le parement côté mer d'une protection en maçonnerie (cf §2.2.1.5). L'état moyen à mauvais de ces parements fortement sollicités (figure 2.31 b) va permettre la circulation des eaux marines dans le corps de digue de sable et favoriser ainsi le mouvement et le départ des sables. Le corps de digue en sable perd du volume, créant ainsi des vides entre la carapace béton et le corps de digue.

- Le système de protection de Boyardville (Ile d'Oléron -17-) est constitué de digues le long du chenal situé au sud du bourg ; une partie de ces digues a un parement vertical coté chenal pour former un quai de déchargement des bateaux. Un défaut d'étanchéité dans le mur vertical a permis un "sous-tirage" des parties fines du remblai à cet endroit conduisant à un affaissement du terre-plein pouvant dépasser 30 cm par endroits (figure 2.31 a).



Photo a

Photo b

Figure 2.31 – Affaissement plate-forme derrière le quai de Boyardville (photo a) Détail de l'érosion et défaut d'étanchéité du parement de la digue du Nouleau (photo b) – Source Irstea.

2.2.2.1. Erosion interne due à un ouvrage traversant

La digue de la Mosson rive droite est un remblai en terre de 2.5 m de hauteur assurant la protection de la station de pompage de Villeneuve-lès-Maguelone et de terrains à vocation agricole. Lors d'une crue, sans submersion de la digue, une brèche d'une dizaine de mètres de longueur s'est ouverte au droit d'une tranchée réalisée pour le passage des câbles ; à cet endroit se trouvent également les fondations (galets) d'un ancien bâtiment. Le mécanisme à l'origine de la rupture est le phénomène d'érosion interne initié par la présence de la tranchée et/ou la présence des galets de l'ancienne fondation, les deux ayant probablement contribué à augmenter le gradient hydraulique et les circulations d'eau.



Figure 2.32 – Digue de la Mosson après la rupture : câbles mis en place dans la tranchée et restes de l'ancienne fondation – Source Cerema.

2.2.2.2. *Erosion interne due à des terriers*

La digue du Réart sur la commune de Thézat (66) est un remblai d'environ 1,5 m de hauteur dont les parements ont un fruit de 1V/1H, le talus coté cours d'eau n'est protégé contre l'érosion que très localement. Cet ouvrage est susceptible de présenter plusieurs types de défaillance : instabilité mécanique du remblai, érosion externe et érosion interne dont les risques d'occurrence sont aggravés par la présence de terriers. En cas de crue, tous ces mécanismes peuvent se combiner et aboutir à la formation d'une brèche.



Figure 2.33 – Digue du Réart : Erosion du talus coté cours d'eau et présence de terriers coté ZP – Source Cerema.

2.2.3. **Rupture par instabilité du remblai ou des fondations.**

2.2.3.1. *Instabilité des talus*

La digue de la Mosson rive gauche est un remblai en terre de 3 m de hauteur assurant la protection des espaces agricoles en premier plan et des espaces urbanisés, hameaux de Lattes entre la Mosson et le Lez en arrière-plan. Les pentes des talus ont une valeur comprise entre 2V/3H et 1V/1H. Le parement côté cours d'eau a connu un glissement à la décrue (condition de vidange rapide pour le remblai).

2.2.3.2. *Instabilités liées aux fondations (sols compressibles, karst)*

Les digues du Rhin canalisé au niveau du bief d'Iffezheim (67) sont des remblais à noyau argileux, d'une hauteur d'environ 4,5 m environ. Les désordres se caractérisent principalement par une zone d'affaissement général de la digue sur une hauteur de 40 cm et sur une centaine de mètres de longueur. Il n'a jamais été constaté de fuite à cet endroit. La zone affaissée se situe au droit d'un ancien bras du Rhin, comblé sur une épaisseur importante (environ 20 m) par des matériaux peu compacts. Dans ces conditions, des tassements se sont produits après la construction de l'ouvrage sous l'effet de la surcharge des matériaux. La digue a été confortée par une recharge en enrochements sur le talus amont, un rehaussement du noyau argileux et une remise à niveau de la crête.



Figure 2.34 : a– Digue de la Mosson rive gauche après glissement du talus ; b- Affaissement de la digue du Rhin de 100 m de longueur sur 40 cm de hauteur – Source Cerema.

3. Les diagnostics

3.1-Présentation de la démarche

Le mot diagnostic n'est pas utilisé ici en référence à une action réglementaire, mais à une démarche technique générale. Ce diagnostic peut constituer une base technique de certaines études réglementaires, par exemple une Etude de Dangers, comme une base préalable à un projet de confortement. Enfin certains éléments réglementaires sont de l'ordre du diagnostic, avec un niveau de précision plus ou moins important (ex VTA). Nous nous attachons dans ce chapitre à présenter la démarche technique d'ensemble et les concepts sous-jacents.

3.1.1-Introduction et définitions

Afin de garantir la sûreté⁹ à long terme d'une digue ou d'un système de protection contre les inondations, des évaluations doivent en être effectuées sur une base régulière, périodique, ainsi que dans des occasions spéciales : avant, pendant ou immédiatement après des événements l'ayant sollicité(e) (crues, tempêtes, séismes, accidents, ...).

Ces évaluations peuvent être de différents types :

- évaluation de performance (ou de sûreté),
- diagnostics¹⁰,
- analyses de risques, y compris attribution des risques.

L'évaluation de performance ou le diagnostic, d'une part, et l'analyse de risque, d'autre part, sont deux types d'activités étroitement liées, mais en réalité différentes :

• **Evaluation de la performance** d'une digue ou d'un système de protection : le processus de compréhension de l'état ou de l'intégrité structurale, ou de la performance d'une digue ou d'un système de digues existant(e). Une évaluation complète devrait inclure et être basée sur un **diagnostic** des causes avérées ou possibles de la défaillance avérée ou potentielle, afin de les corriger ou de les prévenir. L'évaluation de la performance d'une digue comprend deux axes d'analyse : la performance hydraulique (vis à vis de sa fonction de protection) et la performance structurelle (vis à vis de sa fonction de résistance).

• Analyse de risques et attribution des risques : l'**analyse des risques** d'un système de digues de protection contre les inondations permet aux gestionnaires du système de défense de connaître le niveau de risque global associé au système de digues, selon les digues elles-mêmes et leurs performances d'une part¹¹, et les enjeux de la zone protégée et leur vulnérabilité aux inondations d'autre part. Les gestionnaires connaissent ainsi le risque associé à n'importe quelle partie du système de digues, ce qui est appelé l'**attribution des risques**, leur permettant donc d'optimiser leurs

⁹ Pour distinguer ces notions, on parlera autant que possible de SÛRETE pour une digue et de SÉCURITE pour les enjeux qu'elle protège. Néanmoins l'usage et la réglementation utilisent parfois le terme de sécurité en ce qui concerne la digue.

¹⁰ Le diagnostic est l'identification de la cause (l'origine) d'une défaillance, d'un problème à partir des caractères ou symptômes relevés par des observations, des contrôles ou des tests.

¹¹ Une analyse de risque de système endigué intègre donc les résultats d'une évaluation de performance des digues.

actions futures. L'**étude de dangers** (EDD) réglementaire en France pour les digues des classes A à C est une analyse de risques dans un format particulier, incluant de plus une évaluation des risques¹² et des préconisations en termes de mesures de réduction du risque.

Le diagnostic ou l'évaluation de la performance ne s'intéressent qu'à la digue ou au système de protection, alors que l'analyse de risques tient compte du système de protection mais aussi des enjeux situés dans la zone protégée¹³.

NB : on confond parfois dans le langage courant diagnostic et évaluation de la performance. L'évaluation de la performance peut être globale et représenter le niveau de sûreté d'un ouvrage, sans pour autant expliciter les mécanismes à l'œuvre, ce que fait le diagnostic. Dans la suite de ce chapitre, à partir de la section 3.1.2, comme dans le reste de ce guide, nous n'utiliserons que le terme diagnostic, communément répandu, sans faire la distinction avec les évaluations.

Les évaluations de performance (ou de sûreté) et les diagnostics sont basés sur des données qui sont ensuite combinées par l'ingénieur spécialisé pour obtenir un résultat de l'évaluation. De nombreux types et natures de données sont utilisables, et de nombreuses méthodes utilisées pour leur combinaison. La section 2 de ce chapitre présentera les données et la section 3 les méthodes de traitement.

Les résultats de l'évaluation peuvent prendre différentes formes :

- seuil (charge limite),
- coefficient ou facteur de sécurité,
- probabilité conditionnelle de défaillance (pour une charge donnée),
- courbe de fragilité (probabilité conditionnelle de défaillance donnée en fonction d'une gamme de charges),
- index ou indicateur (exemples: sur une échelle de 0-5 ou de 0-10)
- évaluation qualitative (par exemple: très bien, bien, passable, mauvais, très mauvais.),
- probabilité annuelle de défaillance,
- ...

La forme du résultat dépend largement de la méthode utilisée, mais aussi de la manière dont il sera utilisé par la suite. Il est possible de construire des équivalences entre les différents types de résultats, par exemple entre des indicateurs et des probabilités de défaillance, ou entre des coefficients de sécurité et des indicateurs ou des probabilités de défaillance.

Les évaluations de performance des digues peuvent être, en fonction du contexte (connaissances, obligations réglementaires, vie de l'ouvrage, ...) plus ou moins détaillées et plus ou moins précises. Au cours du cycle de vie d'un ouvrage, des évaluations avec différents niveaux de précision et de détail se succèdent (voir 3.1.2.b).

Les inspections visuelles, ou plutôt **examens visuels** pour employer un terme non ambigu vis à vis de la réglementation française et du contrôle par l'Etat, sont une opération de recueil de données utilisables dans un diagnostic plus complet. Elles peuvent néanmoins donner lieu à un diagnostic de premier niveau, d'où leur utilité au vu de leur facilité de réalisation.

¹² Comparaison du risque avec une échelle "d'acceptabilité"

¹³ L'analyse de risque est donc conduite à l'échelle du système endigué plutôt qu'à l'échelle du système de protection

Toute évaluation ou diagnostic de digues devrait par ailleurs s'appuyer entre autres dans ses données sur un examen visuel récent. Le sujet des examens visuels est détaillé au 5.2.2.

Les résultats d'une évaluation, d'un diagnostic, ou d'une analyse de risques, gagnent à présenter, en plus du résultat brut, une indication de précision ou de fiabilité, de préférence chiffrée, ou au moins qualitative; en effet, les décisions qui seront prises suite à ce diagnostic devraient intégrer l'incertitude des résultats.

3.1.2-Les diagnostics : quand, pourquoi

a) La nécessité des diagnostics

La réalisation de diagnostics peut être justifiée ou motivée par des raisons de différents ordres, détaillées ci-dessous.

Pour des aspects patrimoniaux, un gestionnaire de digues a besoin de diagnostics pour l'aider à prendre ses décisions (entretien, confortement, remplacement, démantèlement) basées sur des résultats d'analyses objectives, ce que donnent les diagnostics et les analyses de risques, pour pérenniser ses ouvrages et optimiser ses dépenses tant en fonctionnement qu'en investissement.

En cas de constat d'un désordre, un diagnostic plus ou moins approfondi en terme de recherches de données spécifiques, permettra de conclure sur les mécanismes à l'œuvre et d'adapter ainsi les solutions de réparation ou de confortement vis-à-vis de ces mécanismes, comme à ceux non avérés mais pouvant se produire.

Pour des questions juridiques et de responsabilité, un gestionnaire de digues doit maintenir ses ouvrages à un niveau de performance leur permettant de présenter une sécurité vis-à-vis des mécanismes de rupture lorsqu'ils seront sollicités par une crue au plus égale à la crue de sûreté¹⁴. La réalisation de diagnostics périodiques permet (ou permettra en cas d'insuffisance ultérieure) de justifier auprès des différentes parties prenantes que les obligations du gestionnaire ont bien été remplies. La première Etude de Dangers d'un système existant permet par ailleurs, quand on ne le connaît pas, de faire un constat du niveau de performance associé à l'ouvrage, voire d'aider à le redéfinir.

Enfin, la réglementation sur les ouvrages hydrauliques impose au responsable d'ouvrage la réalisation d'un certain nombre d'études et d'opérations, régulières ou exceptionnelles, de l'ordre du diagnostic. Cette obligation réglementaire peut apparaître comme la principale motivation pour certains gestionnaires, alors que dans les faits cette obligation est elle-même justifiée par les raisons techniques et de responsabilités précédemment exposées. Ainsi tous les objets suivants issus de la réglementation comprennent une part d'activité de diagnostic ou liée à un diagnostic :

- les études de dangers nécessitent de s'appuyer sur un diagnostic aussi précis que possible des ouvrages et une analyse des enjeux de la zone protégée et de leur vulnérabilité, et permettent ainsi de prendre des décisions en intégrant les conséquences d'une rupture ou d'une défaillance. Ces décisions doivent d'ailleurs être décrites dans le chapitre 9 de l'EDD qui déborde le cadre normal d'une analyse de risques ;
- les revues de sûreté périodiques (digues classe A et B) doivent permettre de vérifier que structurellement les ouvrages sont toujours à même de répondre aux sollicitations qu'ils peuvent être amenés à subir ;

¹⁴ au sujet de ces seuils, voir la section 4.1 sur la question des niveaux de protection, de sûreté et de dangers.

- les examens techniques complets fournissent des données sur les éléments non accessibles "en continu" ; ces données doivent être utilisées dans le diagnostic de la Revue de Sureté (RS);
- les visites techniques approfondies qui doivent comprendre à la fois une partie observations et une partie conclusions dans le rapport ;
- les examens visuels périodiques ou suite à événement, pour lesquels la réglementation n'impose pas de fréquence¹⁵, mais qui peuvent entraîner éventuellement la réalisation de travaux d'entretien ou d'un diagnostic plus approfondi en cas de doute ;
- les diagnostics sur les garanties de sûreté, prescrits à la demande du préfet en cas de doute sur la sécurité ;
- les diagnostics initiaux, désormais hors délais, restent néanmoins nécessaires (pour les ouvrages qui n'en ont pas encore) au-delà de toute considération réglementaire, s'agissant d'ouvrages anciens et mal connus. Ils sont donc à réaliser au plus tard lors de la première échéance d'un élément listé ci-dessus, auquel ils doivent alors être intégrés.

b) Les diagnostics et la vie de l'ouvrage

Nous avons vu ci-dessus les différentes raisons qui peuvent conduire à la réalisation d'un diagnostic. Parmi celles-ci il y a le constat d'un désordre qui dépasse le cadre de l'entretien régulier, un événement particulier (crue, tempête, séisme, accident, ...), ou encore le relevé d'une valeur anormale sur une mesure d'auscultation¹⁶. La première étape dans ce cas est généralement un examen visuel, suivi d'un premier niveau de conclusion, conduisant si nécessaire à des compléments de diagnostic et éventuellement à des reconnaissances spécifiques.

D'autres causes, en lien avec d'autres acteurs que le gestionnaire de l'ouvrage et l'Etat service de contrôle, peuvent exceptionnellement rendre utile ou nécessaire un diagnostic : projet de transfert de propriété ou de responsabilité, décision de modifier les objectifs de protection et de sûreté, ...

Dans le cycle de vie normal d'une digue ou d'un système de digues, toutes les raisons de réaliser des diagnostics présentées ci-dessus s'enchaînent. Ces diagnostics n'ont généralement pas le même niveau de précision et de fiabilité. Néanmoins tous doivent prendre en compte les résultats et les données des diagnostics antérieurs. Par exemple, une VTA devra prendre en compte les diagnostics approfondis (RS, EDD, Diagnostic de sûreté, ...) et les VTA antérieures. Les différents diagnostics avec des niveaux de précision variables vont s'enchaîner au long de la vie de l'ouvrage ; des diagnostics plus rapides et moins précis auront lieu plus fréquemment. Ils s'appuieront sur les diagnostics plus complets et pourront à leur tour déclencher des diagnostics de plus en plus précis.

3.1.3-Suites possibles à un diagnostic

Les suites données à l'issue d'un diagnostic peuvent être de natures très différentes :

- Travaux d'entretien courant
- Compléments de diagnostic (y/c reconnaissances spécifiques si nécessaire)

¹⁵ Pour autant, le gestionnaire doit définir dans ses consignes l'organisation qu'il met en place en ce qui concerne les examens visuels périodiques ou liés à un événement. Ces derniers sont donc ensuite réglementaires.

¹⁶ La réglementation n'impose pas pour les digues l'installation d'un dispositif d'auscultation. Néanmoins, il est envisageable, sous certaines conditions de concevoir un dispositif d'auscultation adapté à une digue de protection. Des réflexions et recherches sont en cours par ailleurs sur ce sujet.

- Surveillance renforcée
- Travaux de confortement (y/c si nécessaire diagnostic plus approfondi, intégrant une recherche complète des mécanismes de dégradation en cause ou probables) et la définition des solutions de confortement au moins en termes de principes)
- Démantèlement ou mise en transparence ou modification fonctionnelle du système de digues
- Adaptation du système d'alerte et d'évacuation des personnes

Les activités liées au diagnostic des digues permettent de prioriser les actions à entreprendre suite à cette évaluation. Ces actions peuvent comprendre : le déclenchement d'une procédure d'urgence, l'initiation d'un diagnostic complet d'une partie du système afin de remédier aux problèmes structurels (conception et réparation), d'effectuer des travaux d'entretien "de routine" ou de ne rien faire de spécial et de continuer à surveiller et à évaluer le système de digues. La figure 3.1 présente un organigramme détaillant la prise de décision, sur la base des évaluations de performance hydraulique et structurelle ainsi que sur l'analyse de risque (voir le 3.1.1 sur la différence entre ces différents types d'activité).

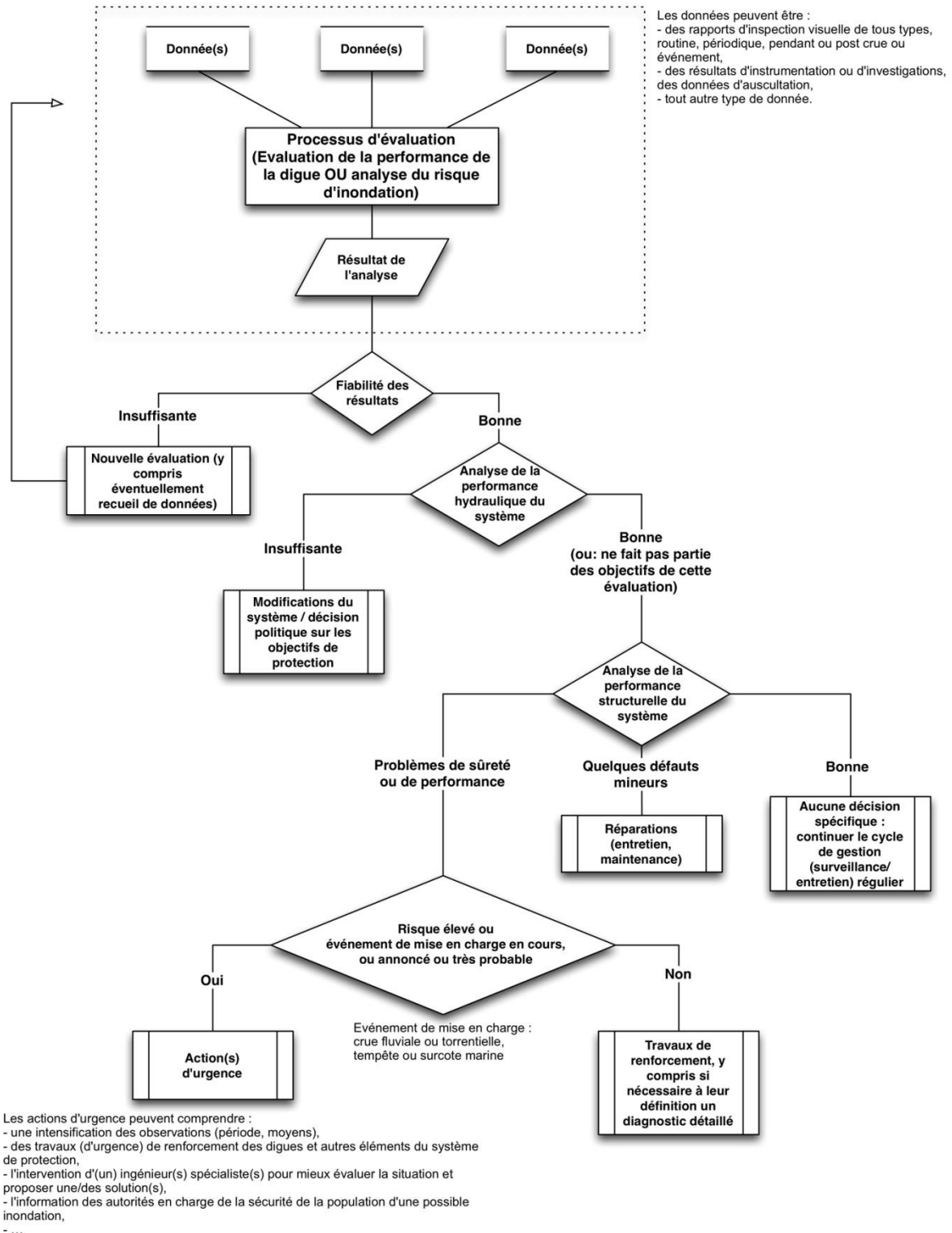


Figure 3.1 : évaluations des digues (évaluation des performances, diagnostics et analyses de risque) et prise de décision par les gestionnaires de digues (source International Levee Handbook [2013], contribution R. Tourment, Irstea)

3.1.4 – Résumé de la démarche de diagnostic

La démarche de diagnostic au sens large se résume de la manière suivante :

- recueil de données notamment, données existantes (bibliographie), données visuelles et données acquises spécifiquement ;
- analyse de ces données (combinaison suivant différents modèles et méthodes) ;
- conclusion en termes de niveau de performance (suivant les cas performance hydraulique et/ou structurelle), y compris la qualification en termes de précision ou de fiabilité des résultats (le plus souvent fonction directe des deux précédentes étapes) ;
- conclusion en termes de suites à donner.

Tout diagnostic se doit d'être formalisé sous la forme d'un rapport indépendant reprenant et explicitant chacun des différents points d'étape de la démarche ci-dessus.

Par exemple, le diagnostic le plus simple que peut être amené à faire un gestionnaire d'ouvrage est celui correspondant à un examen visuel. Les données sont recueillies sur le terrain, et analysées de manière simple, au vu des connaissances antérieures, en termes de fiabilité structurelle de l'ouvrage. Les conclusions en terme de suites à donner se résument dans ce cas à un choix entre i) ne rien faire de particulier, ii) effectuer des travaux d'entretien courant, iii) poursuivre le cycle normal de surveillance et de maintenance, éventuellement en renforçant les périodes de surveillance ou iv) engager un diagnostic plus approfondi sur l'ensemble de la digue ou sur un point particulier ou v) engager des travaux d'urgence. Dans le cas d'une VTA, la rédaction du rapport est obligatoire compte tenu de la réglementation ; ce n'est pas le cas des examens visuels "de routine". Néanmoins, il est nécessaire de formaliser ces visites et garder trace des résultats d'examen visuels ayant donné lieu à des suites "anormales" (travaux, complément de diagnostic, ...), ce qui doit d'ailleurs être fait dans le rapport d'exploitation (réglementaire et obligatoire) et dans le registre de l'ouvrage (non obligatoire au sens de la réglementation, mais conseillé, et d'ailleurs facilitant la rédaction du rapport de surveillance).

3.2-Recueil des données

Un diagnostic s'appuie sur de multiples données, qui sont ensuite analysées suivant différentes méthodes (voir dans la section 3.3). Une même donnée peut servir dans différentes analyses au cours d'un même diagnostic. La présente section présente les données qui sont utilisées dans le cadre des diagnostics de digues avec leurs natures et leurs types (3.2.1), ainsi que leur provenance et leur recueil (3.2.2) et leur gestion sur le long terme (3.2.3).

3.2.1-Types de données, provenance des données, utilisation des données dans l'analyse

On peut tout d'abord identifier les données en fonction de leur nature, à savoir pour quel type d'analyse elles sont nécessaires ou bien quel type d'étude spécifique les produit. Les données sont disponibles soit sous la forme de données numériques ou alphanumériques bien décrites (et utilisables directement dans un modèle) ou bien au contraire être disponibles uniquement dans un document dont l'analyse préalable est nécessaire pour obtenir la donnée utilisable dans le diagnostic (exemple : dans un rapport).

La nature des données peut être (liste non exhaustive, mais correspondant à un minimum dans le cas d'un diagnostic complet) :

- historique (notamment pour comprendre le « mille-feuille » constituant souvent les digues anciennes)
- géométrique et topographique, y compris bathymétrie
- géotechnique et génie civil (structure), y compris géologie, hydrogéologie et géophysique

- hydrologique et hydraulique¹⁷
- morphologiques
- résultats d'examen visuel

Comme indiqué précédemment une même donnée peut servir à plusieurs reprises, pour différents types d'analyse dans le même diagnostic. Par exemple les données topographiques et géométrique servent à la fois à l'étude des sollicitations hydrauliques (hydrologie-hydraulique en fluvial, niveau marin en maritime –cf 4.1.1.2) et aux calculs de stabilité ; les études morphodynamiques donnent des résultats qui servent à la fois à l'analyse de la stabilité (anciennes brèches, traduites en singularités dans la composition de la digue, modifications possibles de la géométrie du lit, définitive voire transitoire pendant une crue) et à l'analyse des sollicitations hydrauliques (prévisions des modifications de la géométrie de l'environnement qui modifieront à leur tour les caractéristiques hydrauliques).

Les données peuvent ensuite être classées par type (désignant ce que décrit la donnée) et par format (indiquant comment est décrite la donnée : numérique, alphanumérique, unités, champ descriptif, ...).

On trouvera ci-après une liste par nature (non exhaustive) des différents types de données et éventuellement des précisions sur les formats possibles. Cette liste présente néanmoins l'essentiel des données qu'il faut rechercher et considérer dans un diagnostic. Ces données ont besoin d'être rattachées à une position sur la digue (en PK), en plan (en X,Y), ou bien dans l'espace (en X,Y,Z), à un point, un segment, une surface ou un volume.

- Géométrie et topographie, y compris bathymétrie :
 - profils en long de la crête de digue (graphiques, plans, tableaux de points XY, fichiers numérisés, ...), voire des autres lignes caractéristiques (par exemple, pied de digue côté eau et côté zone protégée)
 - profils en travers de la digue débordant les pieds de la digue (graphiques, plans, tableaux de points XZ, fichiers numérisés, ...)
 - bathymétrie (plans cotés, MNT, ...)
 - topographie du milieu terrestre côté eau et/ou côté zone protégée (plans cotés, MNT, ...)

- Géotechnique et génie civil (structure et sa fondation), y compris géologie, hydrogéologie et géophysique :
 - profils en travers et coupes (zones et composition en nature de matériau, y compris fondation)
 - paramètres géotechniques (reliés à une zone d'une section ou à un sondage et avec un degré de précision/évaluation adapté aux besoins) :
 - essais identification et minéralogiques
 - caractérisation de la perméabilité
 - caractéristiques de cisaillement
 - caractérisation de la compressibilité
 - caractérisation de l'érodabilité
 - résultats d'essais de compactage
 - résultats de campagnes géophysiques (résultats bruts, interprétation en terme de caractéristiques géotechniques – voir guide [x])
 - synthèse cartographique reliant les différentes campagnes géophysiques avec les différents prélèvements et essais géotechniques

¹⁷ On entend ici le terme hydraulique au sens hydraulique externe, soit dans le cours d'eau ou la mer, soit dans la zone protégée. L'hydraulique interne fait naturellement partie de l'analyse géotechnique ou génie civil éventuellement.

- géologie (sondages, bases de données, cartes, ...)
 - hydrogéologie (sondages, bases de données, cartes, essais de permittivité, ...)
 - Hydrologique et hydraulique
 - études hydrologiques et hydrauliques¹⁸, y compris affluents ou analyse des niveaux marins, pour différentes périodes de retour des événements (lignes d'eau, modèle numérique, ...)
 - étude hydraulique des écoulements dans la zone protégée, en cas de surverse, de contournement ou de brèche, ...
 - étude hydraulique d'écoulement par des déversoirs, des vannes, ... situés dans la digue
 - Morphologie
 - documents cartographiques historiques et plus récents : photographies aériennes (analyse diachronique), cartes anciennes (Cassini, Etat-major), cadastres napoléoniens, profils en long des fils d'eau (cf liste § 4.1.2.1) ; en particulier caractérisation d'anciens bras de fleuve (paleochenaux)
 - étude morphologique et morphodynamique (profil en long du cours d'eau et tracé en plan)
 - étude du transport solide
- Résultats d'examen visuel : la méthodologie d'inspection visuelle des digues de protection, les données recueillies, ainsi que des modèles de fiche de saisie sont complètement décrits dans le guide sur la surveillance, entretien et diagnostic des digues [Mériaux et al, 2001] auquel on se référera.

Les recherches historiques sont très importantes car elles peuvent permettre de retrouver les plans anciens et les rapports relatifs à la construction de l'ouvrage. Lorsqu'on ne dispose que des plans de projet (absence de plan de récolement), il est nécessaire d'engager des investigations complémentaires (sondage à la pelle par exemple) pour lever les incertitudes persistantes.

3.2.2-Recueil des données

Au cours d'un diagnostic, on utilise des données disponibles en les complétant par une campagne de reconnaissance spécifique.

Il faudra donc dans un premier temps, au vu de l'objectif du diagnostic et après examen des données préalablement disponibles (et accessibles... voir 3.2.3 sur la nécessité d'organiser cette accessibilité), définir la nature des données complémentaires à acquérir, soit en termes de reconnaissances (topographie, géotechnique, ...) ou en termes d'études (hydrologie/hydraulique, morphodynamique, ...). La phase de recueil des données spécifiques nécessite éventuellement plusieurs itérations, les premiers résultats donnant des indications sur les phases ultérieures, y compris avec des liens entre les différentes reconnaissances et études (géotechniques et géophysiques ou hydrauliques et morphologiques par exemple). Certaines études vont demander un "pré-traitement" pour fournir des données utilisables dans le diagnostic des digues, c'est le cas par exemple des campagnes de reconnaissance géophysique.

¹⁸ À la différence des études similaires effectuées pour les barrages, on sépare moins pour les digues les études hydrologique et hydraulique car, sur les longs systèmes, les écoulements le long des digues influencent la propagation des crues. C'est particulièrement vrai en présence d'affluents. Exemple étude Loire Moyenne.

Le guide [Lino et al, 2000] propose une méthode de conduite de diagnostic de digue présentant entre autres les grandes phases de recueil de données. Cette méthode a souvent été présentée comme une "méthode de diagnostic en 9 points" :

1. Approche historique
2. Géomorphologie fluviale
3. Topographie
4. Étude hydraulique
5. Examen visuel (initial)
6. Reconnaissances géotechniques
7. Modélisation : hydraulique (interne) et mécanique
8. Étude des risques liés à la rupture
9. Étude des solutions de confortement

A la lecture de ce qui précède dans le présent chapitre, on peut dire que les points 1 à 6 ci-dessus concernent les recueils de données, le point 7 concerne l'analyse des données, le point 8 explicite l'intérêt de conduire une analyse de risque après avoir étudié les aléas de rupture, et le point 9 traite des suites à donner à un diagnostic et en particulier, pour le diagnostic des digues anciennes, la définition des travaux.

Dans cette méthodologie, il était déjà établi que la première phase nécessaire est la recherche et l'examen des données préexistantes.

La nécessité d'une étude géomorphologique était également établie, cette dernière pouvant néanmoins avoir lieu **après** la reconnaissance topographique, qui peut d'ailleurs donner des éléments intéressants au géomorphologue.

On peut donc distinguer ci-dessous les différentes provenances et sources de données, cette typologie pouvant servir de liste référente pour l'exploration de toutes les possibilités de collecte de données à laquelle on pourra s'astreindre :

- données antérieures (disponibles chez le maître d'ouvrage, nécessitant une recherche historique spécifique, ou disponibles dans des bases de données extérieures). Cela peut concerner des données de toute nature ;
- résultats antérieurs de diagnostics et d'autres études classiques en lien avec l'ouvrage (nécessitant une interprétation ou une ré-interprétation au vu des spécificités du nouveau diagnostic). Cela peut également concerner des données de toute nature ;
- acquisition de données topographiques par campagne spécifique (terrestre ou LIDAR)¹⁹ ;
- études spécifiques de caractérisation du site et des sollicitations. Cela concerne principalement des données de nature morphodynamique, hydrologique, hydraulique, (niveaux, courants vagues) et hydrogéologique ;
- des reconnaissances spécifiques géotechniques ou géophysiques, concernant l'ouvrage, ses fondations, et l'environnement proche ;
- les examens visuels (antérieures et **toujours** une inspection visuelle récente a priori spécifique et réalisée par le responsable du diagnostic) qui donnent des données de toute nature ;
- les éventuels résultats d'auscultation, donnant des données de nature principalement d'ordre topographique ou géométrique et d'hydraulique interne. L'exploitation de ces données (l'analyse et l'interprétation des mesures) permet d'en déduire un comportement géomécanique.

Il importe également de dater (chronologie) et de qualifier chacune des données (en terme de fiabilité, précision, résolution, ...). Les métadonnées pourront être saisies et conservées

¹⁹ Le lever topographique terrestre suppose l'interprétation d'un géomètre pour éviter des erreurs dues à des informations manquantes ou des points erronés.

en même temps que les données. La provenance et la datation des données fait partie de ces métadonnées (source, auteur, date, ...).

3.2.3-La conservation des données

A - La nécessité de conserver et gérer les données

Un diagnostic fait appel, comme il a déjà été dit précédemment, à de nombreuses données, de production récente pour certaines mais également ancienne, compte tenu de l'importance dans le diagnostic de l'historique de l'ouvrage qui peut expliquer ou laisser prévoir des évolutions défavorables et des défaillances. Idéalement, lors de chaque diagnostic complet, il convient d'intégrer l'ensemble des données relatives à la digue et au système dans la démarche d'analyse.

Il est donc nécessaire que les gestionnaires de digues aient une politique de gestion rigoureuse des données relatives à l'ouvrage et à son environnement. Ces données servent à tous les niveaux de diagnostic et de prise de décision, y compris pour la maintenance et l'entretien courant, la gestion de crise, ainsi que la conception des travaux lourds de confortement.

Tout document d'ordre technique, voire administratif, organisationnel et contractuel, devrait être archivé et facilement accessible. Réglementairement, c'est une obligation de tenir à jour un tel "dossier d'ouvrage". Pratiquement, il convient non seulement de remplir cette obligation d'archivage, mais aussi de s'assurer que toutes les données et les documents seront facilement accessibles et exploitables, ce qui implique un effort d'organisation. L'outil informatique doit être utilisé pour gérer ces données, a minima avec un logiciel de type gestion de bibliothèque, et a maxima avec une gestion électronique complète de tous les documents numérisés. Néanmoins il convient, pour des raisons de sécurité et d'accessibilité en toutes conditions, voire de lisibilité, de jouer sur la complémentarité papier/numérique.

B - L'utilisation de l'informatique

On peut envisager de gérer les documents et tout ou partie des données relatives aux digues avec des bases de données alphanumériques "classiques". Néanmoins, la dimension linéaire des digues, et bi voire tridimensionnelle de leur environnement incite à l'utilisation d'un logiciel de type SIG (système d'information géographique) permettant aisément de gérer et d'accéder aux données en intégrant le lien avec la position des points auxquels elles sont attachées (géolocalisation).

Le "SIRS Digues" est une application informatique basée sur un SIG et un Système de Gestion de Base de Données dédiée à la gestion des données relatives aux digues fluviales de protection. Cette application a été et est développée sous la maîtrise d'ouvrage de trois des plus importants gestionnaires de digues en France²⁰, sur une idée initiale et avec l'appui technique d'Irstea (ex-Cemagref). Cette application est utilisée sur une base opérationnelle depuis 2005 et est couramment maintenue et en évolution. Ce système de gestion gère bien sûr les données qui y sont stockées, mais aussi des liens avec des documents externes, par exemple des fichiers images ou AutoCAD stockés en dehors de la base de données, qui peuvent être liés à un objet afin d'affiner sa description. Une application secondaire a également été développée en tant que module indépendant utilisant uniquement la base de

²⁰ le SYMADREM, l'AD Isère Drac Romanche et la DREAL Centre, par ordre d'entrée dans le projet, qui gèrent à eux trois plus de 1.000 kilomètres de digues (environ 15% de la longueur totale des digues fluviales en France)

données alphanumérique, qui permet de saisir et mettre à jour les données, par exemple par les garde-digues sur le terrain.

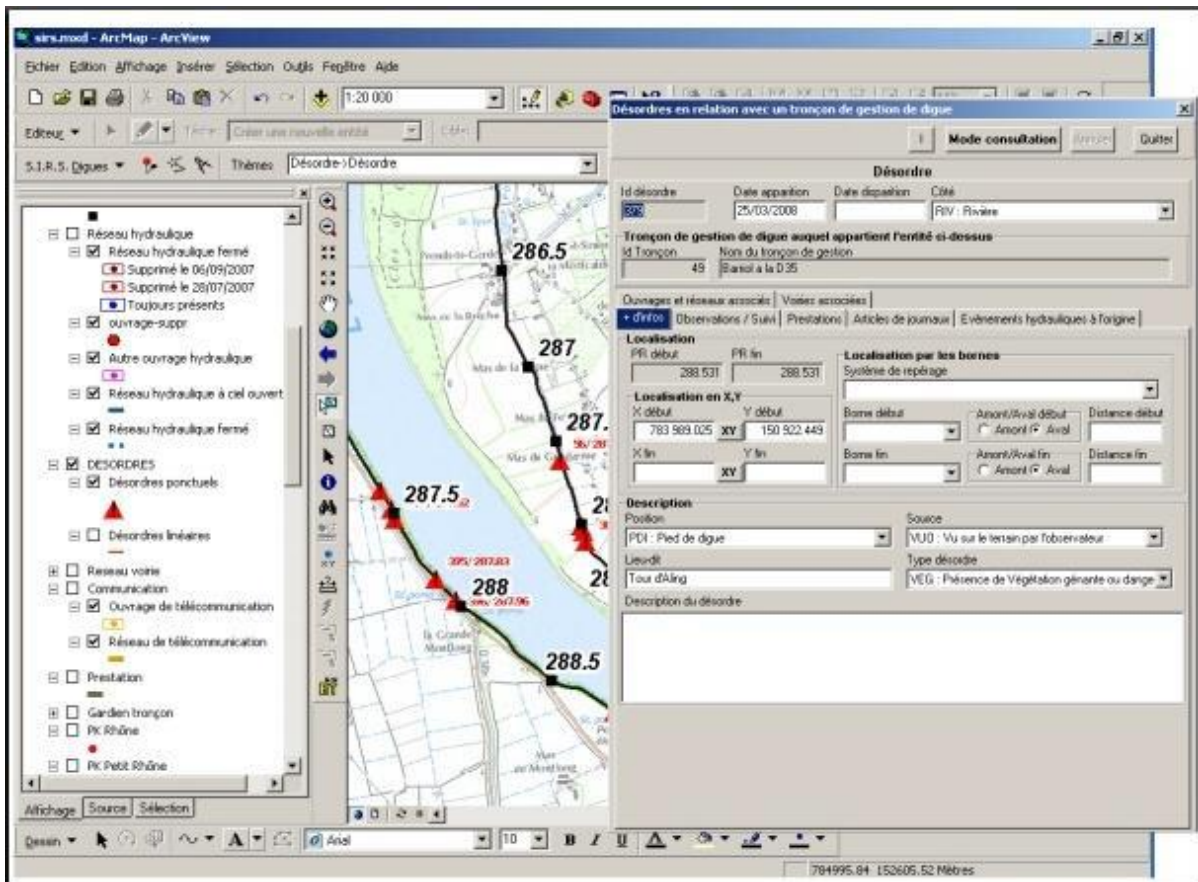


Figure 3.2 : une copie d'écran de l'application SIRS Dignes (Symadrem)

Bien entendu, l'utilisation d'une application informatique demande une phase initiale de réflexion, d'analyse des besoins, de construction de l'architecture des données et de définition des fonctionnalités de traitement et d'interface à ne pas négliger sous peine d'aboutir à un résultat inutilisable ou au mieux non satisfaisant.

3.3-Analyse des données

3.3.1 - Analyses hydraulique, structurelle et de risque

Dans le cadre d'un diagnostic, l'analyse des données est bien évidemment l'activité la plus sensible. Cette analyse comprend différents volets qui sont explicités dans les sections suivantes, et que l'on peut résumer comme :

1. l'évaluation des performances hydrauliques des digues et du système de protection,
2. l'évaluation des aléas de rupture de la digue (ou évaluation des performances structurelles),
3. et l'analyse des risques.

Ces trois volets ne sont pas systématiquement réalisés lors de chaque étude de diagnostic, au cours du cycle de vie de l'ouvrage. Néanmoins, étant tous nécessaires à une bonne gestion, en termes d'éléments participant à l'éclairage des prises de décision relatives au système de protection dans son ensemble, il est nécessaire de disposer de chacune de ces analyses, dans une version suffisamment récente et précise. Ces volets ne sont pas non plus indépendants : l'étude des aléas de rupture nécessite de connaître les aléas de

surverse, ce qui est un des objectifs du diagnostic hydraulique, et l'analyse de risque nécessite de connaître les aléas de défaillance tant hydrauliques que structurels.

3.3.2-Diagnostic hydraulique du système de protection

L'objectif du diagnostic hydraulique de la digue, ou plus justement du système de protection, est de vérifier que celui-ci répond à ses objectifs en terme de protection contre les inondations, ou pour les systèmes anciens et mal connus, de constater le niveau de la protection apportée par le système. L'échelle est bien le système et non la digue, la protection étant assurée par l'ensemble du système ; chacun de ses composants (digue, tronçon de digue, élément naturel ou autre ouvrage) participe à cette fonction. Le but principal de cette analyse est de connaître, en l'absence de brèche sur les ouvrages, le niveau de protection effectif apporté par le système.

Un objectif simple de protection peut être par exemple "protéger contre la crue centennale du cours d'eau X" ou bien "protéger contre les niveaux marins jusqu'à X m NGF"²¹. Bien sûr, lors de la conception d'un système, on définit (ou on aurait dû définir) des équivalences entre des niveaux altimétriques et des périodes de retour : les ouvrages sont définis par des niveaux (variables le long du linéaire) et les événements peuvent être caractérisés par une période de retour mais se traduisent aussi en sollicitations hydrauliques (hauteurs, courants, vagues) le long du même linéaire.

La première étape de cette analyse consiste en un croisement entre les niveaux de lignes d'eau correspondant à différents événements représentatifs (crues, surcotes, tempêtes, ...), issues d'études hydrologiques ou d'évaluation des niveaux marins et hydrauliques, et la ligne de crête de la ligne de défense principale, issue de la campagne topographique. On peut ainsi trouver où et pour quelle occurrence d'événement les premiers déversements vont se produire, ce qui permet de vérifier si l'objectif de protection est correctement satisfait²².

Dans l'exemple représenté dans la figure ci-dessous, on constate que les premiers déversements du Val d'Orléans vont se produire pour des crues de période de retour d'environ 170 et 200 ans, en des endroits non prévus à cet effet, et ensuite pour des crues d'occurrence 500 ans sur le déversoir de Jargeau (cote de la crête fusible). Le système est donc défaillant²³, ce qui est dû aux évolutions morphologiques du lit de la Loire depuis la conception et la réalisation du système au XIXème siècle. En conclusion de cette analyse hydraulique, le niveau de protection apparent²⁴ du système correspond à une crue de période de retour T=170 ans.

²¹ Sur la question des niveaux et celle de leur équivalence entre altimétrie et périodes de retour, voir la section 4.1. ; à noter également de bien différencier les notions de cote (ou niveau) de protection et de cote de submersion.

²² Il ne s'agit là que d'une première approche dans le cas où il n'y a pas de déversoir en place et que le niveau de protection est assimilé au niveau de sûreté ou de protection apparent.

²³ La défaillance provient du fait que le déversoir de Jargeau ne joue pas son rôle de supporter les premiers déversements.

²⁴ C'est à dire en l'absence de rupture de digue avant ce niveau, donc en l'absence de diagnostic structurel. Dans le cas d'Orléans, le diagnostic a conduit à un niveau de sûreté inférieur de 1 m. au niveau de protection apparent. Ce qui implique que le niveau de protection réel correspond en fait à un niveau au plus égal au niveau de sûreté.

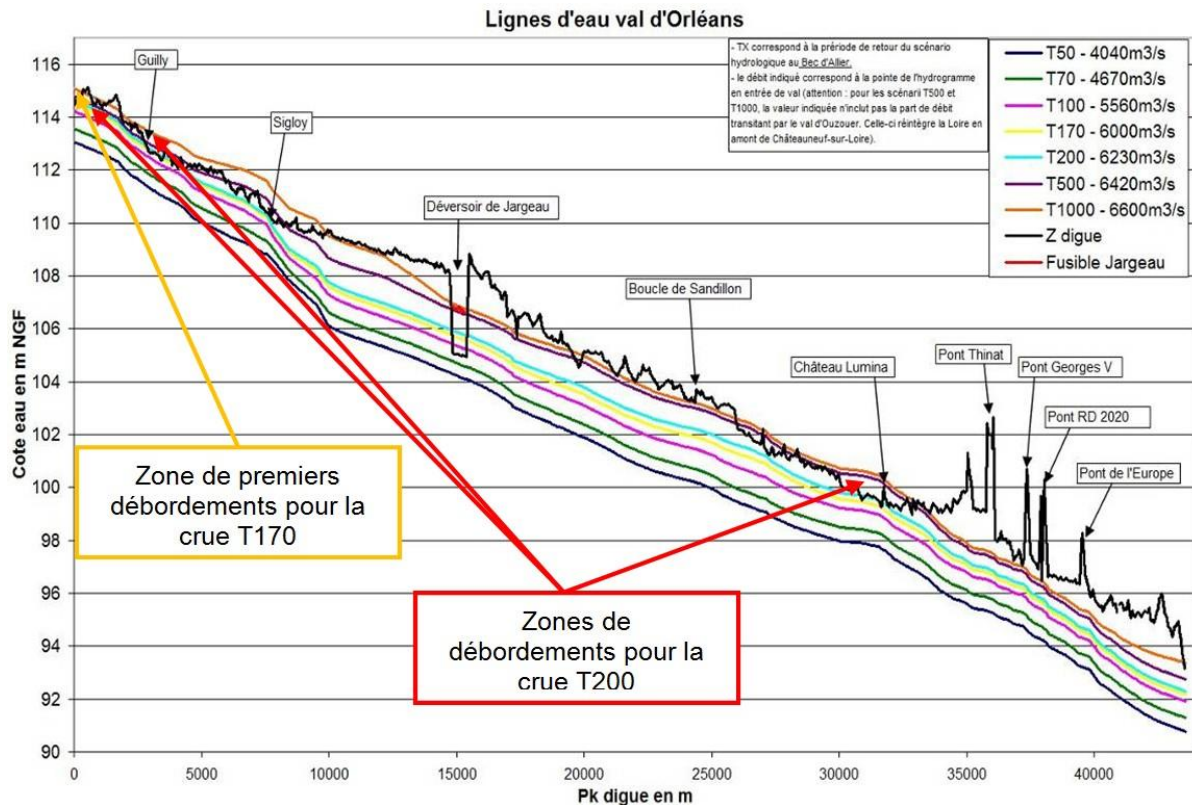


Figure 3.3 : exemple d'analyse des lignes d'eau de différentes crues sur le Val d'Orléans (source : DREAL Centre)

Cette analyse permet également d'obtenir différents niveaux de sollicitation des digues pour les différents événements considérés, ce qui va être utilisé ensuite dans le diagnostic structurel.

Sur certains cours d'eau, comme dans le milieu maritime, différents événements pourront donner des niveaux de sollicitation variables le long du linéaire (et non "parallèles"). C'est par exemple le cas sur les cours d'eau qui tels le Rhône qui sont soumis à des régimes hydrométéorologiques très variés (voir la figure 3.4) ; chacune de ces crues donnera des lignes d'eau avec des pentes différentes et donc potentiellement des zones de première surverse différentes. C'est également le cas dans le domaine maritime où la superposition des facteurs d'origine des phénomènes exceptionnels (marée, pression atmosphérique, intensité et direction du vent....) vont donner le long d'un rivage des niveaux différents (exemple de l'île de Ré lors des tempêtes de 1999 et Xynthia). Ce point est à intégrer dans le diagnostic hydraulique ; en particulier une crue plus longue (ex crue de nov. 2002 sur la figure 3.4) favorise les mécanismes d'écoulements internes dans la digue.

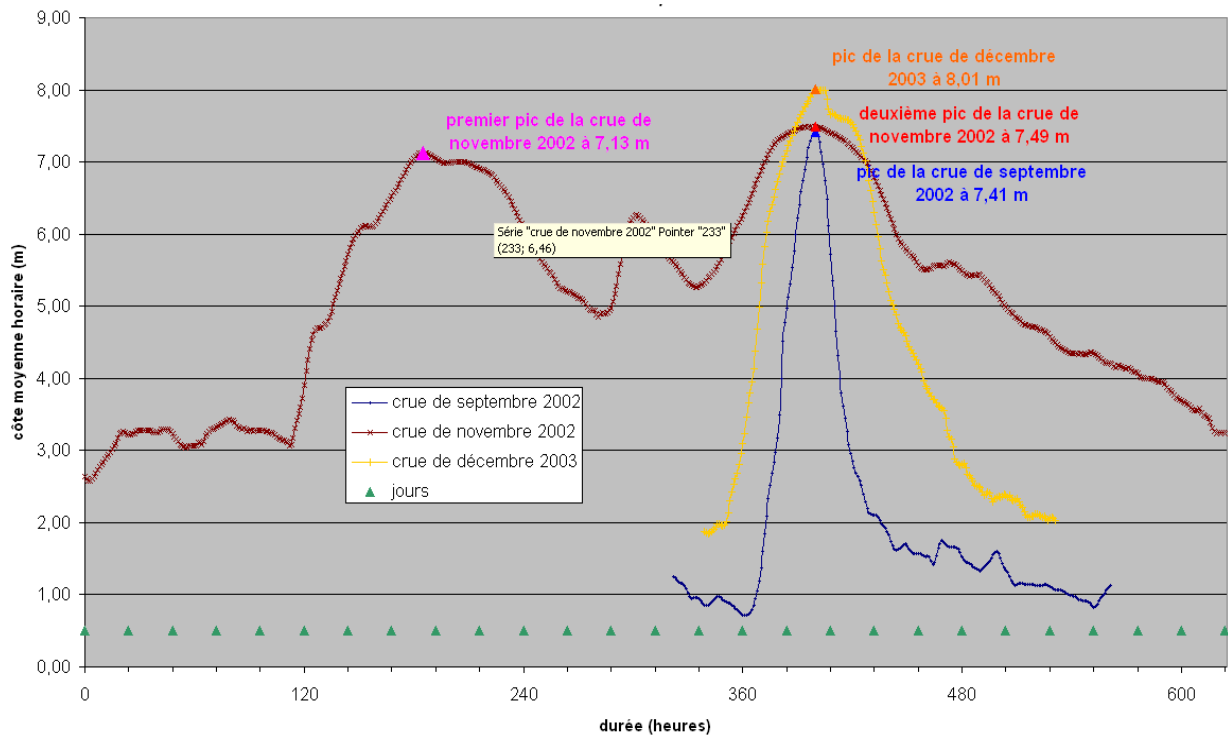


Figure 3.4 : les hydrogrammes des crues du Rhône de septembre et novembre 2002 et décembre 2003 (source CNR et Irstea)

Le diagnostic hydraulique devra étudier l'ensemble des scénarios de défaillance possibles de la fonction hydraulique du système (protection), sans rupture de digue, ce qui peut arriver :

- par insuffisance du niveau de protection (si le niveau de protection réel est inférieur à l'objectif de protection)
- ou par défaillance d'un élément ayant une fonction hydraulique (déversoir, batardeau, ...)

Ce deuxième point est plus basé sur une analyse fonctionnelle et une analyse des modes de défaillance du système que sur l'analyse hydraulique présentée plus haut.

En domaine fluvial, il est nécessaire de modéliser le lit mineur (et éventuellement une partie du lit majeur) entre les digues pour obtenir les lignes d'eau. Pour cela, on peut utiliser différents types de modèles à choisir au cas par cas. Ces modèles peuvent être basés sur différents types d'outil de modélisation (1D, 1D à casier, 2D) ; généralement un modèle 1D ou 1D à casier sera suffisant. Il peut être nécessaire de corriger les résultats bruts d'un modèle pour intégrer différents éléments (dévers dans les courbes, effets du vent, embâcles, ...). Pour l'étude d'un système donné, il sera généralement utile de disposer de deux modèles à des échelles différentes : un modèle dit "global" qui portera à l'échelle du cours d'eau ou d'un sous-bassin de celui-ci, et un modèle local à l'échelle du système de digues étudié. Le premier modèle sera généralement couplé avec l'étude de l'hydrologie du bassin versant, le second donnera les résultats utilisables dans le diagnostic et utilisera les résultats du premier comme conditions aux limites (voir §4.1).

En domaine maritime une étude des cotes et niveaux devra être menée conformément aux éléments mentionnés au §4.1.1.2.

3.3.3 - Diagnostic structurel (ou estimation des aléas de rupture)

A - mode de représentation de la digue pour l'évaluation

Le diagnostic structurel des digues peut être fait soit directement à l'échelle globale du système (dans ce cas en général avec des méthodes à base de jugement expert), soit localement à l'échelle d'un tronçon.

Le diagnostic d'une digue ou d'un système analysé en tronçons intègre celui de chacun des tronçons. Son objectif est d'obtenir :

- une évaluation de la performance structurelle du système ou de la digue ou du tronçon,
- le lien entre les défaillances possibles et les mécanismes en cause.

En ce qui concerne le premier point, cette évaluation pourra s'exprimer sous différentes formes (voir plus haut au 3.1.1). A minima on s'attend pour tout type de diagnostic à avoir une évaluation de la performance structurelle (soit de sa sûreté) en terme qualitatifs, et pour les diagnostics complets une évaluation du niveau de sûreté et du niveau de danger (notions définies au §4.1.1), associé éventuellement à différentes probabilités de rupture pour différentes crues. On comparera le niveau de sûreté effectif du système avec celui prévu à l'origine de la conception du système ou, à défaut, avec des valeurs admissibles compte tenu des enjeux protégés (lien avec l'analyse de risques).

Le diagnostic structurel s'effectue de manière classique en découpant la digue en tronçons, sur lesquels la démarche qui va être décrite ci-dessous sera appliquée. Le découpage en tronçons peut se faire de plusieurs manières :

- soit on découpe la digue en tronçons "homogènes", en fonction des paramètres utilisés pour l'évaluation, les tronçons ont alors une longueur variable,
- soit on découpe la digue en tronçons de longueur fixe et donc généralement faible.

Au-delà des tronçons, il existe également des points singuliers (transitions²⁵, ouvrages "ponctuels", ...). Ces points singuliers peuvent être traités séparément, soit être intégrés au tronçon auquel ils appartiennent et modifier l'évaluation de ce dernier.

B - choix des scénarios de rupture

Une des premières étapes d'un diagnostic complet est d'identifier les scénarios de rupture envisageables sur une digue donnée, pour chaque tronçon homogène du point de vue des sections en travers. Cela peut être fait soit sur la base d'une démarche formelle d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance, soit par analyse experte, soit en faisant une étude bibliographique, soit a minima en faisant référence aux scénarios "classiques"²⁶ présentés au chapitre 2 :

- érosion par surverse
- érosion interne (aussi appelée de manière imprécise "renard" hydraulique)²⁷
- glissement,
- érosion externe par le courant notamment à la base des ouvrages,

²⁵ Voir les livrables du projet Européen FloodProBE, tâche 3.1

²⁶ On appelle mode de rupture un scénario de rupture qui met en œuvre un certain nombre de mécanismes qui peuvent se succéder ou se produire en parallèle ; en général le scénario ou mode de rupture est dénommé par le mécanisme initiateur ou prépondérant.

²⁷ L'état de l'art actuel distingue désormais quatre grands modes d'érosion interne : suffusion, érosion régressive, érosion de contact et érosion de conduit ou érosion concentrée. Cette dernière est celle qui correspond à la phase finale de l'érosion interne, le fameux "renard".

- soulèvement hydraulique aval (correspond à un "claquage" d'une couche superficielle relativement imperméable suivi d'une érosion interne régressive et de conduit d'une fondation sous-jacente plus perméable et non cohésive).

Les quatre premiers de ces scénarios sont décrits pour les digues fluviales dans le guide [Lino et al, 2000], le dernier ne concernant bien évidemment que certaines configurations. Il est de même envisageable d'imaginer des scénarios supplémentaires suivant les configurations. Pour cela, la démarche d'analyse fonctionnelle puis d'analyse des modes de défaillance est a priori la seule pouvant prétendre à identifier systématiquement les scénarios potentiels.

C - modèles utilisables par scénario ou mécanisme

L'étape suivante consiste en une analyse, tronçon par tronçon, pour une crue ou différentes crues ou niveaux de sollicitation, et scénario par scénario. Cette analyse peut aussi être conduite par mécanisme, mais il convient alors d'envisager les enchaînements de mécanismes dans un second temps.

Les données sont analysées suivant différentes méthodes (voir liste des types ci-après) mais il convient de les rattacher à des mécanismes ou des scénarios.

Parmi les types de méthodes d'analyse on distingue :

- l'analyse à l'aide de modèles mathématiques, basés :
 - o soit sur des lois physiques (exemple : le cisaillement),
 - o soit sur des lois empiriques (exemple : l'érosion interne régressive)
- l'analyse avec des méthodes à base d'indicateurs,
- les analyses expertes (pas de formalisation préalable des données nécessaires, utilisation de toute donnée pertinente).

L'avantage des deux derniers types de méthodes est qu'elles permettent de combiner des données de type numérique (quantitatives) et des résultats d'observations visuelles (qualitatives). Par ailleurs, vu la complexité et l'hétérogénéité des structures des digues, les modélisations mathématiques ne sont pas forcément représentatives de l'ensemble de l'ouvrage. Enfin, de nombreux mécanismes et surtout les scénarios, ne sont aujourd'hui pas modélisables en termes mathématiques, alors qu'une approche à base de règles expertes, formalisées ou non, permettra de se prononcer sur le niveau de performance.

Pour chaque scénario (ou mécanisme) retenu, on recherchera les données nécessaires et/ou utiles pour conduire les analyses et le résultat des analyses sera présenté dans des tableaux, par tronçon homogène au niveau de ces données.

Un même mécanisme ou scénario peut être, pour le même diagnostic, analysé avec plusieurs de ces méthodes. In fine, il est de toute façon nécessaire qu'un ingénieur spécialisé corrige ou affine les résultats de tout type d'analyse, ou combine des analyses de types différents. Comme il a été dit précédemment, les résultats du diagnostic peuvent prendre différentes formes :

- seuil (charge limite),
- coefficient ou facteur de sécurité,
- probabilité conditionnelle de défaillance (pour une charge donnée),
- courbe de fragilité (possibilité conditionnelle de défaillance donnée en fonction d'une gamme de charges),
- index ou indicateur (exemples: sur une échelle de 0-5 ou de 0-10)
- qualitative (par exemple: très bien, bien, passable, mauvais, très mauvais.),
- probabilité annuelle de défaillance,
- ...

et seule une approche experte pourra, dans l'état actuel des connaissances, combiner des résultats de natures différentes.

D - combinaison des résultats – performance globale d'un tronçon

La phase de diagnostic précédemment décrite aboutit à l'estimation de l'aléa de rupture des tronçons de digues.

L'aléa de rupture (Al) d'un tronçon se calcule pour différentes crues et différents scénarios de rupture. Son calcul, pour un scénario de rupture et une crue donnés s'exprime de la façon suivante :

$$Al_{\text{rupture}} (\text{mécanisme } m, \text{ crue } c) = Al_{\text{crue}} (\text{crue } c) \cdot Al_{\text{conditionnel de rupture}} (\text{mécanisme } m, \text{ crue } c)$$

Dans cette expression, l'aléa de crue correspond à la probabilité annuelle de la crue. L'aléa conditionnel de rupture pour le mécanisme de rupture considéré est quant à lui conditionné par les caractéristiques (intensité et cinétique) de la crue considérée.

Ainsi, pour un tronçon de digue donné, on obtient dans un premier temps l'ensemble des aléas conditionnels de rupture, pour chaque mécanisme de rupture, pour chaque crue. Ces résultats peuvent dans un second temps être agrégés pour obtenir d'un côté l'aléa de rupture pour tous les mécanismes de rupture pour une crue, et de l'autre, l'aléa de rupture pour chaque mécanisme de rupture pour toutes les crues.

Enfin, le résultat final pour un tronçon consiste en l'agrégation de ces précédents résultats et aboutit à l'aléa de rupture du tronçon pour toutes les crues et tous les mécanismes de rupture (Tableau 3.1).

	Mécanisme 1	Mécanisme 2	Mécanisme 3	Mécanisme 4	
Crue 1	Al _{conditionnel} (m1, c1)	Al _{conditionnel} (m2, c1)	Al _{conditionnel} (m3, c1)	Al _{conditionnel} (m4, c1)	Al _{rupture} (c1)
Crue 2	Al _{conditionnel} (m1, c2)	Al _{conditionnel} (m2, c2)	Al _{conditionnel} (m3, c2)	Al _{conditionnel} (m4, c2)	Al _{rupture} (c2)
Crue 3	Al _{conditionnel} (m1, c3)	Al _{conditionnel} (m2, c3)	Al _{conditionnel} (m3, c3)	Al _{conditionnel} (m4, c3)	Al _{rupture} (c3)
Crue 4	Al _{conditionnel} (m1, c4)	Al _{conditionnel} (m2, c4)	Al _{conditionnel} (m3, c4)	Al _{conditionnel} (m4, c4)	Al _{rupture} (c4)
	Al _{rupture} (m1)	Al _{rupture} (m2)	Al _{rupture} (m3)	Al _{rupture} (m4)	Al _{rupture} (tronçon)

Tableau 3.1 : principe d'agrégation de l'aléa de rupture pour un tronçon de digue

E - performance globale de la digue

Il est également nécessaire de produire une évaluation globale de la performance de la digue, ne serait-ce que pour permettre à un gestionnaire de comparer ses différents ouvrages.

Cette performance peut être présentée de différentes manières : courbe de fragilité, niveau de protection effectif et niveaux de sûreté et de dangers, probabilité annualisée de rupture, ...

F - exemples de méthodologies de diagnostic

Exemple 3.1 - Exemple de diagnostic de digue à Orléans (France, Loire, 2011-2012) d'après DREAL Centre, Irstea et LRPC de Blois

Méthode de diagnostic	Application de modèles mathématiques sur les longueurs fixes de tronçons de digues, sur la base de lois physiques ou empirique (selon différents mode de défaillance), et ajustés en fonction d'autres données. Évaluation de la probabilité de défaillance pour différentes charges hydrauliques, en tenant compte des propriétés et de l'état des digues,
------------------------------	--

	pour des scénarios composés d'un ou plusieurs mécanismes, et faisant une distinction entre la probabilité d'apparition et la probabilité d'évolution vers une brèche. Utilisation à la fois de modèles mathématiques (physiques et empiriques) et de méthodes basées sur des règles expertes.
Ce qui est combiné	Données géométriques, données géotechniques, charges hydrauliques, résultats d'inspections visuelles (exemples: terriers d'animaux, arbres) et autres bases de données (par exemple: les empiétements de canalisations) ainsi que l'organisation (suivi des digues en crue, capacité d'intervention).
Modes de défaillance et/ou mécanismes	Surverse, érosion interne, glissement de talus suivi d'un autre mécanisme, érosion externe suivie d'un autre mécanisme, soulèvement hydraulique suivi d'une érosion interne régressive.

Graphiques

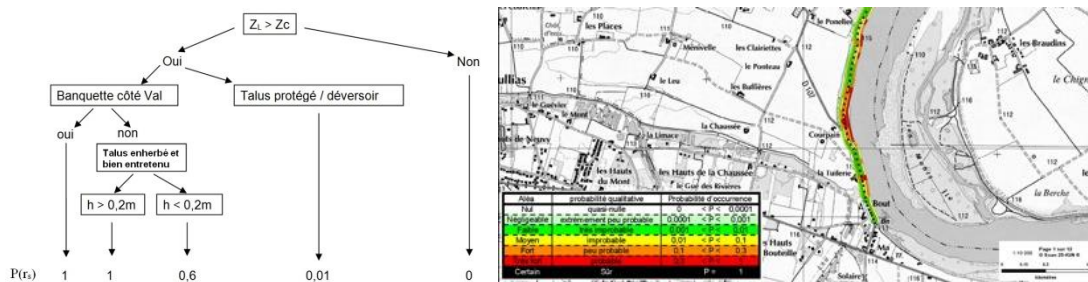


Figure a : estimation de la probabilité de brèche par surverse, une fois la crête de digue dépassée

Figure b : résultat global de l'estimation

Explication

Cinq modes de défaillance principaux ont été identifiés et conservés pour l'analyse de cette méthode de diagnostic. Ces modes de défaillance sont soit composés d'un seul mécanisme (surverse, érosion interne) ou à partir de deux ou trois mécanismes (glissement de talus suivi par l'érosion interne, érosion externe suivie par l'érosion interne ou par l'effondrement puis l'érosion interne, soulèvement hydraulique suivie par l'érosion interne régressive).

Chacun de ces modes de défaillance (ou scénarios de brèche) a été évalué sur des longueurs de digues fixes (50 m), pour différentes crues (Q50, Q100, Q170, Q200, Q500). D'abord, il a été déterminé la probabilité $P(A)$ que le premier mécanisme se produise et ensuite la probabilité $P(r)$ que cet événement conduise à une brèche, impliquant soit l'évolution du premier mécanisme jusqu'à la brèche, soit d'autre(s) mécanisme(s), pour chaque probabilité de crue $P(q_t)$ d'intérêt. Le résultat calcule la probabilité de brèche pour un mode de défaillance donné : $P(R) = P(A) \cdot P(r) \cdot P(QT)$

Différents modèles ont été appliqués pour chacun de ces termes sur chacune des sections pour chaque crue. Ces modèles sont différents pour chaque mécanisme et mode de défaillance, prenant en compte soit des modèles physiques (de glissement, ...), soit des modèles empiriques (Selmeyer : érosion régressive d'une couche de sable sous une couche imperméable ...) ainsi que des règles expertes (résistance à l'érosion par surverse, voir Fig.a, en prenant en compte le suivi de la "lutte" contre l'érosion interne ...).

Les données proviennent à la fois du système SIG de gestion de données du gestionnaire de digues (SIRS Digues), d'un examen visuel spécifique d'une recherche dans les informations historiques (rapports) relatives à la géotechnique et d'un MNT (créé par levé LIDAR, voir tâche 3.2 de FloodProBE)

Le modèle a été développé dans un tableur (CARDigue).

Un tableau d'équivalence entre les probabilités et leur traduction en termes qualitatifs (ex : événement possible mais extrêmement peu probable ; événement très peu probable ; événement improbable ; événement probable ; événement habituel) a été mis au point. Il permet soit de produire des probabilités à partir de règles expertes, soit d'exprimer en mots les résultats probabilistes.

Une fois que la probabilité de brèche a été évaluée pour chaque mode de défaillance et classe de crue considérés; ces résultats seront utilisés comme tels par le gestionnaire de travaux ou combinés pour produire les probabilités suivantes: probabilités globales pour chaque crue (tous les modes de défaillance); probabilités globales pour chaque mode de défaillance (toutes les classes de crue); probabilités globales (pour tous les modes de défaillance et toutes les classes de crue). Les méthodes, basées sur des probabilités, adaptées pour produire de telles combinaisons sont encore à déterminer.

Quels que soient les types de résultats attendus, ceux-ci peuvent être représentés graphiquement, à l'aide d'un SIG; sur une carte affichant la probabilité de brèche sur toute la longueur de la digue considérée (figure b). Ils peuvent également être enregistrés dans un système SIG de gestion de données.

Exemple 3.2 : Exemple de méthode de diagnostic basé sur une analyse fonctionnelle des composants d'une digue (France, 2011-2012) d'après Irstea [Serre,...] et [Vuillet, ...]

Méthode d'analyse	Combinaison d'indices (indicateurs d'état, critères de fonctions, indicateurs de performance) à l'aide de règles basées sur les connaissances expertes formalisées. Combine différents types et natures de données (géométriques, géotechniques, hydrauliques, morphodynamiques; observations visuelles, ...) dans une méthodologie explicite.
Ce qui est combiné	Informations issues d'inspections visuelles; données géométriques, géotechniques ; informations morphologiques ; informations issues de bases de données (empiétements des ouvrages; ...)
Modes de défaillance et/ou mécanismes	L'exemple détaille la méthode pour l'érosion interne, mais la méthode existe aussi pour la surverse, l'érosion externe et le glissement. Les principes génériques de la méthode sont également présentés.
Graphiques	

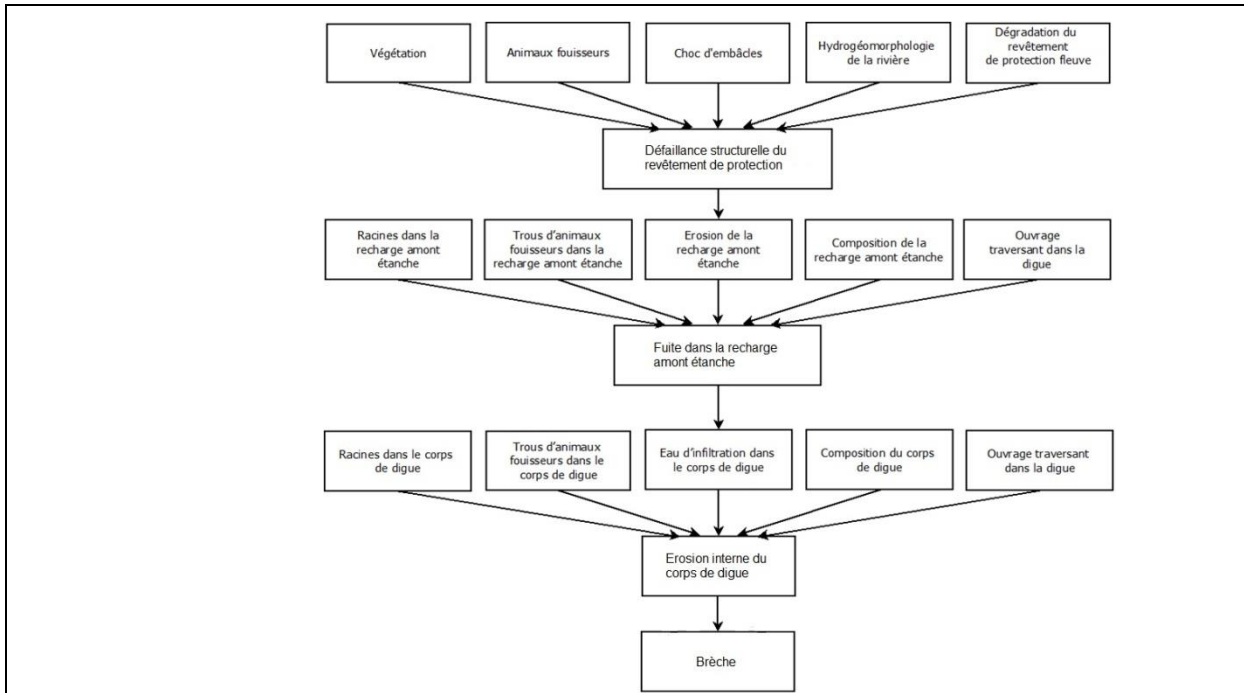


Figure c : Exemple d'arbre de défaillance pour l'érosion interne sur une digue avec recharge amont imperméable.

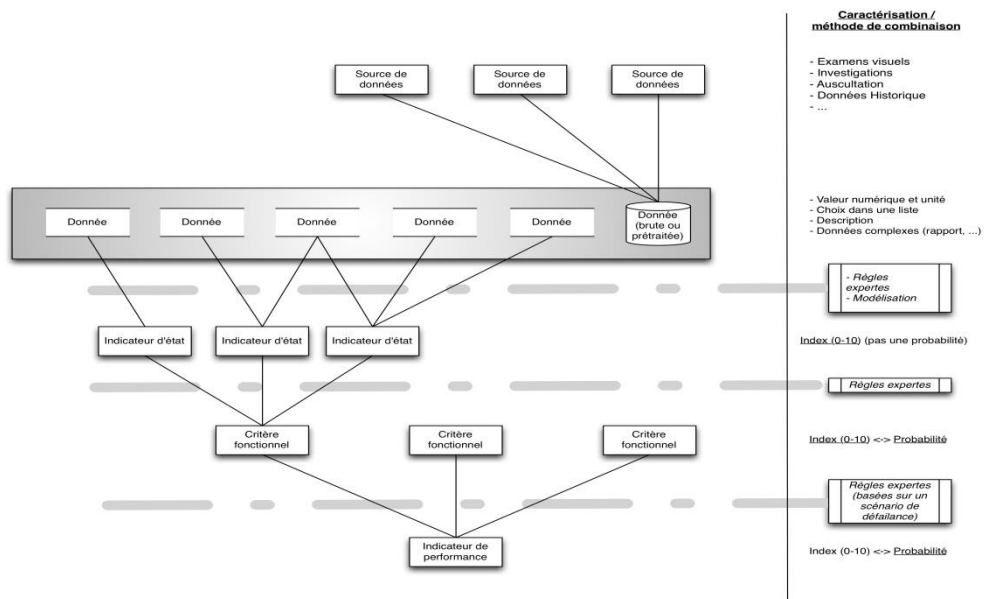


Figure d : processus général de diagnostic utilisant la méthode basée sur des indicateurs utilisée dans cet exemple.

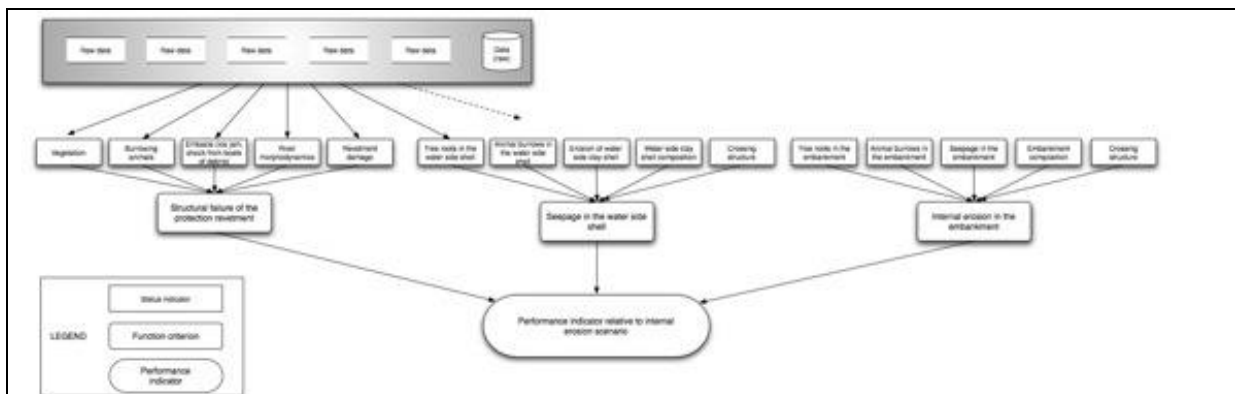


Figure e : processus de diagnostic de l'érosion interne sur une digue avec recharge amont imperméable.

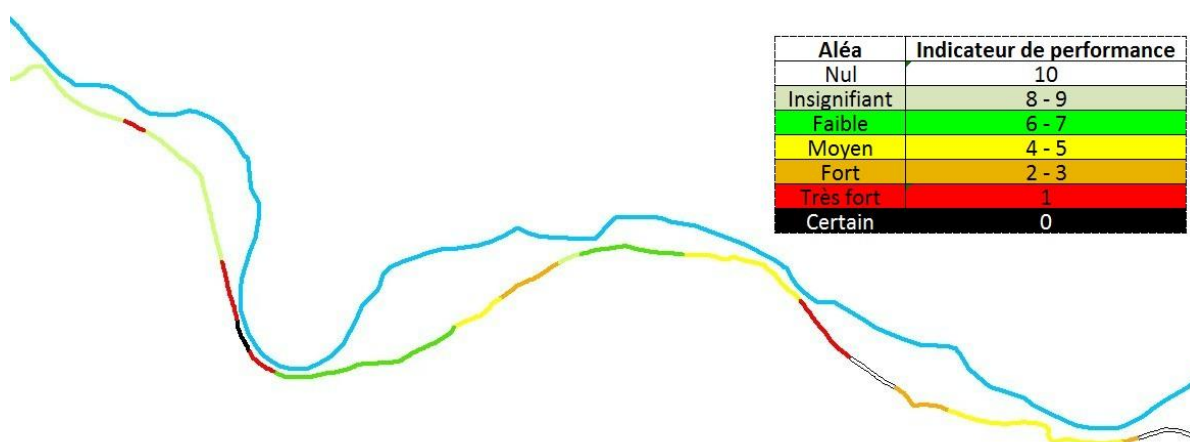


Figure f : exemple de carte montrant le résultat d'un diagnostic de digues global pour différents tronçons.

Explication

Basé sur une analyse fonctionnelle des composants d'une digue, dans chaque section en travers, les scénarios de défaillance sont identifiés et analysés, en reliant des fonctions essentielles (comme la protection, étanchéité, la stabilité, la filtration ...) et des composants. La figure 1 présente un tel scénario de défaillance.

Les données sont d'abord utilisées pour établir les différents indicateurs d'état. Les valeurs de ces indicateurs résultent soit directement des données brutes soit des données prétraitées ou des données combinées. Elles sont relatives à une fonction, et à un seul composant lié à la fonction. Exemple: la nature (ou l'état) du revêtement de protection du parement côté cours d'eau.

Les critères fonctionnels sont alors calculés, sur la base de la combinaison des valeurs des indicateurs d'état. Ils sont relatifs à une fonction en relation avec le mode de défaillance étudié. Exemple: résistance du revêtement à l'érosion externe.

Enfin, comme indiqué sur les figures d (cas général) et e (application à l'érosion interne), l'évaluation des indicateurs de performance est basée sur une combinaison de critères fonctionnels. Ils sont relatifs à un scénario de défaillance / rupture (ou «mode de défaillance») pour une section en travers donnée. Exemple : la performance du tronçon de digue vis à vis du «scénario d'érosion interne».

L'évaluation finale tient compte de tous les modes de défaillance.

Un avis d'expert est utilisé, d'une manière formalisée pour produire les règles d'agrégation permettant de passer des indicateurs d'état aux critères fonctionnels, et des critères fonctionnels aux indicateurs de performance.

Un SIG permet de :

- gérer toutes les données disponibles relatives à la digue,
- de mettre à disposition chaque donnée pertinente à tous les indicateurs d'état,
- de prétraiter les données pour produire les indicateurs d'état pour ceux qui ont mis en place les règles expertes,
- de prétraiter la combinaison des indicateurs d'état et des critères fonctionnels pour produire les critères fonctionnels et les indicateurs de performance,
- de représenter l'estimation de la performance à la fois pour l'indicateur de performance globale et les indicateurs de performance propres à chaque mode de défaillance.

3.3.4 - Analyse de risques (diagnostic des conséquences de la défaillance du système de protection)

L'objectif de l'analyse de risques est l'évaluation du risque que représente la défaillance du système étudié. Pour un système de protection, ce risque correspond à l'estimation de la probabilité de réalisation d'inondations dans la zone protégée et à l'estimation de la gravité de leurs conséquences pour les enjeux qui s'y situent.

L'analyse de risque se déroule en plusieurs étapes :

- l'identification et le choix des scénarios d'inondation caractérisés en termes de probabilités d'occurrence ;
- la caractérisation des scénarios d'inondation en termes d'intensité et de cinétique des phénomènes dangereux ;
- l'estimation de la vulnérabilité des enjeux et de la gravité des scénarios d'inondation ;
- l'évaluation du risque.

C'est typiquement le principe de la démarche effectuée dans le cadre d'une étude de dangers (EDD).

3.3.4.1 - L'identification et le choix des scénarios d'inondation caractérisés en termes de probabilités d'occurrence

Les scénarios d'inondation peuvent découler de :

- la surévaluation du niveau de protection (si le niveau de protection réel est inférieur à l'objectif de protection) ;
- la défaillance d'éléments ayant une fonction hydraulique (déversoir, batardeau, ressuyage, ...) ;
- brèches (résultat de défaillances structurelles).

Une multitude de scénarios d'inondation peuvent être envisagés sur la base des résultats des diagnostics hydraulique et structurel. Il est donc difficile de viser l'exhaustivité quant à leur prise en compte, l'analyse de risques ne peut être menée que sur la base d'un nombre limité de scénarios d'inondation (notamment pour des raisons de coût).

Le choix des scénarios d'inondation doit alors se porter sur les situations les plus représentatives :

- les situations les plus pénalisantes en termes de gravité des conséquences ;
- les situations les plus probables ;

- les situations permettant de connaître la variabilité de l'aléa d'inondation envisageable dans la zone protégée.

Ce travail consiste d'abord à choisir des points et des conditions d'entrée d'eau dans la zone protégée. Les débits d'eau de crue que l'on souhaite voir entrer dans la zone protégée selon les scénarios sont ensuite définis en fonction des crues considérées lors du diagnostic hydraulique et des retours d'expériences sur les brèches passées.

La probabilité associée à chacun des scénarios d'inondation dépend directement de la crue que l'on considère, et en cas de brèche, de la probabilité que cette crue provoque la rupture du tronçon choisi comme point d'entrée d'eau dans la zone protégée. Cette probabilité correspond à celle de l'aléa d'inondation et doit être exprimée sur la base d'une échelle de potentialité de réalisation des scénarios d'inondation pour une unité de temps donnée (Tableau 3.2).

Probabilité de l'aléa d'inondation	Classes de probabilité (p/unité de temps)
A. Evènement courant	10^{-1} à 1
B. Evènement probable	10^{-2} à 10^{-1}
C. Evènement improbable	10^{-3} à 10^{-2}
D. Evènement très improbable	10^{-4} à 10^{-3}
E. Evènement possible mais extrêmement peu probable	$< 10^{-4}$

Tableau 3.2 : Exemple d'échelle de probabilités d'aléa d'inondation

3.3.4.2 - La caractérisation des scénarios d'inondation en termes d'intensité et de cinétique des phénomènes dangereux

L'intensité et la cinétique de l'inondation constituent la seconde composante de l'aléa d'inondation. On peut notamment les traduire au travers des paramètres d'écoulement suivants :

- la hauteur d'eau
- la vitesse horizontale
- la vitesse de montée des eaux
- le temps de propagation

Le choix peut toutefois être fait de se limiter à certains d'entre eux, par exemple au couple (hauteur et vitesse horizontale) à l'instar des PPRI ; mais d'autres paramètres peuvent avoir un impact important sur les enjeux telle que, par exemple, la vitesse de montée des eaux qui est également un élément déterminant dans l'organisation des secours.

L'estimation des paramètres choisis doit être réalisée pour chacun des scénarios d'inondation considérés. Elle peut être menée par l'utilisation de différents types de méthodes et notamment :

- la modélisation hydraulique bidimensionnelle
- la modélisation à casiers
- l'utilisation de modèles simplifiés (exemple Castor Dignes)
- l'approche experte, basée éventuellement sur une modélisation 1D

Les données quantitatives ainsi produites doivent alors être classées et combinées sur la base d'une grille d'intensité d'aléa d'inondation prédéfinie. La figure 3.5 donne un exemple de combinaison conduisant à des classes d'intensité d'inondation pour un aléa défini par le couple (hauteur x vitesse horizontale).

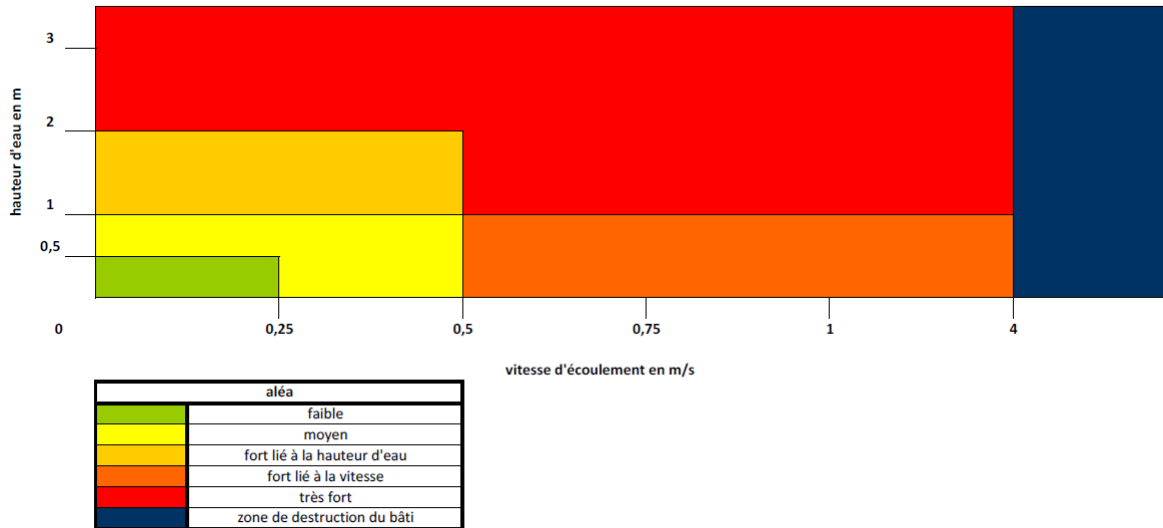


Figure 3.5 : Exemple de grille d'intensité de l'aléa d'inondation

L'intensité de l'aléa propre aux scénarios d'inondation peut alors être cartographiée, notamment par l'utilisation d'un SIG (figure 3.6).

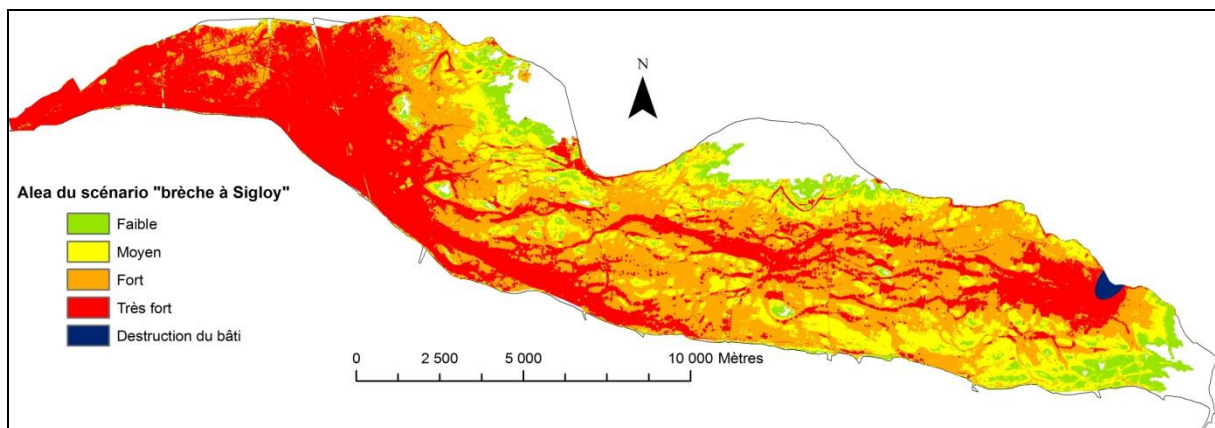


Figure 3.6 : Exemple de carte d'aléa d'inondation pour un scénario de brèche sur le système de protection d'Orléans

Le risque associé à chacun des scénarios d'inondation peut alors être estimé par croisement avec la vulnérabilité des enjeux présents dans la zone protégée.

3.3.4.3 - L'estimation de la vulnérabilité des enjeux et de la gravité des scénarios d'inondation

Par définition, la vulnérabilité d'un enjeu donné correspond au niveau de conséquences prévisibles que l'intensité d'un aléa peut lui causer. Ainsi, la vulnérabilité d'une zone protégée doit traduire la nature et l'importance des dommages auxquels les enjeux qui la composent sont potentiellement exposés pour les différentes classes d'intensités d'inondation.

Les dommages aux enjeux peuvent être de différentes natures (humaines, économiques, environnementaux, sociaux, ...) et un même enjeu peut souvent en combiner plusieurs types. Cela conduit à la mise en évidence de différents types de vulnérabilités en fonction des types de dommages auxquels on s'intéresse et de la finesse avec laquelle on souhaite

mener l'analyse de risque. Il est souvent fait le choix de ne s'intéresser qu'à l'impact direct sur les populations (les décès potentiels) ou aux pertes économiques.

Dans le cas de l'estimation de l'impact direct sur les populations, un exemple de méthode consiste à identifier les différents types de zones (habitat, activités agricole, ...) composant la zone protégée et la densité moyenne de population qu'elles contiennent. Chaque type de zone se voit alors attribuée une échelle d'endommagement traduisant la proportion de population potentiellement menacée pour chacune des classes d'intensité de l'aléa d'inondation (Tableau 3.3). Cet endommagement est défini en fonction de la nature de la zone considérée et essentiellement selon la possibilité de mise à l'abri des populations et la planification de l'action des services de secours.

Intensité de l'aléa d'inondation	Endommagement des enjeux « X » (par exemple 50 pers./ha)
6. Zone de destruction du bâti	45 (pers./ha)
5. Très fort	35 (pers./ ha)
4. Fort lié à la vitesse	20 (pers./ ha)
3. Fort lié à la hauteur d'eau	15 (pers./ ha)
2. Moyen	5 (pers./ ha)
1. Faible	0 (pers./ ha)

Tableau 3.3 : exemple de grille d'endommagement pour un type d'enjeu donné

Les résultats de l'estimation de la vulnérabilité doivent alors être cartographiés afin de les croiser avec les cartes d'aléa des différents scénarios d'inondation considérés.

Pour un scénario d'inondation donné ce croisement permet (dans le cas de la présente méthode) d'estimer la somme de l'ensemble des populations potentiellement impactées dans la zone protégée. La gravité des conséquences des scénarios est alors qualifiée sur la base d'une échelle de gravité qui doit être définie (Tableau 3.4).

Niveau de gravité du scénario d'inondation	Nombre de victimes potentielles
5. Désastreux	Supérieur à 10 000
4. Catastrophique	Entre 1 000 et 10 000
3. Important	Entre 100 et 1 000
2. Sérieux	Entre 10 et 100
1. Modéré	Inférieur à 10

Tableau 3.4 : Exemple de classes de gravité des scénarios d'inondation

Les enjeux stratégiques et sensibles peuvent également être repérés (services de secours, centre de décision, hôpitaux, écoles, réseaux ayant une influence à l'extérieur de la ZP...) et leur exposition estimée pour chacun des scénarios d'inondation.

3.3.4.4 - L'évaluation du risque

L'évaluation du risque consiste en la détermination de la criticité des scénarios d'inondation. La criticité d'un scénario correspond au niveau d'acceptabilité qui lui est attribué en fonction de son niveau de risque. L'acceptabilité du risque une notion principalement définie par le pouvoir politique du territoire étudié.

La lecture de la criticité d'un scénario peut notamment se faire par l'utilisation d'une grille de criticité (figure 3.7).

Criticité des scénarios		Probabilité de réalisation des scénarios d'inondation				
		E. Extrêmement peu probable	D. Très improbable	C. Improbable	B. Probable	A. Courant
Gravité des scénarios d'inondation	1. Modéré					
	2. Sérieux					
	3. Important					
	4. Catastrophique					
	5. Désastreux					

	Risque acceptable
	Risque préoccupant ou tolérable sous conditions
	Risque intolérable

Figure 3.7 : Exemple de grille de criticité

L'évaluation du risque est une donnée qui permet de prioriser les actions de gestion du système de protection.

3.3.5 - Conclusions d'un diagnostic

Un diagnostic complet (c'est à dire exclusion faite des diagnostics fréquents effectués sur la simple base d'un examen visuel) devrait conclure à la fois sur le niveau de performance hydraulique et le niveau de fiabilité (résistance aux différents modes de rupture), pour différents scénarios de crue.

Les diagnostics intermédiaires doivent être basés sur un diagnostic complet antérieur, et également conclure sur les suites à donner (travaux, diagnostics, surveillance et entretien).

Tous les diagnostics doivent conclure sur les suites à donner, en donnant des pistes sur les éventuelles reconnaissances et diagnostics complémentaires, sur les types de travaux de confortement nécessaires ou sur des recommandations concernant la surveillance et l'exploitation.

Sur la base de l'analyse de risques, le diagnostic peut également proposer une priorisation des différentes actions comme dans le cas d'une étude de dangers (EDD).

Au cours du cycle de vie de l'ouvrage, des diagnostics plus ou moins précis, succèdent donc à des diagnostics plus complets et précis, de manière à garantir une optimisation des ressources et des résultats (voir figure 3.8). Il est éventuellement possible dans cette démarche de procéder par itérations successives pour arriver au premier diagnostic complet.

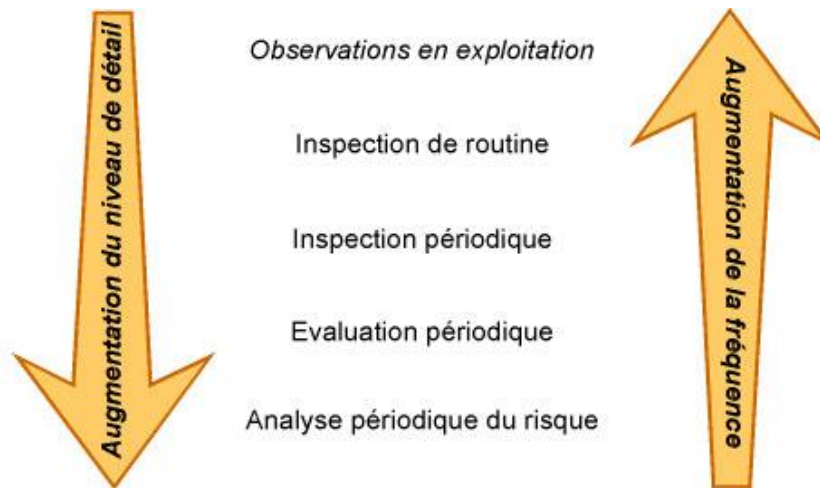


Figure 3.8: diagnostics périodiques, niveaux de détail et fréquences (source : ILH chapitre 5)

4. Conception, dimensionnement et exécution des travaux

La conception d'une digue de protection contre les inondations est un processus généralement itératif qui comprend notamment les phases suivantes dont les principales sont abordées au sein de ce chapitre, à savoir :

- caractérisation hydrologique et hydraulique du milieu eau (§ 4.1),
- définition des objectifs de protection et de sûreté,
- contraintes diverses (foncier, environnement, ...),
- implantation et caractéristiques générales approchées : position en plan, hauteurs (digue en section courante et en section déversante – voir § 4.2.5), pentes, le tout sur la base d'un calcul hydraulique.
- reconnaissances et essais géotechniques (§ 4.2.1)
- conception et dimensionnement précis de l'ouvrage (§ 4.2.2 à 4.2.6)

Les principes de conception étant définis, la justification des ouvrages est abordée au § 4.3 puis le § 4.4 est consacré au cas spécifique du confortement des digues existantes ce qui constitue actuellement la majeure partie des projets en France. Pour terminer, les éléments généraux relatifs à la réalisation des travaux constituent le § 4.5 de ce chapitre.

4.1. Définition et détermination des sollicitations

Les sollicitations qui s'appliquent à une digue sont importantes à connaître initialement pour son dimensionnement et ultérieurement pour sa vérification (diagnostics, étude de dangers, ...). Ces sollicitations (ou actions du milieu extérieur) sont de différentes natures :

- les sollicitations hydrauliques (externes)²⁸,
- les sollicitations mécaniques directes, causées par des facteurs extérieurs non généralisables d'un système à un autre (séismes, effondrements localisés de la fondation ou des environs karstiques ou des terrains surplombant environnant de l'ouvrage ou autres, actions anthropiques dont circulation, actions accidentelles, surcharges ...),
- les sollicitations causées par des évolutions de la morphologie du milieu eau (morphodynamique fluviale ou côtière), qui en modifiant le milieu proche de la digue (estran ou ségonal, fondation), peuvent causer l'apparition de mécanismes ou de scénarios de dégradation ou de rupture.

4.1.1. Sollicitations hydrauliques

Les sollicitations hydrauliques, causées par le milieu eau, comportent différentes composantes, à caractériser au cas par cas, en domaine maritime comme en domaine fluvial. Ces composantes (ou les paramètres significatifs de ces composantes) sont :

- un niveau hydrostatique y compris ses conséquences sur les écoulements internes et sur la surverse éventuelle ;

²⁸ les conditions hydrauliques internes sont bien entendu importantes, mais il ne s'agit pas de sollicitations

- les variations de ce niveau hydrostatique pendant un événement (vitesses de montée et de descente principalement) y compris leurs conséquences sur les écoulements internes et les pressions interstitielles ;
- une composante dynamique ayant des effets mécaniques directs (impact des vagues par exemple) sur l'ouvrage ou des effets pouvant se traduire en terme de franchissement ou de surpression ; les paramètres significatifs sont notamment une hauteur des vagues, une vitesse de propagation et une période (longueur d'onde) ;
- une composante de vitesse dans le sens longitudinal à l'ouvrage ;
- le transport solide ;
- le transport de corps flottants (arbres, véhicules, ...).

La connaissance précise de toutes ces composantes des sollicitations hydrauliques est nécessaire pour apprécier correctement la fiabilité d'un ouvrage existant comme pour dimensionner un ouvrage en projet.

Ces sollicitations hydrauliques du fleuve ou de la mer représentent en général les principales actions hydrauliques auxquelles devra résister la digue mais il convient d'y ajouter dans certaines situations des sollicitations pouvant venir du côté zone protégée (ZP) tel que celles provoquées par des fossés de drainage et/ou ruisseau secondaire en pied de digue ainsi que les plans d'eau qui s'établissent à l'arrière des digues dans les zones d'expansion des crues (ZEC) avec des vitesses de courant et de montée des eaux ainsi que des hauteurs de vagues spécifiques à chaque ouvrage

Notions de côtes et de niveau

Les termes de niveaux, cotes et événements (crues, tempêtes, ...) appliqués aux notions de protection, de sûreté ou de danger sont employés dans différents documents techniques et réglementaires avec des significations différentes notamment selon que l'on parle de hauteur et/ou période de retour de crue ou de niveau marin, de tronçon de digue, de système de protection ou de sécurité des personnes.

Dans le présent guide technique nous retiendrons les définitions suivantes, établies à partir de celles proposées pour les digues fluviales [Degoutte, 2012], [Mallet et al, 2013] et illustrées figure 4.1, mais que nous étendons au domaine des systèmes de protection maritimes en utilisant les définitions FONCTIONNELLES²⁹ suivantes :

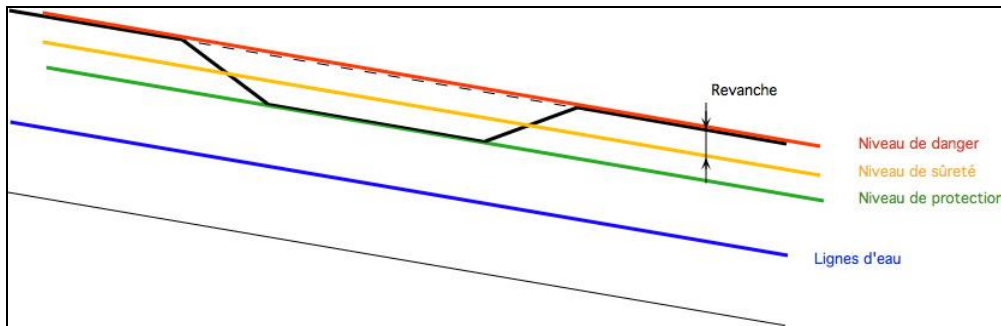
- **Niveau de protection**³⁰ (s'applique au système de protection) : Situation dans laquelle on n'a pas d'entrée d'eau dans la zone protégée (ZP) à travers le système de protection ou dans une quantité limitée et acceptable par le système d'assainissement et de drainage de la ZP (par exemples des embruns ou faibles projections en milieu maritime).
La ZP peut néanmoins être inondée par d'autres phénomènes (remontée de nappe, ruissellement, ...).
- **Niveau de sûreté** (s'applique au système de protection ou tronçon par tronçon avec dans ce cas celui du système qui est le plus faible de tous les tronçons) : Situation jusqu'à laquelle la probabilité de rupture de la digue est négligeable. Lorsque ce niveau est supérieur au niveau de protection, de l'eau peut entrer dans la zone protégée, sans dommage sur la digue.

²⁹ Nous essaierons d'éviter la confusion entre la définition des termes dans cette partie du guide et la description des méthodes de détermination des valeurs associées (caractérisation, en 4.1.1.1)

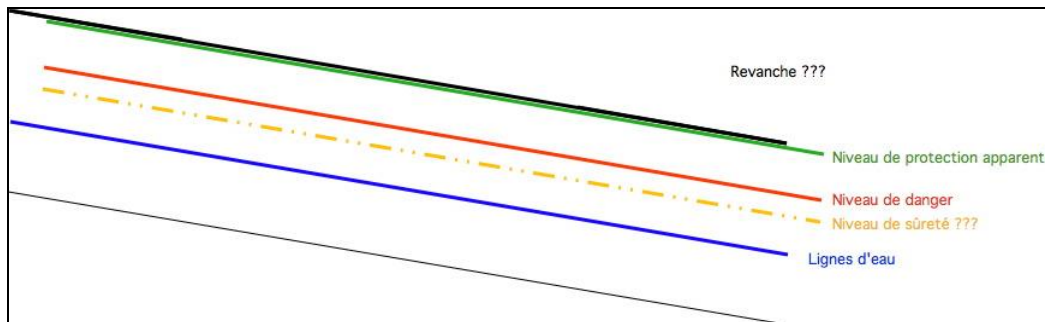
³⁰ Peut également être dénommé "niveau de début de submersion"

Cela peut par exemple correspondre en fluvial au fonctionnement des déversoirs tant que la hauteur d'eau ne menace pas l'intégrité de la digue et en maritime au passage de « paquets de mer » tant que l'intégrité de la digue n'est pas mise en cause (niveau évidemment largement lié à la conception de la digue et à son système de protection contre l'érosion).

- **Niveau de danger** (s'applique au système de protection ou tronçon par tronçon avec dans ce cas celui du système qui est le plus faible de tous les tronçons) : Situation au-delà de laquelle la rupture de l'ouvrage est quasi-certaine. C'est notamment le moment où la hauteur d'eau et/ou les vagues créent une surverse sur un tronçon de digue non prévu à cet effet.

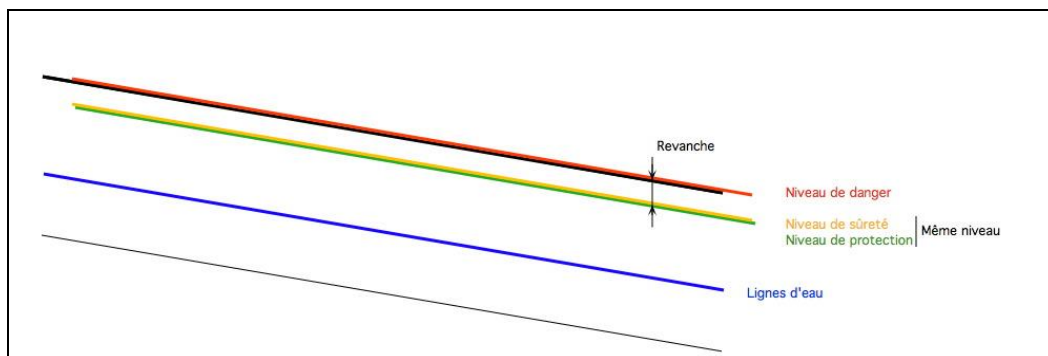


a- Digue munie d'un déversoir



b- Digue en état imparfait et non munie d'un déversoir.

Le niveau de protection apparent ne correspond fonctionnellement à rien car la digue risque la rupture avant la surverse, ce qui est à proscrire.



c- Digue en bon état mais non munie d'un déversoir.

Figure 4.1 : Exemples des différents niveaux sur un tronçon de digue fluviale (source R. Tourment)

Les niveaux définis ci-dessus expriment soit des **constats**, dans le cadre d'un diagnostic (voir chapitre 3), soit des **objectifs**, dans le cadre d'un projet d'ouvrage neuf ou de modification d'un système existant. Ils peuvent s'exprimer initialement aussi bien en période

de retour, qu'en altimétrie (niveau hydrostatique ou niveau hydrostatique plus hauteur de vague), ou encore en référence à un ou plusieurs événements historiques ou modélisés.

Ces niveaux sont variables le long des digues, en domaine maritime comme en domaine fluvial ou de rivière torrentielle, à la différence du niveau du plan d'eau amont sur les barrages. On évitera donc le recours à la notion de cote, forcément localisée.

Dans le domaine fluvial, on emploie régulièrement les mots « crue » en lieu et place de « niveau » ce qui peut introduire une ambiguïté car à une période de retour donnée peuvent correspondre différentes crues et donc des hauteurs d'eau différentes sur une même section du cours d'eau (figure 3.4). Nous nous en tenons donc ici aux notions générales de niveaux (différents de cotes ou hauteurs d'eau) données ci-dessus et largement reliées à la notion d'intégrité de la digue et à sa fonction de protection.

Pour des raisons pratiques il est intéressant de rattacher le niveau à une échelle de crue qui fait l'objet d'une prévision de crue par le SPC.

Pour autant, nous ne bannissons pas dans des applications locales à faire référence à des événements, réels ou prédéterminés (crues ou niveaux marins), sur la base d'un hydrogramme ou limnigramme. Par exemple, le niveau objectif de protection ou le niveau objectif de sûreté d'une digue fluviale peut légitimement être fixé en considérant des crues historiques.

Notion de revanche

La revanche est une marge de sécurité qui, lors d'un processus de conception d'un ouvrage hydraulique (construction ou confortement important), est ajoutée au niveau de sûreté de l'ouvrage pour déterminer le niveau de sa crête sur les tronçons en remblai non destinés à déverser, ce qui correspond pour un ouvrage en bon état à son niveau de danger.

Déterminer la revanche lors d'un projet est un choix relativement complexe qui nécessite d'intégrer de nombreux éléments relatifs au calcul des niveaux de protection et de sûreté (incertitudes sur l'hydrologie, intégration ou non des vagues, des pentes locales de la surface de l'eau et d'autres effets dans la modélisation hydraulique, risques d'embâcles, prise en compte éventuelle des tassements prévisibles de la digue, ...).

Une hauteur minimale de 50 cm est à recommander pour la revanche. Pour plus de précisions sur les différents modes de calculs associés à la détermination de la revanche, on pourra se référer au guide [CFBR 2010] sur les Petits barrages, ainsi qu'au guide [DEGOUTTE, 2012] sur les déversoirs sur digues fluviales.

La notion de revanche n'est pas transposable au diagnostic des ouvrages existants, particulièrement des ouvrages anciens pour lesquels les niveaux d'objectif de protection et encore plus de sûreté ne sont pas connus. Un diagnostic complet (voir chapitre 3) doit déterminer les niveaux effectifs de protection, de sûreté et de danger. Il est préférable de dénommer la différence de cote entre les niveaux effectifs de sûreté et de danger "marge de sécurité" que d'employer le terme de revanche pour éviter les ambiguïtés. Il est à noter d'ailleurs que pour ce type d'ouvrage le niveau de danger peut être inférieur à celui de la crête.

La revanche et la marge de sécurité, comme les différents niveaux ci-dessus, s'apprécient de manière variable le long d'un ouvrage, de manière continue ou bien par tronçon, compte tenu du linéaire des ouvrages et des variations des conditions de charge sur celui-ci.

4.1.1.1. *Sollicitations hydrauliques en fluvial*

La connaissance des sollicitations hydrauliques des digues ou systèmes d'endiguement, qui se traduisent par la connaissance des niveaux d'eau ou des vitesses d'écoulement, passe en général par une analyse hydrologique préalable suivie d'une modélisation hydraulique adaptée en fonction des objectifs recherchés.

A - Niveaux de sollicitations en fluvial (hydrologie et hydraulique)

Pour ce qui concerne les digues fluviales, les sollicitations hydrauliques principales se manifestent essentiellement lors des crues, chacune étant caractérisée par un hydrogramme et un débit de pointe (hydrologie), dont les niveaux peuvent varier localement au cours du temps, à débit constant, en fonction des modifications éventuelles apportées au lit du cours d'eau (hydraulique).

La connaissance des sollicitations hydrauliques peut être nécessaire pour répondre à plusieurs questions relatives aux digues :

- la définition du niveau de protection en terme de période de retour : en général un profil en long de lignes d'eau pour différents débits en régime permanent devrait être suffisant; il suffit alors de connaître la distribution statistique des débits de pointe (hydrologie), et de transformer ces débits en lignes d'eau avec un modèle hydraulique qui représente la topographie locale des écoulements (hydraulique) ;
- l'évaluation des risques éventuels d'affouillements [Blanchet et Morin, 1971] dus aux vitesses locales d'écoulement : dans ce cas, l'hydrologie joue plutôt un rôle secondaire, car les vitesses d'écoulement ne sont pas nécessairement maximales pour les plus fortes crues (si par exemple l'écoulement devient noyé par l'aval pour les forts débits); par contre la modélisation hydraulique devra être soignée et pourra demander la mise en œuvre d'une modélisation 2D, voire 3D, dans le cas des coudes de rivières par exemple (la vitesse verticale n'est plus négligeable dans ce cas) ;
- la hauteur et la durée de charge hydraulique sur la digue seront-elles suffisantes pour saturer le corps de digue et/ou engendrer des écoulements internes en régime transitoire (voir la figure 3.4 sur les différents types d'hydrogrammes possibles pour un même cours d'eau et des débits de pointe équivalents) ;
- la modélisation des scénarios de défaillance (création de brèches) ou le dimensionnement des déversoirs de crue : l'approche hydrologique devient plus complexe, car la connaissance du débit de pointe ne suffit plus, il faut en plus la connaissance des volumes écoulés par la crue, donc la connaissance de l'hydrogramme attaché à une période de retour; la modélisation hydraulique sera également plus complexe, car il faut pouvoir modéliser, d'une part, l'écoulement dans la rivière et, d'autre part, son expansion dans la plaine d'inondation : une modélisation hydraulique 2D devrait normalement s'imposer dans ce cas.

Dans tous les cas, la détermination des sollicitations hydrauliques pour les digues fluviales nécessite une démarche en deux étapes, la première étape consiste en une analyse hydrologique des débits de crue, voire des hydrogrammes de crue, et la seconde étape repose sur une analyse hydraulique par modélisation (éventuellement sommaire pour un premier dégrossissage).

B - Analyse hydrologique

Nous ne détaillerons pas dans cette partie les différentes méthodes utilisées en hydrologie, et nous invitons le lecteur à se référer à l'ouvrage intitulée « Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations » [Lang et al, 2007 – Editions Quae] qui sert de référence au texte suivant.

Il faut tout d'abord distinguer le cas des cours d'eau sur lesquels il existe des mesures de débits à des stations hydrométriques, du cas des cours d'eau pour lesquels on ne dispose pas de données mesurées.

Dans le premier cas, il est possible de réaliser des analyses statistiques sur les débits de crue, pour déterminer par exemple le débit de pointe des crues centennale, millénaire, ... (sous réserve que la chronique des mesures soit suffisamment longue pour garantir la fiabilité de l'analyse statistique).

La variable hydrologique « débit » est naturellement la plus représentative de la pluviométrie locale et de la réaction du bassin versant à l'exutoire, tandis que, sauf au niveau des stations hydrométriques, les hauteurs d'eau mesurées en un point ne représentent pas une variable hydrologique facilement exploitable, notamment parce qu'elles sont influencées par les conditions locales d'écoulement, qui évoluent en fonction du temps (évolution du lit, aménagements hydrauliques réalisés), et elles ne sont pas transposables en un autre site du bassin versant.

L'exploitation statistique des débits nécessite toutefois quelques précautions car la métrologie des débits n'est pas très simple et est entachée d'incertitude. En général, la mesure des débits passe par la mesure des hauteurs d'eau à une station hydrométrique, et la transformation des hauteurs en débits est faite à partir d'une courbe dite de tarage, qui est établie à partir de mesures de débits, qui sont réalisées à des instants ponctuels dans l'année et qu'on appelle « jaugeages ».

La fiabilité des débits mesurés est donc souvent directement liée à la fiabilité de la courbe de tarage, qui peut être parfois non-univoque (à une hauteur d'eau peut correspondre deux débits différents suivant que la mesure est faite en montée ou en descente de crue), et qui n'est pas toujours stable avec le temps (par exemple si la section hydraulique évolue au cours du temps en raison d'affouillements du lit par exemple). Par ailleurs pour la plupart des cours d'eau les tarages ne concernent pas les plus fortes crues.

Les réserves ci-dessus étant émises, les étapes à suivre pour réaliser un ajustement statistique sur un échantillon de débits sont les suivantes :

1. recueil de données : chronique de débits sur le site le plus proche; recueil et analyse des études hydrologiques antérieures ;
2. critique des données : visualisation de la chronique de débits; examen des courbes de tarage et du nuage des jaugeages; avis du gestionnaire sur la qualité des données ;
3. échantillonnage des données : typologie des crues (genèse, dynamique spatio-temporelle, caractère saisonnier); valeurs maximales annuelles ou saisonnières; vérification des propriétés de l'échantillon (caractère aléatoire, indépendance, homogénéité, stationnarité) ;
4. ajustement fréquentiel : choix d'une loi des valeurs extrêmes (Gumbel/GEV) et calage sur les valeurs maximales (moment, maximum de vraisemblance); diagnostic à l'aide d'un graphique de fréquence cumulée ;

5. présentation des résultats : quantiles de crue et ordre de grandeur de la précision du résultat; classe de période de retour des crues historiques les plus fortes connues.

Dans le deuxième cas où il n'existe pas de données de débits de crue sur le cours d'eau à proximité du site étudié, il faut distinguer plusieurs situations différentes :

- **Cas 1** – Existence d'une station de mesure des débits sur le bassin versant à étudier située légèrement en aval ou en amont du site étudié : il est possible de procéder à un transfert des informations du site mesuré au site étudié en utilisant des fonctions de transfert adaptées.
- **Cas 2** – Existence d'une station de mesure sur le bassin versant, mais éloignée du site étudié : il est alors préférable de mettre en œuvre des approches multiples afin de réduire l'incertitude sur l'estimation des débits. On préférera notamment des formulations qui prennent explicitement la pluie en compte, la variable pluie étant, après la superficie, la variable la plus explicative des débits de crue.
- **Cas 3** – Aucune station de mesure n'existe sur le bassin versant : l'information sur les bassins versants proches sera alors recherchée, sans se limiter à un seul bassin, mais en examinant au moins deux ou trois bassins voisins.

Pour les bassins versants non-jaugés, il existe aussi des formules empirico-statistiques qui permettent de déterminer le **débit de pointe** décennal ou centennal, à savoir : les régressions multiples, la formulation de Bressand-Golossof (1995), les courbes-enveloppes de Francou-Rodier (1967), la méthode du Gradex (Duband et al., 1988), la formule Crupedix (CTGREF et al., 1980-1982), la formule Socose (CTGREF et al., 1980-1982), la méthode rationnelle (Stifel W.J. Et Mc Pherson M.B., 1964), la méthode SCS (Soil Conservation Service, 2003), les modèles QdF de référence, et le modèle SHYREG, méthode SCHADEX [Lang et al, 2007].

Enfin, il existe des méthodes qui permettent de construire des **hydrogrammes** de projet relatifs à une crue de période de retour donnée, et qui utilisent les courbes QdF (Débit-Durée-Fréquence) et IdF (Intensité-Durée-Fréquence) sur la base des volumes écoulés et précipités à l'échelle du bassin versant dans le domaine des observations, et l'extrapolation à la distribution des crues selon la méthode du Gradex des pluies.

La construction d'un hydrogramme de projet est également indispensable pour la justification de la stabilité de la digue (mécanique, résistance à l'érosion interne) en régime transitoire.

C - Analyse hydraulique

Nous invitons le lecteur à se reporter au « Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques » (2008, Publication CETMEF), document principal et ses annexes, afin d'avoir plus de détails sur la modélisation hydraulique.

L'analyse hydraulique d'une digue ou d'un système d'endiguement sera normalement réalisée après l'analyse hydrologique présentée précédemment.

Comme nous l'avons déjà évoqué, la méthodologie d'étude et les moyens mis en œuvre seront différents suivant l'objectif recherché, voire la classe de l'ouvrage.

Dans tous les cas, il sera nécessaire de procéder à un recueil des données topographiques et bathymétriques du site d'étude, notamment des levés topographiques de la digue ou du système d'endiguement.

Il sera également nécessaire de procéder au recueil des laisses de crue ou des informations historiques qui ont pu concerner la digue ou le système d'endiguement (crues historiques ayant sollicité l'ouvrage, surverses observées et localisations, brèches constatées et localisations, niveaux de crue observés au droit de l'ouvrage et dans la zone du site étudié).

Les données historiques ne seront peut-être pas toujours disponibles, mais elles sont cependant nécessaires pour procéder au calage de toute modélisation hydraulique qui pourra être réalisée. A défaut, l'hydraulicien retiendra des valeurs de référence pour les paramètres de calage du modèle, notamment les coefficients de Strickler, mais il ne pourra pas en vérifier la fiabilité du modèle ainsi paramétré sur les résultats de crues réelles.

Dans tous les cas, la modélisation hydraulique, de la plus simple (utilisation de la formule de Manning-Strickler par exemple) à la plus compliquée (modélisation 2D ou 3D), servira à transformer les débits de l'analyse hydrologique (débits de pointe ou hydrogrammes de crue) en hauteurs d'eau, en vitesses d'écoulement et en diagramme de charge hydraulique sur les ouvrages.

La base des modèles hydrauliques repose sur les équations de Barré-de-Saint-Venant, dérivées des équations de Navier-Stokes, qui représentent, d'une part, la conservation de la masse et, d'autre part, la conservation de la quantité de mouvement.

La résolution de ces équations permet de calculer les hauteurs d'eau, les débits et les vitesses d'écoulement, soit sur des profils en travers (modélisation 1D), soit sur des nœuds d'un maillage structuré ou non-structuré (modélisation 2D ou 3D).

Dans le cas des études de dangers, l'analyse de la défaillance d'une digue ou d'un système d'endiguement peut conduire à simuler une ou plusieurs brèches dans la modélisation hydraulique, afin d'obtenir les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement en aval de celles-ci. Cette modélisation des brèches est tout à fait possible, mais elle est rarement incluse dans les fonctionnalités des codes de calculs, et elle nécessite de faire des hypothèses qui ont des conséquences fondamentales sur les résultats de la simulation (localisation de la brèche, cinétique de création de la brèche, largeur et hauteur de la brèche, instant de déclenchement de la brèche, durée d'ouverture de la brèche, création éventuelle d'une fosse, hydrogramme de débit dans la brèche).

Après la détermination des niveaux "moyens", il faut s'intéresser à la détermination des vagues et des phénomènes locaux (remous en amont d'ouvrages, ondes stationnaires, ...).

4.1.1.2. Sollicitations hydrauliques en maritime

Pour ce qui concerne les digues littorales ou estuariennes, il y a lieu de prendre en compte non seulement le niveau de la mer à proximité de l'ouvrage, mais aussi la houle, les mers de vent ou le clapot. Ces paramètres interviennent tant pour évaluer la protection apportée par l'ouvrage que sa sûreté.

A titre d'exemple, une digue peut permettre de se prémunir d'inondations par submersion pour un niveau moyen de la mer inférieur à sa cote d'arase. Mais il est possible que des vagues concomitantes provoquent des inondations par franchissement. Ces franchissements sont de différentes natures. Il peut s'agir de projections générées par les vagues qui se brisent, sur un ouvrage vertical notamment. Les vagues peuvent aussi remonter sur un perré incliné jusqu'à le franchir. Et, quand le niveau moyen de la mer est élevé mais reste en dessous de l'arase de l'ouvrage, l'action des vagues peut prendre l'aspect d'un franchissement massif et quasi continu.

Par ailleurs, la houle est un paramètre déterminant pour apprécier la sûreté, notamment pour les digues littorales. Lorsque la profondeur d'eau est importante aux abords de l'ouvrage, il n'y a pas ou très peu de dissipation, ce qui crée des vagues importantes et des sollicitations sans commune mesure avec celles des niveaux statiques. Ces sollicitations s'appliquent tant en avant de l'ouvrage qu'en arrière s'il y a des franchissements.

Il s'ensuit que pour apprécier la protection ou la sûreté d'une digue littorale pour une période de retour donnée, il faut prendre en compte des couples (niveau marin - état de mer). Un seul couple ne suffit pas en raison de l'indépendance, au moins partielle, des phénomènes. En général, seule une étude statistique sur l'ensemble de ces couples apportera une réponse, sous réserve de disposer de données sur une durée suffisamment longue.

Détermination des sollicitations

Les sollicitations appliquées aux digues maritimes et estuariennes dépendent du niveau marin et de la houle, des mers de vents ou du clapot (voir définition ci-après) et des interactions avec l'ouvrage et la côte.

Pour l'ensemble de ce chapitre si on souhaite aller plus loin, on se reportera utilement au guide enrochements partie 4 [CETMEF, 2009].

Niveau marin :

Le niveau marin comprend différentes composantes :

- la hauteur de la marée astronomique:

La hauteur de la marée astronomique dépend essentiellement de la position de la Lune et du Soleil. Elle peut être prédite car les mouvements de la Lune et du Soleil sont bien connus. La marée astronomique est peu sensible sur les côtes françaises en Méditerranée, mais elle présente une amplitude importante, en métropole, le long des côtes de la mer du Nord, de la Manche et de l'Atlantique. Le marnage peut atteindre plus de 15 m dans la baie du Mont Saint Michel.

Les prédictions de marée dans certains ports français sont libres d'accès sur le site du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). Elles sont limitées à l'année en cours, mais le calcul de hauteurs passées est possible. D'autres informations sont aussi disponibles, comme, par exemple, les hauteurs de pleine mer et de basse mer pour les marées astronomiques d'amplitude maximale et minimale. Les prédictions pour l'année en cours et la suivante sont accessibles dans l'annuaire de marée ou avec le logiciel SHOMAR. Enfin, les prédictions à plus long terme nécessitent l'utilisation d'un logiciel spécifique ou de passer une commande auprès du SHOM.

Les prédictions de hauteur en France métropolitaine sont définies en référence au zéro hydrographique, qui est proche du niveau des plus basses mers (il peut toutefois s'en écarter de plusieurs décimètres). Le calcul des hauteurs de la marée astronomique dans le référentiel IGN 69 est possible dans les ports où il existe un raccordement entre les deux référentiels. Cette information est disponible tant sur le site que dans les annuaires de marées du SHOM.

Si l'on souhaite évaluer des hauteurs de la marée astronomique ailleurs que dans les ports de référence, la seule méthode accessible, à ce jour, est l'interpolation. Mais elle ne fournit pas toujours des résultats acceptables notamment dans les zones où la côte n'est pas rectiligne. Dans ce cas, on devrait avoir recours à une campagne de mesure. Il faudra être vigilant dans l'exploitation de plans d'ouvrages anciens car ce raccordement des deux référentiels a pu évoluer dans le temps.

Pour des informations très détaillées sur la marée astronomique, on pourra consulter l'ouvrage « La marée océanique côtière, Bernard Simon, 2007 ».

- la surcote d'origine météorologique :

La marée réelle est souvent différente de la marée prédite. On appelle surcote ou décote la différence de hauteur entre la marée réelle et la marée astronomique. La surcote n'est donc pas le niveau maximal atteint par la mer.

Les phénomènes météorologiques, à savoir le vent et la pression atmosphérique, peuvent générer des ondes longues de l'ordre de quelques centaines de kilomètres. Elles sont à l'origine de surcotes de hauteur variable selon la configuration de la côte et avec des durées de l'ordre de l'heure à la journée.

Les surcotes mesurées dans les ports de France métropolitaine peuvent atteindre 2 m et plus, mais elles ne se produisent pas nécessairement lors de la pleine mer d'une forte marée. Le caractère exceptionnel du niveau marin atteint à La Rochelle lors de la tempête Xynthia n'est pas lié à la hauteur maximale de la surcote (1,50 m alors que des surcotes de 2 m avaient déjà été observées) mais au fait que son maximum soit survenu au moment d'une pleine mer de fortes vives eaux.

Combinées aux marées astronomiques, les surcotes peuvent modifier sensiblement la hauteur de la mer. Une publication du SHOM et du Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluvial (CETMEF) permet d'évaluer les niveaux extrêmes de la mer en résultant pour la Manche et en Atlantique. Intitulé « statistique des niveaux marins extrêmes de pleine mer en Manche et en Atlantique », ce document fournit, dans le référentiel IGN69, les niveaux prévisibles tout le long du littoral pour différentes périodes de retour. Ces niveaux ne prennent pas en compte la surélévation due à la houle, les seiches, ni l'élévation du niveau de la mer due au changement climatique (voir ci-après).

- la surélévation due à la houle :

Appelée « Wave set-up » en anglais, cette composante du niveau marin se développe au voisinage littoral. Elle a principalement pour origine le déferlement des vagues induit par la remontée des fonds. On peut donc l'observer par exemple entre les barres et le rivage ou sur les plages, entre autres. Sa hauteur peut dépasser 10% de celle de la houle du large. Elle ne fait pas partie des composantes bien mesurées par les marégraphes permanents du SHOM, car ils se situent essentiellement dans des ports en eau profonde et en général à l'abri des houles. Elle n'est pas non plus prise en compte dans la publication « statistique des niveaux marins extrêmes de pleine mer en Manche et en Atlantique » évoquée au précédent paragraphe.

D'autres phénomènes de surélévation existent, notamment en raison de la réflexion des vagues sur une côte réfléchive, devant des seuils ou des ouvrages côtiers (surélévation de clapotis).

- les seiches :

Ce sont des oscillations d'une durée allant de quelques minutes à quelques dizaines de minutes. Elles proviennent, entre autres, de résonnances dues à la géométrie des côtes. A titre d'exemple, des réflexions entre l'île de Groix et le continent sont à l'origine de seiches atteignant 1,50 m à Port Tudy. Elles ne sont pas prises en compte dans la publication « statistique des niveaux marins extrêmes de pleine mer en Manche et en Atlantique ».

- les tsunamis :

Ils se manifestent sous la forme d'une ou de quelques ondes solitaires qui sont générées par des mouvements rapides des fonds marins, voire des effondrements de falaises. D'une hauteur modeste au large, ces vagues se propagent très rapidement et sur de longues distances puis gonflent quand les fonds marins remontent, notamment lorsqu'elles atteignent le littoral. Les tsunamis n'ont pas tous l'ampleur des quelques phénomènes extrêmes qui se

sont produits ces dernières années en Extrême-Orient. Il en existe de plus faible hauteur, notamment en Méditerranée, où ils pourraient atteindre, dans sa partie occidentale, de l'ordre 2 m pour une période de retour de 50 ans.

- L'élévation du niveau de la mer due au réchauffement climatique

L'élévation du niveau marin est un phénomène important à l'échelle géologique. On estime que la mer se situait 120 à 130 mètres plus bas il y a 18 000 ans. La vitesse de remontée a été d'une vingtaine de centimètres au 20^{ème} siècle avec une tendance actuelle à s'accélérer ce que l'on l'explique par l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat (GIEC), dans son quatrième rapport datant de 2007, avance une élévation de 20 à 60 cm à l'échéance de 2100. Cependant nombre d'experts et de groupes de travail considèrent que cette estimation est trop basse en raison de la fonte plus rapide que prévue des glaciers.

Pour connaître l'élévation relative de la mer par rapport à la terre le long des côtes, la seule qui nous intéresse pour les digues littorales, il faut intégrer les variations d'altitude du socle terrestre. En Norvège, par exemple, le niveau relatif de la mer, aujourd'hui, baisse en raison d'une surrection des terres plus rapide que la remontée du niveau marin. A l'inverse, dans les atolls du Pacifique, le niveau relatif est bien plus élevé que la simple surélévation du niveau marin, du fait de leur enfoncement.

Pour ce qui concerne la France métropolitaine, citons la « circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les PPRL » qui retient comme hypothèse une surélévation de 60 cm à l'horizon 2100

Houle, mer de vent et clapot:

- Génération

Les vagues sont générées par le vent. Elles présentent initialement un aspect désordonné et sont cambrées, c'est ce que nous observons sur le littoral quand la dépression est voisine du continent. Il s'agit alors d'une « mer de vent » ou de « clapot » si le vent souffle sur quelques kilomètres. Lorsque que les vagues sont générées au large (à quelques centaines, voire milliers de kilomètres), elles s'organisent dans leur déplacement et forment des ondes presque régulières qui ont une forme arrondie. Il s'agit alors de « houle ». Un « état de mer » est un ensemble de vagues qu'il s'agisse de houle, de mer de vent ou de clapot, voire de leur combinaison (houles croisées, houle et mer de vent ...)

On décrit statistiquement un état de mer par des spectres de répartition de la période et de la hauteur des vagues et de leur étalement directionnel. L'état de mer dépend de la force du vent, de la durée pendant laquelle il souffle ainsi que de la longueur du plan d'eau qu'il sollicite.

- Propagation

Les vagues, dans leur déplacement, lorsqu'elles s'approchent de la côte et que les fonds remontent, subissent des modifications par shoaling et réfraction. Pratiquement, ces phénomènes apparaissent lorsque la profondeur devient inférieure à la moitié de la longueur d'onde calculée en profondeur infinie. A titre d'exemple, pour une houle océanique de période 15 s, les modifications se produisent dès que la profondeur est inférieure à 175 m, alors que pour une mer de vent de période 5 s, cela se produit à partir d'une profondeur de 20 m. Ceci met en évidence la forte dépendance de cette profondeur à la période.

Le shoaling est une modification de la hauteur des vagues due à la pente des fonds. Dans un premier temps, la hauteur diminue progressivement, de 10% environ, puis augmente dans les petits fonds. Cette augmentation dépend de la période de la houle. Par 2 m de profondeur, elle est de l'ordre de 5% pour une mer de vent de période 5 s alors qu'elle dépasse 50 % pour des houles océaniques de période supérieure à 13 s.

La réfraction modifie la hauteur et la direction de propagation des vagues. Leur direction tend à s'aligner sur les lignes de plus grande pente des fonds. Ce phénomène permet d'expliquer la concentration des vagues sur les caps et leur épanouissement dans les baies. Des réfractions se produisent aussi en présence de courants.

Indépendamment de la remontée des fonds, des phénomènes de diffraction peuvent se produire sous la forme d'un étalement latéral des vagues là où elles sont de moindre hauteur. Ce phénomène intervient notamment autour des rochers, des îlots, des îles, des presqu'îles, des digues et jetées portuaires etc...

Les vagues se réfléchissent aussi sur les obstacles comme les hauts fonds, toutes les formes émergentes, la côte, et les ouvrages. Il se produit alors en avant des obstacles un clapotis dont la hauteur est supérieure à celle de la vague incidente (le double sur un obstacle parfaitement réfléchissant). Le clapotis s'accompagne d'une surélévation du niveau moyen du plan d'eau.

Enfin, elles déferlent dès que leur cambrure est trop élevée (vagues dont la crête est trop pointue)

Des codes de calcul permettent de modéliser la propagation de la houle. Ils reproduisent bien les effets du shoaling et de la réfraction. En revanche, la réflexion n'est pas prise en compte. Certains codes modélisent le déferlement mais l'effet de la diffraction ne donne pas souvent des résultats satisfaisants. Les limites apparaissent notamment en présence d'îles et surtout de groupes d'îlots. Il peut alors être utile de mettre en œuvre des mesures in situ.

Pour réaliser un modèle fiable, certaines précautions sont à prendre. L'emprise du modèle doit s'étendre, si possible, jusqu'aux profondeurs supérieures à la moitié de la longueur d'onde au large. Les états de mer doivent aussi être évalués pour ces profondeurs. La collecte des données bathymétriques sur toute l'emprise du modèle est à rechercher. Les propagations sont à réaliser en faisant varier la direction, la période, la hauteur des états de mer et le niveau du plan d'eau dans les mers à marée.

- Les états de mer au droit de la digue

Les vagues en approchant l'ouvrage peuvent déferler. Pour une plage de pente faible, on peut considérer que le déferlement se produit lorsque la hauteur de la vague est de l'ordre de la profondeur d'eau. Pour des pentes plus importantes, le déferlement sera plus tardif. Il dépendra alors de la pente et de la période des vagues. La profondeur en avant de l'ouvrage va donc limiter la hauteur des vagues qui l'atteignent. L'altitude des petits fonds et de l'estran pour les mers à marée est donc un paramètre essentiel à l'évaluation de l'état de mer au droit de l'ouvrage. Il faudra être très vigilant lorsque les fonds en avant de l'ouvrage sont constitués de sédiments mobiles ou de roches tendres susceptibles d'être érodées, car tout abaissement conduit à une augmentation de la hauteur des vagues.

Le niveau moyen du plan d'eau remonte devant l'ouvrage du fait de la surcote de déferlement (voir plus haut).

Enfin une réflexion se produit sur la digue entraînant la formation d'un clapotis, dont les conséquences sont une augmentation de l'agitation devant l'ouvrage comme une surélévation du niveau moyen du plan d'eau.

La complexité du sujet est telle qu'une modélisation numérique de tous ces phénomènes physiques n'est quasiment pas envisageable à des prix raisonnables aujourd'hui. Par contre, des essais physiques ont été réalisés sur des configurations type. Ils ont permis de dégager des règles de l'art dans certains domaines. On peut citer par exemple la stabilité des blocs de carapace d'une digue sous l'effet des vagues. En revanche, des sujets ont été moins explorés, comme l'évaluation des volumes d'eau franchissant les ouvrages de haut de plage sous l'effet des vagues. On doit cependant citer un travail récent sur le sujet, mais il ne traite qu'un nombre limité de cas, notamment pour ce qui concerne la géométrie des fonds en avant de l'ouvrage. Le lien <http://overtopping-manual.com/index.html> permet d'avoir accès aux conclusions de ce travail. N'oublions pas que les observations in situ voire les essais en modèles physiques restent bien souvent la méthode la plus précise.

Sollicitations hydrauliques maritimes :

Les sollicitations hydrauliques peuvent provenir du courant, comme en fluvial, nous n'insisterons donc pas sur ce sujet. En revanche, les effets des marées et de la houle sont plus spécifiques.

La marée applique une charge hydraulique variable devant la digue. Si elle est construite en terre, l'effet des écoulements alternés devra être pris en compte non seulement pour la stabilité d'ensemble mais aussi pour la stabilité de surface. Si elle est constituée d'un remblai recouvert d'enrochements, il faudra vérifier la non percolation des particules fines sous l'effet du pompage exercé par l'eau au travers de la carapace. Enfin, si le remblai est recouvert d'un perré ou si la digue est constituée d'un soutènement, le niveau de la nappe en arrière est un paramètre essentiel du dimensionnement de l'écran. Une démarche pragmatique consiste à retenir un niveau de nappe en arrière correspondant à l'arase du parement sauf à démontrer le contraire. L'efficacité des barbicanes n'est pas acquise en raison des charges hydrauliques alternées, du temps de réponse de la nappe en arrière et du colmatage. L'étanchéité de l'ensemble du parement doit être soignée pour éviter la formation d'une cavité en arrière due au départ des matériaux de remblai.

La houle exerce aussi des forces hydrauliques variables sur la digue mais le cycle est de l'ordre de quelques secondes à comparer à 12 heures environ pour la marée en métropole. Cette variation rapide produit des effets dynamiques spécifiques, comme le franchissement des vagues et les efforts dynamiques. Ces deux effets dépendent fortement de la hauteur des vagues au pied de l'ouvrage (les efforts surfaciques et volumiques sont par exemple proportionnels respectivement au carré et au cube de la hauteur de la houle). Comme la hauteur de la houle résiduelle dépend de la profondeur d'eau au pied de l'ouvrage, on comprend que le niveau de l'estran est un paramètre essentiel tant pour évaluer les franchissements que les efforts appliqués. En présence de houle, la digue doit obligatoirement être recouverte d'une carapace en enrochements ou protégée d'un écran, voire d'une structure hybride. Le dimensionnement des enrochements se fait suivant des méthodes bien décrites dans la littérature. En revanche celui des écrans reste très empirique, il est souvent réalisé par un calcul quasi-statique de soutènement. Les effets de pompage dus à la houle sont plus conséquents que ceux de la marée. Ils sont pris en compte dans les méthodes de dimensionnement des enrochements. Pour ce qui concerne les écrans, les dispositions d'étanchéité décrites au paragraphe précédent s'appliquent de la même manière, voire plus strictement.

4.1.1.3. Influence de l'hydrogéologie

L'hydrogéologie (dans le sol de la fondation) est un facteur essentiel pour la caractérisation des sollicitations à prendre en compte pour les approches mécaniques et hydrauliques de la conception d'un ouvrage hydraulique.

Les digues de protection contre les inondations (inondations fluviales ou submersions marines) sont construites bien souvent sur des formations plus ou moins perméables avec la présence d'une nappe mettant en communication la masse d'eau (mer ou rivière) et une nappe présente dans le sous-sol de la zone protégée.

Sous la digue le niveau de cette nappe pourra donc fluctuer en fonction des variations de niveaux côté masse d'eau et côté zone protégée. Ce niveau, comme ses fluctuations, sont bien entendu fonction de la perméabilité de la fondation. De manière concomitante à cette variation du niveau de la nappe dans la fondation, des écoulements vont se produire sous la digue avec des débits et des vitesses variables (variation saisonnière, marée, crue...). Ces écoulements, à terme, sont susceptibles d'engendrer des problèmes, liés par exemple à des mécanismes d'érosion interne. En maritime, c'est surtout la sollicitation extérieure qui varie. La stabilité de l'ouvrage est surtout menacée à marée basse au creux de la vague (si l'estran est plus bas que cette cote de nappe).

En termes de fréquence de fluctuation, les variations de nappe sous une digue ont une fréquence généralement beaucoup plus élevée que les variations de charge externe sur la digue. Il n'est donc pas impossible que, suivant les configurations, les désordres liés à ces fluctuations soient plus importants en termes de risque que celles liées aux variations de la masse d'eau contre laquelle on veut se protéger.

En milieu de mer à marée, la fréquence de fluctuation des niveaux sous la digue sera de deux cycles par jour en général. En milieu fluvial, cette fréquence pourra dépendre du régime hydrologique du cours d'eau (variations globales saisonnières ou localisées dans le temps lors des crues) et des conditions aux limites dans la zone protégée, elles-mêmes soumises à de nombreux facteurs (pompages, irrigation, drainage, régime hydrologique des affluents, ...), et pouvant donner lieu à des variations plus fréquentes et parfois décalées avec celles du cours d'eau. Certaines digues fluviales sont implantées entre le fleuve et une plaine agricole où se pratiquent des cultures se caractérisant par de fortes variations imposées de la nappe. De forts écoulements souterrains, de direction alternée, se produisent donc dans ces endroits. Des reconnaissances géotechniques en fondation dans ce type de milieu ont pu localement mettre en évidence la présence de couches sableuses lâches, possible conséquence de phénomènes de suffusion.

En zone calcaire les écoulements souterrains peuvent également être à l'origine de la présence karsts sous les digues.

4.1.2. **Influence de la géomorphologie**

Une digue de protection contre les inondations fluviales ou les submersions marines est implantée dans un environnement qui évolue plus ou moins.

L'approche géomorphologique vise à fournir au concepteur de l'ouvrage les informations nécessaires pour définir les évolutions prévisibles de l'environnement de l'ouvrage.

Le processus d'étude doit être itératif. En effet, l'évolution morphologique de l'environnement de l'ouvrage peut conduire à des pathologies de l'ouvrage, voire à sa rupture. Réciproquement, la présence de l'ouvrage peut avoir une influence plus ou moins marquée sur l'environnement de l'ouvrage et qui s'en trouve ainsi modifié.

Par ailleurs, les évolutions morphologiques peuvent aussi avoir un impact en termes de modification des sollicitations hydrauliques, de la même manière que la création ou la modification d'un système de digues peut avoir des conséquences en termes de morphodynamique ou de modification des sollicitations hydrauliques. Ici Les évolutions morphodynamiques s'étudient à différentes échelles de temps : courte, pendant les événements crue ou tempête, moyenne et longue pour des actions non exceptionnelles, à la durée d'un cycle de maintenance/diagnostic (10 ans par exemple pour respecter la réglementation française actuelle) ou de la durée de vie prévisible de l'ouvrage (100 ans en toute vraisemblance).

4.1.2.1. *Géomorphologie fluviale*

En préambule, il convient de rappeler que la logique de la morphologie fluviale est liée à la logique des écoulements liquides, à la logique du transport solide et à l'influence de la végétation. Seule une approche globale peut éviter des échecs. Toute intervention doit être précédée d'une phase de diagnostic du comportement de la rivière sur un tronçon bien plus long que celui sur lequel on compte intervenir.

Le guide traitant de l'hydraulique et de la morphologie fluviale [Degoutte, 2012a] constitue un ouvrage de référence dans ce domaine.

A – Transport solide

Pour définir les sollicitations géomorphologiques, il faut s'intéresser au transport solide du cours d'eau et de ses affluents. Deux modes caractérisent le transport solide :

- le charriage (mouvement de roulement ou de saltation près du fond) concerne plus particulièrement les sables, les graviers, les galets et les blocs ;
- la suspension, concernant plus particulièrement les sables et les limons, est due à la turbulence s'opposant à la chute du sédiment.

En règle générale, la pente d'un cours d'eau décroît de l'amont vers l'aval plus ou moins régulièrement. Les dépôts les plus grossiers se situent alors dans le cours amont, alors que les plus fins continuent leur transit vers l'aval. Ainsi, l'étendue granulométrique est large dans les parties amont et se resserre à l'aval. Les affluents dont les pentes sont plus fortes peuvent apporter à nouveau des matériaux plus grossiers.

Dans les rivières à pente forte ou moyenne, certains gros grains peuvent avoir un rôle structurant en organisant une armature de surface, appelée pavage, que seule une forte crue pourra détruire. Dans les rivières pavées, le transport solide peut être très inférieur de ce qu'il aurait été sans cette protection. Si le pavage est emporté à l'occasion d'une forte crue, le substratum peut être découvert et le transport solide peut s'en trouver grandement modifié en fonction à la résistance à l'érosion du substratum.

Il n'y a pas de formule universelle de transport solide. Toutes les formules de transport solide doivent être utilisées avec prudence car elles ont été établies à partir de mesures dans des conditions particulières notamment en terme de topographie, granulométrie et d'hydraulique.

Dans les torrents (pente supérieure à 6%), le charriage a un rôle prédominant et influe fortement sur l'écoulement liquide. La hauteur d'écoulement est significativement supérieure à ce qu'elle serait en présence d'eau seule. La hauteur d'écoulement est encore plus importante lorsqu'il s'agit de laves torrentielles. Ce type de sollicitation très spécifique n'est pas ici abordé.

B – Morphologie des cours d'eau

Dans une rivière, l'écoulement n'est jamais uniforme en raison des variations géométriques (largeur, pente) et de la présence de singularités naturelles ou artificielles (méandres, obstacles, ouvrages, végétation, ...). Les zones de fortes vitesses sont les zones privilégiées d'érosion, a contrario les zones de faibles vitesses sont propices aux dépôts.

Le lit des cours d'eau est façonné par le transport solide et le transport liquide. Au-delà d'un certain débit, le lit va évoluer : ce sont les crues morphogènes. L'évolution du lit peut concerner la largeur, la profondeur et la pente. Ces évolutions dues à la discontinuité des apports (solide et liquide) sont appelées « respiration » mais le lit maintient en général sur le long terme un équilibre entre la pente, la granulométrie des matériaux du fond et le régime hydraulique.

Un tronçon de rivière considéré est à l'équilibre si le taux d'érosion est égal au taux de dépôts. Cet équilibre général n'est en rien contradictoire avec des processus localisés alternant des zones d'érosion et des zones de dépôt, notamment dans les coudes.

Les affluents les plus importants peuvent modifier les apports solides et liquides. Le cours d'eau s'adapte en modifiant sa pente.

L'érosion, si le lit s'approfondit, et l'exhaussement, dans le cas contraire peuvent être régressifs, s'ils se développent de l'aval vers l'amont, ou progressifs, de l'amont vers l'aval.

Malgré leur ressemblance, ils résultent de causes différentes. L'érosion régressive est la conséquence d'un abaissement du fond alors que l'érosion progressive est due à un déficit en matériaux transportés par charriage.

Les processus d'évolution concernent aussi le tracé en plan de la rivière. Le plus souvent, la forme du lit évolue de l'amont vers l'aval d'un cours d'eau :

- tracé rectiligne et vallée étroite, à l'amont,
- puis tracé en tresses large et plat, composés de plusieurs chenaux séparés par des bancs,
- suivi d'un style divagant, le nombre de tresses diminue et un tracé principal sinueux s'organise,
- et lit unique à méandres nettement calibré, à l'aval.

Dans le cas des rivières à méandres, des évolutions de tracé conduisent à un déplacement des méandres (reptation, déplacement latérale, coupure). Dans le cas des rivières en tresses, les évolutions concernent les bras (déplacement, création et comblement).

C – Sollicitations du cours d'eau sur la digue

Les évolutions géomorphologiques peuvent avoir un impact sur la sécurité des digues d'autant plus que celles-ci sont proches du lit mineur. La présence ou l'absence d'un espace entre le lit mineur et l'ouvrage ainsi que la plus ou moins forte mobilité naturelle du lit conditionnent la nécessité d'une étude morphologique plus ou moins approfondie.

Divers processus sont susceptibles d'être rencontrés :

- érosion des berges par le courant pouvant déstabiliser la digue ;
- évolution du tracé du cours d'eau qui peut augmenter la vitesse d'écoulement au droit de la digue et donc provoquer une érosion du talus ou saper le pied de la digue;
- réactivation d'un ancien bras sur lequel ou à proximité duquel la digue est implantée ;
- évolution du profil en long par enfoncement localisé ou généralisé modifiant les conditions de surverse ;
- évolution du profil en long par exhaussement localisé ou généralisé modifiant les conditions de surverse ;
- formation d'embâcles qui peuvent être, d'une part, des agresseurs pour les berges voire les digues, et, d'autre part, à l'origine de surverses.

L'étude géomorphologique peut comporter plusieurs volets.

Elle peut viser à définir le fuseau de mobilité du cours d'eau et à estimer les vitesses d'évolution dans ce fuseau, très rapides à l'échelle d'une crue, ou lentes. Pour cela peuvent être utilisés :

- des documents cartographiques historiques :
 - o cartes de Cassini,
 - o cadastres napoléoniens ;
 - o campagne de topographie spécifique (ex : Loire 1850, Rhône 1856) ;
- des documents plus récents :
 - o cartes IGN,
 - o plans cadastraux,
 - o cartes géologiques,
 - o photographies aériennes,
 - o profils en long du fil d'eau de la rivière,
 - o levés bathymétriques.

En complément, il est utile de faire une analyse à une échelle plus fine. Sur le terrain le géomorphologue recherchera la présence de pavage, d'anciens chenaux, de zones d'érosions et de dépôts... Une analyse granulométrique des alluvions permet d'apprécier la composante sédimentologique. La profondeur et la nature du substratum des matériaux de recouvrement (y compris les berges) conditionnent la possibilité que les mécanismes d'érosion se développent plutôt en profondeur ou au contraire latéralement.

La végétation joue un rôle généralement positif sur la résistance des berges car elle limite l'érosion et le glissement. Cependant son action peut aussi être inverse : turbulences érosives, basculement d'arbres... La végétation ligneuse est source de dangers pour la digue si elle est implantée dessus ou à proximité de ses pieds [Zanetti et al, 2008]. L'étude de la végétation, utile pour apprécier l'impact de celle-ci sur l'ouvrage et sur la berge environnante, peut être étendue plus en amont pour évaluer le risque d'embâcles : arbres arrachés, présence de pièges potentiels (ponts, seuils, coudes prononcés).

La présence d'îles ou d'atterrissements implique un rétrécissement local, une divergence des lignes de courant et un mouvement hélicoïdal des masses d'eau. Les forces tractrices sur les berges sont donc augmentées.

D – Impact de la digue sur le lit de la rivière

La réalisation d'une digue ou le déplacement d'une digue peuvent modifier l'équilibre morphologique de la rivière en créant une discontinuité du transport des matériaux grossiers. Le rétrécissement du lit peut conduire à l'apparition d'érosions et, a contrario un élargissement peut favoriser des dépôts. Si la perturbation est suffisamment longue, le cours d'eau retrouvera un équilibre en modifiant sa pente et son tracé (méandrage). Les conséquences ne sont pas limitées au tronçon endigué : en général, on constatera une érosion régressive à l'amont de l'endiguement et à un dépôt à l'aval (ré-élargissement). Si l'aménagement est court, une variation locale du fond est à attendre.

En cas d'érosion d'une couche alluviale de faible épaisseur, le substratum peut être découvert. Dans ce cas et si celui-ci est tendre ou peut se déliter, l'érosion peut être considérable. A l'inverse, selon la granulométrie du lit, l'érosion peut être limitée par la formation d'un pavage.

Un nouvel endiguement sur un cours d'eau à l'équilibre aura pour conséquences morphologiques de provoquer :

- l'incision d'un cours d'eau, d'autant plus forte que les digues sont hautes et que l'espace inter digues est réduit (augmentation du tirant d'eau, des vitesses d'écoulement et donc des forces tractrices),
- un dépôt des matériaux transportés en suspension dans l'espace inter-digues, d'autant plus épais que cet espace est réduit et que la phase en suspension et la fréquence des débordements sont importantes.

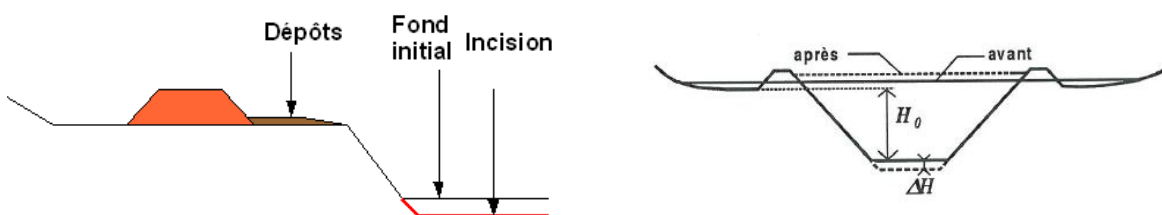


Figure 4.2 – dépôt dans l'espace inter-digues et approfondissement du lit mineur consécutif à l'élévation du niveau d'eau due à la suppression des débordements dans le lit majeur

Selon Ramette (guide d'hydraulique fluviale), les fonds évoluent sensiblement parallèlement aux fonds initiaux. L'approfondissement est de l'ordre de :

$$\Delta H = H_0 \left(\left(\frac{Q}{Q_m} \right)^{2/3} - 1 \right)$$

Avec :

Q : débit du lit endigué,

Q_m : débit du lit mineur avant endiguement ($Q_m < Q$),

H_0 : profondeur du lit mineur avant endiguement

L'approfondissement du lit mineur et l'exhaussement de l'espace inter-digues modifient la capacité du lit endigué. A plus ou moins long terme, la fréquence des débordements dans le lit majeur en arrière des digues est modifiée.

Par ailleurs, l'implantation d'un déversoir sur un endiguement a des effets en termes de transports solides. On se reportera à ce sujet sur le guide « déversoirs sur les digues fluviales de protection contre les inondations fluviales » [Degoutte, 2012b]. En quelques mots, on notera que la présence d'un déversoir entraîne un exhaussement du lit (régressif à l'amont et progressif à l'aval) et un dépôt localisé à son voisinage. Ces effets sont toutefois limités si le déversoir déverse rarement ou des faibles débits.

4.1.2.2. *Géomorphologie maritime*

A – Transport solide

Comme en fluvial, deux modes de transport caractérisent le transport solide : la suspension et le charriage. Les sollicitations hydrauliques qui en sont à l'origine sont les courants et la houle. Un mode de transport spécifique est la projection des matériaux en haut d'estran sous l'effet des vagues, qui si elles sont obliques entraînent un transport longitudinal (parallèle à la plage). Ce mode de transport est caractéristique des plages de galets.

Les courants peuvent résulter des marées, notamment en Mer du Nord, en Manche et en Atlantique pour ce qui concerne la métropole. Leur action est particulièrement marquée dans les estuaires ou les baies comme celle du Mont Saint Michel. Ils mettent et maintiennent en suspension les particules fines principalement les vases, les limons puis les transportent jusque dans les zones abritées où elles se déposent. Les particules les plus fines restent longtemps en suspension avant de se déposer. Ce phénomène est particulièrement marqué dans certains estuaires où les eaux sont très turbides et où il peut se former un bouchon vaseux, constitué de volumes considérables de matière en suspension, qui se déplace au gré des marées et des courants du fleuve.

Les vagues produisent sur les fonds des courants alternés à leur passage ainsi qu'une composante résiduelle suivant leur direction de propagation. Pour simplifier, les courants alternés mettent en suspension les matériaux du fond qui ensuite sont transportés sous l'action des courants résiduels. Les matériaux mis en suspension et transportés peuvent être de granulométrie plus grossière que ceux soulevés par les courants seuls évoqués au paragraphe précédent, notamment dans les zones exposées et de faible profondeur. Des sables grossiers peuvent ainsi être mis en suspension et transportés lors des tempêtes. A proximité du rivage des courants puissants peuvent se former et générer des transports conséquents (transport longitudinal ou cross shore, transport transversal ou long shore).

L'action de la houle et des courants peuvent aussi se compléter. Il en résulte des transports plus importants. Le transport par charriage, sans suspension, est aussi possible sous l'action du courant, de la houle, voire des deux. Dans ce cas, les matériaux roulent ou sautent.

B – Morphologie des fonds marins, des plages et du trait de côte

La morphologie des fonds marins des plages et du trait de côte est évolutive notamment en présence de matériaux mobiles comme la vase, les limons, les sables, les graviers et les galets. Les échelles de temps de ces évolutions sont également très variables : pendant une marée, pendant une tempête, suivant les saisons et à l'échelle interannuelle, voire séculaire. Ces évolutions peuvent être considérables. Nous allons en donner quelques exemples.

Une plage de galet sur le littoral Normando-Picard peut s'exhausser ou baisser de deux mètres le long d'un épi à l'occasion d'une tempête. Lors de la tempête Xynthia on a pu constater que le pied d'une dune avait reculé de 15 mètres environ.

Les plages de sable et de galets n'ont pas la même forme pendant l'été et l'hiver. En été on note un engraissement de la plage et du haut de l'estran. Les tempêtes d'hiver vont démaigrir le haut de plage et le pied de dune et transporter ces matériaux vers le large. A Fécamp la plage de galets s'est déjà abaissée de plus de 3 mètres pendant un hiver.

A l'échelle inter-annuelle et séculaire le trait de côte peut avancer et reculer. A l'Île Tudy, la dune a avancé et reculé plusieurs fois au XX^{ième} siècle. L'amplitude de ces mouvements atteint 100 m. L'altitude des plages peut aussi varier. Sur le site de Wissant la plage de sable a baissé de plus de 5 mètres en 20 ans environ et on a vu son altitude varier de plusieurs mètres plusieurs fois en un siècle.

Enfin la forme des côtes et des estuaires à l'échelle pluriséculaire peut être complètement transformée. Des mouvements de plusieurs kilomètres, voire dizaines de kilomètres en quelques siècles existent.

Les évolutions du littoral et des plages sont très sensibles au transit long shore. Ce dernier peut être important et atteindre plusieurs dizaines de milliers voir centaines de milliers de m³ par an. L'interruption de ce transit par la construction d'ouvrages perpendiculaires à la côte, comme des digues ou jetées portuaires, peut se faire ressentir à plusieurs dizaines de kilomètres en aval voire plus. A une moindre échelle, un épi génère une érosion en l'aval.

C – Sollicitations maritimes sur la digue

Comme pour les digues fluviales, les évolutions morphologiques, comme les sollicitations hydrauliques doivent être prises en compte.

Nous avons évoqué au chapitre précédent des évolutions morphologiques observées. Il faut appréhender les tendances pluriannuelles pour l'implantation de la digue. Si la tendance est au recul du trait de côte, il faudra implanter la digue suffisamment en retrait de ce dernier sauf à devoir considérablement renforcer l'ouvrage, voire risquer sa destruction. Si une avancée du littoral est possible, il peut être judicieux d'attendre avant de réaliser une digue dont l'utilité n'est pas immédiatement acquise, et de mettre en œuvre des travaux provisoires. Il arrive que des travaux conséquents soient réalisés après une tempête alors qu'il ne s'agit que de la vie naturelle de la plage et du littoral. Partout où il sera possible de le faire, on doit éviter d'implanter un ouvrage en haut de plage car celle-ci a une résilience que ne présente pas l'ouvrage.

Les études morphologiques à mener doivent s'appuyer, comme en fluvial, sur tout document historique, cartographique et photographique anciens ou contemporains. En raison de la grande sensibilité du dimensionnement d'une digue maritime aux évolutions des petits fonds, il faut notamment rechercher toutes les bathymétries et les levés d'estran anciens.

D – Impact de la digue sur le littoral et la plage

La construction d'une digue modifie l'équilibre de l'estran et des petits fonds lorsqu'ils sont constitués de matériaux mobiles ou érodables, notamment lorsque le site est exposé à la houle. En effet la digue constitue un obstacle réfléchissant pour la houle, qui de ce fait va croître au pied de l'ouvrage et provoquer des départs de matériaux. Ce processus est itératif, car l'approfondissement produit permet à des houles plus fortes, qui auraient déferlé au paravent lorsque la plage était plus haute, d'atteindre l'ouvrage et donc d'augmenter l'érosion etc... Aucun ouvrage ne sera moins réfléchissant que la plage elle-même ; la baisse du niveau de la plage suite à la construction d'un ouvrage en haut de plage ne peut donc être évitée. En Méditerranée, de nombreux ouvrages ont provoqué la disparition de la plage. Sur les mers à marée, des plages se sont tant amaigries qu'elles ne sont plus visibles à marée haute. Pour éviter ces effets négatifs, la meilleure solution est de construire la digue suffisamment en arrière lorsque c'est possible. Des solutions palliatives consistent à essayer de contrôler le niveau de la plage en avant de la digue soit par la réalisation d'ouvrages comme des épis, des brise-lames ou mieux par des rechargements, voire une combinaison des deux.

La digue a aussi un impact en présence d'un transit littoral, notamment lorsque des ouvrages ont été réalisés pour stabiliser la plage en avant de celle-ci. Le transit littoral peut être bloqué ou diminué, ce qui entraîne une érosion en aval des ouvrages et peut provoquer une accumulation en amont (l'amont et l'aval vis à vis du transport littoral).

4.1.3. Sollicitations mécaniques

Au-delà des phénomènes hydrauliques et géomorphologiques précédemment décrits, les digues peuvent être soumises à des sollicitations mécaniques liées à des facteurs extérieurs spécifiques à chaque ouvrage ; elles peuvent être permanentes ou accidentelles, naturelles ou anthropiques. A ce titre, les ouvrages à vocation multiples comme les routes ou voies ferrées en remblai qui assurent également un rôle de digue³¹ doivent être conçus en prenant en compte les contraintes mécaniques induites par le trafic qu'ils supportent, en particulier les aspects de surcharge pondérale et les vibrations induites par la vitesse de passage des engins (camion, train...) sont des éléments importants pour la stabilité des remblais et la pérennité des organes d'étanchéité.

Pour l'ensemble des ouvrages, les sollicitations dues au passage d'engins en crête ou sur les risbermes pour assurer l'entretien de la digue doivent être prises en compte au niveau de la conception ou des travaux de confortement aussi bien en ce qui concerne la stabilité structurale, les dimensions minimales à respecter (largeurs de crête et risberme, rampes d'accès...) et la nature des couches de surface qui devront assurer un déplacement d'engins par tout temps.

Certaines digues sont également soumises à des risques potentiels de chocs (véhicule, bateau, chute de blocs...) avec des impacts sur l'intégrité de l'ouvrage ou plus généralement sur le masque d'étanchéité qui devra dans ce cas être doté d'une résistance mécanique adéquate. Le vandalisme constitue également un élément à prendre en compte dans la conception d'un ouvrage. Par exemple, pour les dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG), une protection mécanique de la géomembrane devra être prévue dans tous les espaces ouverts au public. Par ailleurs, certains ouvrages subissent le passage et/ou le piétinement du bétail.

³¹ C'est-à-dire qui peuvent se mettre en charge, au moins partiellement.

4.2. Conception générale

4.2.1. Étude géologique et géotechnique

4.2.1.1 Principe et objectifs

L'objectif de ces études est d'apporter au concepteur une connaissance la plus exhaustive possible des contextes géologique, hydrogéologique et géotechnique du secteur d'études, nécessaire à la maîtrise des aléas associés, pouvant entraîner des risques pour la réalisation d'un ouvrage neuf ou le confortement d'un ouvrage existant. La gestion des risques liés au sous-sol est en effet indispensable pour orienter les choix de conception, fiabiliser le délai de réalisation, le coût final et la qualité de l'ouvrage.

L'étude géologique débouchera sur une connaissance approfondie de la nature lithologique du terrain. Elle permettra notamment de distinguer les terrains de couverture, avec présence éventuelle de niveaux compressibles, du substratum rocheux sous-jacent qui peut se trouver à une profondeur trop importante pour être directement « sollicité ». Il est à noter également l'importance de mettre en évidence les hétérogénéités et/ou accidents géologiques du site. L'étude géotechnique permettra d'estimer l'état et le comportement mécanique des terrains de fondation et/ou des matériaux constitutifs d'ouvrages existant (pour les ouvrages en remblais), afin de définir les conditions de construction ou de confortement d'un ouvrage. Les différentes missions types de l'ingénierie géotechnique qui doivent être effectuées sont décrites dans la norme NF P 94-500.

4.2.1.2 Phasage des études

a) Cas des ouvrages neufs

Pour la conception d'un ouvrage neuf, les études géologiques et géotechniques concernent les terrains de fondation, désignés « fondation ». Elles s'intéressent également, pour les ouvrages en terre, à la recherche de matériaux utilisables en remblai. Ce dernier point est traité au 4.2.2. (Conception du corps de digue).

L'objectif de ces études est de fournir les informations nécessaires pour juger de la qualité de fondation (sa capacité portante, son étanchéité et les risques de tassements différentiels et d'érosion). Compte tenu de la spécificité des problèmes géologiques et géotechniques, il n'existe pas de programme type de reconnaissances pour une étude de fondation. En effet, la grande variété des fondations rencontrées, qui fait de chacune d'elles un objet unique, ne permet pas de définir a priori le nombre et la nature des reconnaissances nécessaires. Il est toutefois possible de donner les grandes phases d'une étude de fondation, correspondant à des niveaux d'étude de plus en plus précis.

L'étude des terrains de fondations se déroule au minimum lors des phases d'études préliminaires et d'études d'avant-projet. Elle peut être complétée lors de la phase d'études projet avec des reconnaissances complémentaires pouvant s'avérer nécessaire dans certains cas complexes, voire lors des études d'exécution en phase préparatoire de travaux. Les différents niveaux d'étude et leur enchaînement sont décrits dans la norme NF P 94-500 relatives aux missions d'ingénierie géotechnique.

L'étude géotechnique préalable (étude G1 au sens de la norme NF P 94-500) a pour objet d'apprécier la difficulté du projet sur les bases de données géologiques sommaires, de fournir des éléments de choix de l'emplacement de la digue et d'effectuer un premier recensement des gisements de matériaux disponibles pour sa construction. Il s'agit d'une phase essentiellement basée sur la recherche et l'exploitation de données d'archives et d'informations bibliographiques, constituant un préalable indispensable à toute étude

géologique. Cette recherche doit aller du général (études régionales, cartes géologiques au 1/50000^{ième} ...) au particulier (études locales dans la zone du projet). Sur la base de ces données et d'un relevé topographique (échelle et précision fonction du projet), un examen géologique du site doit être réalisé, en insistant particulièrement sur les terrains de couverture souvent absents ou moins bien représentés sur les cartes générales.

L'étude géotechnique de conception phase avant-projet (étude G2 phase AVP au sens de la norme NF P 94-500) a pour objectif de fournir les éléments nécessaires à l'établissement d'un avant-projet suffisamment complet. Cette étude suppose que l'emplacement de la digue ait été défini. Elle doit permettre de connaître :

- la géométrie des couches de fondation de la digue,
- les caractéristiques d'identification de ces couches,
- des informations sur leurs caractéristiques mécaniques, afin d'étudier la stabilité de l'ouvrage et le cas échéant d'apprécier l'amplitude des tassements prévisibles,
- les niveaux piézométriques et leurs fluctuations.

Ces renseignements sont obtenus à partir de reconnaissances géophysiques et/ou mécaniques (sondages), dont la nature et l'ampleur sont à adapter aux conditions du site et du projet. Ces reconnaissances iront généralement du plus simple (et par conséquent peu onéreux) au plus complexe en fonction des besoins d'approfondissement de la connaissance des fondations. Les reconnaissances doivent être choisies en fonction du contexte géologique et les méthodes adaptées à ce contexte.

L'étude géotechnique de conception phase projet (étude G2 phase PRO au sens de la norme NF P 94-500) a pour objectif de fournir toutes les données nécessaires pour l'établissement du projet définitif. Elle permet d'effectuer une étude détaillée de zones particulièrement complexes, nécessitant la réalisation de reconnaissances complémentaires (par exemple, zones d'hétérogénéités et/ou accidents géologiques). Il peut s'agir également de préciser les perméabilités des terrains, ou de déterminer de façon plus complète les caractéristiques mécaniques de la fondation.

Enfin, lors des travaux, l'étude d'exécution (étude G3 au sens de la norme NF P 94-500) permet de donner le dimensionnement précis des ouvrages, leur méthode d'exécution, leurs phasages. Ce type d'étude est décrit au 4.5.2. (Exécution des travaux).

b) Cas des ouvrages existants

Pour les ouvrages existants, le phasage des études géologiques et géotechniques, nécessaires pour établir un projet de confortement, est le même que celui décrit précédemment.

Dans le cadre de l'étude préliminaire, une recherche d'archives la plus exhaustive possible est indispensable, afin d'identifier à travers les documents disponibles les informations utiles à la compréhension de la nature constitutive de la digue et de sa fondation. Idéalement, les documents de projet et plans de récolement permettent d'avoir une connaissance exhaustive de l'ouvrage et des terrains sous-jacents. Si ces documents sont disponibles, les phases suivantes d'études géotechniques peuvent être allégées. Cependant, dans la plupart des cas (digues anciennes), très peu de documents d'archives sont disponibles, ce qui implique une connaissance initiale très limitée de la digue et sa fondation. Dans ce cas, un diagnostic géotechnique de l'ouvrage est nécessaire (mission de type G5 au sens de la norme NF P 94-500), préalablement à la réalisation des études d'avant-projet et de projet de confortement. Ce diagnostic est basé, après enquête documentaire, sur des reconnaissances géotechniques de l'ouvrage et de sa fondation.

Les phases ultérieures d'étude (avant-projet, projet, en phase d'exécution) ont les mêmes objectifs que ceux décrits ci-dessus, la digue existante étant étudiée comme un horizon

supplémentaire à caractériser (géométries internes, caractéristiques d'identification de différentes couches, caractéristiques mécaniques, niveaux piézométriques).

4.2.1.3 Méthodes de reconnaissances géotechniques

Les différentes méthodes de reconnaissances mobilisables pour une étude géologique et géotechnique sont décrites ci-dessous. Les points de reconnaissances devront être relevés précisément en altimétrie et planimétrie.

- **Géophysique** : les reconnaissances géophysiques sont généralement les premières reconnaissances mises en œuvre. Ces reconnaissances non-destructives permettent d'aboutir à un zonage du terrain reconnu, à une première répartition des différents matériaux et à une évaluation de leurs propriétés (dont notamment la nature et l'état de saturation). Les résultats des reconnaissances géophysiques permettent ainsi d'établir un premier modèle géologique du site, ou d'affiner le modèle géologique sommaire établi lors de la première phase, ainsi que d'implanter les sondages de reconnaissance mécaniques. Quand la couverture sur le substratum est trop épaisse, ces reconnaissances complètent les sondages mécaniques. Sans être exhaustif, on peut citer, lorsqu'on veut différencier entre elles des formations meubles, les méthodes électriques et sismiques (surtout quand les contrastes de vitesse entre les formations sont bien marquées). Le radar géologique peut également être utilisé pour détecter des singularités (présence de vides notamment), mais sa profondeur d'investigation est fortement réduite dans les sols conducteurs (présence d'argiles ou de limons). **Pour la reconnaissance d'ouvrages existants**, dans le cas de digues à grand linéaire, où les fondations sur terrains alluviaux sont le plus souvent meubles, avec présence d'une nappe, on utilise dans un premier temps des méthodes à grand rendement pour établir un premier zonage du linéaire, utile à l'identification de tronçons homogènes. L'électromagnétisme basse fréquence (type Slingram) est une méthode fréquemment utilisée, mais présente pour principale limite une forte sensibilité à la présence, à proximité de la zone prospectée, d'interférences conductrices (lignes à haute tension, véhicules, barrière métallique, clôtures...), empêchant leur utilisation en milieu urbain. Le radar géologique peut également être mis en œuvre sur des ouvrages en terre à faible proportion de matériaux conducteurs (argiles notamment), principalement pour la détection d'interfaces dans le corps de digue et la fondation, ou la reconnaissance d'ouvrages traversants. Des méthodes plus ponctuelles peuvent être utilisées dans un second temps, comme par exemple les panneaux électriques, pour affiner la connaissance au droit d'une zone d'anomalie identifiée par les méthodes à grand rendement.
- **Sondages géotechniques**
 - 1- *Sondages à la pelle mécanique* : on procède généralement par tranchées ponctuelles mais, dans certains cas, il peut être préférable de réaliser des tranchées continues d'orientation judicieusement choisie (par exemple selon un profil en travers de la digue). Profondes de 4 à 5 m au maximum et si possible assez larges (80cm à 1m), elles permettent d'obtenir des coupes assez précises des couches formant la fondation et de faire des prélèvements représentatifs des différents horizons. Le niveau éventuel d'apparition d'eau doit être noté et, dans la mesure du possible (conditions de sécurité), il est souhaitable de les laisser ouvertes pendant quelques heures pour observer l'évolution des venues d'eau et la stabilisation de la nappe si elle existe. Ces sondages seront rebouchés avec le plus grand soin.

- 2- *Forages* : ils constituent un complément aux reconnaissances précitées s'il s'avère nécessaire de mieux caractériser les formations plus profondes. Les forages et/ou sondages destructifs permettent de qualifier les différents horizons (nature, profondeur notamment sur la base d'une diagraphie – enregistrement des paramètres de forage-) et de réaliser des essais de perméabilité en place (Lugeon ou Lefranc selon nature des matériaux). Si nécessaire des sondages carottés permettent en complément de recueillir des échantillons intacts pour caractérisation géotechnique (propriétés géomécaniques). Des sondages à la tarière peuvent également être mis en œuvre pour recueillir des échantillons remaniés des différents horizons recoupés, afin d'effectuer des essais d'identification des sols (analyses granulométriques, teneur en eau, limites d'Atterberg, VBS...). Des essais pressiométriques peuvent être effectués dans les forages destructifs, afin notamment de disposer des caractéristiques mécaniques utiles à l'évaluation des tassements engendrés par la surcharge apportée par la digue.

3- *Pénétromètre (qui n'est pas un appareil de sondage proprement dit)*: L'utilisation du pénétromètre ne constitue pas uniquement un moyen de définir des valeurs mécaniques caractéristiques comme indiqué au § 4.2.1.3 mais cela constitue souvent un complément intéressant et moins coûteux que les forages pour interpréter, extrapoler et faire un lien entre les résultats des sondages proprement dits et la géophysique. Selon les conditions de site pourront être utilisés des pénétromètres dynamiques ou statiques (Cone Penetration Test -CPT) qui donnent également des informations très riches.

4- *Perméafor.*[Ursat et al, 1992] : C'est un matériel d'essai en place qui permet de réaliser des essais simplifiés de type Lefranc et d'obtenir ainsi une « diagraphie verticale de perméabilité » ; il est particulièrement destiné aux sols alluvionnaires de perméabilité comprise entre 10^{-6} et 10^{-3} m/s.

En cas de réalisation de sondages, le rebouchage du trou (si celui-ci n'est pas réutilisé pour l'implantation d'un piézomètre) devra être effectué par défaut à l'aide d'un coulis de bentonite-ciment pour garantir l'étanchéité entre couches de la digue.

4.2.1.4 Analyses géotechniques de laboratoire

Les travaux de reconnaissance sont complétés par une analyse géotechnique des formations rencontrées en fondation ; l'objectif est de définir les caractéristiques mécaniques et hydrauliques des différents horizons de la fondation. Les essais géotechniques peuvent être réalisés in-situ (voir § précédent) et/ou en laboratoire, les deux étant complémentaires notamment sur les grands linéaires.

Les essais en laboratoire sont, d'une part, les essais d'identification des sols (teneurs en eau, granulométrie, limites d'Atterberg...) et, d'autre part, des essais mécaniques et hydrauliques à réaliser dans la mesure du possible sur des échantillons intacts ; il s'agit principalement de mesure de la perméabilité et de la résistance mécanique (paramètres C et ϕ , définis ci-après au 4.2.2.1); des essais oedométriques peuvent également apporter des renseignements importants sur les tassements de la fondation consécutifs à la réalisation du remblai.

Le nombre et la nature des essais seront adaptés au contexte du site, en particulier pour les ouvrages en remblai de faible hauteur (< 2 mètres) les caractéristiques mécaniques pourront être définies en référence à des valeurs usuelles en fonction de la nature du sol.

4.2.1.5 Résultat attendu de l'étude de la fondation

L'étude géologique et géotechnique de la fondation doit permettre de définir la stratigraphie des formations en place et de qualifier les caractéristiques mécaniques et hydrauliques des matériaux des couches présentes.

On attachera une attention particulière à quelques points clés pour la stabilité et l'étanchéité de la fondation :

- Les écoulements, le cheminement et la maîtrise des eaux dans la fondation par rapport à la structure géologique d'ensemble (seront pris en compte les écoulements naturels existants et ceux dus à la montée des eaux que l'ouvrage devra "endiguer"). Une mauvaise maîtrise des phénomènes hydrauliques en fondation peut être à l'origine d'importants désordres.
- L'existence de terrains compressibles ou déformables sous l'emprise de l'ouvrage qui peut conduire soit à leur décapage, soit à mettre en œuvre des dispositions constructives permettant leur maintien en place.
- Pour des reprises sur des ouvrages anciens, notamment en l'absence de plans de recollement antérieurs, les ouvrages existants seront recalés au contexte géologique du site.
- Analyse de l'érodabilité des matériaux de fondation pour laquelle on pourra s'appuyer sur le volume 1 du guide ERINOH : laboratory tests [Bonelli, 2013].

L'étude de la fondation constitue un élément essentiel pour le choix de la structure de la digue projetée et inversement l'étude géologique devra être conduite en fonction des contraintes qui seront imposées par l'ouvrage en projet.

4.2.2 Conception du corps de digue

En préalable à la conception géotechnique de la digue, il convient en premier lieu de définir l'implantation (contraintes d'emprise, de propriété...) et les caractéristiques hydrauliques du projet (niveau de la crête, position et cote des déversoirs...); ces points ne sont pas ici abordés.

Pour des raisons économiques et techniques (fondation généralement constituée de terrains meubles) le corps de digue est généralement constitué en remblai. L'étanchéité peut être assurée par le remblai lui-même ou par un masque étanche ou écran interne. Ce qui suit concerne donc principalement les ouvrages en remblai avec un volet spécifique concernant l'étanchéité de l'ouvrage.

Les matériaux constituant le remblai peuvent être prélevés sur le site (solution généralement la plus économique) ou provenir d'une carrière proche. Dans le second cas les caractéristiques des matériaux sont généralement bien connus et homogènes par contre lorsque les matériaux du remblai sont prélevés dans des zones d'emprunts sur le site ou à proximité, il est nécessaire de réaliser une reconnaissance des zones de prélèvement envisagées complétées par des analyses géotechniques des matériaux.

4.2.2.1. Reconnaissance et étude géotechnique

Les premières phases de la démarche générale de reconnaissance décrite précédemment pour la fondation s'appliquent également à la recherche de matériaux de remblai. Les tranchées à la pelle mécanique constituent en général la majeure partie des travaux de reconnaissance sur le terrain et permettent, outre la définition des horizons stratigraphiques

de la zone prospectée, de prélever des matériaux des formations susceptibles de pouvoir être utilisée en remblai en vue d'une caractérisation par des essais géotechniques. Pour les remblais en matériaux fins, à minima seront réalisés les **essais d'identification et de compactage** suivants :

- **Teneur en eau des matériaux**

La mesure de la teneur en eau d'un sol est un essai simple et peu coûteux qui est particulièrement intéressant pour la caractérisation et la différenciation des matériaux sur un même site. Pour les sols fins, lorsque les teneurs en eau pondérales sont inférieures à 10 ou supérieures à 40, les matériaux ont des caractéristiques très médiocres et il convient a priori de les éviter comme emprunts.

- **Analyse granulométrique**

Les matériaux qui contiennent plus de 30% d'éléments inférieurs à 80 μ sont probablement étanches ; avec moins de 15%, ils ne le sont probablement pas. Avant d'envisager une étanchéité artificielle du remblai, il convient de bien vérifier qu'on ne dispose pas de matériaux susceptibles de constituer un noyau étanche. La granulométrie permet également de vérifier les règles de filtres et/ou de dimensionner des filtres.

- **Limites d'Atterberg**

Les matériaux fins dont l'indice de plasticité est supérieur à 35 posent non seulement des problèmes de stabilité mais également de tassement, de gonflement et de mise en œuvre.

- **Proctor Normal**

Par rapport à la teneur en eau optimale, la teneur en eau de mise en place des matériaux ne doit pas s'en écarter de plus de 2 ou 3 points (côté sec et côté humide) et même quelquefois moins. Le compactage devra permettre d'atteindre, pour les sols fins, une densité en place supérieure à 95% de la densité à l'OPN. A ce titre, cet essai est essentiel pour pouvoir définir les modalités de compactage (type de compacteur, épaisseur des couches et nombre de passes) lors de la réalisation de la planche d'essai sur site.

Hormis pour les ouvrages de hauteur modeste, pour lesquelles on pourra définir des pentes de parements de manière "forfaitaire", il conviendra de définir les **caractéristiques mécaniques et hydrauliques** (mesure de la perméabilité) des matériaux du remblai.

Les essais mécaniques permettront de définir la cohésion (C en kPa) et l'angle de frottement (ϕ en degré) ; la plus grande attention devra être portée à ces essais mécaniques dont la nature et par conséquent les résultats, peuvent être très différents. Ainsi on distingue 2 principaux types d'essais triaxiaux :

- **Essais triaxiaux non consolidés non drainés** (cohésion c_{uu} et frottement interne ϕ_{uu}) qui caractérisent la résistance à court terme d'un sol fin. Ces valeurs seront utilisées pour les calculs de stabilité à court terme (fin de construction) pour la fondation (essais sur échantillons intacts) et le remblai (cas d'un sol fin). En fondation, si la couche meuble la plus médiocre (en général saturée ou presque et donc $\phi_{uu} = 0$ ou très faible) a une valeur de cohésion non drainée c_{uu} de 20, 40, 60 kPa on peut respectivement construire une digue de hauteur 5, 10, 15 mètres sans avoir à élargir sensiblement sa base.

- **Essais triaxiaux consolidés** ; ces essais permettent d'obtenir les caractéristiques granulaires du matériau : cohésion c' et frottement interne ϕ' qui permettront de calculer la stabilité au cours de la vie de l'ouvrage pour différentes hypothèses de pression d'eau en fondation et dans le remblai.

La perméabilité du matériau de remblai peut souvent être appréhendée par son analyse granulométrique mais dans un certain nombre de cas un essai spécifique au perméamètre devra être réalisé pour définir ce paramètre essentiel pour le concepteur.

- **Essais d'érodabilité** : Le guide ERINOH [Bonelli, 2013] constitue une synthèse récente et complète des essais d'érodabilité sur laquelle on pourra s'appuyer.

4.2.2.2. Type de remblai et stabilité

On peut distinguer trois principaux types d'ouvrages parmi les ouvrages neufs selon la nature de l'étanchéité du remblai :

- Remblai homogène

Si l'on dispose de sols fins de qualité satisfaisante et en quantité suffisante (1,5 à 2 fois le volume du remblai), la solution digue en terre homogène ou pseudo-zonée s'impose comme la plus économique. La digue pseudo-zonée est une variante du remblai homogène qui consiste à répartir les matériaux dans le corps du remblai en fonction de leur granularité ou de leur humidité, mais sans que des filtres de séparation ne soient nécessaires.

- Remblai zoné

Si l'on dispose de matériaux fins en quantité limitée et de suffisamment de matériaux grossiers exploitables, on peut envisager la construction d'une digue en terre zonée avec noyau ou massif côté eau assurant étanchéité et recharges stabilisatrices en matériaux grossiers.

- Remblai avec étanchéité "artificielle"

Si l'on ne dispose pas de matériaux fins susceptibles d'assurer l'étanchéité de la digue, ou bien si l'exploitation d'une zone d'emprunt très hétérogène constituée de matériaux fins à grossiers est trop complexe, on peut recourir à une étanchéité artificielle qui pourra être interne au remblai (paroi moulée par exemple) ou sur le parement côté eau (masque « amont »).

L'adaptation du remblai à la fondation devra prendre en compte les éléments suivants :

- Le remblai sera construit après décapage de la terre végétale (au moins 0,4 à 0,5 m en général). La nature des matériaux à l'interface remblai-fondation peut nécessiter la mise en place d'un filtre. Pour les digues littorales lorsqu'elles sont en contact direct avec la mer, leur fondation doit descendre sous le niveau bas de l'estran en avant de l'ouvrage, en prenant en compte les variations de cote qu'il est susceptible de connaître.

- La continuité de l'étanchéité avec la fondation sera assurée dans les conditions définies au paragraphe suivant.

En ce qui concerne la géométrie des digues en remblai de hauteur modérée (environ 2 mètres) qui constituent la majeure partie du linéaire de digues françaises, on peut recommander le respect de deux règles simples :

- Le fruit minimal pour les talus est de 3H/2V pour la stabilité intrinsèque du remblai mais la pente sera néanmoins la plus faible possible en travaux maritimes pour limiter le coefficient de réflexion ; les pentes plus raides ne peuvent se concevoir que dans des situations spécifiques et justifiées.
- La largeur en crête doit permettre dans le cas général la circulation d'un engin pour l'entretien de l'ouvrage et ne devra pas être inférieure à 4 m en général ; un strict minimum de 3 m peut être toléré pour les digues de faible hauteur dans la mesure où cela reste compatible avec l'entretien de l'ouvrage.

Hormis pour les ouvrages de très faible hauteur (inférieure à 2 m) pour lesquels les pentes pourront être définies de façon "forfaitaire" (nous arrivons pour ces ouvrages à la limite de représentativité des méthodes d'approches classiques), l'analyse de la stabilité du remblai sera réalisée conformément aux recommandations pour la stabilité des barrages et des digues en remblai [CFBR, 2010] résumées au §4.3 ci-après.

4.2.2.3. Dispositif d'étanchéité

L'étanchéité de la digue est réalisée par l'un des éléments suivants :

- Corps du remblai (dans son ensemble pour les remblais homogènes, ou noyau pour les remblais zonés)
- Dispositif interne (paroi moulée, géomembrane, palplanches...)
- Dispositif côté eau (rigide ou souple) qui peut être fin (masque) ou épais (recharge)

Il n'y a pas de valeur cible minimale pour l'étanchéité d'une digue ; l'important est de s'assurer de la stabilité de la digue vis à vis des différents mécanismes en lien avec les écoulements internes.

A - Continuité de l'étanchéité avec la fondation

Si l'étanchéité de la fondation est requise, elle sera assurée en fonction de la nature et de l'épaisseur des couches qui la constituent selon que l'on se trouve dans l'un des trois cas suivants :

- Cas d'une fondation constituée de matériaux peu perméables
- Cas d'une fondation où la présence de couches perméables n'a été mise en évidence que jusqu'à une profondeur de quelques mètres
- Cas d'une fondation perméable jusqu'à une profondeur importante

De manière générale, cette continuité peut être assurée tel que précisé dans le tableau 4.1.

Remblai	Homogène étanche	Zoné à noyau étanche	Perméable avec étanchéité mince (interne ou côté eau)
Fondation			
Imperméable	"clé d'étanchéité" peu profonde	Léger ancrage du noyau dans la fondation	Raccordement de l'étanchéité sur faible profondeur
Perméable sur faible profondeur	"clé d'étanchéité" prolongée jusqu'à l'horizon imperméable	Noyau étanche ancré dans l'horizon imperméable	Etanchéité poursuivie jusqu'à l'horizon imperméable
Perméable sur profondeur importante	Dispositif spécifique : palplanches, paroi moulée...	Dispositif spécifique : palplanches, paroi moulée...	Prolongation étanchéité de la digue ou dispositif spécifique à raccorder

Tableau 4.1 – Adaptation du remblai à la fondation (si étanchéité souhaitée en fondation, cas le moins fréquent)

A noter que la coupure étanche en fondation n'est pas systématique, soit à cause de l'épaisseur trop importante des horizons superficiels perméables qui rend cette continuité de l'étanchéité économiquement impossible, soit par la nécessité de ne pas "couper" des circulations d'eau souterraine (cas de nappes fluviales par exemple). Dans ce cas où il n'existe pas de coupure étanche en fondation pour un ouvrage existant ou pour les raisons précitées, il convient de vérifier que le gradient hydraulique sous le remblai et que la nature et la perméabilité du matériau ne conduisent pas à des risques d'érosion interne et/ou des débits de transit (fuites) sous l'ouvrage incompatibles avec sa fonction. Une attention particulière sera portée au respect des conditions de filtre aux interfaces entre les différents

matériaux et au sein d'un même matériau (sol auto-filtrant). Il pourra être suffisant de rallonger le trajet de l'eau sans l'interrompre.

B- Remblai non étanche dans sa masse

Lorsque l'étanchéité n'est pas assurée par le corps de la digue lui-même deux types de solutions sont possibles :

- Réalisation d'un remblai zoné dont la partie étanche pourra se situer en partie centrale ou côté eau du remblai ; le calcul de stabilité de l'ouvrage sera réalisé en prenant en considération les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant les différentes zones du remblai ; la zone située côté eau du noyau étanche sera considérée saturée jusqu'à la cote du cours d'eau ou de la mer (hors houle).
- Réalisation d'une étanchéité mince, soit interne, soit sur le parement côté eau :
 - Les étanchéités minces internes peuvent être de différentes natures : Paroi moulée, rideau de palplanches ou plus rarement géomembrane mise en place à l'intérieur du remblai (des exemples existent notamment pour les barrages et certaines digues à l'étranger). La paroi moulée est réalisée une fois le remblai achevé, elle traverse l'ensemble du remblai et, si l'étanchéité est recherchée en fondation, elle recoupe les formations meubles jusqu'au substratum imperméable. La tranchée, large de 0,40 à 0,60 m pour les digues de faible hauteur, est emplie d'un coulis auto-durcissable (bentonite, ciment, eau). Cette technique nécessite que le matériau qui entoure la paroi ne soit pas trop perméable pour éviter de trop fortes pertes de coulis avec les risques correspondants d'éboulement de la paroi ; on pourra être amené à réaliser un pseudo-noyau en matériaux peu grossiers à granulométrie continue pour pouvoir y inclure la paroi moulée. Plus rarement, dans des conditions spécifiques, on pourra mettre en place des parois minces en palplanches, injection de béton ou une géomembrane interne mise en place sur une pente côté eau provisoire du talus avant recharge pour obtenir le profil définitif ;
 - Les masques étanches³² doivent permettre d'une part d'assurer l'étanchéité et d'autre part de résister aux agressions externes, notamment l'érosion mais également les tassements résiduels du remblai, les rayons UV, le vandalisme, les animaux fouisseurs, ...

Les masques côté eau étanches peuvent être classés en deux catégories : i) les masques rigides et ii) les masques souples. Les masques rigides sont les plus fréquemment rencontrés, constitués soit de béton, soit de maçonnerie ou encore d'enrochements liés au béton et reposent sur le parement côté eau du remblai qui doit être suffisamment compacté pour limiter les tassements ultérieurs préjudiciables à la pérennité de l'étanchéité. Les masques en béton sont de fait réalisés sous forme de dalles ferrallées et reliées par des joints de dilatation étanches ce qui permet une certaine souplesse et adaptation à de légers tassements du support ; dans certains cas de remblais semi-perméables, un système de drainage devra être prévu sous le masque étanche. Le dimensionnement de ces masques devra non seulement tenir compte de la fonction étanchéité mais aussi de celle de protection contre l'érosion externe qui est rarement dissociée.

³² On entend par masque l'ensemble étanchéité + protection si nécessaire. Il peut être constitué d'une ou plusieurs couches. Le terme amont est à considérer au sens des écoulements au travers de la digue, c'est-à-dire du côté eau.

Les masques souples sont essentiellement des dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG) dont on pourra trouver les descriptions et recommandations dans le fascicule 10 du Comité Français des géosynthétiques (CFG). La protection contre l'érosion devra également assurer la protection de la géomembrane, les deux fonctions pouvant être assurées ou non par le même matériau ; les protections sont généralement constituées d'enrochement posés sur une couche de transition, de dalles béton ou d'éléments préfabriqués.

4.2.3 Protection contre l'érosion externe des digues en remblai

La conception et le dimensionnement de la protection d'une digue en remblai repose sur trois facteurs :

- La nature et la géométrie de la digue,
- Les sollicitations extérieures,
- Les performances de la protection et la durée de vie attendues de l'ouvrage.

Par ailleurs la protection doit être abordée pour les différentes parties de l'ouvrage dont les sollicitations spécifiques et les fonctions sont différentes, à savoir :

- parement coté fleuve ou mer,
- parement coté zone protégée (ZP),
- crête, risbermes si présentes

4.2.3.1 Les sollicitations extérieures

Les sollicitations à prendre en compte pour la définition du dispositif de protection sont principalement celles dues aux écoulements fluviaux ou marins (y compris les vagues) mais également :

- l'érosion pluviale,
- l'érosion anthropique et animale,
- l'érosion éolienne,
- les chocs (accidents navigation ou circulation, embâcles, ...)

A – Érosion fluviale et maritime

Les principales sollicitations à prendre en compte pour la définition du dispositif de protection contre l'érosion fluviale sont définis au § 4.1.1, on retiendra notamment :

- marnage du fleuve ou de la mer et fréquence de mise en eau de la digue,
- vitesse et orientation du courant,
- transports solides éventuels, morphologie, mobilité,
- vagues dues au vent (fluvial) ou aux états de mer (houle, mer du vent, clapot-maritime), navigation (fluvial),
- surcote et houle (maritime et estuarien).

B - Érosion pluviale

L'érosion pluviale se caractérise par deux mécanismes distincts : i) le détachement du sol sous l'effet de l'impact des gouttes et ii) le transport par ruissellement. Ce deuxième phénomène est généralement celui qui est prépondérant et donc dimensionnant sur la crête et le parement côté ZP ;

Ces deux phénomènes sont influencés par des facteurs liés :

- au climat : intensité et fréquence de la pluie, vent, hauteur et durée des pluies,

- aux caractéristiques intrinsèques du sol,
- à la topographie de la zone considérée,
- au couvert végétal.

C – Erosion anthropique et animale

L'érosion anthropique sur les digues se manifeste principalement par le piétinement répété sur certains passages qui ont ainsi tendance à se creuser ; ce phénomène est d'autant plus important que le matériau constitutif de la digue a une faible cohésion, ainsi les passages d'accès aux plages sur les dunes et/ou digues en sable en sont les principaux exemples. L'érosion anthropique comprend également la fréquentation de loisir de type véhicule motorisés (quads, deux roues, 4x4, équitation) ou autre (installations durables liées à la pêche,...)

Les érosions animales se manifestent principalement sous forme de terriers plus ou moins profonds selon les animaux fouisseurs et la nature du remblai.

D – Erosion éolienne

L'érosion éolienne est surtout sensible sur les ouvrages littoraux en sable du fait de la présence de vent forts fréquents créant un déplacement du sable. Ce phénomène est généralement marginal pour les digues hormis quelques digues maritimes dans des conditions spécifiques. Il est par contre prépondérant sur les dunes naturelles dont il arrive qu'elles soient intégrées à un système de protection par endiguement.

4.2.3.1 Types de protection

A – Perrés et dalles bétons

Il s'agit du mode de protection le plus traditionnel dont la conception dépend principalement du fait que le dispositif remplisse ou non simultanément la fonction étanchéité. Dans un premier cas, il conviendra que les liaisons entre les dalles béton ou les joints du perré soient étanches tout en ménageant une possibilité (joint de dilatation) de légères déformations de cette carapace rigide. Dans un second cas, il faut un filtre en dessous de la protection, même si elle est initialement continue (dalles, maçonnerie, ...). Les principaux éléments à prendre en considération à la conception sont les suivants :

- Bon compactage de la couche support pour éviter des tassements ultérieurs incompatibles avec une structure rigide.
- Mise en place d'un filtre (granulaire ou géosynthétique) entre le remblai et la protection pour éviter « l'entraînement » de fines lors de la baisse du niveau de l'eau ; ceci est également vrai si la structure de protection assure l'étanchéité, c'est une garantie en cas de défaillance de celle-ci (dégradation des joints).
- Raccordement en pied de talus assurant la stabilité sur pente du dispositif et la protection contre l'affouillement en pied. Les solutions de raccordement en pied seront également rigides, par exemple :
 - longrine en béton ou maçonnerie (dont la profondeur sera à définir en fonction de la nature de la fondation et les contraintes d'érosion à ce niveau),
 - rideau de palplanches (pouvant également jouer le rôle d'étanchéité généralement surmonté d'une poutre en béton sur laquelle s'appuie la protection du talus ;
- Nature des matériaux adaptée aux agressions extérieures notamment climatiques (gel, amplitude thermique), chimiques (résistance à l'eau saumâtre) et mécaniques (abrasion par l'eau et les transports solides éventuels - du sable jusqu'aux galets dans certains cas -).

B – Enrochement naturel ou blocs béton

Le dimensionnement des enrochements utilisés en protection de parements est abordé ci-après au chapitre 4.3.3.2 sur la justification des protections telle que définie dans le guide CFBR pour les digues fluviales et dans les notices du CETMEF ou le Guide Enrochement (CIRIA année 2009) en maritime ; on rappelle ici simplement les éléments de principe de conception dont la prise en compte est essentielle. A ce titre, outre la nature et l'intensité des sollicitations qui sont à la base de la détermination de la taille des éléments et de l'épaisseur de l'enrochement, le projeteur prêtera une attention particulière aux éléments suivants :

- Résistance des enrochements au gel et à l'agressivité chimique éventuelle de l'eau.
- Mise en place impérative d'un filtre (granulaire et/ou géosynthétique³³) entre le remblai et l'enrochement qui pourra être constitué d'une ou plusieurs couches en fonction de la différence de granulométrie entre le remblai et les enrochements,
- Vérification de la stabilité sur pente de la couche de protection, et dans certains cas de la stabilité d'ensemble lorsque l'enrochement participe à cette stabilité (digue de faible hauteur),
- Conception d'une butée de pied adaptée à la nature de la fondation et aux risques d'affouillement. Cette butée de pied ne sera pas nécessairement en enrochements ; dans certains cas, on pourra avoir recours à du béton, des palplanches ou des gabions.

En tenant compte des nécessités propres au projet, la nature, la qualité et les dimensions des enrochements doivent être conformes à la norme NF-EN 13383-1 & 2.

C – Gabions et pavés liaisonnés

Les gabions assurent seuls la protection sous forme de matelas sur le parement ou sont utilisés en complément (butée de pied et/ou pare-vagues en tête) des autres dispositifs notamment les enrochements décrits précédemment. La taille des blocs et l'épaisseur des matelas sera défini en fonction de l'intensité des sollicitations (voir justification au § 4.3.3.2). Ce type de protection peut se révéler inadapté (sauf conception spécifique adéquate) pour des digues de rivières torrentielles (risque de cisaillement des fils par le transport solide) ou des digues maritimes (corrosion en milieu salé).

A noter les autres éléments de conception à prendre en compte, à savoir :

- mise en place impérative d'un filtre (granulaire ou géosynthétique³⁴) entre le remblai et les gabions,
- stabilité sur pente qui peut nécessiter la mise en place d'ancrages en tête de talus,
- raccordement en pied pour éviter les affouillements.

Les gabions peuvent être endommagés en cas de transport de flottants (par arrachement des fils).

Les pavés liaisonnés ancrés en tête de talus constituent une variante de protection bien adaptée aux pentes de parement élevées (stabilité non assurée de couches granulaires) et aux sollicitations faibles à modérées. La pose peut se faire si nécessaire digue en eau.

³³ La caractérisation d'un filtre en géotextile doit prendre en compte évidemment l'ouverture de filtration mais aussi d'autres caractérisations relatives aux contraintes mécaniques et hydrauliques.

³⁴ La caractérisation d'un filtre en géotextile doit prendre en compte évidemment l'ouverture de filtration mais aussi d'autres caractérisations relatives aux contraintes mécaniques et hydrauliques.

D - Protection mettant en œuvre des géosynthétiques

Ne sont pas abordés ici les fonctions de séparation et filtration des géotextiles décrits ci-après au § 4.2.4.

Pour les zones où les sollicitations sont faibles à modérées, les géosynthétiques utilisés seuls ou plus généralement en complément de matériaux naturels peuvent constituer une solution économiquement et techniquement intéressante. Ce type d'utilisation est défini dans les « recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion » du comité Français des géosynthétiques [CFG, 2003].

Les protections peuvent être classées en trois catégories :

- Renforcement du sol, généralement enherbé, par une nappe géosynthétique, bidimensionnelle qui constitue un renforcement du sol (mise en place dans le sol) ou une protection du semis (mise en place sur le sol),
- Système de confinement géo-alvéolaire généralement de type nid d'abeilles rempli de sol (terre végétale, graviers...) et pouvant être fermé et ancré en tête de talus,
- géoconteneurs (dont les géotubes) qui constituent des enveloppes tridimensionnelles qui seront remplies sur place de matériaux du site (généralement de sable en protections côtières) ou de béton.

E - Enherbement

Il s'agit de la protection la plus répandue contre l'érosion pluviale sur les parements côté ZP et en crête mais également côté fleuve lorsque les sollicitations sont faibles ; le tableau 4.2 montre bien l'intérêt de l'enherbement.

	Granulométrie	Vitesses critiques d'érosion sur sol humide (Hudson, 1981)	
		Du sol nu	Du sol engazonné
Argile compacte	$d < 2\mu\text{m}$	1,20m/s	2,5m/s
Silt	$2\mu\text{m} < d < 0,02\text{mm}$	0,60m/s	1,5m/s
Sable fin	$0,02\text{mm} < d < 0,2\text{mm}$	0,30m/s	0,3m/s
Sable grossier	$0,2\text{mm} < d < 2\text{mm}$	0,45m/s	1,7m/s
Gravier	$2\text{mm} < d < 20\text{mm}$	0,70m/s	-
Cailloux	$20\text{mm} < d < 200\text{mm}$	1,20m/s	-
Enrochement	$200\text{mm} < d$	$> 1,20\text{m/s}$	-

Tableau 4.2 : résistance à l'érosion d'un sol nu ou engazonné (d'après CFG [2003]).

Cette technique simple mérite cependant une attention particulière sur certains éléments de conception, à savoir :

- Intégration d'un "grillage" anti-fouisseurs sous la terre végétale si nécessaire dans la zone concernée,
- Stabilité de la couche de terre végétale sur la pente (à défaut, le renforcement est possible avec un géosynthétique éventuellement ancré en tête),

- Adaptation des semis (ou ensemencement naturel) à la nature du sol et aux conditions climatiques locales (il serait par exemple difficile de maintenir un ray-grass sur le parement sableux d'une digue maritime),
- Prise en compte de la période entre la mise en place de la terre végétale et l'implantation de la végétation pendant laquelle la vulnérabilité à l'érosion est maximale,
- Eventuellement, mise en œuvre en accompagnement de protection surfacique adaptée, comme des nappes plus ou moins biodégradables (jute, coco, géogrid).

4.2.3.3 Choix d'un dispositif de protection

	Parement côté eau		Parement côté ZP		Crête et risbermes	
	Fluvial	Maritime	Fluvial	Maritime	Fluvial	Maritime
Béton ou perré	XXX	XX	-	X	-	XXX
Enrochement	XXX	XXX	-	X	-	-
Grave compactée avec ou sans liant	X	X	-	-	XXX	XXX
Gabions	XXX	-	-	X	-	-
Géo conteneur ou géo-alvéolaire	XX	X	XX	XXX	-	-
Enherbement	X	-	XXX	XX	XXX	X

Tableau 4.3 : Choix d'un système de protection

XXX : Système adapté dans la plupart des situations

XX : Système adapté dans certaines situations

X : Système adapté uniquement dans des conditions spécifiques (solicitation faible par exemple)

- : Non adapté

Au-delà des techniques présentées dans le tableau ci-dessus, des techniques innovantes commencent à apparaître : sol traité à la chaux, pneus, rondins, ...

A – Parement côté fleuve ou mer

La protection sera définie en fonction des sollicitations du fleuve ou de la mer, des caractéristiques géométriques du parement et de la nature des matériaux de remblai. A noter que, dans certains cas, la fonction de protection peut être couplée à une fonction d'étanchéité (même dispositif ou deux dispositifs couplés) et/ou à une fonction de stabilité mécanique (glissement) du parement (par exemple un enrochement avec des blocs de taille importante peut contribuer à la stabilité d'ensemble du talus d'une digue de faible hauteur).

Un élément primordial de la conception sera la butée de pied de la protection qui devra être adaptée aux risques d'affouillement en fondation en prenant en compte les principaux facteurs suivants :

- la nature de la fondation,
- l'orientation et force du courant et niveau d'eau,

- les vagues en site maritime exposé,
- la mobilisation de la fondation (respiration) pendant un événement (crue ou tempête).

Sauf cas particulier les autres facteurs d'érosion ont une action moindre que celles exercées par l'eau retenue par la digue mais, dans le cas d'une sollicitation hydraulique faible permettant une protection plus légère, les effets des animaux, du vent et de la pluie devront être pris en compte.

B – Parement côté zone protégée (ZP)

Hormis lorsqu'elles sont prévues pour résister à la surverse, les digues fluviales ont des parements côté ZP généralement enherbés pour résister à l'érosion pluviale ; cependant, dans les situations où un écoulement d'eau est probable en pied (fossé, inondation par l'arrière dans le cadre d'un casier d'expansion ...), un renforcement spécifique devra être prévu si les vitesses d'eau sont trop importantes par rapport à la résistance de l'enherbement.

Pour les digues maritimes la protection du parement côté ZP et également de la crête de digue sera essentiellement déterminée par la nécessité ou non de la résistance aux "franchissements" des vagues ; en effet les risques de rupture par érosion par les vagues franchissant la crête sont importants et la simple végétalisation risque d'être insuffisante selon l'intensité du phénomène. La protection devra être en adéquation avec l'intensité de "l'agression". Par ailleurs, la végétalisation des digues marines nécessite des techniques et espèces adaptées aux conditions (sol souvent sableux, peu de matières organiques et milieu marin).

C – Crête de digue

En plus de la protection contre l'érosion, la crête de la digue sera, dans la majeure partie des cas, aménagée pour permettre le passage d'engin pour l'entretien de la digue ce qui nécessitera un renforcement mécanique adapté si la nature du matériau n'est pas susceptible de contribuer à une bonne portance des engins. Hormis la résistance à l'érosion pluviale, la crête devra souvent supporter en maritime le déferlement des vagues qui devra être pris en compte dans la conception de la protection. A noter également qu'en cas de surverse (pour les digues non prévues à cet effet), la résistance à l'érosion de la crête joue un rôle important pour retarder voire éviter la rupture de la digue, au moins pour les matériaux cohésifs en remblai.



Figure 4.3 : Protection en enrochement coté rivière et mise en place d'un grillage anti-fouisseur et géosynthétique de renforcement de la terre végétale côté zone protégée

4.2.4 Filtration et drainage

Pour contrôler les effets de l'eau susceptible de circuler dans la digue ou à son contact avec la fondation, il convient de mettre en place, si nécessaire, des filtres et drains qui assureront le transit de l'eau en évitant tout transport de particules solides à l'origine de phénomènes d'érosion interne. La définition du besoin et la conception des dispositifs de filtration et drainage des digues maritimes et fluviales se différencient nettement du cas des barrages du fait qu'il s'agit d'ouvrages généralement "secs" ou mis en eau de manière intermittente. Plus précisément, les digues maritimes ne sont souvent généralement sollicitées qu'à partir d'un certain coefficient de marée et subissent un mouvement cyclique de montée et descente de l'eau retenue tandis que la plupart des digues fluviales ne sont mises en eau que de manière très occasionnelle voir exceptionnelle. Il existe cependant des ouvrages de protection sollicités de manière plus fréquente ou continue sur au moins une partie de leur hauteur ; il conviendra bien sûr de prendre en compte cette situation pour appréhender la circulation de l'eau dans ces ouvrages.

4.2.4.1 .Rôle des drains et filtres

L'eau qui circule dans et autour de l'ouvrage peut avoir 4 origines :

- météoritique,
- nappe souterraine,
- eau contenue par l'ouvrage (cours d'eau ou mer),
- eaux de ruissèlement ou d'affluent dans la zone protégée.

Les actions de l'eau de pluie se concentrent principalement sur les parements et la crête ; leurs effets sont principalement des risques d'érosion (ravines) de surface dont on se protège tel que défini au chapitre 4.2.3. Pour les ouvrages perméables ou semi-perméables une partie de la pluie peut percoler au travers de la digue.

La présence d'une nappe en fondation, ce qui est notamment un cas fréquent dans le domaine fluvial, peut conduire lorsque celle-ci est assez haute (période hivernale ou suite à de fortes pluies) à des circulations d'eau au contact digue/fondation avec éventuellement des remontées dans la digue.

Le cours d'eau ou la mer, lorsqu'ils sont en contact avec la digue, créent également un écoulement au travers de la digue et de sa fondation ; le sens de cet écoulement s'inverse lors de la décrue ou de la marée descendante. A l'inverse des barrages, les périodes de mise en charge du parement côté cours d'eau ou mer sont courtes (quelques heures à quelques jours) et peuvent être cycliques dans le cas des ouvrages maritimes mis en eau par le jeu des marées.

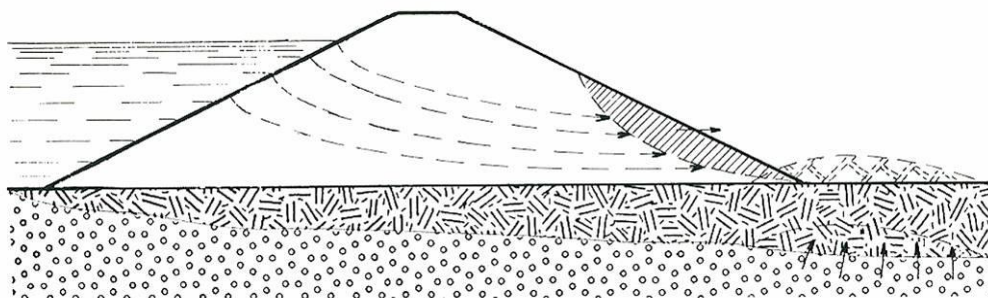


Figure 4.4 : Schéma écoulements au travers d'un remblai non drainé (source *Technique des barrages en aménagement rural*)

A - Les filtres

Compte tenu de ces différentes circulations d'eau et pour éviter l'entraînement de particules fines, le respect des règles de filtre doit être vérifié aux interfaces internes et externes de l'ouvrage, à savoir :

- contact remblai-fondation,
- contact entre matériaux de granulométrie très différente dans les remblais zonés ou à noyau étanche,
- contact entre dispositif de protection contre l'érosion et le remblai notamment dans le cas d'enrochements posés sur le parement en eau de la digue.

Il est toujours nécessaire de prendre en compte les effets potentiels des eaux d'infiltration voire de saturation partielle de la digue lorsqu'elle est en eau afin d'éviter que les résurgences sur le parement côté zone protégée ne nuisent à la stabilité de l'ouvrage par création de renard et/ou par glissement du talus saturé devenu instable (figure 4.4).

B - Les drains

Compte tenu de la nature de ces sollicitations hydrauliques spécifiques aux digues les situations rencontrées peuvent se résumer comme suit pour les ouvrages de hauteur modeste :

- Remblai homogène en matériaux étanches : dans la plupart des cas, le temps de mise en eau est insuffisant pour saturer la partie aval du remblai, le drainage du remblai n'est pas nécessaire.
- Remblai avec noyau étanche : on se trouve généralement dans la même situation que précédemment ; par contre il est nécessaire de vérifier les règles de filtre entre le noyau étanche et les recharges de part et d'autre.
- Remblai homogène en matériaux semi-perméables ou matériaux "tout venant" du site souvent mal connus pour les digues existantes (appelé "remblai historique") : la perméabilité des matériaux est souvent hétérogène et l'on peut rarement faire l'économie du drainage du remblai.

L'expérience montre que la plupart des digues en remblai de hauteur modeste disposent rarement de système de drainage du remblai et des fondations ; dans certains cas, cette conception ne pose pas de problème particulier pour les raisons indiquées ci-dessus mais ne connaissant pas dans la plupart des cas la nature du remblai (remblai historique), on essaiera donc de mettre à profit un éventuel besoin de travaux de confortement pour intégrer un système de drainage (recharge aval drainante par exemple).

4.2.4.2 .Conception des filtres

Les filtres sont constitués soit par une ou plusieurs couches de matériaux granulaires soit par des géotextiles soit par une association des 2 types de matériaux. Le dimensionnement de ces filtres peut être défini comme suit :

A - Filtres granulaires

Afin d'éviter l'entraînement de particules fines entre deux matériaux en contact dans ouvrage, les granulométries de ces deux matériaux doivent être "compatibles". Le respect de ces conditions de filtre peut être apprécié à partir des règles de TERZAGHI élaborées pour des matériaux granulaires uniformes, à savoir :

$d_{15} F < 5 d_{85} M$, avec F pour filtre et M pour le matériau plus fin à protéger avec d_{15} (d_{85}) diamètre des tamis laissant passer 15% (85%) en poids des matériaux de filtre (F) et des matériaux à protéger (M). A noter que pour des sols très fins ce critère n'est pas utilisable et il est recommandé de prendre un sable propre 0-5 mm

$2 < d_{60}/d_{10} < 8$, encadrement du coefficient d'uniformité du matériau filtrant F

Lorsqu'un filtre granulaire est intercalé entre deux couches, il faut vérifier que les conditions de filtre soient respectées vis-à-vis de chacune des 2 couches.

B - Géotextiles

Un géotextile jouant un rôle de filtre doit autoriser le passage d'eau perpendiculairement à son plan, mais pas celui des particules de sol. Le géotextile assurant cette fonction doit être plus perméable que le sol à filtrer. Ainsi, la filtration est un compromis entre l'érosion interne du sol par perte de fines particules et le colmatage du filtre qui peut causer une augmentation de pression interstitielle dommageable à l'ouvrage. Le géotextile est notamment caractérisé par son ouverture de filtration, notée O_f (microns), qui traduit l'ouverture du géotextile : c'est la taille de la plus grosse particule de sol susceptible de traverser le géotextile.

Les critères de dimensionnement sont principalement les suivants :

- la granulométrie du sol : l'ouverture de filtration du géotextile sera définie en fonction du d_{85} (diamètre tel que 85 % des particules du sol soient de dimension inférieure) du sol ;
- sa compacité : un sol dense est moins sensible à l'érosion interne ;
- sa perméabilité : le géotextile doit être plus perméable que le sol à l'amont (sens de l'écoulement) pour ne pas freiner l'écoulement.

Le choix du géotextile est en général fait de telle sorte que son O_f soit inférieure au d_{85} du sol, affecté d'un coefficient C dépendant de l'ouvrage et que sa perméabilité soit 10^3 à 10^5 fois plus grande que celle du sol.

Les éléments de détermination et de mise en œuvre de ces géotextiles sont détaillés dans les normes suivantes :

- détermination des caractéristiques hydrauliques et mise en œuvre des géotextiles et produits apparentés utilisés dans les systèmes de drainage et de filtration (NFG 38061),
- mise en œuvre, spécifications, contrôle des géotextiles et produits apparentés (NFG 38060).

Les géotextiles doivent être des géotextiles certifiés ASQUAL.

4.2.5 Déversoirs de sécurité [Degoutte, 2012]

La probabilité de surverse par-dessus les digues de protection contre les inondations est en général loin d'être négligeable. L'eau en déversant sur une digue en terre acquiert une vitesse forte et érode le talus ou le pied. Cette érosion se développe ensuite rapidement de manière régressive, et généralement s'ensuit une brèche qui inonde brutalement la zone réputée protégée. Arme à double tranchant, une digue peut donc assurer une protection pour les crues moyennes, si elle est bien construite, et par ailleurs constituer une source de danger pour les crues fortes, si aucune disposition n'est prise.

Pour éviter et/ou limiter les conséquences d'une surverse pouvant être catastrophique, on peut transposer et adapter aux digues le principe des déversoirs de crues qui équipent pratiquement tous les barrages.

Le guide technique sur les déversoirs équipant les digues fluviales de protection contre les inondations présente les avantages et les limites des déversoirs implantés sur ces ouvrages. On peut distinguer deux principaux types d'ouvrage de déversement en fonction de la nature des zones alimentées ce qui se traduit par des objectifs différents :

- Les déversoirs de dérivation qui alimentent des zones d'expansion des crues (ZEC)³⁵ si possible dédiées à l'eau, où l'eau est stockée pour être restituée après le passage de la crue ou bien transférée plus en aval sur le même cours d'eau ou un autre cours d'eau ou un grand lac ou la mer. Leur rôle essentiel est de diminuer l'intensité des crues au bénéfice des enjeux situés plus en aval. Mais cela bénéficie aussi à la digue d'en face, aux digues des deux rives en aval du déversoir, et sur une certaine distance en amont par effet de remous (si l'écoulement est fluvial).
- Les déversoirs de sécurité des zones protégées (ZP) déversent en forte crue vers des zones protégées. Leurs objectifs sont multiples :
 - assurer une inondation contrôlée, lente et progressive alors qu'une brèche se produit brutalement et à un endroit imprévu ;
 - limiter le volume déversé en crue par comparaison à une brèche (qui s'étend en général jusqu'à la base de la digue et qui déverse donc plus et plus longtemps) ;
 - permettre de choisir la zone de premier déversement en minimisant les impacts en fonction de son occupation ;
 - dans la mesure du possible, permettre qu'un matelas d'eau se crée et amortisse les écoulements et leur violence lors des crues extrêmes passant malgré tout sur la crête du reste de la digue
 - rendre plus rares les surverses sur le restant de la digue (en amont et en aval) et sur la digue opposée si elle existe ;
 - permettre un effet d'alerte, et ainsi faciliter les décisions d'évacuer une zone ou d'y recommander des mesures de mise en sécurité ;
 - maintenir la conscience du risque en supprimant l'impression pernicieuse d'une protection absolue.

Ces deux types de déversoir ont des objectifs différents pour le concepteur, dans un cas écrêter les crues, dans l'autre cas sécuriser la digue (en pensant aux enjeux). Mais les fonctionnements physiques sont souvent proches. Les conceptions de ces ouvrages généralement de type seuil libre peuvent être très diverses ; dans certains cas, des parties fusibles peuvent s'avérer utile pour retarder le début de la surverse et augmenter alors rapidement le débit évacué. L'ensemble du dimensionnement et de la conception technique de ces ouvrages est largement décrite dans le guide dédié aux déversoirs.

Le guide traite des digues de protection contre les inondations fluviales. Les digues maritimes ne sont pas traitées par ce document, ni les digues de canaux, bien que certaines digues de canaux (ex : canal du Midi dans l'Aude) ou de rivières canalisées aient été équipées d'évacuateurs dans une période récente. Sont concernées aussi bien les digues existantes dans lesquelles des déversoirs existent déjà ou pourraient être incorporés, que les nouveaux projets de digues qui pourraient inclure des déversoirs dès la construction.

Les premières réflexions menées sur l'intérêt et les objectifs d'éventuels déversoirs sur des digues maritimes ont montré le manque de références nationales et internationales dans ce domaine. Il s'agit d'un vaste domaine encore peu étudié et qui mériterait une approche spécifique (à titre d'exemple : réflexion à mener sur l'intérêt et la faisabilité d'un remplissage progressif de certains casiers). Faute d'antériorité suffisante pour les ouvrages maritimes ce point n'est pas abordé dans le présent document.

³⁵ une ZEC est néanmoins une zone protégée contre les inondations par son système digue + déversoir, même si elle peut être protégée pour des niveaux de crue plus faibles que des ZP voisines ou aval

4.2.6 Organes annexes

4.2.6.1 Chemins d'exploitation et d'entretien

L'entretien et la surveillance des ouvrages doivent être pris en compte au moment de la conception ou du confortement des digues. En particulier, il est nécessaire de rendre accessible les ouvrages aux engins qui assureront l'entretien (faucardage notamment).

En règle générale, la crête de largeur minimum de 3m constituera une piste privilégiée ; cela suppose la mise en place d'une couche de roulement (grave traitée ou non) si le matériau du remblai n'a pas la portance suffisante ; les accès à cette piste en crête seront également prévus.

Sauf dans les cas spécifiques où la surface d'emprise est strictement limitée (zone urbaine, présence d'autres ouvrages d'infrastructure...), un chemin d'exploitation sera également prévu en pied de talus côté zone protégée. Pour les quelques ouvrages de hauteur importante, la réalisation d'une risberme à environ mi-hauteur est également une bonne solution pour faciliter l'entretien des talus.

Une troisième piste d'accès et d'entretien peut s'avérer utile en pied côté eau dans le cas notamment de digues fluviales situées dans le lit majeur du cours d'eau dans une zone normalement hors d'eau en dehors des périodes de crue.

4.2.6.2 Conduites traversantes et réseaux longitudinaux

La mise en place d'une conduite qui traverse la digue constitue un point singulier qu'il convient de traiter avec une attention particulière pour qu'il ne devienne pas un point de faiblesse de la digue.

Les principaux risques sont hydrauliques notamment à cause d'écoulements préférentiels qui peuvent s'établir à l'interface conduite-remblai ou dans le remblai proche s'il est insuffisamment compacté ; des phénomènes d'érosion interne sont alors possibles. Par ailleurs, des fuites provenant de la conduite s'il s'agit d'une conduite d'eau en charge peuvent également conduire à des problèmes d'érosion interne. Dans une moindre mesure, des instabilités mécaniques sont possibles en cas de compactage insuffisant autour de la conduite (risque de tassement différentiel).

Pour éviter ces risques de défaillances et éventuellement de rupture au niveau du passage d'une conduite, il convient de respecter quelques principes généraux :

- dans la mesure du possible prévoir un passage en cavalier (siphon inversé) de la conduite ;
- éviter toute possibilité de circulation d'eau depuis le cours d'eau ou la mer en posant la conduite dans une tranchée que l'on remplit de béton ou de mastic bitumineux dans sa partie côté eau en y intégrant si nécessaire des écrans anti-renard (cas principalement des digues de grande hauteur). Le remblai au-dessus sera réalisé avec des matériaux identiques au reste de la digue que l'on compactera à la même densité ;
- En plus d'une bonne étanchéité "côté eau", la mise en place de matériaux drainants autour de la conduite dans son tiers aval peut s'envisager dans la mesure où l'on vérifie que cela ne constitue pas un point singulier avec un gradient important ;

- Dans le cas d'un réseau sous-pression (eau potable, irrigation, gaz...) la conduite devra si possible ne présenter aucun joint ni connexion interne au remblai ; on utilisera donc de préférence des conduites continues (PEHD ou autre) ou à joints soudés ou verrouillés (acier à raccords soudés avec protection anticorrosion interne et externe, fonte verrouillée et éventuellement des tuyaux PVC à joints collés pour les ouvrages à enjeu modéré). Les raccords à simple emboîtement sont à proscrire.

Ces préconisations générales particulièrement adaptées aux remblais homogènes imperméables sont à adapter dans les autres cas (masque côté eau étanche, remblai zoné, étanchéité mince interne ...).

Les traversées de câble souple méritent également une attention particulière, il est important de veiller au bon compactage des matériaux mis en place dans la tranchée qui doit atteindre une densité équivalente au reste du remblai. La pose de câbles en fourreau est à proscrire sauf dispositif très spécifique.

4.3. Justification des digues en remblai

Un groupe de travail du Comité Français des Barrages et réservoirs (CFBR) animé par P. Royet et L. Peyras a établi des recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai [CFBR, 2010] afin d'harmoniser les pratiques françaises dans ce domaine. Les digues de protection contre les inondations entrent dans le champ d'application de ces recommandations qui constituent donc le support de base pour la justification de la stabilité des digues maritimes et fluviales construites en remblai.

Nous ne ferons ici qu'une présentation synthétique de ce document auquel nous recommandons vivement de se référer pour la justification des ouvrages sur la base des données géologiques, géomorphologiques et géotechniques issues des reconnaissances telles que définies aux §4.2.1 et 4.2.2.

4.3.1. Bases de calcul

4.3.1.1. Les situations de projet

Les situations de projet modélisent un ensemble de conditions physiques représentant les conditions réelles auxquelles l'ouvrage est soumis et qui se produisent au cours d'une certaine durée pendant laquelle les distributions de toutes les données (actions, résistances) sont considérées comme constantes. Elles correspondent à des chargements dans lesquels l'ouvrage est susceptible de se trouver durant sa vie soit notamment pour les digues : digue à sec, crue ou sollicitation maritime de projet, séisme, défaillance particulière d'un composant de l'ouvrage, etc.

Le concepteur définit, dans les notes de calculs, les situations qu'il envisage pour le projet. Pour cela, il tient compte de la conception du projet, du mode de fonctionnement des installations, de l'environnement auquel l'ouvrage est soumis et de la vraisemblance des situations de défaillances.

Les conditions de fonctionnement de l'ouvrage et les sollicitations hydrauliques associées permettent au concepteur de définir les situations de projet hydrauliques, qui revêtent une importance particulière pour les digues en remblai.

Les principales situations de projet à retenir pour les digues de protection contre les inondations ou submersions figurent dans le tableau 4.4 qui fournit des exemples à adapter aux situations particulières de chaque ouvrage.

Catégories de situations	Exemples ou remarques
Situation normale d'exploitation	Niveau moyen hors crue de la rivière ou cycle de marée moyenne
Situations transitoires ou rares	Fin de construction Niveau d'étiage bas de la rivière Niveaux marée exceptionnellement basse
Situations de crue ou de forte marée <ul style="list-style-type: none"> • Situation rare de crue • Situation exceptionnelle de crue • Situation extrême de crue 	Cote de protection (digues fluviales) ou marée exceptionnelle avec surcote sans houle notable Cote de sécurité (digues fluviales) Cote de danger (digues fluviales) ou marée exceptionnelle avec surcote et houle forte
Situations accidentelles (hors crue ou marée exceptionnelle)	Séisme d'évaluation de sécurité - SES – (hors crue ou marée exceptionnelle)
Situations liées à la défaillance d'un composant	A répartir entre situations rares ou accidentelles selon la probabilité d'occurrence

Tableau 4.4 : Récapitulatif des principales situations de projet pour les digues de protection contre les inondations

4.3.1.2. Les actions

Les **actions** se répartissent en trois catégories :

- les **actions permanentes** qui sont le poids propre du remblai et les charges d'exploitation;
- l'**action variable** de l'eau qui nécessite une approche spécifique (modèle hydraulique). Cette action est évaluée dans les différentes situations de projet ;
- l'**action accidentelle** (ou rare) sismique qui est définie en fonction du(des) séisme(s) de projet et peut s'accompagner d'une évaluation spécifique de l'action de l'eau.

4.3.1.3. Etats limites

Les états-limites sont les phénomènes que l'on souhaite éviter. Ils correspondent à des états au-delà desquels l'ouvrage ne satisfait plus aux critères de dimensionnement. On distingue deux catégories d'états-limites :

- les états-limites de service (ELS), correspondant à des conditions au-delà desquelles les exigences d'aptitude au service de l'ouvrage ne sont plus satisfaites : les ELS sont les états-limites associés au fonctionnement de la structure ou des éléments structuraux en utilisation normale d'exploitation ;
- les états-limites ultimes (ELU), associés à des pertes d'équilibres statiques ou des modes de ruine ; ils correspondent aux états-limites qui concernent la sécurité des personnes et/ou la sécurité de la structure.

Les états-limites sont associés à des situations de projet. Dans les recommandations du CFBR [2010], on s'intéresse prioritairement aux ELU pour lesquels on propose des critères de justification. Les ELS sont abordés uniquement en dressant une liste (qui n'est pas forcément exhaustive) dans l'objectif de fournir un guide pour le projeteur.

4.3.2. **Modèle hydraulique interne**

Il s'agit de fournir le champ des pressions interstitielles et le champ des gradients hydrauliques au sein de l'ouvrage en fonction des conditions aux limites hydrauliques appliquées.

Le préalable à la réalisation du modèle hydraulique comprend les étapes d'élaboration des modèles géométrique, géologique et hydrogéologique et géotechnique. A partir des trois modèles précédents, il convient de caractériser les données d'entrée du modèle hydraulique interne, choisir la modélisation adaptée à la situation de chargement hydraulique et analyser les résultats de la situation de chargement étudiée.

La spécificité des digues de protection contre l'inondation qui devra être ici prise en compte est le fait que, dans la majorité des cas, les digues ne sont mises en eau qu'exceptionnellement et pour de courtes durées : de quelques heures à quelques jours. Dans ces conditions il est essentiel de prendre en compte la cinétique d'atteinte d'un régime hydraulique permanent dans le remblai qui n'est d'ailleurs pas systématiquement atteint, le régime hydraulique interne restant souvent transitoire et évolutif pendant toute la période de crue ou marée exceptionnelle. Une approche spécifique sera également développée pour les digues maritimes mises en eau à chaque marée.

Ainsi, pour les calculs des pressions interstitielles en situation de crue, l'hypothèse du régime permanent est parfois très conservatrice et les données manquent en général pour faire un calcul réaliste en régime transitoire (il faut des courbes $k-S_r$ et $w-S_r$: perméabilité et teneur en eau en fonction de la saturation). Par ailleurs, les résultats sont souvent dispersés pour ces calculs dès qu'ils font intervenir les caractéristiques mal connues en milieu non-saturé.

Il conviendra donc de retenir des hypothèses raisonnablement conservatives sur les conditions aux limites et sur la position de la ligne de saturation, en fonction de la perméabilité des matériaux, de leur anisotropie, de la présence de singularités (en particulier horizontales) au sein de la digue et de la durée des crues ou des surcotes marines. On prendra en compte le fait que la fondation est le plus souvent saturée dès le début de la crue.

4.3.3. **Justification de la sécurité**

4.3.3.1. *Etats limites à considérer*

Les recommandations établies par le CFBR consacrent un chapitre spécifique (chapitre 6) aux digues de protection contre les inondations. Selon les recommandations de ce chapitre, les états-limites ultimes qu'il est proposé de considérer pour ces digues sont :

- l'état-limite ultime de stabilité d'ensemble (glissement) ;
- l'état-limite ultime de soulèvement hydraulique au pied aval ;
- l'état-limite ultime de défaut de portance (poinçonnement de la fondation) ;
- l'état-limite de service de tassement ;
- l'état-limite ultime d'affouillement en pied côté mer ou rivière ;
- les états-limites de boulangerie, de résistance à l'érosion interne et de résistance à la surverse (non traités dans cette version) ;
- l'état-limite de service de filtration (non traités dans cette version) ;
- l'état-limite de liquéfaction sous sollicitation sismique (traité au sein d'un autre document de référence).

Pour les digues maritimes il y aurait lieu d'ajouter les états-limites de résistance au déferlement de la houle et aux franchissements.

Le tableau 6.1 des recommandations CFBR présente les situations de projet à analyser ainsi que les états-limites correspondants, il est particulièrement adapté à la justification des digues fluviales. Pour les digues maritimes les notions d'étiage, de cote de protection et de crue peuvent être respectivement remplacées par celle de marée exceptionnellement basse, d'objectif de protection de la digue et de niveau exceptionnel de la mer (forte marée + surcote) en présence de houle forte ; par ailleurs les situations liées au déferlement de la houle et ses conséquences sur les protections contre l'érosion (y compris coté ZP) seront prises en compte.

4.3.3.2. Dimensionnement des protections anti-érosion

Les revêtements de protection contre l'érosion externe due aux courants peuvent s'envisager avec une gradation du pied vers la crête, compte tenu de contraintes dégressives, par exemple des enrochements en pied et des techniques végétales en partie supérieure.

Les recommandations du CFBR et la norme NF-EN 13382-1&2 apportent également une réponse au dimensionnement de dispositifs de protection contre l'érosion, à savoir :

- Enrochements
 - dimensions maximales de la protection : profondeur, hauteur le long du talus et largeur de la banquette (dans le cas où elle est nécessaire) : la protection couvre l'ensemble du parement soumis au courant et deux fois la hauteur des vagues estimée au-dessus du plan d'eau considéré
 - dimension moyenne des blocs :

Dans le domaine fluvial et en berges parallèles au courant la formule d'Isbash, par exemple, permet de déterminer le diamètre nominal D en mètres de l'enrochement (diamètre nominal = racine cubique du volume) :

Formule d'Isbash :

$$D = \frac{V^2}{m^2 2g\alpha(\Delta)}$$

V : vitesse du courant (m/s) ;

m : coefficient d'Isbach dépendant de la position individuelle du bloc. Dans le cas des berges, il s'agit d'une couche continue et m = 1,4 ;

α : coefficient de pente dépendant de la pente du talus : $\alpha = \cos \varphi \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \varphi}{\sin \theta}\right)^2}$

φ : angle du talus avec l'horizontale ;

θ : angle au repos des matériaux ($\theta \approx 40^\circ$) ;

Δ : densité apparente (déjaugée) des matériaux de protection = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w = 1,65$

ρ_s : masse volumique des matériaux ;

ρ_w : masse volumique de l'eau.

Des éléments de dimensionnement sont également donnés pour les berges en courbe et pour la hauteur des vagues ; pour une application au domaine maritime on se référera au guide enrochements [CETMEF, 2009]

- épaisseur de la protection : l'épaisseur de la protection correspond à environ deux fois le diamètre nominal D_{50} des blocs, avec un minimum de 0,50 m.

- blocométrie (courbe granulométrique) : la blocométrie doit être suffisamment étalée de sorte à faciliter la mise en place, mais limitée à un diamètre minimal afin de ne pas introduire de blocs de petite taille. Les rapports suivants (en fonction du diamètre nominal D) sont présentés à titre indicatif.

D_{10}	D_{50}	D_{90}
0,90 D	1,12 D	1,40 D

- couche filtre : voir règles rappelées §4.2.4.

- Gabions

On peut se référer à la norme NF-P 94-325-2 et au guide enrochements [CETMEF, 2009].

Il convient de prendre en compte les conditions de site (vitesse de courant, profondeur d'affouillement possible) et les données de l'ouvrage (type et état de l'ouvrage à protéger, niveau, type et état de la fondation de l'ouvrage) pour définir le niveau de pose, la géométrie et l'épaisseur de la protection superficielle parafouille. Pour les confortements de berges, le plus souvent, la protection superficielle est constituée par un radier rectangulaire réalisé à partir d'un assemblage de matelas gabions ou de gabions plats mis en place en pied, le long de l'ouvrage à protéger.

L'épaisseur de la protection superficielle doit être choisie en tenant compte des sollicitations dues à la vitesse du courant et de la hauteur de la section mouillée ou du tirant d'eau. Le tableau ci-après donne les règles approximatives concernant l'épaisseur des matelas de gabions, basées sur une fourchette de vitesses du courant ; les valeurs de vitesse critique et de vitesse limite sont destinées au dimensionnement préliminaire, en prenant pour hypothèses un revêtement horizontal (protection du lit) et des matelas de gabions à double diaphragme.

Épaisseur du matelas (m)	Diamètre des enrochements D_{50} (mm)	Vitesse critique (m/s)	Vitesse limite (m/s)
0.15 – 0.17	85	3.5	4.2
	110	4.2	4.5
0.23 – 0.25	85	3.6	5.5
	120	4.5	6.1
0.30	100	4.2	5.5
	125	5.0	6.4
0.5	150	5.8	7.6
	190	6.4	8.0

Tableau 4.5: Valeurs indicatives des vitesses critiques et limites de courant pour les matelas gabions (guide enrochement, 2009)

- Techniques végétales

En annexe 7 des recommandations CFBR [2010], les principales techniques végétales sont décrites avec des éléments de conception.

4.3.3.3. *Etat limites à vérifier pour les digues comportant un rideau de palplanches*

Pour le cas des digues avec un écran de soutènement en palplanches métalliques, il convient de prendre en compte :

- les états-limites de la digue de protection ;
- les états-limites de l'écran de soutènement.

La vérification des états-limites est définie dans l'annexe 3 des recommandations du CFBR qui s'appuie sur la norme NF EN 1993-5 (Eurocode 3 - partie 5) et dans ROSA 2000 (fascicule "rideaux de soutènement" ou fascicule "exemples commentés de notes de calcul – rideau de soutènement ancré").

4.4. Réhabilitations, confortements, modifications et transitions

Compte-tenu du parc important de digues en France, la majeure partie des travaux sont maintenant réalisés sur les digues existantes sous forme de réhabilitation, confortement, ou modification pour répondre à de nouveaux objectifs de protection. Les principes généraux de conception définis précédemment restent applicables aux travaux sur les anciennes digues. Nous verrons dans ce qui suit les spécificités de ces travaux qui ont la particularité "d'englober" un ouvrage préexistant.

On distinguera dans ce qui suit :

- Les confortements ou réhabilitations qui répondent de manière préventive ou curative à un dysfonctionnement ;
- Les modifications résultant d'une évolution de l'objectif de l'ouvrage, généralement une rehausse de la digue.
- Les réparations d'urgence et les interventions préventives en crue qui seront abordées dans le chapitre 5.

4.4.1. Confortements

Le confortement d'une digue est réalisé pour éviter les ruptures et/ou dysfonctionnements, il est réalisé si possible de manière préventive suite à un diagnostic de l'ouvrage et parfois suite à une rupture totale ou partielle de l'ouvrage. La nature du confortement est fonction de la nature des problèmes et/ou dysfonctionnements de la digue existante et en particulier :

- L'érosion par surverse ponctuelle ou généralisée
- L'érosion interne ou défaut d'étanchéité ou de filtration
- L'érosion externe et affouillements
- La stabilité d'ensemble (glissement ou poussée)

La phase de diagnostic (chapitre 3) est essentielle à la définition du projet de confortement ; elle permet de faire un constat du risque, établir les causes d'une dégradation avérée ou potentielle pour adapter le confortement à la problématique (préventif ou curatif). Les principaux points du diagnostic qui vont influencer sur la conception mais aussi le dimensionnement des confortements sont :

- Les reconnaissances géophysiques et géotechniques
- La modélisation hydraulique externe
- La modélisation géotechnique y compris écoulements internes

Le tableau 4.6 donne à titre d'exemples des principes de solutions de confortement adaptées à des mécanismes de rupture potentielle ou avérée. A noter qu'un projet de confortement peut traiter plusieurs causes et que par ailleurs dans certaines situations la reconstruction d'une nouvelle digue généralement en recul peut constituer une bonne solution technique mais également économique.

Mécanisme de rupture	Solutions de confortement
Surverse/franchissements	Traitement des points bas Aménagement du talus aval Création de déversoir(s) en fluvial
Erosion interne	Reconstitution de l'étanchéité et/ou de la filtration
Affouillement et/ou érosion du talus côté eau	Protection des talus et/ou du pied de berge/rempiètement Déplacement de la digue (recul)
Instabilité des talus	Recharge latérale Soutènement Reprofilage Drainage

Tableau 4.6 : Principales solutions de confortement. (d'après R. Tourment et P. Mériaux)

4.4.1.1. La surverse

Dans la majorité des cas, une surverse sur une digue en terre va induire une brèche (si la crue ou la surcote marine est assez longue), cette surverse est inévitable pour les événements exceptionnels d'intensité supérieure à celle qui a servi à dimensionner l'ouvrage, dans ce cas la rupture peut être plus dangereuse que l'absence de digue. Il faut donc limiter les risques de surverse et à défaut en diminuer les effets.

Les principales solutions pour le contrôle des déversements sont :

- Suppression des points bas pour éviter les surverses localisées : Il ne s'agit pas d'un rehaussement généralisé mais le traitement spécifique des points bas localisés ou vont se concentrer les écoulements. Les solutions techniques sont diverses en fonction de la nature et de la taille (différence de cotes) de ces anomalies dans le profil en long de la digue.
- Mise en place de déversoir(s) de sécurité pour éviter (ou retarder) autant que possible les déversements généralisés et pour assurer un remplissage progressif et sans danger de la zone protégée ; jusqu'au niveau de sûreté le déversoir ne subit pas de dommage en cas de fonctionnement et limite l'impact sur la zone protégée pour laquelle un plan de sauvegarde doit être prévu (surveillance puis évacuation)
- Traitement du talus aval pour augmenter sa résistance à l'érosion externe et ainsi empêcher ou retarder le délai d'ouverture d'une brèche.

Plusieurs de ces solutions peuvent être associées, il convient essentiellement de faire une analyse préalable sur les risques et conditions de surverse et d'adopter une stratégie qui permettra d'éviter des phénomènes rapides et brutaux susceptibles d'apporter atteinte à la population de la zone protégée dont l'inondation lorsqu'elle devient inéluctable doit se faire le plus lentement possible.

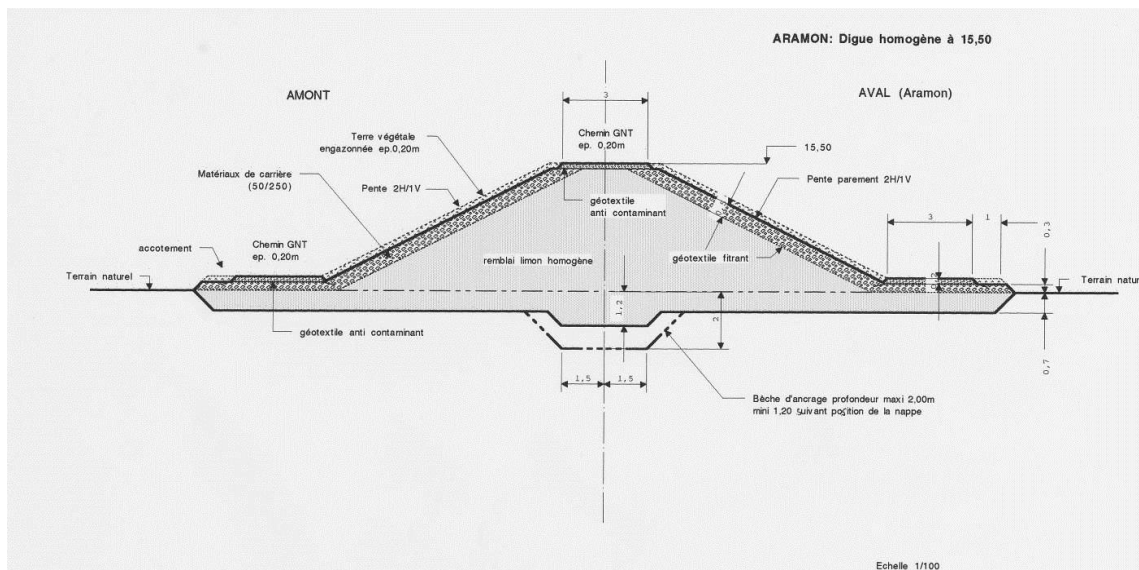


Figure 4.5 : Exemple de renforcement à la surverse d'une digue homogène : tronçon déversant

4.4.1.2. L'érosion interne

L'érosion interne peut se produire soit dans le sol de fondation ou de remblai soit à une interface (sol/sol ou sol/ouvrage) ; dans tous les cas, il y a nécessité de circulation d'eau entraînant des particules fines au travers des éléments plus grossiers du sol. Quatre principaux types d'érosion sont à distinguer :

- Entraînement de particules par arrachement le long d'un conduit dénommé érosion de conduit (anciennement dénommé "renard")
- Entraînement de particules fines à travers les particules plus grossières du sol dénommé "suffusion"
- Entraînement de particules à l'aval de l'ouvrage dénommé érosion interne régressive
- Mouvement des particules fines d'une couche de sol vers la couche de sol plus grossier voisine, dénommé érosion de contact

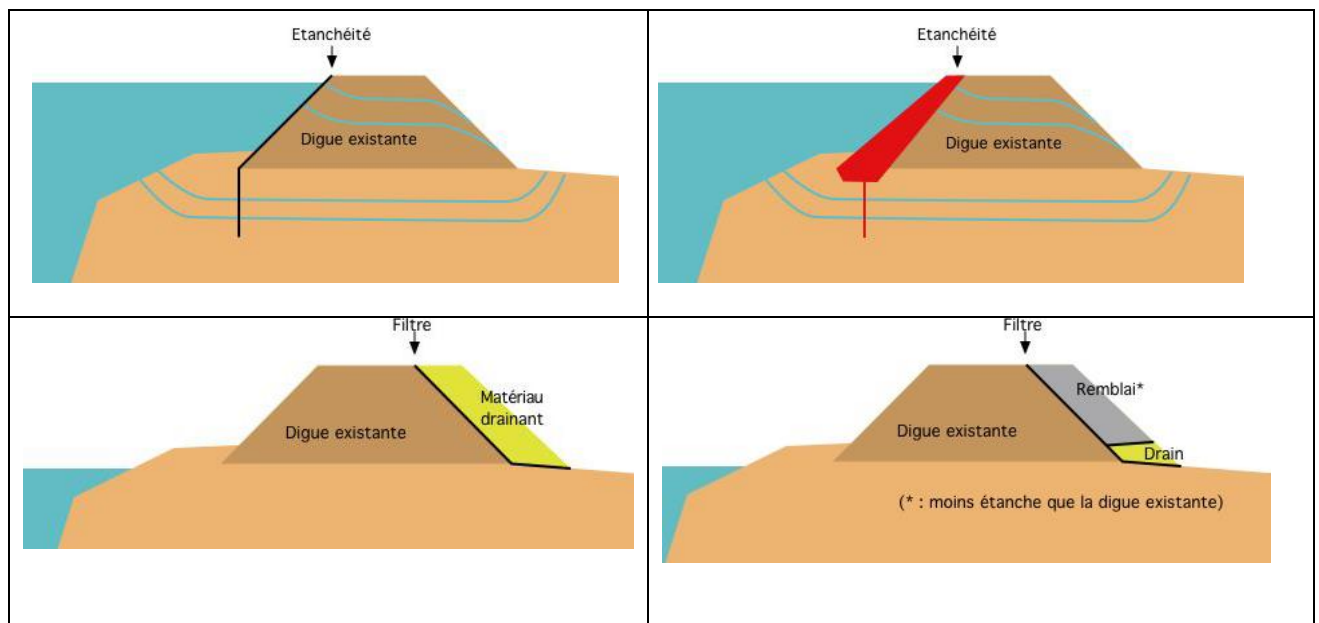


Figure 4.6 : Principe des deux types de solutions permettant d'éviter le risque d'érosion interne (source R. Tourment, formations digues)

4.4.1.3. L'érosion externe et les affouillements

L'érosion externe peut essentiellement concerner la protection du parement du côté mer ou cours d'eau et dans une moindre mesure la crête et le parement côté zone protégée dans la mesure où l'on souhaite donner une résistance à l'érosion par surverse à la digue concernée. L'érosion du parement côté ZP par ravinement dû à la pluie est abordée au § 4.2.3. Les affouillements concernent essentiellement le pied de digue y compris éventuellement la fondation côté mer ou cours d'eau.

Les confortements consistent à renforcer la résistance à l'érosion du(des) parement(s) concerné(s) par réparation et/ou complément à la protection en place ou dans certain cas à rajouter un nouveau système de protection sur le précédent ou directement sur le remblai si elle a disparu (ou jamais existé). Les techniques utilisées sont celles décrites au § 4.2.3 et notamment :

- la protection par enrochements ou perré,
- la mise en place de matelas type Reno,
- protection avec des techniques végétales si l'on se trouve dans les situations où elles sont satisfaisantes.

Pour lutter contre les affouillements en pied de talus, outre les mesures précédemment décrites on pourra être amené à mettre en place par exemple un rideau de palplanches ou un merlon de pied en enrochement. Le recul la digue pour la positionner en retrait dans une zone où les vitesses seront plus faibles et les risques d'érosion par conséquent diminués peut constituer une solution plus économique et/ou pérenne.



Figure 4.9 : exemple de confortement par palplanches pour lutter contre les affouillements en pied de talus – Source Cerema

Figure 4.10 : Rempîement d'une digue en maçonnerie, suite à une baisse du niveau de l'estran, par la réalisation d'une butée en béton – Source Cerema

- Largeur en crête insuffisante
- Instabilité locale ou d'ensemble des talus

L'objectif dans ce cas est de reconstruire à partir de l'existant un ouvrage qui respectera autant que possible les règles de l'art actuelles dont les principes sont rappelés dans le présent document ; dans de nombreux cas, l'intervention portera sur un ou plusieurs des éléments suivants :

- Étanchéité, stabilité du talus et protection contre l'érosion côté cours d'eau ou mer ;
- Drainage et stabilité du talus coté ZP
- Élargissement et/ou aménagement de la crête
- Aménagement si non existence de piste(s) pour l'entretien

Ci-après quelques exemples caractéristiques (à ne pas considérer bien sûr comme des principes généraux à appliquer systématiquement).

Exemple 1 :

La digue représentée figure 4.12 consistait en un remblai ancien en mauvais état que le propriétaire souhaitait réhabiliter ; le projet réalisé avait plusieurs objectifs :

- légère rehausse de la crête
- reprofilage total de la digue
- création d'une piste en crête pour faciliter son entretien
- amélioration de l'étanchéité

La digue existante présentait un profil « arrondi » avec une largeur en crête quasi-nulle ce qui a entraîné un reprofilage complet avec côté fleuve une "purge" des matériaux du remblai ancien fortement retaillé pour permettre la réalisation d'une zone étanche en matériaux argileux sur une largeur suffisante pour permettre un compactage avec des engins lourds appropriés. Un rideau de palplanches permet de prolonger le massif étanche jusqu'à 4 m de profondeur en fondation. La disponibilité du terrain côté val a permis d'élargir la crête et d'en faire une piste pour l'entretien de l'ouvrage et de créer une seconde piste en pied ; un cordon drainant est mis en place au pied du remblai côté val.

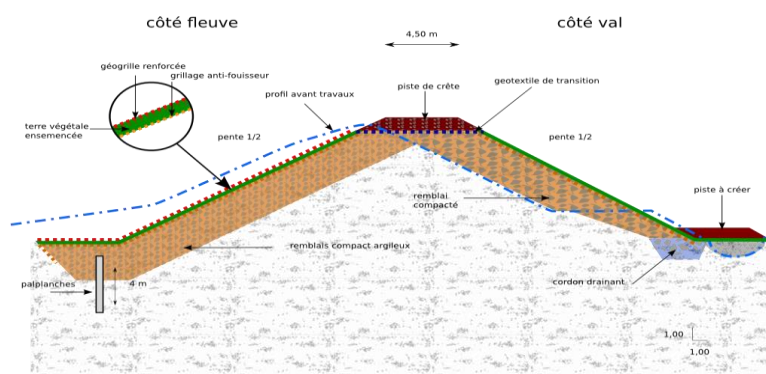


Figure. 4.12 : Exemple 1 de confortement d'une digue à buts multiples

Exemple 2 :

La réhabilitation de la digue représentée figure 4.13 avait plusieurs objectifs :

- Reprofilage total de la digue avec création d'une piste en crête
- Amélioration de l'étanchéité
- Protection contre l'érosion de la rivière

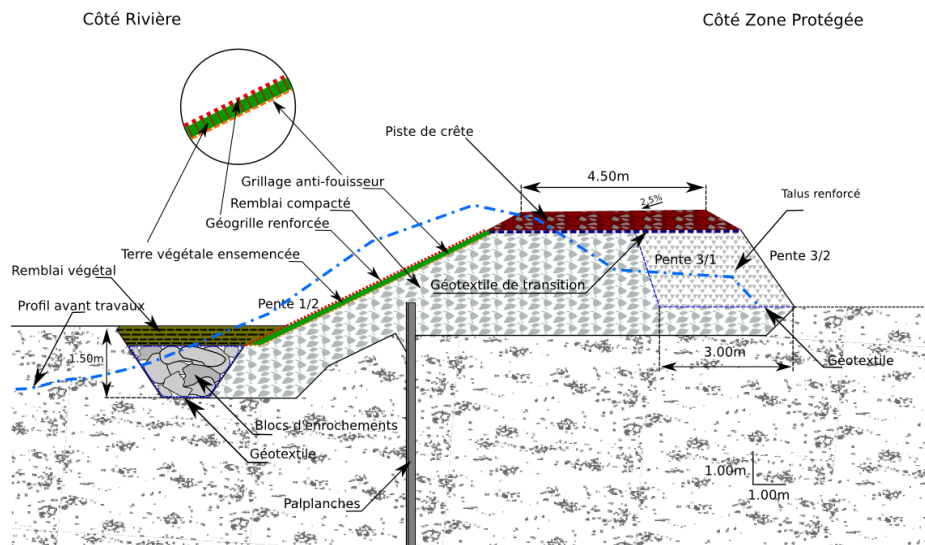


Figure. 4.13 : Exemple 2 de confortement d'une digue à buts multiples

L'amélioration de l'étanchéité a été réalisée par mise en place d'un rideau de palplanches en fondation au dessus duquel le remblai en matériaux argileux a été compacté. La protection contre l'érosion côté rivière a été réalisée par la mise en place d'un cordon d'enrochements en pied de remblai et un enherbement renforcé par une géogrille sur le parement après pose d'un grillage anti-fouisseur. Le manque de disponibilité foncière côté ZP a conduit à construire un massif renforcé avec raidissement du talus permettant la création d'une piste de crête de 4,50 m de large.

4.4.1.6. Transition entre les tronçons

Un soin particulier doit être apporté aux transitions entre tronçons confortés par des méthodes différentes comme entre les tronçons confortés et les tronçons laissés en l'état ou les appuis naturels. Cela, de telle manière qu'en ce qui concerne les fonctions techniques principales de la digue, il y ait continuité entre les organes portant les fonctions d'étanchéité de drainage et de filtration, ou qu'un recouvrement entre tronçons garantisse cette continuité de manière fonctionnelle si elle ne l'est pas de manière structurelle. Pour les éléments externes (protection), il convient de s'assurer que les transitions en termes géométriques et d'état de surface soient les plus douces possibles, toute discontinuité étant un point faible pour l'attaque des phénomènes érosifs. Le problème des transitions est notamment abordé dans le rapport Floodprobe 3.1.2 auquel on pourra se référer [FLOODPROBE].

Une difficulté de traitement des transitions apparaît lorsque les maître d'ouvrages du tronçon conforté et celui de son appui (autre tronçon ou ouvrage) ne sont pas les mêmes.

4.4.2. Les modifications liées à une augmentation de la cote de la crête

Les principales solutions de surélévation d'une digue en remblai peuvent se résumer comme suit :

- Elargissement du remblai côté fleuve (figure 4.14) ou mer par mise en place de matériaux compactés (matériaux étanches ou adjonction d'un masque d'étanchéité si une étanchéité est recherchée) et d'un dispositif de protection contre l'érosion sur le talus et à son pied ; cette solution est à privilégier si l'on souhaite améliorer l'étanchéité du remblai et/ou sa protection contre l'érosion du cours d'eau ou de la

mer ; la condition nécessaire est une emprise suffisante de ce côté du remblai (niveau foncier mais également technique selon proximité du lit mineur par exemple).

- Elargissement du remblai coté zone protégée qui se fera alors avec des matériaux tout venant et si possible drainant. Cette solution est bien adaptée lorsque l'étanchéité du remblai est bonne et/ou le parement coté ZP en mauvais état.
- Surélévation limitée uniquement en crête dans le cas où l'augmentation de cote est faible, soit par simple surélévation du remblai (quelques dizaines de cm) lorsque la largeur en crête est excédentaire, soit par la création d'un mur parapet destiné à retenir l'eau (figure 4.15). Dans les deux cas, il y a lieu de veiller à la continuité entre l'étanchéité du remblai existant et la surélévation (remblai ou béton) et à la stabilité mécanique de l'ouvrage rehaussé.

Le projet de surélévation d'une digue en remblai pourra consister à mettre en œuvre l'une de ces 3 solutions ou un mélange de ces solutions en fonction de paramètres propres à chaque site et ouvrage et en particulier selon les critères suivants :

- Emprise foncière disponible
- Proximité du lit mineur dans le cas fluvial
- Pathologie et/ou insuffisance du remblai
- Coût du projet (possibilité d'utiliser des matériaux du site par exemple)

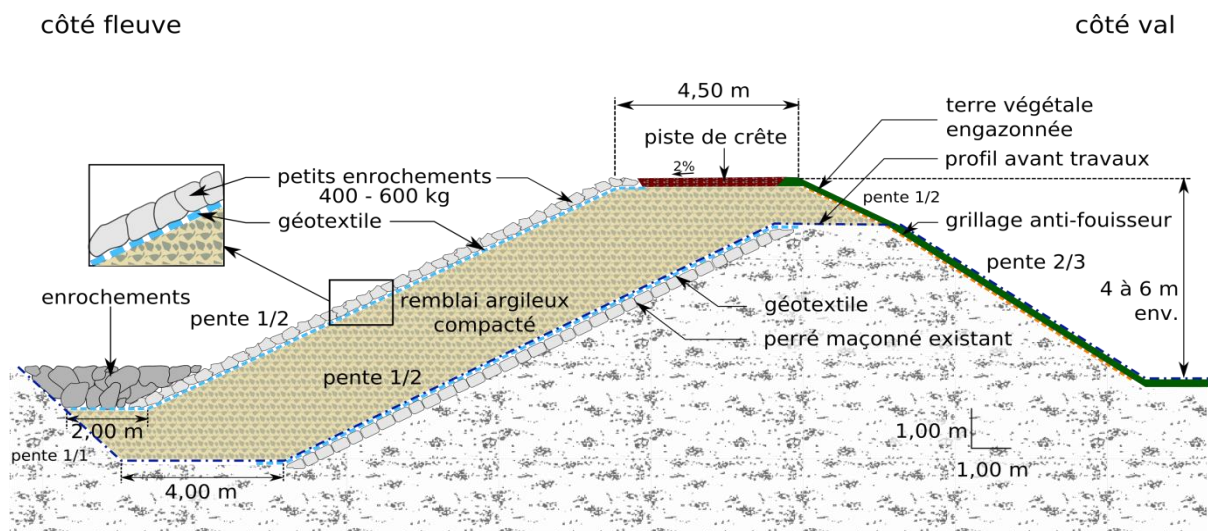


Figure. 4.14 : Surélévation d'une digue avec recharge coté fleuve

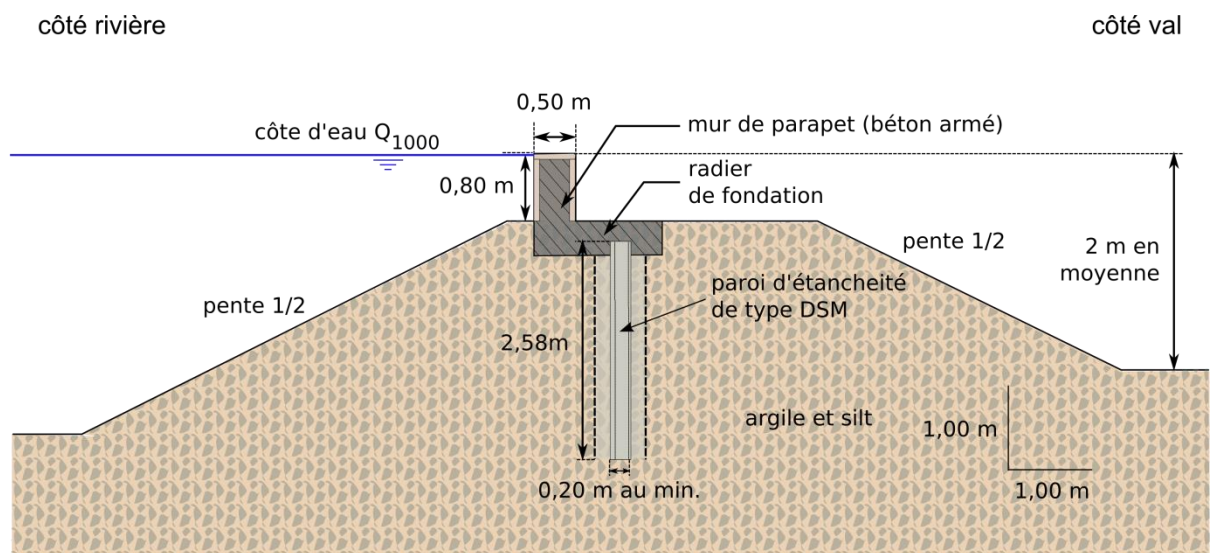


Figure. 4.15 : Surélévation d'une digue par un mur parapet

4.5. Réalisation des travaux

4.5.1. Contractualisation avec l'entreprise

4.5.1.1. Consultation des Entreprises,

Lorsque le maître d'ouvrage est l'État, une collectivité locale ou un établissement public, la consultation des entreprises doit être faite suivant les procédures du Code des Marchés publics (CMP). Il en va de même lorsqu'un opérateur est chargé d'une mission de service public relevant d'un maître d'ouvrage susnommé. Pour le privé, le CMP ne s'applique pas néanmoins les principes généraux du CMP restent intéressants à appliquer.

La consultation se fait par le biais d'une procédure de mise en concurrence des entreprises. Cette procédure peut être un appel d'offre ouvert, un dialogue compétitif ou une procédure dite adaptée dans le code des marchés publics. Cette procédure débouche sur un contrat entre le maître d'ouvrage et l'entreprise qui peut avoir la forme d'un marché à quantités définies, un marché à commande ou un accord cadre. L'accord cadre et le marché à commandes offrent un cadre juridique intéressant pour maîtriser les prix sur des prestations homogènes et apporter une souplesse pour faire des travaux d'urgence et de crise.

4.5.1.2. Choix des entreprises

Le choix des entreprises est déterminant dans la réussite des chantiers. Il est basé sur la notion d'entreprise « mieux disante » permettant la meilleure garantie technico-économique de la réalisation des travaux. Un règlement de consultation précise les critères qui vont conduire à ce choix.

Exemple de critères pour un confortement en pieds de digues :

Critère d'attribution	Pondération
<p>La valeur technique des prestations, notée sur 60 et appréciée au vu du mémoire justificatif et notamment de la notice technique, du SOPAE³⁶ et du SOSED³⁷ demandés au 3-1-2 du règlement de la consultation et plus particulièrement :</p> <ul style="list-style-type: none">• la méthodologie envisagée pour la réalisation des travaux d'enrochement et d'enlèvement de l'aménagement hétéroclite (note sur 15, en fonction de la garantie offerte par la méthodologie - organisation, moyens matériels, contrôles in situ),• la méthodologie envisagée pour la réalisation des travaux d'abattage, de dessouchage ou d'arrachage d'arbres (note sur 10),• la méthodologie envisagée pour la réalisation des remblais (note sur 10),• la méthodologie de gestion du chantier côté Loire au vu des difficultés d'accès et la sécurité du chantier vis-à-vis de la piste cyclable (note sur 10),• les précautions prises par rapport à l'environnement (bruit, poussières, pollution, riverains, acheminements...) (note sur 10),• le tri sur le site des différents déchets et les modalités pour assurer le transport, le contrôle, le suivi et la traçabilité (note sur 5).	60 %
<p>Le prix des prestations : apprécié au vu du bordereau des prix, du détail estimatif, des sous-détails de prix unitaires et de décompositions des prix forfaitaires, noté sur 40 et défini par la formule suivante :</p> <p>$40 \times (2,5 - 1,5 \times M / MIN)$ ou $M = \text{offre considérée}$ et $MIN = \text{offre minimale}$</p>	40 %

³⁶ Schéma Organisationnel d'un plan Assurance Environnement

³⁷ Schéma d'organisation et de Suivi de l'Evacuation des Déchets

4.5.1.3. Assurance qualité liée à la construction/au confortement d'un ouvrage

Le maître d'œuvre demande à l'entreprise le schéma organisationnel de son plan d'assurance qualité (SOPAQ).

Le maître d'œuvre est unique et agréé sur les ouvrages hydrauliques (cf. articles R. 214-148 à R. 214-151 du code de l'environnement). Il doit fournir un SOPAQ précisant notamment le niveau d'habilitation lié à l'agrément des intervenants en maîtrise d'œuvre.

A partir de ces éléments le maître d'ouvrage peut construire un schéma d'organisation au niveau de chaque chantier désignant tous les acteurs et leur niveau de responsabilité.

4.5.1.4. Stipulations essentielles du CCTP

Le CCTP doit préciser l'environnement de l'ouvrage (localisation et exposition), sa durée d'utilisation, les caractéristiques des matériaux et constituants utilisés, les modalités imposées de mise en œuvre, les contrôles intérieurs à effectuer et les contrôles de conformité prévus ainsi que le référentiel normatif. Les paragraphes suivants décrivent les stipulations essentielles devant être contenues dans un CCTP de travaux de digue. Les protections en béton ou en maçonnerie des ouvrages en terre du paragraphe b) relèvent du paragraphe ouvrages en béton ou maçonnerie a).

- Protection du chantier contre les eaux

Le CCTP doit traiter des points suivants concernant la protection du chantier contre les eaux:

- captages des résurgences et des infiltrations et rejets hors des différentes fouilles
- protection du chantier contre les eaux de ruissellement, le cours d'eau ou la mer. Le CCTP précisera une cote (correspondant par exemple au niveau de crue décennale calculée sur la période des travaux, ou à un niveau de plus haute mer) jusqu'à laquelle le chantier doit être protégé par l'entrepreneur.

- Ouvrages en terre

Les ouvrages en terre sont des ouvrages massifs de matériaux naturellement variables quant à leurs caractéristiques intrinsèques et à leur aptitude à la mise en œuvre selon les conditions environnementales, pour lesquelles il s'agit d'encadrer le choix des constituants (fuseau de spécifications) et l'exécution par l'entreprise des prescriptions.

Le CCTP définit les caractéristiques des matériaux (corps de remblais, noyau étanche, base drainante) résultant des études de projet (granulométrie, masse volumique, perméabilité, angle de frottement, cohésion).

Le CCTP doit rappeler que, avant mise en place du remblai, il convient d'assainir et de nettoyer la surface du fond de fouille, de réaliser un lever détaillé et d'effectuer la réception des fouilles .

Il doit imposer l'identification d'accidents géologiques probables, tels que fractures ou karsts dans le sol support (vides ou remplies de matériaux érodables), matériaux solubles, sols compressibles ou perméables.

Le CCTP doit imposer l'exécution d'une ou plusieurs planches d'essai destinées à fixer les conditions de mise en œuvre des matériaux avec le matériel proposé par l'entreprise pour atteindre la compacité qu'il spécifie. Le CCTP doit fixer les dimensions de la planche d'essai.

Le CCTP doit préciser que les sols de fondations doivent être préalablement compactés puis scarifiés avant la mise en place des remblais terrestres qui doivent être exécutés selon la

méthode du remblai excédentaire ou de la mise en œuvre en w sur tous les talus afin d'obtenir des remblais parfaitement compactés jusqu'à la limite finale du talus.

Le CCTP doit définir les points sensibles (points critiques et points d'arrêts), la répartition des contrôles et insister sur les modalités du contrôle du compactage en référence au GTR 92. Il caractérise également les constituants complémentaires tels que les géotextiles et les enrochements.

Le CCTP impose le regroupement de tous les éléments relatifs à l'exécution dans un dossier de récolement pour préparer et faciliter les opérations de maintenance de l'ouvrage. Ceci est d'autant plus important que de nombreux éléments ne sont plus accessibles après la réalisation (levé des fouilles, position du dispositif drainant, contrôle des remblais, type et implantation des appareils d'auscultation). Ce dossier doit aussi regrouper les descriptions des incidents survenus pendant le chantier tels que crues, gel, arrêts pour pluies.

- Ouvrages en béton ou en maçonnerie

Un ouvrage en béton ou maçonnerie est à réaliser selon les référentiels des ouvrages d'art compte-tenu des enjeux en termes de résistance et de durabilité. Pour les ouvrages en béton, le CCTP doit ainsi intégrer essentiellement les spécifications d'exécution sur la base des exigences de la norme d'exécution EN 13670 et des prescriptions du fascicule 65 du CCTG. Il est notamment indispensable que les spécifications des bétons soient faites d'une manière rigoureuse par partie d'ouvrage pour bien encadrer le choix des formules par l'entreprise.

L'attention doit être portée sur la responsabilité du maître d'ouvrage dans la chaîne de spécification du béton. Le CCTP (rédigé sous la responsabilité du maître d'œuvre) traduit en spécifications techniques les exigences formulées et formalisées par le maître d'ouvrage dans son programme. Pour le matériau béton, ces exigences portent tout d'abord sur la Durée d'Utilisation de Projet (notion introduite dans l'Eurocode 0). Pour les infrastructures maritimes telles que les digues, comme pour l'ensemble des ouvrages de génie civil, la Durée indicative d'Utilisation de Projet est fixée à 100 ans. De manière générale, le choix de cette Durée d'Utilisation de Projet devrait être effectué par le maître d'ouvrage, avec un dialogue éventuel avec son maître d'œuvre; classiquement pour les ouvrages hydrauliques, y compris en remblai des valeurs supérieures à 100 ans sont utilisées. Elles portent également sur l'environnement dans lequel se trouvera l'ouvrage (les classes d'exposition introduites dans la norme NF EN206-1 définissent les environnements possibles et leur niveau d'agressivité). La définition des niveaux de prévention vis-à-vis des risques d'alcali-réaction [LCPC 1994] et de réaction sulfatique interne [LCPC 2007] relève également de la responsabilité du maître d'ouvrage.

Parties d'ouvrages	Classes d'exposition NF EN 206-1 + RSI	Classe de résistance	Teneur minimale en liant équivalent vis-à-vis de la durabilité	Caractéristiques complémentaires du ciment vis-à-vis de la durabilité	Eeff/Leq vis-à-vis de la durabilité	Caractéristiques complémentaires
Fondations profondes	XA2 XC2 XH3	C35/45	385 kg	ES	0,45	RAG (B) RSI (Cs)
Semelles	XA2 XC4 XH3	C30/37	330 kg	ES	0,50	RAG (B) RSI (Cs)
Appuis	XC4 XH3	C35/45	350 kg	ES	0,50	RAG (B) RSI (Cs) EQP

Tableau 4.7 – Spécifications relatives au béton utilisé pour les fondations d'ouvrages, vis-à-vis des classes d'exposition, et des risques d'alcali-réaction et de réaction sulfatique interne.

Le CCTP fixe les conditions d'agrément des centrales à béton (marque NF), des formules de béton (référence ou épreuve d'étude) et impose l'exécution d'une ou plusieurs épreuves de convenance destinées à vérifier a priori que le béton défini par sa formule nominale et fabriqué, transporté et mis en œuvre dans les conditions du chantier, satisfera aux exigences du marché. L'exécution d'un élément témoin permet de contrôler la vibration, la cure, les parements et l'enrobage des armatures. Les enrobages minimaux des armatures (dimensionnés conformément à l'Eurocode 2), qui sont un paramètre fondamental pour garantir la durabilité des structures en béton armé, sont également fixés dans le CCTP.

Il impose que le PAQ de l'entreprise comprenne une procédure de bétonnage détaillée (coffrages et parements, mise en œuvre du béton, cure et décoffrage, reprise de bétonnage, traitement des non-conformités) intégrant le plan de contrôle intérieur et définit les modalités de contrôle de conformité.

Le CCTP doit traiter exhaustivement des études d'exécution, de la fourniture et de la mise en œuvre de l'ensemble des constituants et de la réception.

Pour les ouvrages en béton, le CCTP pourra être rédigé à partir de la base de données PETRA du SETRA régulièrement mise à jour notamment sur le plan normatif.

Pour les ouvrages maritimes, on pourra aussi se référer au Guide d'utilisation du béton dans les ouvrages maritimes [CETMEF, 2009].

Pour les ouvrages en maçonnerie, le CCTP précisera que les mortiers utilisés doivent être conformes à la norme NF EN 998-2.

4.5.2. Exécution des travaux

4.5.2.1. Phase préparatoire

1) Etudes d'exécution :

En fonction du niveau atteint en phase projet par les études de dimensionnement, des études complémentaires seront à réaliser en phase d'exécution. Celles-ci pourront inclure :

- des reconnaissances complémentaires, si les reconnaissances en phase d'avant-projet et de projet s'avèrent insuffisantes,
- des études de détail des méthodes d'exécution et des contrôles devant y être associés,
- une identification des matériaux mis en œuvre lors des travaux : qualification des matériaux (remblai ou ouvrages en maçonnerie ou en béton), quantification des stocks disponibles, vérification de l'adéquation des caractéristiques matériaux par rapport aux hypothèses prises en phases projet en phase d'avant-projet et de projet.

En phase d'exécution, l'accompagnement classique de l'ingénierie géotechnique est constitué par la mission de type G3 (étude et suivi géotechnique d'exécution) au sens de la norme NF P 94-500, qui doit être réalisée avec exécution en parallèle des investigations géotechniques nécessaires à cette mission. Cette mission est confiée à l'entrepreneur qui réalise le ou les ouvrages géotechniques sauf disposition contractuelle contraire.

2) Qualité :

C'est au cours de la préparation du chantier que sont définies les dispositions spécifiques à mettre en œuvre par les entreprises pour l'assurance de la qualité pendant les travaux. Ces dispositions sont notamment détaillées dans la Plan d'Assurance Qualité (PAQ), soumis à l'acceptation de la maîtrise d'œuvre, et le plan de contrôle établi par le maître d'œuvre.

Le PAQ, qui doit être conforme à la norme NF X 50-164 (Guide pour l'établissement d'un Plan d'Assurance Qualité), est constitué de trois types de documents :

- une note d'organisation générale de chantier, précisant notamment les coordonnées des parties concernées (maître d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprises - figure 4.16), l'affectation des tâches aux différentes entreprises et fournisseurs, les moyens mis en œuvre, la nature des documents remis ou tenus à disposition du maître d'œuvre, ainsi que la liste des documents d'exécution, la hiérarchisation des points sensibles propre au chantier, l'articulation des actions de contrôle intérieur de l'entreprise avec celles du contrôle extérieur du maître d'œuvre (en donnant notamment les points critiques et les points d'arrêt) et les principes de gestion des anomalies ;
- une ou des procédures d'exécution définissant les moyens et les conditions de réalisation des travaux (notamment modes opératoires, méthodologies et instructions, ainsi que les liaisons entre procédures),
- des documents de suivi d'exécution et de résultats, répondant à la double nécessité de fournir au maître d'œuvre la preuve que les prescriptions et spécifications du marché ont bien été respectées, afin de donner l'assurance que les travaux réalisés sont bien conformes au marché et aux règles de l'art, ainsi que de recueillir les données nécessaires à l'établissement du dossier de récolement qui constitue la mémoire du chantier.

Le contenu du document est à adapter à la nature du chantier (taille, complexité, enjeux). Pour les petits chantiers, les documents de suivi d'exécution ne rendront compte que des points sensibles.

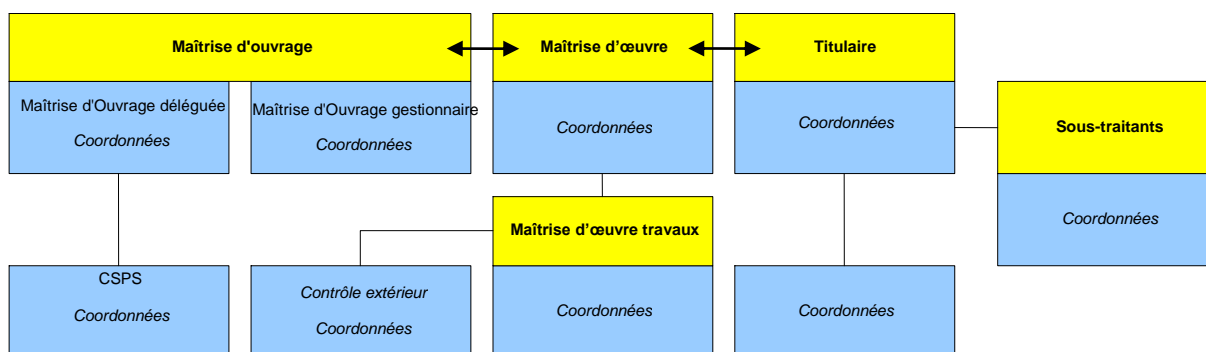


Figure. 4.16 : Exemple d'organigramme chantier

Le plan de contrôle du maître d'œuvre constitue un document d'harmonisation entre le contrôle intérieur des entreprises et le contrôle extérieur. Il précise les obligations de chacun, notamment en matière d'information réciproque des partenaires³⁸.

³⁸ Dans la mesure où la réalisation de travaux sur une digue s'inscrit dans la vie de l'ouvrage avec des travaux « avant » et des travaux « après », il serait souhaitable que le maître d'ouvrage se préoccupe de la cohérence des différents documents et procédures. Pour le PAQ et le plan de contrôle, une certaine continuité/cohérence est souhaitable dans le temps, mais ce n'est pas forcément simple du fait des changements de maîtrise d'œuvre.

3) Travaux de préparation initiale :

Les travaux préparatoires consistent essentiellement en :

- l'aménagement des accès et circulations pour la desserte du chantier, y compris contrôle des accès et sécurité vis-à-vis des tiers,
- le piquetage et l'implantation des ouvrages,
- l'aménagement des emprises de la digue et des zones d'emprunt
- la protection du chantier contre les eaux (cours d'eau, mer, eaux souterraines ou de ruissellement....)

Pour les ouvrages hydrauliques existants plusieurs impératifs complémentaires doivent être abordés en phase préparatoire:

- ne pas détériorer les ouvrages (notamment lors de la création des accès ou de l'intervention sur la végétation), ou les remettre dans leur état initial à la fin du chantier en veillant à pouvoir le faire rapidement en cas de montée des eaux,
- maintenir la fonctionnalité de l'ouvrage pendant les travaux,
- gérer les usages et la sécurité,

Par ailleurs, le calendrier des travaux devra prendre en compte l'hydrologie ou les marées, les courants et les vagues, ainsi que les enjeux environnementaux.

4.5.2.2. *Déroulement des travaux*

A – Construction d'une digue en terre [CFGB, 2002]

Lors de la réalisation des ouvrages géotechniques, la supervision géotechnique d'exécution (mission G4 au sens de la norme NF P 94-500), réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière, comprend deux phases interactives :

- la phase Supervision de l'étude géotechnique d'exécution, qui émet un avis pour le visa donné par la maîtrise d'œuvre. Elle donne un avis sur la pertinence des hypothèses géotechniques de l'étude géotechnique d'exécution, des dimensionnements et des méthodes d'exécution, des adaptations ou des optimisations des ouvrages géotechniques proposées par l'entrepreneur, du plan de contrôle, du programme d'auscultation et des valeurs seuils ;
- la phase Supervision du suivi géotechnique d'exécution. Par interventions ponctuelles sur le chantier, en fonction des observations et des données fournies dans le cadre de la mission G3 (à la charge de l'entrepreneur chargé des travaux géotechnique), elle donne un avis sur la pertinence :
 - du contexte géotechnique ;
 - du comportement de l'ouvrage et des avoisinants ;
 - de l'adaptation ou de l'optimisation de l'ouvrage géotechnique proposée ;
 - de la prestation géotechnique du dossier des ouvrages exécutés (DOE) et des documents fournis pour le dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO).

Le projet est basé sur les résultats d'études géotechniques ponctuelles (fondation et zones d'emprunt) qui ne prennent pas complètement en compte la variabilité naturelle des matériaux du site ce qui conduira à s'adapter en continu aux conditions réelles du site. Le déroulement des travaux se déroulera en plusieurs phases successives ou concomitantes qui devront respecter les prescriptions générales suivantes :

- **Planches d'essais de compactage**

En début de chantier des reconnaissances et essais complémentaires sont à effectuer sur les matériaux prélevés sur le site pour préciser les résultats de l'étude géotechnique avant la réalisation de la planche d'essais qui constitue un élément essentiel de la préparation du chantier.

Le choix du compacteur est également un élément important, ils peuvent être classés en 3 catégories :

- Les rouleaux à pieds dameurs sont adaptés au compactage des sols fins.
- Les rouleaux vibrants lisses sont de préférence réservés aux sols granulaires.
- Les compacteurs à pneus conviennent à la majeure partie des sols mais les rouleaux lourds peuvent conduire à un phénomène de feuilletage et ceux plus légers à une action insuffisante en profondeur.

La planche d'essai est destinée à fixer les conditions de mise en œuvre du remblai en définissant notamment l'épaisseur des couches et le nombre de passages du compacteur qui sera retenu. La planche d'essai sera réalisée sur un sol décapé de sa terre végétale, si possible en dehors de l'emprise de la digue à réaliser et avec le matériel qui sera utilisé sur le chantier pour scarifier, régaler, niveler et compacter. On exécutera au moins 3 couches de remblai pour s'affranchir des effets d'assise et on testera deux ou trois épaisseurs de couche différentes. Des mesures de teneur en eau et de densité sèche seront réalisées sur ces couches par le même organisme et le même matériel que ceux prévus pour le contrôle du chantier lui-même. Ces mesures pourront être complétées par l'exécution d'une tranchée pour vérifier visuellement l'homogénéité de la couche et la bonne liaison inter-couches.

L'épaisseur des couches compactées dépend de la nature des matériaux et du type de compacteur. Les règles de compactage pour l'utilisation de matériaux en remblai sont notamment données dans le guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme (GTR). A titre indicatif, pour les sols fins l'épaisseur des couches compactées pourront rester comprises entre 0,20 et 0,40 m avec un nombre de passages compris entre 6 et 12 ; les sols plus grossiers permettent en général un compactage par couches plus épaisses.

- **Traitement de la fondation**

Le traitement de la fondation se ramène, en général, au terrassement des fouilles de l'assise de la digue et à la réalisation de la clé d'étanchéité ; dans certains cas, le projet prévoit des traitements particuliers (paroi moulée, rideau d'injection...), l'exécution de ces travaux spécifiques ne sera pas abordée ici.

Cette phase de « préparation » de la fondation est essentielle et devra faire l'objet d'un contrôle spécifique notamment par la réception du fond de fouille avant le commencement de la mise en place du remblai (point d'arrêt du chantier)

- **Exécution du remblai**

Si les matériaux proviennent de ballastières sur le site, on veillera à ce que les zones d'emprunt fassent l'objet d'un décapage préliminaire de la terre végétale de manière à ce que les matériaux mis en remblai ne contiennent pas de débris végétaux, racines, matières organiques, tourbe... Les zones d'emprunts seront exploitées de manière à ce que les matériaux soient, autant que possible, protégées d'apports d'eau extérieur (pluie, ruissellement, cours d'eau...) et gardent ainsi une teneur en eau compatible avec les conditions de compactage définies au préalable. Dans le cas d'apport de matériaux de carrière un contrôle de conformité avec les caractéristiques du projet sera réalisé périodiquement.

La mise en place des matériaux et leur compactage seront effectués conformément aux prescriptions issues des planches d'essais en vérifiant que la nature des matériaux utilisés pour la planche d'essais est bien représentative des matériaux réellement mis en place. Au-delà du contrôle de l'épaisseur des couches et du nombre de passes du compacteur, la densité et la teneur en eau du remblai compacté seront mesurés régulièrement et les prescriptions de mise en place et de compactage seront modifiées et/ou adaptées si la densité cible n'est pas atteinte. **On rappelle ici qu'en aucune manière le passage d'une pelle hydraulique ou d'un bulldozer à chenille ne peut être considéré comme un compactage du matériau mis en place.**

- **Exécution des filtres, drains et protections sur les parements ou en crête**

Le mode de réalisation des filtres, drains et protections est spécifique à chacun de ces éléments et des matériaux qui les constituent, nous n'aborderons pas ici les détails d'exécution de ces organes essentiels à la sûreté et à la longévité de ces ouvrages ; toutefois on rappelle quelques éléments généraux qui doivent être respectés :

- Vérifier la qualité et la conformité aux prescriptions du CCTP des matériaux utilisés qu'ils soient manufacturés (géosynthétiques...) ou proviennent de carrières (enrochements...)
- Prévoir un lieu d'entreposage adéquat pour ces matériaux dans l'attente de leur mise en place, en particulier veiller à ce que les rouleaux de géosynthétiques soient posés à plat dans leur emballage qui les préserve des rayons UV.

- **Cas particulier des opérations de confortement ou réhabilitation**

En phase de réalisation de travaux, la différence entre le confortement et le neuf porte sur la nécessaire vérification de la conformité de l'existant au projet et au recours à des techniques particulières d'injection, de comblement de cavités, de réparation de surfaces, de rejointoiement, de traitement d'affouillement pour lesquelles il convient de se référer aux guides spécifiques.

Une attention particulière devra être apportée aux points suivants :

- transition avec l'ouvrage existant,
- reconstruction partielle de l'environnement de l'ouvrage (ex. : reconstitution des berges),
- renforcement des pieds de digues,
- création de déversoir de sécurité.

B - ouvrages béton ou en maçonnerie

Il est essentiel de disposer d'un référentiel travaux approuvé comprenant les notes de calculs, les plans, ainsi que les PAQ des entreprises.

Il s'agit de vérifier sur le terrain par de la surveillance, des audits et des contrôles l'application de ce référentiel et en particulier des procédures d'exécution.

Une attention particulière doit être apportée à l'acceptation des matériaux et équipements et aux moyens et méthodes de mise en œuvre en ayant notamment recours aux épreuves de convenances prévues au CCTP.

Il sera vérifié que l'ensemble des contrôles de conformité est effectivement réalisé et traité notamment en cas de non atteinte des spécifications.

Le guide Mémoar (Mémento pour la mise en œuvre sur ouvrages d'art) du SETRA [2005] rassemble sous forme de fiches les actions à entreprendre par technique.

C – Suivi et contrôle des travaux

L'entreprise est chargée de la bonne réalisation des ouvrages. Pour ce faire, elle met en place un contrôle interne et externe. Le maître d'œuvre, garant de la conformité de l'ouvrage répondant au besoin du maître d'ouvrage, se charge du contrôle extérieur.

Lorsque plusieurs acteurs interviennent sur un chantier, un contrôle coordonné de la sécurité est assuré par le coordonnateur sécurité et protection de la santé (CSPS).

Les principales vérifications et contrôles à effectuer pendant les travaux, selon la nature de l'ouvrage concerné, sont les suivantes :

- Vérifications pour le remblai (en lien avec missions normalisées G3 et G4 en introduction du 4.5.2.2)
 - Qualité du décapage de la terre végétale et élimination des éléments organiques
 - profondeur de la clé d'étanchéité
 - qualité et conformité avec le projet des matériaux d'emprunt
 - compactage du remblai avec notamment un suivi de la teneur en eau et de la densité des matériaux mis en place
 - qualité et conformité au CCTP des matériaux des drains et filtre
 - profil en travers et caractéristiques géométriques définitives du remblai
- Vérifications pour les ouvrages en béton ou en maçonnerie
 - qualité et dosage des composants du béton : qualité des granulats, nature et dosage du ciment et teneur en eau du béton
 - résistance à la compression des bétons (valeurs à 3,7 et 28 jours)
 - ferrailage : nombre, position, recouvrement, enrobage et section des aciers
 - qualité des coffrages et reprises
 - qualité des enrochements ou pierres pour la maçonnerie
- Vérification pour les protections minérales
 - Qualité des enrochements (CCTP et NF EN 13383-1 et 2)
 - Respect des épaisseurs
 - Respect des cotes notamment ancrage et/ou fondation
 - Contrôle remplissage des gabions
 - Contrôle mise en œuvre et appareillage des éléments rocheux

4.5.3. Réception de l'ouvrage

4.5.3.1. Introduction sur la réception d'un ouvrage

A l'issue des travaux, le maître d'ouvrage réceptionne les ouvrages et en prend possession (transfert de responsabilité propriétaire de l'entreprise vers le maître d'ouvrage). La réception peut aussi être prononcée de fait lorsqu'il y a mise en fonctionnement de l'ouvrage au profit du maître d'ouvrage. En pratique pour les digues, l'ouvrage devient opérationnel avant la réception et il devient difficile d'établir la répartition des responsabilités.

Le maître d'œuvre apporte une assistance au maître d'ouvrage lors de la réception ainsi que pendant la période de garantie de parfait achèvement. Cette assistance comprend :

- les opérations préalables à la réception des travaux;
- le suivi des réserves formulées lors de la réception des travaux jusqu'à leur levée;
- l'examen des désordres signalés par le maître de l'ouvrage;
- la constitution du dossier des ouvrages exécutés nécessaires à l'exploitation de l'ouvrage, à partir des plans conformes à l'exécution remis par l'entrepreneur, des plans de récolement

ainsi que des notices de fonctionnement et des prescriptions de maintenance des fournisseurs d'éléments d'équipement mis en œuvre.

Il est nécessaire que le gestionnaire soit associé aux opérations de réception.

4.5.3.2. *Dossier des ouvrages exécutés (récolement) :*

Le dossier des ouvrages exécutés doit permettre de compléter le dossier d'ouvrage pour des digues existantes en précisant notamment les parties non visibles qui auraient pu être constatées lors du chantier. Ces informations doivent permettre de mettre à jour les bases de données relatives à la gestion des digues du type du SIRS Dignes. Par ailleurs, lorsque les travaux ont un impact sur le niveau de protection, il convient également de mettre à jour le niveau de sûreté.

On attire l'attention sur l'extrême importance de ces informations qui constituent une partie essentielle du dossier d'ouvrage, et doivent être intégrées à tous les diagnostics ultérieurs.

Le dossier de récolement permet de préparer et de faciliter les opérations de maintenance de l'ouvrage.

- rapport de fin d'exécution du chantier, à inclure dans le dossier d'ouvrage
- contenu du dossier : levé des fouilles, contrôle des remblais, implantation d'éventuels appareils d'auscultation, description des incidents survenus pendant le chantier, incidence de la météorologie sur la réalisation du chantier, mise en œuvre d'ouvrages particuliers, ...
- éventuellement notice de fonctionnement des organes annexes, ou dispositifs de surveillance ou d'auscultation, formation du personnel au fonctionnement des organes annexes...

4.5.3.3. *Dossier d'intervention ultérieure sur l'ouvrage*

Le dossier d'intervention ultérieure sur l'ouvrage précise les modalités d'entretien de l'ouvrage et de surveillance spécifique. Il doit prévoir les possibilités de renforcements ultérieurs.

4.5.4. **Contrôle des travaux**

A titre d'information, on rappelle que le service en charge du contrôle des ouvrages hydrauliques peut intervenir en phase d'exécution des travaux, afin de s'assurer de la conformité de ceux-ci au projet autorisé.

Par ordre chronologique, les interventions du service de contrôle peuvent porter sur les points suivants :

- Suivi et instruction des modifications par rapport au projet autorisé (modifications de nature à modifier le fonctionnement ou le comportement de l'ouvrage)
- Éventuellement, visite en cours de chantier (par exemple, fond de fouille ou suites données à modification importante)
- Visite sur site une fois l'ouvrage achevé, portant sur la conformité de l'ouvrage au projet autorisé.

5. Vie de l'ouvrage

5.1. La cohérence hydraulique du système de protection

La protection contre les crues de cours d'eau ou les submersions marines peut quelque fois être réalisée par un ensemble d'ouvrages. On parle alors de système de protection.

Ce système de protection peut s'avérer complexe pour différentes raisons :

- il est composé d'ouvrages dont la fonction de protection n'est qu'une fonction parmi d'autres : c'est notamment le cas de remblai d'infrastructure (route, voie ferrée et canaux),
- il est géré par plusieurs entités : le découpage pouvant être longitudinal ou transversal,
- il est constitué de plusieurs lignes de défense successives qui ne sont pas toutes réalisées avec des ouvrages conçus pour contenir une inondation,
- quelques éléments naturels ou pseudo naturels ne faisant l'objet d'aucun entretien ou que de façon occasionnelle complètent le système de protection,
- des ouvrages qui ne sont pas des digues de protection modifient les sollicitations au niveau de la digue, tels que les épis, les seuils en rivières, les brises lames en mer, la plage ...

Lorsqu'un gestionnaire n'a qu'une maîtrise partielle du système de protection, il a intérêt à connaître les éventuelles conséquences des dysfonctionnements des ouvrages dont il n'a pas la charge sur l'exploitation de ses propres ouvrages. Pour illustrer cela, la surveillance d'un ouvrage peut être perturbée en cas d'inondation causée par la défaillance d'un ouvrage, généralement en amont mais pas nécessairement, par exemple si la route d'accès à cet ouvrage est rendue impraticable. Les conséquences peuvent aussi être graves car la défaillance peut, par effet domino, entraîner la défaillance d'un autre.

Il s'agit donc pour chaque gestionnaire de digues de bien comprendre le fonctionnement hydraulique dans lequel s'inscrivent ses ouvrages. Le chapitre 3.3.1 présente l'analyse de la fonction hydraulique que le responsable se doit de mener. Cette analyse est utilisée pour l'étude de dangers et à l'échelle de la zone protégée.

Bien entendu, les différents gestionnaires ont tout intérêt à mutualiser leurs moyens matériels et humains et à tendre vers une gestion unique de l'ensemble du système de protection. Il est alors très souhaitable qu'une convention définisse les relations et les échanges entre ceux-ci. Leur rapprochement visera à assurer de façon pérenne une gestion globale et cohérente de l'ensemble du système de protection.

De plus, une harmonisation des actions des gestionnaires en cas de crue ou de tempête peut faciliter la gestion de la mise en sécurité des populations par les autorités en charge de celle-ci.

Les éléments de connaissance que doit acquérir un maître d'ouvrage sur l'environnement de son ouvrage sont :

- le niveau de protection (voir la définition au chapitre 4.4.1) des différents éléments du système de protection. Ce niveau de protection ne pourra être connu qu'à l'aide d'une étude topographique et hydraulique. On veillera à prendre une marge de sécurité, eu égard aux imprécisions des études et aux conditions d'écoulement qui peuvent être variables, notamment au cours d'un événement,
- la liste des ouvrages associés contribuant au bon fonctionnement de ses digues et leur état (ex : pertuis vanné pour le franchissement transversal d'un affluent),

- l'impact d'une brèche d'un élément du système sur l'ensemble des ouvrages composant le système,
- les itinéraires de repli pour veiller à la sécurité de ses agents.

Ces éléments devront nécessairement être acquis dans le cadre de l'étude de dangers.

5.2. Surveillance des digues en période normale

5.2.1. Visites d'ordre réglementaire, périodicité et traçabilité des visites

Le Tableau 5.1 présente une synthèse des obligations en matière de gestion et de surveillance, pour les responsables de digues, par la réglementation en vigueur à la parution du guide.

Obligations	Classe de la digue concernée par l'obligation	Périodicité maximale de l'obligation en fonction de la classe
Constitution d'un <u>dossier d'ouvrage</u> (études de conception ou de diagnostic, plans topographiques, description de l'organisation pour le suivi, consignes de surveillance, tous rapports, etc.).	A, B, C et D	Mise à jour permanente du dossier d'ouvrage
Élaboration de <u>consignes écrites</u> de surveillance en condition courante et en crue. Ces consignes ainsi que leur mise à jour sont à soumettre à l'approbation préalable du préfet pour les digues de classe A, B ou C.	A, B, C et D	Mise à jour de la consigne en cas de nécessité Approbation par le Préfet sauf classe D
Élaboration d'un <u>diagnostic initial de sûreté</u> (avant déc. 2009)	A, B et C	Par définition unique
Production d'un <u>rapport de surveillance</u> , par le gestionnaire. Ce rapport est à transmettre au préfet.	A, B et C	1 an pour les A ; 5 ans pour les B et C
Conduite par un personnel ou un bureau compétent d'une <u>visite technique approfondie</u> (VTA).	A, B, C et D	1 an pour les A et B ; 2 ans pour les C ; 5 ans pour les D
Réalisation par un organisme agréé de la <u>revue de sûreté</u> comprenant un <u>examen technique complet</u> des parties d'ouvrage habituellement non accessibles (ouvrages traversants, berges ou pieds de talus immergés, ...).	A et B	10 ans
Déclaration au préfet des incidents ou <u>événements</u> affectant la digue et potentiellement dangereux. Le Délai de déclaration dépend de la gravité : <ul style="list-style-type: none"> - immédiat, pour les accidents, - sous une semaine pour les incidents graves, - déclaration annuelle pour les incidents. 	A, B, C et D	

Tableau 5.1 : obligations des propriétaires de digue en lien avec la surveillance des ouvrages

Dans ce cadre réglementaire, le gestionnaire de la digue doit réaliser un examen détaillé de son ouvrage dans le cadre du diagnostic initial de sûreté, d'une visite technique approfondie et, à fortiori si sa digue est de classe A ou B, d'une revue de sûreté. La définition du contenu de ces obligations figure au chapitre 3.1.2. Si un examen complet n'a pas été réalisé auparavant, l'ETC initial (classe A ou B) doit avoir lieu lors de la réalisation de l'EDD pour pouvoir intégrer un diagnostic dans l'analyse de risques.

Les consignes écrites définissent les modalités de surveillance des différentes parties de l'ouvrage et de ses abords, ainsi que leur périodicité. Il est conseillé de faire appel à des prestataires compétents pour l'exécution des visites techniques approfondies. Pour celles-ci, un compte-rendu précis, pour chaque partie de l'ouvrage et de ses abords, les origines possibles des éventuels désordres et les suites à donner en termes de surveillance, de travaux d'entretien, voire d'études si l'importance des désordres nécessite un diagnostic plus approfondi avant la réalisation de travaux de confortement. Il peut (doit) être fait référence aux comptes-rendus des examens techniques antérieurs.

A ces examens détaillés, le gestionnaire ajoute des visites dites "de routine", ou "programmées" *a priori* plus rapides. Leur intérêt réside principalement en l'observation des éventuelles évolutions des désordres déjà observés, voire en la découverte d'une nouvelle dégradation de l'ouvrage. La périodicité de ces visites est à définir par le gestionnaire de l'ouvrage dans les consignes. Les visites seront d'autant plus fréquentes que les enjeux de protection seront importants. Les crues, même mineures, sont évidemment une raison justifiant une visite supplémentaire (cf. § 5.5.4.2).

L'examen technique complet d'une digue concerne l'ensemble de l'ouvrage, notamment les pieds des berges en eau dans le cas des digues proches du lit mineur. Il concerne également les ouvrages englobés dans la digue, tels que tuyaux ou câbles, même s'ils appartiennent à un autre propriétaire.

Bien qu'elle ne soit pas imposée pour les digues, la tenue d'un registre permet au responsable de l'ouvrage de tracer ses actions de surveillance et d'entretien de l'ouvrage.

Sur ce registre, sont inscrits les principaux renseignements relatifs au quotidien de l'ouvrage, soit : les visites de surveillance approfondies ou de routine, les travaux d'entretien, les examens particuliers, les désordres constatés et tous les événements, notamment les crues ou les tempêtes. Il facilitera la rédaction du rapport périodique de surveillance et sera un support particulièrement utile pour témoigner de ses obligations de surveillance et d'entretien, notamment en cas de défaillance de l'ouvrage.

5.2.2. Justification, principe et méthode proposée pour l'examen visuel détaillé

Le guide « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations », édité par Cemagref-Editions [Mériaux et al, 2004] développe les actions à entreprendre pour assurer la pérennité des digues fluviales. Le présent chapitre s'en inspire grandement.

Bon nombre de désordres pouvant affecter une digue et ses ouvrages annexes se révèlent par des indices de surface : mouvements ou accidents de terrain (au sens le plus large), érosions et ravinements, zones de végétation singulière, suintements, terriers de fousseurs, sorties de canalisation, fissures, déplacements, etc. L'examen visuel constitue le meilleur moyen de repérer de tels indices et s'avère incontournable pour établir un état initial de la digue puis en permettre le suivi ultérieur.

Le principe général de cet examen par le gestionnaire consiste à parcourir intégralement à pied le linéaire de la digue, en répertoriant toutes les informations visuelles sur les désordres ou les présomptions de désordre affectant l'une ou l'autre de ses composantes. Lors de la première visite, il s'agit de réaliser un état des lieux par un parcours méthodique de la digue. Il est vivement souhaitable de disposer pour cela d'un plan topographique détaillé afin d'y reporter les désordres constatés. Ces plans faciliteront le suivi de l'évolution des désordres lors des visites suivantes. Les désordres peuvent être décrits à l'aide de fiches et de photographies.

Pour les digues fluviales en remblai, les points à observer sont répertoriés dans le tableau 5.2 extrait du guide pour la surveillance, l'entretien et le diagnostic des digues de protection contre les inondations [Mériaux et al, 2004], regroupés selon les mécanismes de rupture redoutés et pour les trois différentes parties d'ouvrage à examiner.

Pour les murs en béton ou en maçonnerie, les désordres que l'on cherche à identifier peuvent être regroupés en trois familles : les désordres structuraux, les affouillements de leur fondation et les dégradations locales. Les observations à faire sont synthétisées dans le tableau 5.3 issu du même guide.

Pour les digues bordées par le cours d'eau et pour un examen approfondi, la surveillance sera complétée par :

- une reconnaissance par barque (cas d'un pied de talus subvertical, inaccessible et/ou boisé) ;
- une visite subaquatique (cas d'un perré ou d'une protection de pied se prolongeant sous le niveau d'étiage).

Enfin, la plupart des digues sont aussi occupées par des ouvrages situés à proximité de la digue ou encastrés dedans. Ces ouvrages singuliers demandent une attention particulière. Il peut s'agir de maisons, de constructions diverses, de batardeaux, de débouchés ou de regards de galerie ou de canalisation. Le gestionnaire de la digue définira, si possible par convention avec chaque responsable, les modalités de surveillance, d'exploitation en toutes circonstances et d'entretien de l'ouvrage singulier considéré.

5.2.3. Conditions et moyens de mise en œuvre

Les visites de surveillance doivent se dérouler après un dégagement soigné de la végétation herbacée et arbustive afin de bénéficier de conditions de visibilité optimales.

L'équipe de terrain est formée d'une brigade de deux (ou trois) agents pour garantir l'exhaustivité et la pertinence de l'inventaire et pour la sécurité des opérations.

Le repérage peut se faire à l'aide d'un Topofil (dispositif à fil perdu), complété d'un ou deux décamètres. L'utilisation d'un récepteur GPS portable est intéressante si toutefois les conditions d'utilisation du GPS sont favorables.

En préalable à la visite de surveillance, il est indispensable de se munir :

- des plans et des profils de la digue qui permettront le repérage et le report des observations - plan au 1/500 ou au 1/1000 ;
- des plans de détail des ouvrages particuliers (vannes, clapets, déversoirs) ;
- des documents contenant les observations de la (des) précédente(s) visite(s), pour comparer les évolutions de tel ou tel désordre.

Les agents doivent être équipés d'une tenue adaptée (bottes voire cuissardes le cas échéant, gilets de sauvetage pour les reconnaissances en barques ou sur des talus raides bordant le cours d'eau,...). Il est recommandé d'avoir un appareil photographique pour des prises de vue de désordres afin de comparer objectivement des observations à des dates successives.

Mécanismes de rupture	Points d'observation	Surveillance visuelle de routine		
		Talus côté rivière (fleuve)	Crête	Talus côté terre (val)
Surverse	Profil en long de la crête		Apparition / évolution d'irrégularités sur le profil : points bas, affaissements, ornières - état des batardeaux, portes , ...	
	Cote du cours d'eau, laisses de crue	Relevé de la cote le jour de la visite, existence de laisses récentes		
	Déversement		Etat du revêtement et de l'éventuel dispositif fusible (déversoir)	Etat du revêtement et du dissipateur aval (déversoir)
	Dispositif de revanche		Etat du dispositif de revanche : aspect du contact avec le corps de digue, stabilité	
Erosions de surface / affouillements	Effets sur talus des sollicitations hydrauliques fluviales	Verticalité du talus, déchaussement de la végétation rivulaire, apparition / évolution d'anse d'érosion	Fissuration longitudinale sur la crête au droit d'anse d'érosion	
	Protection de surface (revêtement)	Etat du revêtement de protection (perré, masque béton, enrochement,...)		Etat du revêtement de protection (écoulements fluviaux dans le Val)
	Protection de pied de talus	Etat de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches, enrochement,..)		
	Proximité et tracé du lit mineur / caractéristique de l'écoulement	A observer, si la levée est proche du lit mineur. Etat du contact avec le lit mineur. Direction et vitesse du courant.		
	Effets sur talus des sollicitations externes diverses	Apparition et/ou stade de développement de ravines, impacts de terrassement, ...		Apparition et/ou stade de développement de ravines, impacts de terrassement, ...
Erosion interne	Végétation	Nature, développement et stabilité, racines et souches, sur ou en pied de talus	Nature et développement, racines et souches	Nature et développement, racines et souches, sur ou en pied de talus
	Terriers	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente
	Canalisations / traversée	Débouchés de canalisation ou de traversées, aspect du contact avec le remblai, état du dispositif anti-retour éventuel	Regards de canalisation, passages en cavalier	Débouchés de canalisation ou de traversées, aspect du contact avec le remblai, état du vannage éventuel
	Confortement	Etat du confortement éventuel (recharge étanche, géomembrane)	Etat du rideau d'étanchéité éventuel (palplanches, paroi moulée, ...)	Etat du confortement éventuel (recharge drainante)
	Ouvrages singuliers	Etat, configuration : échelle, cale, rampe, bâtiment encastré, ...	Etat, configuration : porte, batardeau, bâtiment encastré, ...	Etat, configuration : puisard, mur de soutènement, bâtiment encastré, ...
	Fuite	Fontis	Fontis	Indices de fuite
Instabilité d'ensemble	Saturation, piézométrie	Apparition / évolution de zones humides, sources - Etat des piézomètres et mesure si possible	Etat des piézomètres et mesure si possible	Etat des piézomètres ou, en pied de talus, de puits ou fossé, et mesure si possible
	Mouvements de terrain	Apparition / évolution de fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés	Apparition / évolution de fissures longitudinales, affaissements - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides tels que chaussées, parapets, murets	Apparition / évolution de fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés
Conditions d'accès pour l'entretien	Accessibilité aux engins de terrassement (et d'entretien)	Etat de la voirie de pied de talus	Etat de la voirie de crête	Etat de la voirie en pied ou à proximité du pied de talus

Tableau 5.2 : Surveillance visuelle de routine des digues fluviales en remblai – présentation synoptique des points à observer [Mériaux et al, 2004]

Mécanismes de dégradation	Points d'observation	Surveillance visuelle		
		Parement côté rivière (fleuve)	Crête	Parement côté terre (val)
Mouvements structuraux	<i>Tassements</i>		Fissures avec ouverture ou glissement, irrégularités sur le profil, présence de points bas, affaissements	
	<i>Poussée des terres</i>	Fissures traversantes avec rejet	Fissures traversantes avec rejet	Fissures traversantes avec rejet
	<i>Retrait du béton</i>	Fissures traversantes sans rejet ni glissement	Fissures traversantes sans rejet ni glissement	Fissures traversantes sans rejet ni glissement
Affouillements / érosions	<i>Effets des sollicitations hydrauliques fluviales</i>	Déchaussement du pied du mur, sous-cavage, présence d'anse d'érosion	Fissures avec ouverture ou glissement, irrégularités sur le profil, présence de points bas, affaissements	
	<i>Effets de la surverse sur les déversoirs</i>		Pierres emportées sur le seuil déversant	Pierres emportées sur le coursier ou sur le radier, creusement de fosses d'érosion en aval du radier, sous-cavage du radier
	<i>Protection de pied de talus</i>	Existence, nature et état de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches, enrochement...)		
	<i>Proximité et tracé du lit mineur / caractéristiques de l'écoulement</i>	A observer. Mur en contact direct du lit mineur ? Méandres - courbe concave. Direction et vitesse du courant.		
Dégradations locales	<i>Vieillissement des pierres</i>	Pierres fissurées, délitées, éclatées par le gel ; pierres manquantes	Pierres fissurées, délitées, éclatées par le gel ; pierres manquantes	Pierres fissurées, délitées, éclatées par le gel ; pierres manquantes
	<i>Vieillissement des joints de maçonnerie</i>	Joints dégradés, mortier fissuré, poreux, s'effritant facilement	Joints dégradés, mortier fissuré, poreux, s'effritant facilement	Joints dégradés, mortier fissuré, poreux, s'effritant facilement
	<i>Végétation</i>	Nature et développement de la végétation dans les joints de maçonnerie	Nature et développement de la végétation dans les joints de maçonnerie	Nature et développement de la végétation dans les joints de maçonnerie
	<i>Ouvrages singuliers, canalisations, traversées, bâtiments encastés</i>	Repérage et caractérisation Débouchés de canalisation ou de traversées (existence, caractéristiques), aspect du contact avec le béton ou la maçonnerie, dispositif anti-retour	Repérage et caractérisation Regards de canalisation, passages en cavalier, état des rainures à batardeaux	Repérage et caractérisation Débouchés de canalisation ou de traversées (existence, caractéristiques), aspect du contact avec le béton ou la maçonnerie, vanne
	<i>Réparations</i>	Existence, nature des réparations (rejointoiement de maçonneries, remplacement de pierres, ...)	Existence, nature des réparations (rejointoiement de maçonneries, remplacement de pierres, ...)	Existence, nature des réparations (rejointoiement de maçonneries, remplacement de pierres, ...)
Dégradation des banquettes fusibles de déversoirs	<i>Tassements et érosions</i>		Régularité du profil en long, points bas sur le profil, ravines d'érosion dues à la pluie, dégradations liées au passage d'animaux ou de véhicules.	

Tableau 5.3 : Surveillance visuelle de routine des digues fluviales en maçonnerie et en béton – présentation synoptique des points à observer [Mériaux et al, 2004]

5.2.4. Limites de la surveillance visuelle

La limite de la surveillance visuelle réside dans le fait qu'elle ne fournit aucun élément sur les désordres - a priori liés à des caractéristiques du sol en profondeur et/ou au comportement du cours d'eau en crue au droit de la digue - qui ne produisent pas (ou qui n'ont pas encore produit) d'indices de surface (ex : zones de plus grande perméabilité dans le corps de digue ou en fondation, renard hydraulique n'ayant pas débouché, sollicitations par les courants de rive ...) ou dont les indices ont été effacés (ex : constructions ou ouvrages enfouis, accident ou mouvement de terrain remodelés, ancienne zone de surverse, ...).

Le risque de ne pas être exhaustif est, à ce titre, d'autant plus fort que la dernière mise en charge (grande crue) est ancienne : d'où l'intérêt de compléter les visites de surveillance à sec, dès que l'occasion s'en présente, par des visites en crue et/ou post-crue, ou post-tempête ou après un cycle de grandes marées dans le cas des digues maritimes.

5.2.5. Spécificités de la surveillance des murs en maçonnerie ou en béton

Les désordres peuvent être classés en trois familles : désordres structuraux, affouillements et dégradations locales. Les points d'observation correspondants sont présentés dans le tableau 5.3.

5.2.5.1. Désordres structuraux

Les désordres structuraux se traduisent par des fissures qui en général traversent l'ouvrage. Elles sont dues à des tassements différentiels de la fondation ou à des poussées excessives des terres retenues.

Ces fissures sont à caractériser par l'ouverture et par les déplacements relatifs, soit avant – arrière (rejet) signe de poussée excessive, soit vertical (glissement), signe de tassements de la fondation. Dans le cadre de la visite technique approfondie, le rapport indiquera la gravité des désordres et, si nécessaire, une étude de diagnostic sera menée. Pour les autres visites, une conclusion en termes de suite à donner doit être précisée.

5.2.5.2. Affouillements

Les ouvrages situés à proximité du lit actif du cours d'eau ou d'un ancien bras susceptible de s'activer en crue, ou les digues maritimes dont le pied est atteint à chaque haute mer sont potentiellement exposés à ce type de désordre.

Le pied de l'ouvrage est à examiner en période d'étiage du cours d'eau et au besoin par un examen subaquatique, à marée basse pour les digues maritimes. Il est aussi recommandé de réaliser périodiquement un levé du fond du lit à proximité du mur à l'aide de perche ou par sonar. Un examen des pieds des ouvrages est aussi à réaliser après chaque grande crue, cycle de grandes marées ou tempête.

5.2.5.3. Dégradations locales

Il s'agit de dégradations liées au vieillissement ou au développement de la végétation. Ces dégradations nécessitent des travaux d'entretien réguliers : rejointoiement des murs en pierres maçonnées, remplacement des pierres fendues ou manquantes, enlèvement de la végétation jusqu'aux racines ... Dans un premier temps limitées, ces dégradations peuvent à terme déstructurer l'ouvrage.

5.2.6. Examen des déversoirs sur les digues fluviales

Les dégradations sur les déversoirs massifs en béton ou en maçonnerie sont de même nature que celles des murs précédemment évoquées : fissures structurales, phénomènes de vieillissement du béton ou de la maçonnerie.

En outre, les déversoirs peuvent subir des dégradations par érosion hydraulique. Ces dégradations concernent le déversoir lui-même, où des pierres peuvent être emportées par le flot sur le seuil, le coursier ou le radier aval ; elles concernent aussi la zone en aval du radier sous la forme d'affouillements et de creusement de fosses d'érosions pouvant aller jusqu'à des sous-cavages du radier.

Ces phénomènes n'ont bien sûr lieu qu'à l'occasion des crues, lorsque ces dernières sont suffisamment fortes pour provoquer la mise en service du déversoir. Une attention particulière doit donc être exercée lors de l'examen post-crue des déversoirs. Tous ces désordres lors des crues sont des désordres graves, qui doivent faire l'objet de réparations rapides, en tous cas avant l'arrivée d'une autre crue, faute de quoi les dégradations seraient nettement amplifiées, pouvant conduire à la rupture complète du déversoir.

5.2.7. Examen des ouvrages d'accessibilité impossible sans moyen particulier

Nous avons déjà évoqué le cas des examens des pieds des ouvrages situés en permanence sous l'eau qui demandent un examen subaquatique.

Il faut aussi citer le cas des ouvrages singuliers occupant le corps de digue ou ses fondations et dont la visite ne peut être effectuée que par caméra. De tels examens qui peuvent s'avérer coûteux et demandant une technicité particulière, seront réalisés en cas de diagnostic complet de tout ouvrage et *a minima* tous les dix ans, lors de l'examen technique complet, obligatoire pour les digues de classe A ou B.

5.3. L'auscultation des digues

Les pratiques d'auscultation des digues de protection sont encore peu développées à l'heure actuelle. Un récent article a fait le point sur la question pour les digues fluviales [Mériaux et al, 2012] et la rédaction de la présente section en reprend les fondements.

5.3.1. Utilité et difficulté de l'auscultation des digues de protection

L'auscultation d'un ouvrage consiste en un ensemble de mesures ou d'observations, répétées dans le temps, de manière à pouvoir en tirer des conclusions sur le comportement de l'ouvrage et/ou de son environnement, et in fine sur sa sécurité. L'auscultation vient compléter les examens visuels réguliers pour permettre au gestionnaire de prendre ses décisions de maintenance ou de déclenchement d'un diagnostic plus approfondi si nécessaire. En cas de diagnostic approfondi, les mesures d'auscultation et leur analyse apportent d'importants éléments à l'expert, en complément d'éventuelles reconnaissances spécifiques et ponctuelles.

L'auscultation et l'analyse des mesures qui en sont issues est classique sur les barrages réservoirs et les canaux. La situation est très différente pour les digues de protection qui sont en général très hétérogènes, avec des variations à l'échelle potentiellement métrique, voire décimétrique ou même centimétrique dans le sens vertical, qui combinées à la grande longueur de l'ouvrage rendent particulièrement difficile la détection et le suivi d'auscultation de toutes les singularités potentiellement dangereuses pour la structure. Par ailleurs, leur hauteur est, sauf rare exception, inférieure à 7 m et leur fondation ne supporte finalement qu'une charge hydraulique modérée et généralement transitoire, équivalente à celle des très petits barrages. Ces éléments expliquent le peu de dispositifs d'auscultation sur les digues (hormis sur le faible nombre d'entre elles de hauteur importante). En ce qui concerne les fondations qui sont elles aussi potentiellement hétérogènes et n'ont en général pas fait l'objet de traitement particulier à la construction, elles sont l'objet d'écoulements qui peuvent changer de direction plusieurs fois par an pour les digues fluviales et jusqu'à deux fois par jour pour les digues maritimes, entraînant un comportement particulier vis à vis des mécanismes d'érosion interne. Compte tenu de cela, le suivi des caractéristiques hydrauliques internes (niveaux, débits) n'est pas chose aisée, d'autant plus que les dispositifs (piézomètres, drains, ...) n'y sont pas présents à l'origine.

5.3.2. Les dispositifs d'auscultation envisageables sur les digues

De manière générale, l'auscultation d'un ouvrage est effectuée sur la base d'un appareillage installé à demeure sur l'ouvrage (exemple : cellule de pression interstitielle), on parle alors d'instrumentation, ou bien amené spécifiquement pour les mesures (exemple : mesures topographiques), éventuellement en complément d'éléments installés à demeure (exemples : cibles, vinchons).

Les mesures relatives à des ouvrages hydrauliques concernent généralement soit l'hydraulique interne (niveaux piézométriques, pressions interstitielles, débits) soit la géométrie de l'ouvrage (topographie, déformations, inclinaisons).

Concernant l'hydraulique interne, il est tout à fait envisageable d'équiper des digues de protection contre les inondations ou les submersions marines de piézomètres et de dispositifs de mesure des débits de fuite, les réelles difficultés étant plus de l'ordre du coût de l'instrumentation et de la réalisation des mesures (nombre élevé d'appareils, compte tenu du linéaire considéré) et de celui de l'interprétation des mesures (faibles périodes de sollicitation). Comme pour les barrages, il est intéressant pour effectuer l'analyse de ces mesures de disposer parallèlement des mesures de niveau de l'eau côté rivière ou mer et d'un suivi de la pluviométrie. Bien entendu, la représentativité de l'analyse par des méthodes numériques ne sera pas facilitée par la faible période de sollicitations. En revanche, la dispersion le long du linéaire permettra de repérer des tronçons avec des comportements différents et donc d'identifier d'éventuels secteurs à risque. La décision d'installation et la définition d'un d'équipement d'auscultation des digues seront évaluées au cas par cas en fonction des retours attendus sur la sécurité des ouvrages et sur leur contexte technique.

Concernant la topographie, les méthodes de levé classique, tout à fait utilisables sur les digues, sont aujourd'hui complétées par des méthodes à haut rendement et à haute résolution, dont le LiDAR (Light Detection And Ranging) aéroporté basse altitude [Mériaux et al, 2013]. Notons que la topographie "terrestre" doit être complétée par la bathymétrie, du moins pour les ouvrages situés au contact ou à proximité de l'eau (mer ou rivière). On peut également envisager des mesures relatives à des déformations locales sur une digue, principalement en des points singuliers, transitions ou structures rigides, à l'aide de repères ou de dispositifs simples de type vinchon.

5.3.3. Le suivi topographique des digues et de leur environnement

Le suivi de la topographie de la digue et de son environnement proche (côté eau estran ou ségonal, côté terre sur une largeur d'une à quelques dizaines de mètres) est la méthode d'auscultation la plus aisée à mettre en œuvre sur une digue ancienne, car elle ne nécessite pas d'équipement fixe, ou presque pas dans le cas où l'on veut poser des repères sur des points particuliers. Il convient toutefois de s'assurer que le dispositif mis en œuvre (association du matériel topo utilisé et de la méthodologie d'acquisition) soit d'une précision suffisante quelles que soient les conditions de surface.

Il semble souhaitable que les gestionnaires de digues fassent effectuer à intervalles réguliers (entre 5 et 10 ans par exemple, sauf évolutions rapides) des levés topographiques afin de détecter des évolutions néfastes (abaissement du niveau de la crête, débuts de glissements, ...), avant que ceux-ci n'évoluent de manière catastrophique, ou ne provoquent en cas de crue ou de tempête une inondation de la zone "protégée". Le suivi topographique et/ou bathymétrique de l'environnement côté eau est absolument nécessaire compte tenu de l'influence majeure qu'à cet élément en termes de stabilité et de résistance de la digue à de nombreux mécanismes de dégradation.

Enfin, les mesures topographiques sont particulièrement utiles, car elles servent directement en tant qu'auscultation, mais sont par ailleurs utiles d'une part dans d'autres activités liées à la surveillance (repère pour les autres informations, dont examens visuels) et d'autre part de données d'entrées à des modèles de calcul utilisés lors des diagnostics réguliers.

5.3.4. Méthodes d'auscultation innovantes

Nous avons évoqué plus haut le LiDAR comme technique innovante de mesure ou de suivi topographique. D'autres techniques d'instrumentation et de reconnaissance à haut rendement sont étudiées en vue de servir à la surveillance des digues. Citons principalement la fibre optique, qui, installée à demeure, permet de détecter des circulations d'eau et/ou des déformations et les mesures géophysiques, dont la tomographie de résistivité électrique qui permettent de repérer des singularités locales comme des évolutions temporelles.

Une première installation de fibre optique sur des linéaires importants (43 km) a été réalisée à l'automne 2013 sur les digues du Rhin au nord de Strasbourg. Cette fibre optique enterrée, sensible à des variations de température de 1/10°C, permettra de mettre en évidence des circulations d'eau au travers de la digue et par conséquent de détecter des fuites. Il convient cependant de préciser qu'il s'agit dans ce cas d'une digue constamment en eau ce qui permet d'avoir un régime hydraulique permanent et relativement stable (en fonction de la cote du Rhin) dans la digue et sa fondation ; l'utilisation sur une digue de protection mise en eau de manière très occasionnelle en crue mérite d'être étudiée, à ce titre un chantier test est réalisé sur une digue de protection de la Loire (La Charité).

5.4. Entretien des digues

5.4.1. Justification de l'entretien de la digue

Quelle que soit sa forme juridique (Collectivité locale, Association Syndicale, personnes privées, etc...), l'organisme qui est le propriétaire des digues est pleinement responsable, des dommages qui peuvent être occasionnés par l'ouvrage et en particulier, le cas échéant, par sa rupture. Si le propriétaire confie l'entretien de sa digue à un gestionnaire, il est nécessaire que cette disposition fasse l'objet d'un contrat ou d'une convention qui précise la durée, l'étendue exacte et le contenu détaillé de la mission correspondante. Dans certaines situations où un gestionnaire de fait intervient en lieu et place de un ou plusieurs propriétaires défaillants, il conviendrait également de régulariser le cadre légal des interventions, voire envisager un transfert de propriété.

Les modalités d'entretien et de vérification de toute digue et de ses organes associés (vannes, ouvrages traversants, ...) font partie des éléments à décrire dans les consignes écrites de surveillance de l'ouvrage.

Au-delà des considérations de responsabilité et de réglementation, l'objectif de maintenir les ouvrages en bon état justifie à lui seul l'entretien régulier. Il permet en effet de freiner le vieillissement et donc d'augmenter la longévité de l'ouvrage. Des petits travaux réguliers, par exemple sur la végétation ou vis-à-vis des animaux fouisseurs, peuvent éviter des interventions lourdes de réhabilitation. Enfin, le bon entretien des ouvrages (notamment, dégagement de la végétation, maintenance des voies de service) permet leur surveillance dans de bonnes conditions.

5.4.2. Principes généraux. Piste de service. Bornage

L'entretien des digues repose sur les axes suivants :

- la pratique régulière de la surveillance visuelle des ouvrages, de routine et postérieure aux crues ;
- le contrôle de la végétation sur la digue elle-même, et si nécessaire sur ses abords ;
- la lutte contre les dégâts des animaux fouisseurs ;
- l'entretien des parties d'ouvrage et parafoilles en maçonneries, gabions, éléments métalliques, etc. ;
- la formation et l'expérience des agents.

Ne sont pas traités dans ce qui suit les actions à mener en cas de déformation anormale du remblai tels que les affaissements, fontis, glissements... Ce sont des pathologies dont on recherchera au préalable les origines pour établir un projet de réhabilitation même s'il est très localisé. Il ne faut pas traiter les symptômes sans faire de diagnostic, c'est en particulier le cas de fontis consécutifs à un problème d'érosion interne.

Il est recommandé de disposer d'au moins une piste de service et, si elle n'existe pas, d'en aménager une. Cette piste a plusieurs fonctions :

- elle permet une circulation aisée, ce qui améliore l'efficacité de la surveillance ;
- elle facilite l'entretien des talus qui peut alors se faire par des moyens mécaniques et en diminue donc le coût ;
- elle permet, en cas d'indice de désordres pouvant conduire à une brèche, l'approvisionnement de matériaux (enrochements) pour faire un comblement de fortune et éviter la brèche ou limiter son agrandissement.

La chaussée de cette piste doit bien sûr être dimensionnée pour supporter le trafic qu'elle aura à subir, y compris donc un trafic de camions sur un corps de digue partiellement saturé. La localisation idéale de cette piste est sur la crête de digue. Cependant, si le couronnement de la digue est trop étroit, la piste de service peut être localisée sur une risberme, voire en pied de talus côté val. Pour les digues neuves ou objet d'un confortement il est idéal de prévoir trois pistes de services en parallèles : une en crête et deux en pied.

La piste de service doit être régulièrement entretenue de façon à garantir sa viabilité. Cet entretien consiste essentiellement à combler les ornières, à maintenir un profil présentant un dévers vers l'extérieur pour faciliter l'évacuation des eaux de pluies et à éviter des points bas de concentration des eaux susceptibles de conduire à des zones d'érosion potentielle.

Pour faciliter le repérage de toutes les observations lors des visites de surveillance et de tous les travaux d'entretien et de réparation, il est souhaitable de disposer d'un repérage par des bornes implantées en bordure de la crête de digue.

5.4.3. La végétation

5.4.3.1. Objectifs et principes

Le contrôle régulier de la végétation répond à un triple objectif :

- maintenir des conditions de parfaite visibilité des talus et des pieds de digue (afin de faciliter les visites de surveillance visuelle et d'en garantir la qualité) ;
- éviter le développement de racines (d'arbres ou d'arbustes) dans les corps de digue qui, d'une part, aggrave le risque de renard hydraulique (par le biais des conduits créés par le dépérissement des racines) et, d'autre part, déforme ou démantèle (par action mécanique) les maçonneries de pierres éventuellement présentes en surface, telles que les revêtements perreyés ;
- éviter la présence des arbres qui, lors de leur chute par l'action de l'eau ou du vent, peuvent emporter une partie de la digue ;

- dissuader les animaux fouisseurs d'élire domicile dans la digue, en troublant leur quiétude (animaux généralement farouches) par le passage régulier des engins et par la suppression des zones de couvert, donc d'abri potentiel.

Sur la crête, les talus de la digue ainsi que sur une bande d'au moins 5 m de part et d'autre des pieds de talus, le principe est double :

- le maintien d'un couvert herbacé le plus ras possible ;
- l'éradication de toute végétation ligneuse (sauf cas particulier de l'existence de gros arbres déjà installés où une étude spécifique est nécessaire).

Ces principes doivent être mis en œuvre dans le respect des contraintes foncières et environnementales locales qui peuvent constituer des situations compliquées relevant d'une approche spécifique.

5.4.3.2. *Entretien des talus enherbés*

Un enherbement vigoureux et bien entretenu améliore la résistance des talus à la surverse et à l'érosion par le ruissellement, le vent ou le piétinement. Le premier objet de l'entretien est, donc, d'assurer le maintien d'une couverture herbacée homogène sur les talus de la digue : si nécessaire, des techniques appropriées d'engazonnement complémentaire doivent être mises en œuvre dans les zones mal enherbées ou dégradées.

Les enherbements installés doivent faire l'objet d'un fauchage régulier, afin de préserver leur vigueur et de maintenir des bonnes conditions d'observation de la digue. La périodicité minimale est un fauchage annuel, voire plus si les conditions de visibilité de l'ouvrage se dégradent.

En appoint au fauchage, des traitements phytocides peuvent permettre, selon les produits :

- la limitation de la croissance des herbacées afin d'espacer les fauchages ;
- le désherbage total, pour les maçonneries ou les remblais drainants.

Pendant, ces produits ont des impacts nuisibles sur l'environnement, et notamment sur les milieux aquatiques à proximité desquels leur usage est réglementé (cf. arrêté ZNT "Zones Non Traitées" du 12/09/2006). Aussi, les traitements mécaniques ou thermiques sont à privilégier.

En fonction du retour d'expérience, le pâturage des talus, lorsque leur pente est suffisamment douce (<50 %) de préférence par des ovins et dans des conditions météorologiques ni trop sèches ni trop humides pour éviter les dégradations, est, par contre, recommandé car les traces des sabots des ruminants et la fumure naturellement apportée sont propices à la régénération de la couverture herbacée.

5.4.3.3. *Élimination de la végétation ligneuse*

Le fauchage régulier intégral prévient le développement d'arbres ou d'arbustes.

Pour se débarrasser d'arbustes existants, on procède classiquement à leur abattage suivi de la dévitalisation des souches (à faire à l'automne, en sève descendante), afin de tuer les sujets et éviter les rejets de souche. Là encore, les moyens mécaniques (broyage des souches et/ou extraction à la dent Becker) paraissent à privilégier par rapport aux moyens chimiques qui ne sont pas autorisés à proximité d'un cours d'eau.

Que faire des arbres existants ?

Lorsqu'une digue est boisée ou présente des arbres isolés de haute tige, il est recommandé d'enlever, au moins à terme, ces arbres et arbustes. En effet, ces arbres un jour mourront et

leur réseau de racines, en pourrissant, créera autant de conduits qui seront des voies potentielles d'amorces de renards hydrauliques pendant les périodes de hautes eaux.

Il faut cependant être conscient que ce phénomène de pourrissement des racines va se produire – et même s'intensifier - aussi après l'abattage des arbres. Par ailleurs, quelques arbres vont reprendre³⁹ et leurs racines grandir.

Ceci implique, parallèlement, de renforcer les zones concernées en prenant en compte l'homogénéité du remblai et le niveau d'étanchéité requis de la digue ; ce qui peut se faire par l'une des solutions suivantes :

- des remblaiements ponctuels (arbres isolés côté rivière) avec un matériau adéquat, soigneusement compacté, après abattage, dessouchage et purge ;
- une recharge étanche sur l'ensemble du talus côté rivière, réalisée immédiatement après l'abattage (à faire suivre de l'enlèvement des souches et d'un réglage du talus) ;
- une coupure étanche dans la digue (palplanches ou paroi au coulis) réalisée au maximum une dizaine d'années après cet abattage (le temps que les racines soient pourries).

Si aucune intervention de génie civil n'est envisageable à court terme, **mieux vaut surseoier à un abattage généralisé**. Un débroussaillage systématique sous et entre les arbres peut, par contre, être réalisé immédiatement et contribuera déjà à améliorer les conditions de surveillance de la digue.

L'espace boisé plus ou moins large entre berge de lit mineur et pied de digue côté fleuve doit, quant à lui, être préservé, sous réserve des éventuelles servitudes de passage et de la prise en compte de la réduction de la section hydraulique et/ou de l'entrave à l'écoulement due à la présence de cette zone boisée. Il concourt, en effet, à limiter la vitesse du courant le long de la digue et diminue donc le risque d'érosion externe du talus. Cette végétation doit cependant faire l'objet d'un entretien régulier consistant, en particulier, à abattre les arbres qui menacent de tomber dans le cours d'eau, pouvant entraîner un arrachement de la berge et des risques d'embâcles. Ces principes généraux sont à adapter aux situations particulières des rivières torrentielles dont la gestion des espaces boisés devra faire l'objet d'une étude spécifique.

5.4.4. Les animaux fouisseurs

5.4.4.1. *Les désordres imputables aux fouisseurs*

Les risques et dégradations engendrés par l'activité des fouisseurs dans les digues, ou à leur proximité immédiate, sont multiples :

- initiation ou développement de l'érosion interne pouvant conduire à des phénomènes de renard (raccourcissement des lignes de fuite) ;
- fuites directes (terriers traversants) ;
- affaissements / irrégularités en crête ;
- fragilisation au plan mécanique (berges, talus côté fleuve) ;
- déstabilisation des maçonneries, perrés, chaussées.

Dans notre pays, les principales espèces animales responsables de dégâts sur les digues sont : le blaireau, le ragondin, le lapin de garenne, le renard, le rat musqué et le sanglier. La

³⁹ Ceci concerne les espèces d'arbre qui rejettent de souche comme les peupliers, les robiniers, certains chênes, etc...

réglementation sur la chasse ou sur l'élimination de ces animaux (piégeage, ...) est très stricte. Aussi, les moyens dissuasifs sont toujours privilégiés.

5.4.4.2. *Les moyens de lutte dissuasifs*

Le fauchage ou le débroussaillage régulier, troublant la quiétude des lieux et empêchant le développement de zones de couvert, limite les risques d'installation de populations de certains fousseurs de tempérament craintif (ex : blaireau).

La mise en place, sur les talus, de dispositifs de protection mécanique est également une solution généralement efficace mais peut être coûteuse :

- grillage galvanisé, revêtu de terre végétale ;
- couche de revêtement à base de matériau lourd ou résistant, tels que des enrochements jointifs.

Les moyens dissuasifs sont, dans tous les cas, à préférer aux moyens de destruction ou de capture des animaux fousseurs. Le recours à ces derniers - dont l'effet s'avère temporaire - est à réserver aux situations graves ou urgentes.

5.4.4.3. *Dispositions curatives*

a) Injection de terriers

Des techniques d'injection de coulis durcissables (ciment-bentonite) ont été essayées, en action curative, pour colmater les galeries de fousseurs, sources de fuites et de fragilisation des digues. Celles-ci se sont avérées sans grand succès : les quantités consommées furent importantes et supérieures aux prévisions mais, surtout, les dégradations ont repris, par la suite, au voisinage des terriers injectés (d'où la nécessité de prolonger une telle intervention curative par une action dissuasive). Dans l'état actuel de nos connaissances cette technique ne semble pas efficace.

Plus simplement, on peut procéder au déblaiement par moyens mécaniques du volume de digue miné par le réseau de galeries, et à la reconstitution du profil avec le matériau extrait recompacté, si sa nature et sa teneur en eau conviennent à cet usage.

b) Dispositifs d'étanchéité

Pour rétablir l'étanchéité interne d'une digue minée par des galeries de fousseurs, les techniques suivantes sont envisageables :

- paroi moulée ou rideau de palplanches dans l'axe de la digue ;
- recharge étanche côté rivière.

La paroi moulée ou le rideau de palplanches, correctement dimensionnés, offrent l'avantage de régler définitivement le problème de l'étanchéité interne de la digue et ce, même si la détérioration par les terriers se poursuit après les travaux. En effet, les animaux ne pourront plus creuser des terriers, à travers les palplanches de façon évidente, mais aussi à travers la paroi moulée après prise du coulis. Par contre, de tels procédés ne contribuent pas à renforcer le talus de digue côté fleuve : ce qui peut être gênant si le développement des terriers (qui va continuer) concerne et fragilise plus spécialement cette zone. Ces techniques sont, en outre, coûteuses et peuvent avoir des impacts sur l'hydrogéologie.

5.4.5. **L'entretien des talus en enrochements**

Le Tableau 5.4 présente les dégradations, causes et réparations envisageables des talus en enrochements (liste non limitative) :

Dégradation	Causes probables	Réparation envisageable
Déchirure du géotextile	Résistance insuffisante du géotextile Aspérités de la couche sous-jacente Blessures du géotextile lors de la pose des enrochements	Dégager l'enrochement et le géotextile sur la partie dégradée, enlever les aspérités de la couche sous-jacente, mettre un nouveau géotextile plus résistant (géotextile anti-poinçonnant), avec recouvrement de 0,5 m minimum sur le géotextile laissé en place, et reposer les enrochements.
Dégradation physico-chimique du géotextile	Trous d'animaux Géotextile exposé directement au rayonnement solaire	Idem ci-dessus et ajouter un grillage Idem ci-dessus. Veiller à bien assurer la « fermeture » de la couche d'enrochements pour éviter le rayonnement solaire direct sur le géotextile ou protection du géotextile par couche granulaire
Dégradation des enrochements	Pierres friables, nature géologique inadaptée	Réparation ponctuelle ou réfection complète de la couche d'enrochement selon l'ampleur du problème
Enrochements glissés	Sabot de pied sous-dimensionné Pente trop forte	Engraisser le sabot de pied. Compléter la couche d'enrochements en tête du talus à protéger Engraisser la couche d'enrochements (en élargissant également le sabot) de façon à adoucir la pente (si compatibilité avec la réduction de section induite). Augmenter la stabilité des enrochements en les liant avec du béton ou mortier (enrochements maçonnés)
Enrochements emportés	Taille insuffisante des enrochements, épaisseur insuffisante de la couche	Diagnostic approfondi et redimensionnement de la protection.

Tableau 5.4 : dégradations, causes probables et réparations envisageables des enrochements en milieu fluvial [Mériaux et al, 2004].

5.4.6. L'entretien des perrés maçonnés

Trois mécanismes principaux peuvent être à l'origine de la dégradation d'un perré de protection du talus côté rivière :

- l'altération des moellons de qualité insuffisante à l'origine ;
- l'altération des joints de mortier assurant la liaison entre les moellons (avec action aggravante de la végétation) ;
- le déchaussement du pied du perré.

L'altération des moellons ne peut être réparable que par remplacement des moellons concernés. Les nouveaux moellons doivent être de pierre dure, propre, dense et insensible à l'immersion. Leur forme doit s'adapter au mieux à celle des vides à combler.

L'altération des joints de mortier est inéluctable avec le temps selon un scénario habituel : dégradation du mortier par des mécanismes physico-chimiques, colonisation par la

végétation dans les interstices, déchaussement du moellon. Il est donc nécessaire de prévoir une réfection périodique des joints de perrés (tous les 30 à 50 ans si le perré a été correctement réalisé et entretenu) consistant à enlever tous les joints anciens jusqu'à une profondeur minimale de 5 à 6 cm, puis à nettoyer le fond de joint à l'air ou à l'eau sous pression, et enfin à refaire le joint, lissé en creux par rapport aux moellons. Le perré n'ayant pas, en général, une fonction d'étanchéité, il faut, pour préserver sa stabilité à la décrue, réaliser des joints non continus, laissant des interstices pour la dissipation d'éventuelles sous-pressions. Ces discontinuités seront de taille limitée pour éviter le risque de décollement.

Le déchaussement du pied de perrés est constaté à proximité de rivières ou plages dont la tendance est à l'incision. La technique de réparation consiste à refaire un ouvrage parafouille (souvent en palplanches) et à reconstituer, en maçonnerie, la butée de pied du perré sur l'ouvrage parafouille.

5.4.7. Les ouvrages parafoilles

Dans la plupart des cas les désordres constatés sur les ouvrages parafoilles sont des désordres graves qui ne relèvent pas à proprement parler de l'entretien mais plutôt de réparations qui nécessitent une étude préalable par un spécialiste.

5.4.7.1. *Pieux en bois*

Le plus souvent, les ouvrages parafoilles, lorsqu'ils existent, sont constitués de pieux en bois. Tant que ces pieux restent constamment immergés, ils ont une excellente durabilité. Dans le cas contraire, leur vieillissement est fortement accéléré, notamment en cas d'alternance « humide-sèche ». Le bois pourrit, se casse ou se délite.

L'intervention, qui ne ressort plus du simple entretien, consiste à refaire le parafouille, le plus souvent en palplanches métalliques. Une réfection par des pieux en bois est également envisageable, à condition d'abaisser la tête des pieux (pour qu'ils soient toujours immergés), de choisir de bonnes espèces (châtaignier, chêne, azobé, ...). Dans tous les cas, cette intervention doit être précédée d'une phase d'études avec diagnostic des dégradations et de leurs causes, choix des techniques de réparation et projet détaillé.

5.4.7.2. *Palplanches*

Le principal phénomène de vieillissement est la rouille mais dans certains cas le rideau de palplanches peut présenter des déformations notables. Lorsque la corrosion est importante des mesures d'épaisseur résiduelle doivent être réalisées et dans tous les cas une étude approfondie doit être réalisée par un spécialiste.

5.4.7.3. *Autres types*

Dans certains cas, les parafoilles sont constitués de gabions ; les causes de désordre sont principalement la rupture des fils. Les réparations seront adaptées selon qu'il s'agisse d'une rupture localisée accidentelle (doublement des fils concernés) ou de ruptures généralisées notamment par corrosion qui nécessitent de remplacer la nappe de grillage (par doublement de la nappe).

Si un parafouille, constitué d'enrochements ou de gabions formant la butée de pied, présente des mouvements ou des déformations, il y a lieu de rechercher les phénomènes qui sont la cause du désordre avant d'entreprendre toute intervention, ce qui peut dans certains cas conduire à une expertise morphologique et hydraulique du tronçon.

5.5. Gestion des crues, des tempêtes ou d'événements particuliers

La gestion d'une crue, d'une tempête marine ou d'un événement particulier (séisme, accident nautique, ...) implique de la part du gestionnaire d'un système de protection une réflexion préalable sur l'organisation et les moyens à mettre en place pour faire face à ces situations de crise, tant du point de vue de la **surveillance des ouvrages** que du circuit de **transmission de l'information** aux autorités compétentes et aux populations, des **moyens à mettre en œuvre d'urgence** en cas de désordres identifiés, et des **dispositions post-événement** à prévoir à court ou plus long terme.

Les dispositions spécifiques à la surveillance de l'ouvrage en période de crue, de cycle de grandes marées ou de marée de tempête, ainsi que celles à prendre en cas d'événement particulier, d'anomalie de comportement ou de fonctionnement de l'ouvrage, doivent être précisées dans les **consignes écrites** de l'ouvrage. Dans le cadre réglementaire en vigueur à la parution du guide, ces consignes sont soumises à l'approbation du préfet pour les digues de classe A, B et C.

5.5.1. Organisation spécifique en situations de crue ou de tempête marine

5.5.1.1. Importance de l'organisation préalable

Les situations de crise présentant un caractère imprévisible (séisme) ou prévisible uniquement à (très) court terme (crues, tempêtes), il convient de s'y préparer à froid en définissant, le plus précisément possible, l'organisation spécifique à mettre en place. Cette organisation spécifique doit permettre de gérer au mieux, au regard de la sûreté des ouvrages de protection et de la sécurité des personnes et des biens, des situations pouvant conduire à la surverse des ouvrages ou à l'apparition de désordres susceptibles d'entraîner leur rupture.

Les dispositions relatives à cette organisation doivent être synthétisées par le(s) gestionnaire(s), notamment dans la **description de l'organisation mise en place pour assurer la surveillance** des ouvrages de protection, ainsi que dans **les consignes de surveillance en crue**. Il n'existe pas de dispositions organisationnelles génériques en situation de crise : chaque disposition est **propre à une situation locale**, induisant par conséquent de la part du (des) gestionnaire(s) une implication forte dans la définition de ces dispositions. Bien entendu, comme évoqué précédemment au 5.1, les différents gestionnaires ont tout intérêt à harmoniser leurs actions en mutualisant leurs moyens, ou de préférence à tendre vers une gestion unique de l'ensemble du système de protection.

Cette organisation spécifique exige une parfaite coordination interne, ou entre les différents gestionnaires, ainsi qu'entre gestionnaire(s) et pouvoirs publics (préfectures, services de l'Etat, collectivités locales).

Le(s) gestionnaire(s) d'un système de protection doit (doivent) clarifier le rôle de chaque intervenant en situation de crise, et en particulier :

- du ou des responsables en charge de la coordination des actions en situation de crise (autorité fonctionnelle du (des) gestionnaire(s), correspondant du représentant de l'Etat),
- des équipes en charge de la surveillance des ouvrages (les équipes doivent être identifiées explicitement et, pour chaque équipe, le tronçon de digue à surveiller),
- en cas de désordres constatés lors de la surveillance, des équipes d'interventions d'urgence (entreprises de travaux publics, services techniques des collectivités territoriales, ...).

La surveillance des ouvrages nécessite des moyens humains et matériels conséquents qui peuvent dépasser les moyens propres du gestionnaire. En situation de crise, certains gestionnaires s'appuient sur le personnel des communes protégées par le système de protection. A ce sujet, l'article L2212-2 du Code Général des Collectivités Territoriales attribue au Maire le soin de « prévenir, par des précautions convenables, et de faire cesser, par la distribution des secours nécessaires... Les inondations, les ruptures de digues... ». **L'organisation mise en place doit toutefois intégrer l'absolue nécessité d'assurer la sécurité des intervenants qu'ils relèvent du gestionnaire, d'entreprise de Travaux Publics ou de tiers.**

L'efficacité d'une organisation réside dans les échanges fréquents et réguliers d'informations entre les responsables, en charge de la gestion d'une situation de crise, et les équipes de terrain, en charge de la surveillance en crue. Les modalités de ces échanges doivent être réfléchies et testées « à froid », hors situations de crise.

L'organisation spécifique en situation de crise doit également préciser les dispositions relatives à la transmission d'informations vers les autorités compétentes, en particulier la cellule de crise organisée par le représentant de l'Etat et les communes pour l'alerte et l'évacuation éventuelle des populations ; le Service de Prévision des Crues (SPC) sera informé pour intégration des informations dans ses prévisions.

Afin de faciliter la compréhension de l'organisation mise en place, il est préconisé d'établir un schéma organisationnel de surveillance et d'intervention en situation de crise. A titre d'illustration, le schéma organisationnel établi par le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM) est présenté sur la figure 5.1. Le SYMADREM est renforcé par le personnel communal pendant les crues pour la surveillance de ses ouvrages et, en cas de désordres susceptibles de mettre en péril l'ouvrage, et font intervenir les entreprises de travaux publics pour les interventions d'urgence ou de réparation dans le cadre de marchés à bons de commande.

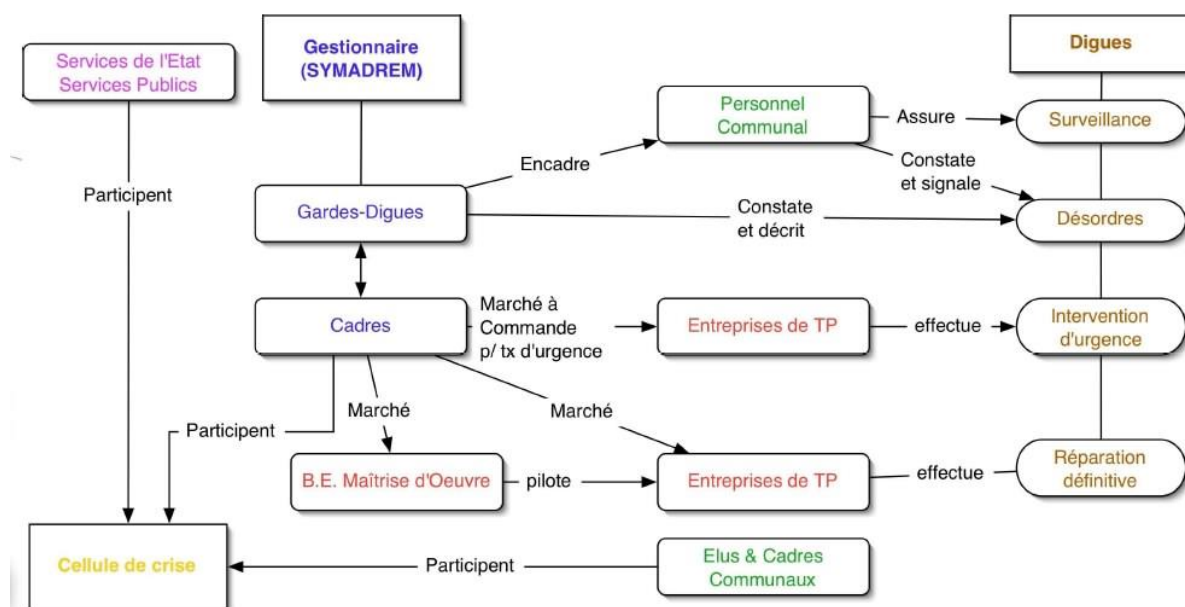


Figure 5.1 : exemple du schéma organisationnel de surveillance et d'intervention en crue du SYMADREM (source R. Tourment)

5.5.1.2. Gestion des organes hydrauliques annexes

Les interventions sur les organes hydrauliques annexes (batardeaux, vannes, ...) doivent être soigneusement préparées. Cela commence par l'établissement d'une liste exhaustive de

ces ouvrages et du (des) gestionnaire(s) associé(s). Cette liste doit également préciser les caractéristiques de ces ouvrages, leur localisation sur une carte, les lieux de stockage des batardeaux,... Des exercices périodiques de mise en place ou de manœuvre de ces organes sont à programmer régulièrement hors situation de crise et une vérification spécifique est à prévoir dès le premier niveau d'état de vigilance. L'accessibilité à ces organes hydrauliques quelles que soient les conditions météorologiques doit être vérifiée. Enfin, l'entretien régulier de ces organes est une des conditions de leur efficacité lorsqu'on en aura besoin.

La gestion des organes hydrauliques annexes peut ne pas être de la compétence du gestionnaire des digues. Dans ce cas, il est souhaitable que ce dernier définisse dans une convention avec chaque responsable des organes concernés les missions et les tâches de chaque organisme. Il importe que le gestionnaire des digues contrôle que ces actions sont effectivement réalisées et prévoie de se substituer si nécessaire à l'organisme défaillant dans les situations de crise.

5.5.1.3. *Organisation de l'alerte et de mise en sécurité des personnes*

En cas de risque avéré de surverse ou de rupture de digue, l'alerte et la mise en sécurité des populations est, en premier lieu, du ressort des communes. L'efficacité de la mise en œuvre de ces dispositions suppose une parfaite coordination entre le(s) gestionnaire(s) d'un système de protection, et les communes concernées par ce système. Ces dispositions sont notamment décrites dans le Plan Communal de Sauvegarde (PCS). La mise en place d'un PCS est obligatoire dans les communes dotées soit d'un plan de prévention des risques naturels (PPR), soit d'un plan particulier d'intervention (PPI). Pour les autres communes, la mise en place d'un PCS est recommandée. Le PCS détermine, en fonction des risques connus, les mesures immédiates de sauvegarde et de protection des personnes, fixe l'organisation nécessaire à la diffusion de l'alerte et des consignes de sécurité, recense les moyens disponibles et définit la mise en œuvre des mesures d'accompagnement et de soutien de la population. Les dispositions spécifiques en cas de crue, notamment les systèmes d'alerte (par exemple, systèmes d'alerte téléphonique automatique de la population), doivent être établis en concertation entre gestionnaire(s) et communes, et l'autorité préfectorale. Il est par ailleurs nécessaire d'établir le lien entre le(s) PCS et les consignes de surveillance des digues. La consigne doit définir les informations à transmettre aux services identifiés dans le PCS en fonction de différents niveaux de crue atteints ou prévisibles. Dans les cas où plusieurs communes sont concernées ou d'un événement d'une ampleur exceptionnelle, le préfet prend en charge la sécurité des personnes (plan ORSEC, volet inondation).

5.5.1.4. *Formations et exercices de simulation*

Afin de se préparer « à froid » à la gestion de situations de crise, une formation des intervenants (initiale et continue), ainsi que des exercices de simulation de crise, peuvent être mis en œuvre, éventuellement en associant les services en charge de la mise en œuvre du PCS.

La formation des intervenants doit porter sur les problématiques spécifiques à chaque système de protection (en terme de sollicitations, de gestion d'organes hydrauliques annexes, ...). Au cours de cette formation doit être présentée explicitement l'organisation du (des) gestionnaire(s) en situations de crise. Une présentation des désordres engendrés par les différentes sollicitations (crues, tempêtes, séismes) doit être effectuée auprès des équipes de terrain en charge de la surveillance en crue (intervenants du ou des gestionnaires, personnels des communes concernées...).

Afin de tester l'organisation spécifique mise en place pour la gestion des situations de crise, il est préconisé d'organiser régulièrement des exercices de simulation de crise. Ces exercices répondent à plusieurs objectifs :

- mise en œuvre opérationnelle de l'organisation spécifique, afin de tester son efficacité en situation de crise,
- perfectionnement des pratiques individuelles et collectives de gestion et de communication de crise des différents intervenants,
- en liaison avec les communes concernées, mise en œuvre opérationnelle des dispositions relatives aux populations protégées prévues dans les Plans Communaux de Sauvegarde (PCS).

Ces exercices doivent permettre de tester l'organisation mise en place pour différents états de vigilances. Afin d'être efficaces, ces exercices doivent mobiliser un maximum d'intervenants impliqués dans la gestion de situations de crises. La fréquence des exercices de simulation est à fixer par le(s) gestionnaire(s). Cette fréquence doit être adaptée au degré de complexité du système de protection, au nombre d'intervenants en situations de crise... A titre d'exemple, le SYMADREM organise un exercice de simulation une fois par an. Après exécution de l'exercice, une analyse critique de son déroulement doit être effectuée, et une synthèse des enseignements tirés de cet exercice doit être établie.

5.5.2. Etats de vigilance et surveillance en situations de crise

Un système de protection est soumis à différentes sollicitations (crues, tempêtes, séismes), pouvant conduire à l'apparition de désordres. Pour le cas des crues, la probabilité de désordres s'amplifie avec l'augmentation du débit et la durée de la crue. Cette probabilité demeure à la décrue, et jusqu'au ressuyage complet du corps des digues.

Tout désordre non détecté dès le début et traité immédiatement peut s'aggraver rapidement et entraîner la rupture de l'ouvrage. Sauf si la rapidité de l'événement ne permet pas une intervention efficace et, **sous réserve de la préservation de la sécurité des surveillants**, il est donc essentiel de mettre en place une surveillance linéaire et continue des ouvrages de protection contre les inondations, afin d'observer le comportement de l'ouvrage, de prévenir et de limiter les dégradations éventuelles et d'intervenir en cas d'urgence. Différents niveaux de vigilance doivent être définis, de façon à intervenir de façon graduée selon l'ampleur des sollicitations.

5.5.2.1. Informations générales en situations de crise, prévision et suivi de l'évolution d'une crue

Les moyens dont dispose(nt) le(s) gestionnaire(s) pour anticiper l'arrivée et le déroulement des crues ou d'événements particuliers prévisibles doivent être décrits dans les consignes écrites.

En ce qui concerne les digues fluviales, le(s) gestionnaire(s) peut (peuvent) s'appuyer sur les informations fournies par les Services de Prévision des Crues (SPC), en charge de l'organisation de la surveillance, de la prévision et de la transmission de l'information sur les crues, pour les cours d'eau surveillés. Les SPC mettent à disposition des autorités publiques et du public des cartes de vigilance et des bulletins d'information associés, établis à raison de deux publications par jour, ou à un rythme plus élevé pouvant atteindre la fréquence horaire en cas d'aggravation. Dès la mise en vigilance jaune, les bulletins contiennent un commentaire général sur la situation hydrométéorologique et l'évolution prévue, une description des conséquences possibles et des conseils de comportement, ainsi qu'une description détaillée de la situation par tronçon en vigilance, une qualification de l'évènement et de son évolution, ainsi que, le cas échéant, des prévisions.

Toutefois, tous les cours d'eau ne sont pas inclus dans le dispositif de la vigilance "crues". Pour les cours d'eau inclus dans ce dispositif, les consignes de surveillance doivent indiquer les moyens de transmission de l'information, du service de prévisions des crues aux services gestionnaires des digues. Des indications sur les temps d'arrivée des crues sont aussi très précieuses. Si le cours d'eau ne dispose pas d'un service de prévision des crues pour les digues fluviales, il convient d'identifier la chaîne minimum d'information, depuis les communiqués de Météo-France, les postes limnigraphiques, jusqu'aux gestionnaires d'ouvrages.

D'autres informations peuvent également être utiles en situations de crises :

- observations et prévisions météorologiques : Météo France dispose d'un réseau d'observations pluviométriques, produit de l'imagerie satellite et diverses observations météorologiques (températures, vents, impacts de foudre, ...), établit deux fois par jour des bulletins de précipitation (BP), précisant les hauteurs d'eau moyennes ponctuelles, observées et prévues à 24h et 48h par secteur géographique ;
- informations fournies par d'autres gestionnaires (des barrages situés sur le cours d'eau, CRICR pour l'information sur l'état des routes) ;
- service « Avertissements Précipitations Intenses à l'échelle Communale » (APIC) mis en place depuis fin 2011, à destination des maires, par Météo-France et le Ministère en charge de l'Ecologie, dans le cadre de l'application du Plan de lutte contre les Submersions Rapides : si nécessaire, se renseigner en Préfecture.

5.5.2.2. *Etats de vigilance*

Les dispositions spécifiques à la surveillance de l'ouvrage en situations de crise doivent indiquer les différents états de vigilance et de mobilisation du ou des gestionnaires pour la surveillance des ouvrages de protection, les conditions de passage d'un état à l'autre et les règles particulières de surveillance de l'ouvrage par le propriétaire ou l'exploitant pendant chacun de ces états.

Ces états de vigilance sont définis par le(s) gestionnaire(s), qui peut (peuvent) notamment s'appuyer sur une étude de dangers (pour les digues de classe A, B ou C). Les modalités de définitions de ces états de vigilance sont propres à chaque situation locale. La définition des états de vigilance peut notamment faire appel :

- aux débits mesurés au droit d'une station hydrométrique,
- au niveau d'eau relevé localement sur une échelle limnimétrique,
- ...

Le gestionnaire doit définir le niveau de l'événement au-delà duquel, il n'est plus en mesure d'assurer la surveillance linéaire et continue de ses ouvrages, **sans mettre en danger les agents chargés de la surveillance**. La surveillance peut, si possible, continuer depuis des lieux de repli sécurisés.

5.5.2.3. *Surveillance visuelle en crue ou lors d'une tempête*

Le guide « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations », édité par Cemagref-Editions [Mériaux et al, 2004] développe les actions à entreprendre en situation de crue pour les digues fluviales. Le présent chapitre s'en inspire grandement.

- **Justification, principe et spécificités de la méthode (digues fluviales)**

Les visites de surveillance en crue ou lors d'une tempête diffèrent des visites de routine, effectuées « à sec ». L'objectif général de ces visites de surveillance est de répertorier, repérer et évaluer les désordres ou présomptions de désordre liés plus ou moins directement à l'état "en charge" de la digue, révélant les zones de faiblesse de l'ouvrage (en complément de celles décelées lors des visites de surveillance à sec) et/ou susceptibles d'en annoncer la rupture prochaine. Ces désordres peuvent résulter des contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par la digue (charge hydraulique, surverse, courant de rive, vagues, ressauts et turbulences) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers ou sous le corps de digue, état de saturation, courants hydrauliques, pressions interstitielles).

Le principe de la méthode consiste à parcourir un linéaire de digue en charge, au cours d'une crue du cours d'eau. Le niveau de surveillance est à adapter à l'état de vigilance. Une des difficultés réside dans le fait que le constat de l'un ou l'autre des indices de désordre en crue peut précéder de très peu une rupture plus ou moins soudaine de l'ouvrage.

Outre la nature des indices de désordre à plus particulièrement observer, la surveillance visuelle en crue se distingue de la surveillance à sec par plusieurs aspects importants :

- elle se pratique sous deux formes, d'ailleurs non exclusives l'une de l'autre :
 - o examen linéaire d'un plus ou moins large secteur prédéfini dans le but d'y vérifier le fonctionnement critique de la digue et de parfaire la connaissance de l'ouvrage et de ses défauts d'étanchéité ; sur ces linéaires, il convient d'identifier les secteurs ou les points de digue qui feront l'objet d'un examen visuel prioritaire et ce, en fonction de la connaissance que le gestionnaire a de l'état des digues (grâce au diagnostic initial, aux visites techniques approfondies et aux visites de surveillance en période normale) et des enjeux qu'elles protègent ;
 - o examen ponctuel d'une zone restreinte et circonscrite de digue où ont été signalés par des témoins - ou sur laquelle on redoute a priori (ex : ouvrage singulier) - des désordres (fuites, surverse, ...) et leurs conséquences.
- le moment (et la saison) de la visite est imposé par les événements et le délai de préparation est plus ou moins court. En conséquence, si les talus et/ou les abords de la digue sont mal entretenus (végétation), on ne disposera guère de temps pour faire effectuer un débroussaillage préalable (d'où l'intérêt d'assurer un entretien régulier des ouvrages afin de maintenir en toutes circonstances des conditions de visibilité optimales) ;
- les observations effectuées au titre de la visite en crue peuvent entrer dans un processus de gestion de crise et conditionner des procédures de mise en sécurité de la population exposée ou la mise en œuvre de travaux conservatoires avec des moyens manuels ou mécaniques (ex : obstruction de passage busé, confortements divers, colmatage de brèche). Il est donc nécessaire de couvrir un maximum de linéaire de digue en un minimum de temps, en s'attachant aux points essentiels de la visite, et de disposer, en outre, de moyens de communication rapides ;
- les évolutions à suivre peuvent être rapides et les informations recueillies doivent être rattachées à une échelle de temps fine (de l'ordre de la minute ou à tout le moins du quart d'heure) ;
- les opérateurs de terrain sont potentiellement exposés à des risques corporels et des mesures doivent être prises pour assurer leur sécurité.

Tous ces éléments imposent de définir, hors période de crise, les modalités pratiques de mise en œuvre de la surveillance en crue et, si possible, de les tester par des exercices de simulation.

- **Organisation de la surveillance et moyens de mise en œuvre**

L'équipe de terrain est formée de deux agents. En effet, l'intervention en binôme s'avère souhaitable, voire indispensable, pour la sécurité des opérations. Il est recommandé que l'un des agents soit également le gestionnaire courant (responsable des inspections de routine et du contrôle des travaux d'entretien) du secteur de digue concerné

La longueur du tronçon affecté à une équipe dépendra de trois facteurs :

- niveau de sécurité du tronçon déterminé par les études de diagnostic réalisées « à sec ». Un tronçon présentant des désordres ou des faiblesses préalablement identifiés devra faire l'objet d'une surveillance plus soutenue ;
- conditions de l'observation : moyens de circulation sur la digue, état de la végétation ;
- degré de vulnérabilité des zones protégées par les digues, compte-tenu du risque hydraulique et de l'importance des enjeux (habitat, infrastructures, services publics, cultures à haute valeur ajoutée, ...).

On peut considérer en première approche que la longueur d'un tronçon affecté à une équipe donnée devrait se situer entre une dizaine et une vingtaine de kilomètres (ordre de grandeur proposé pour les levées de Loire).

Pour chaque tronçon doit être préparée une fiche récapitulative sur le déroulement des opérations. De façon non-exhaustive, chaque fiche précise :

- la dénomination et le repérage PK du tronçon à surveiller,
- une carte du tronçon, avec report des différents accès,
- des consignes vis-à-vis de l'examen des ouvrages annexes,
- la mention et les coordonnées PK des points à contrôler en priorité pour une inspection linéaire,
- un aide-mémoire général sur les désordres à observer,
- la fréquence de l'opération si on estime qu'elle doit être renouvelée plusieurs fois au cours de la tournée.

La fiche récapitulative mentionnera également les documents et les matériels à emporter par l'équipe de surveillance (en s'assurant que le(s) gestionnaire(s) en dispose(nt) d'un nombre d'exemplaires suffisant). Les moyens techniques mis à disposition des équipes de surveillance sont ceux utilisés en période normale, auxquels viennent s'ajouter, de façon non-exhaustive :

- des moyens de communications : poste radio analogique, téléphone mobile (l'utilisation de téléphones mobiles n'est pas forcément appropriée dans des situations de crise où les réseaux risquent d'être saturés, par ailleurs, une identification préalable des zones non couvertes par des moyens de communication est souhaitable),
- un véhicule, afin de parcourir un maximum de linéaire de digue en un minimum de temps (la circulation d'un véhicule sur les digues est toutefois conditionnée par les conditions hydrométéorologiques et de sécurité),
- des gilets de sauvetage,
- des lampes de poche et des piles de rechange, pour les visites effectuées en période nocturne.

Les consignes de surveillance sont élaborées dans un souci de sécurité des intervenants notamment en situation de crue et d'efficacité des communications et prises de décision.

Ces consignes sont mises à jour régulièrement, en particulier pour prendre en compte les évolutions des conditions d'accès aux ouvrages (voirie, nouvelles constructions...).

- **Les points à observer et informations à répertorier**

Mécanismes de rupture	Points d'observation	Surveillance visuelle en crue		
		Talus côté rivière (fleuve)	Crête	Talus côté terre (val)
Surverse	<i>Profil en long de la crête</i>		Vérification de la mise en place des batardeaux - comportement à la charge des batardeaux (stabilité, étanchéité, ...)	
	<i>Cote du cours d'eau, laisses de crue</i>	Relevé de la cote du cours d'eau (au moins par rapport à la crête). Repérage de la laisse de pointe de crue.	Indices et localisation d'une surverse récente : laisses, herbe couchée, ...	Indices et localisation d'une surverse récente : laisses, herbe couchée, ...
	<i>Déversement</i>		Surverse constatée : alerte !, dimensions de la lame d'eau, tenue au ravinement de la crête. Déversoir : en service ou non?, état du dispositif fusible, comportement du déversoir.	Surverse constatée : alerte !, dimensions de la lame d'eau, tenue au ravinement du talus. Déversoir : en service ou non?, comportement du coursier et du dissipateur d'énergie. Extension de l'inondation côté Val (à vue).
	<i>Dispositif de revanche</i>		Comportement à la charge du dispositif de revanche : aspect du contact avec le corps de digue, étanchéité, stabilité	
Erosions de surface / affouillements	<i>Effets sur talus des sollicitations hydrauliques fluviales</i>	Amorces ou développement d'anse d'érosion. Déstabilisation d'arbres, fissuration en sommet de talus.	Fissuration longitudinale, affaissements sur la crête, désordres sur ouvrages rigides, au droit de zones d'attaque côté rivière. Erosion de la crête : alerte !	Existence d'écoulements fluviaux côté Val et impacts éventuels en pied ou sur talus de digue
	<i>Protection de surface (revêtement)</i>	Tenue à l'érosion du revêtement de protection, indices de mouvement.		Tenue du revêtement de protection côté Val s'il existe
	<i>Protection de pied de talus</i>	En principe, non observable		
	<i>Proximité et tracé du lit mineur / caractéristique de l'écoulement</i>	Direction et vitesse du courant de rive. Existence et taille des vagues, remous, ressauts, turbulences, tourbillons, vortex.		
Erosion interne	<i>Végétation</i>			Vérification d'indice de fuites
	<i>Terriers</i>	Repérage et examen des gros terriers	Repérage et examen des gros terriers	Repérage des gros terriers - Vérification d'indice de fuites
	<i>Canalisations / traversée</i>			Vérification d'indice de fuites
	<i>Confortement</i>			Vérification d'indice de fuites
	<i>Ouvrages singuliers</i>			Vérification d'indice de fuites
	<i>Fuite</i>			Fuites, suintements, rigoles, zones humides ou saturées sur le talus ou son revêtement, au pied des souches, au débouché des terriers, canalisations, drains du confortement aval, sur les bâtiments encastrés ou autres ouvrages singuliers. Résurgences au de
	<i>Amorce de renard</i>	Fontis, cavitations singulières Tourbillons, vortex	Fontis, cavitations singulières	Turbidité des eaux de tous les écoulements constatés
Instabilité d'ensemble	<i>Saturation, piézométrie</i>		Vérification de la portance du sol Relevé des piézomètres	Vérification de la portance du sol Relevé des piézomètres, de la cote d'eau dans les puisards, puits, etc.
	<i>Mouvements de terrain</i>	Indices de mouvement de terrain (fissurations, bombements, loupes) en phase de dégrue.	Fissures longitudinales, affaissements - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides tels que chaussées, parapets, murets	Fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés
Brèche	<i>Accessibilité aux engins de terrassement</i>		Vérification du caractère praticable de la voie de circulation en crête	Vérification du caractère praticable de la voie de circulation en pied de talus

Tableau 5.5 : Surveillance visuelle en crue des digues fluviales en remblai - présentation synoptique des points à observer d'après [Mériaux et al, 2004] - ■ = indices à observer plus particulièrement

Les points à observer sont indiqués pour les digues fluviales en remblai dans le Tableau 5.5, selon les mécanismes de rupture redoutés et pour les trois différentes parties d'ouvrage à examiner.

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient, si possible, de procéder au relevé des mesures, tout au moins pour les instruments qui sont accessibles sans danger.

Pour le repérage des informations, l'utilisation d'un récepteur GPS portable est particulièrement intéressante, car rapide (y compris en conditions nocturnes), si toutefois une couverture forestière dense n'empêche pas la réception du signal GPS.

Enfin, la prise de vue photographique des désordres les plus importants est intéressante si elle peut être effectuée avec un appareil numérique dans le but de disposer de clichés immédiatement exploitables.

- **Modalités de report et de restitution des informations**

Il semble difficile d'imposer une saisie en fiche directement sur le terrain, tout au moins lors de l'intervention en état de vigilance forte. Dans un souci de rapidité, il convient de saisir les informations dans un carnet de notes sous la forme la plus simple, avec au minimum pour chaque observation : une référence PK (ou un « waypoint » GPS), un élément de repérage transversal même sommaire (ex : bas - milieu - haut du talus côté Val), une description succincte assortie d'un croquis éventuel, la référence des photos prises et la mention de l'heure (en plus de la date du jour). On recommande l'utilisation d'un dictaphone qui permet d'enregistrer rapidement toutes les données listées ci-dessus.

Dans tous les cas, une fois la situation de crise passée, les notes de terrain et/ou les enregistrements, issus de la surveillance en crue, devront être exploités par le service gestionnaire afin de compléter la connaissance de la digue : il est recommandé, à ce titre, de conduire une visite de surveillance post-événement (cf 5.5.4.2 ci-après) destinée à valider les observations en crue (vérification/amélioration du repérage) et à apprécier les dernières évolutions des désordres.

- **Sécurité des intervenants et interruption de la surveillance**

La sécurité des intervenants devra être une préoccupation constante dans l'élaboration des consignes écrites. Des équipements particuliers de sécurité et de communication sont à prévoir, notamment gilets de sauvetage et talkies-walkies (l'utilisation de téléphone mobiles n'est pas forcément appropriée dans des situations de crise où les réseaux risquent d'être saturés).

Si une équipe de surveillance est confrontée à une situation de mise en danger, il convient alors d'interrompre la surveillance⁴⁰. Il conviendra dans ce cas d'avertir le responsable en charge de la coordination des actions en situation de crise.

5.5.3. **Actions d'urgence**

Si, lors des visites de surveillance en crue ou lors d'une tempête, un désordre ou des présomptions de désordres pouvant conduire à une rupture partielle ou totale d'une digue sont détectés, une intervention d'urgence peut être programmée par le(s) gestionnaire(s), si

⁴⁰ Décision à prendre par le chef d'équipe compétent sur le terrain en liaison avec le PC de crise.

les conditions le permettent (non mise en danger des intervenants). Ces interventions peuvent être effectuées parallèlement à la mise en sécurité des personnes présentes dans la zone protégée par la digue.

Les travaux d'urgence ont pour objectif de stabiliser **temporairement** l'ouvrage ou retarder sa rupture lors d'une situation de crise (crue, tempête marine). En effet, en période d'urgence, il n'est généralement pas possible de conforter rapidement un ouvrage de manière suffisamment fiable pour être définitive. Les interventions d'urgence nécessitent donc obligatoirement que des travaux de confortement définitif soient réalisés ultérieurement (§ 5.5.4).

Il en découle trois niveaux d'interventions :

- les travaux de première urgence : effectués lors de la situation de crise, afin de stabiliser l'ouvrage pendant la crue ou la tempête marine,
- les travaux d'urgence post-crue : suite à l'inspection post-événement (cf 5.5.4.2), lorsque les ouvrages sont accessibles, afin de rétablir la continuité de la protection avec un niveau de sûreté « acceptable » à court terme,
- les travaux de confortement définitifs, visant à conforter ou reconstruire l'ouvrage afin qu'il retrouve un niveau de sûreté au moins équivalent à la situation antérieure à la crue (évoqués au 5.5.4).

En ce qui concerne les travaux de première urgence, une des difficultés réside dans le fait que le constat d'un indice de désordre en crue ou lors d'une tempête marine peut précéder de très peu une rupture plus ou moins soudaine de l'ouvrage. Il convient donc que les travaux d'urgence soient réalisés le plus rapidement possible après détection d'un indice de désordre. Pour se montrer réactif en situation d'urgence, il est fortement recommandé que les gestionnaires de digues disposent de marchés à bons de commande avec des entreprises de travaux publics locales, pouvant être mobilisées en interventions d'urgence (après mise en alerte à partir d'un certain niveau de vigilance). De plus, le(s) gestionnaire(s) doit(doivent) hors période de crise identifier avec ces entreprises des stocks de matériaux utilisables pour les confortements d'urgence, et s'assurer régulièrement de leur disponibilité.

Les travaux de première urgence et d'urgence post-crue doivent avoir pour but de stopper ou de limiter la libération d'eau dans la zone protégée par le système de protection, de faire face à la fin de la situation de crise et à une éventuelle nouvelle crue ou tempête. Les travaux ne doivent pas être considérés comme définitifs, les conditions techniques n'étant pas réunies pour les exécuter selon les règles de l'Art (par exemple, quasi-impossibilité de mettre en œuvre des matériaux fins dans de bonnes conditions de compactage du fait du degré de saturation élevé des terrains). Les travaux d'urgence consistant à reconstituer une digue, en crue ou immédiatement après, devraient raisonnablement être limités à une fonction unique : colmater ou refermer rapidement une brèche afin d'éviter une seconde inondation. Dans cette optique, il est préférable de privilégier la résistance mécanique à l'étanchéité.

La teneur des travaux à mettre en œuvre nécessitent que le(s) mécanisme(s) en cours (fuite, suintement, surverse, glissement, affaissement...) soi(en)t bien identifiés lors de la visite de surveillance. Les travaux de première urgence et d'urgence sont donc à adapter à chaque ouvrage et à chaque situation de crise. Dans la mesure du possible, les différents types de confortements possibles en situation d'urgence peuvent être réfléchis « à froid » hors période de crise. Cela permet notamment de préparer des stocks de matériaux (par exemple, sacs de sable) mobilisables en urgence.

Uniquement à titre d'illustration, quelques exemples de confortement de première urgence ou d'urgence sont donnés ci-dessous.

En cas de suintements ou de fuite constatés sur le talus aval d'un ouvrage, ou en cas de faible surverse, il est, par exemple, possible de mettre en place :

- des sacs de sable par intervention humaine (figure 5.2)
- des remblais ou sacs de sable (type big-bags) à la pelle mécanique (figure 5.3).



Figure 5.2 : Pose de sacs autour du débouché côté val d'une conduite traversante en Camargue



Figure 5.3 : Disposition de sacs en stabilisation provisoire de talus au droit d'une résurgence côté val

Si une amorce de renard hydraulique est constatée, un recours aux engins mécaniques permet d'effectuer :

- un colmatage à l'argile sur le débouché immergé côté fleuve s'il est accessible,
- des interventions sur le débouché côté zone protégée,
- des blocages en enrochements.

Ces interventions supposent bien sûr que les engins mécaniques aient un accès sécurisé à la(les) zone(s) de désordre constatée(s) sur l'ouvrage.



Figure 5.4 : Confortement sommaire de talus côté fleuve réalisé en crue

En crue ou lors d'une tempête marine, il est également possible d'intervenir après rupture de l'ouvrage, sous réserve de la non mise en danger des intervenants. A titre d'exemple, les interventions suivantes ont été effectuées sur des digues fluviales :

- interventions aériennes : mise en place de big-bags par hélicoptage lors crues de 1993-1994 en Camargue,
- Interventions terrestres : fermeture de brèche par remblai de ceinture côté val lors des crues du Petit Rhône à Claire Farine en décembre 2003 (figure 5.5).



Figure 5.5 : Vue panoramique des remblais de fermeture en crue et post-crue de la brèche de Claire-Farine (Petit Rhône rive droite, décembre 2003)- Photo P. Mériaux, Irstea.

En ce qui concerne les travaux d'urgence post-crue, ceux-ci sont réalisés après la décrue lorsque la digue est accessible. L'examen visuel post-événement peut mettre en évidence des pathologies de nature à augmenter le risque de rupture en cas de nouvelle crue, et nécessitant un confortement provisoire :

- présence de glissements sur l'un des talus,
- présence d'anses d'érosion sur le pied talus côté eau ou sur la berge à proximité directe du pied de digue,
- observation de zones humides en pied de talus côté zone protégée,

- apparition d'un fontis en crête de digue,
- amorce de renard hydraulique,
- zone ayant subi un début de surverse,
- ...

A titre d'illustrations, les travaux suivants peuvent être effectués sur des digues fluviales :

- sur le talus côté ZP (à privilégier) : recharge ou engraissements drainants,
- sur le talus côté eau (conditions généralement peu favorables à des travaux d'étanchement) : pose d'enrochements,
- sur la crête : remblaiement de points bas.



Figure 5.6 : Confortement par mise en place d'un remblai protégé par enrochements de la digue de Comps (30) suite à la crue de septembre 2002 – Photo P. Mériaux, Irstea.

5.5.4. Dispositions post-événements

5.5.4.1. Travaux de confortement définitifs

Les travaux de confortement définitifs sont réalisés sur les digues ayant subi des dégâts suite à une crue ou tout autre type d'agression extérieure. Ces travaux sont nécessaires pour conforter les zones ayant fait l'objet d'une intervention de première urgence ou d'urgence.

Comme pour les ouvrages neufs ou les réhabilitations ou confortements d'ouvrage existant, il est nécessaire de réaliser des études préalables, pouvant comprendre par exemple :

- un diagnostic visuel,
- un relevé bathymétrique,
- des reconnaissances géotechniques et/ou géophysique, avec prélèvements de matériaux pour analyses en laboratoire.

S'il s'agit de causes géotechniques, le diagnostic géotechnique (mission d'ingénierie géotechnique de type G5 au sens de la norme NF P94-500) doit permettre de comprendre le mécanisme à l'origine des désordres. Pour certaines autres causes telles que les sollicitations hydrauliques, la morphologie, etc..., le géotechnicien n'est pas nécessairement seul compétent. Une solution de confortement définitive pourra ensuite être élaborée. Il convient de bien distinguer le confortement définitif des travaux d'urgence post-crue ; même s'ils doivent être réalisés dans des délais contraints, ces travaux seront conçus et réalisés selon les critères définis au chapitre 4.

Les confortements définitifs doivent faire l'objet d'un dossier de demande d'autorisation, qui sera contrôlé par le SCSOH. Les études et la maîtrise d'œuvre doivent être obligatoirement

conduites par un bureau d'étude agréé. Enfin, les travaux de confortement définitifs doivent être réalisés en période favorable vis-à-vis du risque de crue, mais également vis-à-vis de la réalisation des terrassements.

A titre d'illustrations, les travaux de confortements définitifs suivants peuvent être mis en œuvre sur des digues fluviales :

- sur le talus côté val : recharge drainante, reconstitution de talus après surverse, tranchées de décompression en pied, blocage contre-filtre au débouché des traversées fuyardes, engraisements, ...
- sur le talus côté fleuve : recharge étanche (cas où l'étanchéité est recherchée) si les contraintes liées au cours d'eau sont limitées, mise en place d'un sabot ou d'une protection en enrochements (si le diagnostic permet de conclure à la faisabilité).

Enfin, un déplacement de la digue peut également être étudié.

5.5.4.2. *Examen visuel post-événement*

Après une crue, une tempête ou un séisme d'ampleur suffisamment importante, le gestionnaire doit procéder à l'examen méthodique et complet du système de protection, relever les dommages éventuels subis par les ouvrages (vérification des informations recueillies lors de la visite lors de l'événement, et apport d'informations complémentaires), avec un repérage précis (PK, GPS, ...), et prendre certaines décisions en matière de réparations des dégradations survenues pendant ou immédiatement après l'événement. Il est préconisé que cet examen soit du niveau d'un examen visuel détaillé, analogue à celui effectué lors d'une visite technique approfondie (cf 5.2.2). La particularité est que cet examen doit être réalisé dans les meilleurs délais après un événement, afin de bénéficier de toute la fraîcheur des indices (zones humides, laisses de crue, érosions, mouvements de terrain, etc.) et avant que ceux-ci ne s'estompent ou ne s'effacent. Idéalement, l'examen post-événement débute dans les 2 à 3 jours suivant la fin de l'événement.

Il est recommandé au gestionnaire de faire appel à un personnel compétent en matière d'ouvrages hydrauliques (moyens propres s'ils existent, ou bureau d'étude compétent). Néanmoins, si ce personnel n'est pas mobilisable rapidement, et dans la mesure où il est primordial d'effectuer l'examen visuel détaillé dans les meilleurs délais après un événement, le gestionnaire peut mobiliser les équipes de surveillance pour effectuer un premier relevé des indices de désordres.

Les désordres, dont on recherche plus particulièrement les indices, peuvent résulter des contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par la digue (charge hydraulique, surverse, courant de rive, vagues) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers ou sous le corps de digue, état de saturation, courants hydrauliques, pressions interstitielles). Les points à observer sont répertoriés dans le tableau 5.6 pour les digues fluviales selon les mécanismes de rupture redoutés et pour les trois différentes parties d'ouvrage à examiner.

Les déversoirs doivent faire l'objet d'un examen particulièrement attentif, surtout s'ils ont fonctionné pendant la pointe de crue. L'objectif premier est de repérer toutes les traces d'érosion et d'affouillement.

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient de procéder au relevé des mesures.

Mécanismes de rupture	Points d'observation	Surveillance visuelle post-cru		
		Talus côté rivière (fleuve)	Crête	Talus côté terre (val)
Surverse	Profil en long de la crête		(Dys)fonctionnement des passages batardés.	
	Cote du cours d'eau, laisses de crue	Relevé de la cote du cours d'eau. Repérage de la laisse de pointe de crue.	Indices et localisation de surverses s'étant produites lors de la crue : laisses, herbe couchée, ...	Indices et localisation de surverses s'étant produites lors de la crue : laisses, herbe couchée, ... Examen des laisses de crue / inondation côté Val
	Déversement		Surverse constatée : dimensions de la (des) zone(s) ayant surversé, état de la crête, de la chaussée et de ses bas-côtés. Déversoir : a-t-il fonctionné ou non?, état du dispositif fusible (fondu ou non?), état du radier et des murs latéraux (bajoyers).	Surverse constatée : dimensions de la (des) zone(s) ayant surversé, état du talus et de son pied, ampleur des affouillements. Déversoir : a-t-il fonctionné ou non?, état du coursier et du dissipateur d'énergie.
	Dispositif de revanche		A-t-il été en charge ou non?: aspect du contact avec le corps de digue, stabilité	
Erosions de surface / affouillements	Effets sur talus des sollicitations hydrauliques fluviales	Diagnostic minutieux de l'état du talus et des berges (si proches de la digue), localisation et dimensions des anses d'érosion et/ou des loupes de glissement, aspect de la végétation (berge et talus), présence d'embâcles	Fissuration longitudinale, affaissements sur la crête, désordres sur ouvrages rigides, au droit de zones d'attaque côté rivière. Erosion de la crête : dimensions de la zone érodée.	Etat du talus et de son pied vis-à-vis de l'impact éventuel d'écoulements ou d'une inondation côté Val
	Protection de surface (revêtement)	Etat du revêtement de protection : sous-cavage, fissuration, indices de mouvement, fonctionnement au ressuyage (écoulements par les barbacanes ou les joints).		Etat du revêtement de protection côté Val s'il existe
	Protection de pied de talus	Etat de la protection de pied de talus : sous-cavage, fissuration, indices de mouvement, fonctionnement au ressuyage.		
	Proximité et tracé du lit mineur / caractéristique de l'écoulement	Modification du tracé du lit mineur, dépôts alluvionnaires, méandrement, nouvelles caractéristiques de l'écoulement		
Erosion interne	Végétation	Recherche de cavitations autour des souches		Vérification d'indice de fuites autour des souches
	Terriers	Repérage et examen des gros terriers	Repérage et examen des gros terriers	Repérage des gros terriers - Vérification d'indice de fuites
	Canalisations / traversée	Recherche de cavitations autour des entonnements		Vérification d'indice de fuites
	Confortement	Etat, comportement au ressuyage		Vérification d'indice de fuites au débouché des drains
	Ouvrages singuliers	Recherche de cavitations sur les surfaces de contact avec le remblai		Vérification d'indice de fuites
	Fuite			Rigoles, fuites résiduelles, suintements, zones humides ou saturées sur le talus ou son revêtement, au pied des souches, au débouché des terriers, canalisations, drains du confortement aval, sur les bâtiments encastrés ou autres ouvrages singuliers. Résurgences persistantes, au delà du pied de talus, dans les fossés, canaux, dépressions, puisards,
	(Amorce de) renard	Fontis, cavitations singulières	Fontis	Turbidité des eaux des écoulements résiduels constatés. Si renard constaté : localisation et dimensions de l'orifice aval.
Instabilité d'ensemble	Saturation, piézométrie	Vérification de la portance du sol. Relevé des piézomètres s'ils sont en état de fonctionnement	Vérification de la portance du sol. Relevé des piézomètres	Vérification de la portance du sol. Relevé des piézomètres, de la cote d'eau dans les puisards, puits, etc.
	Mouvements de terrain	Recherche minutieuse d'indices frais de mouvement de terrain : fissures, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés	Fissures longitudinales, affaissements - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides tels que chaussées, parapets, murets ..., notamment vers les deux bords de la crête	Fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés

Tableau 5.6 : Surveillance visuelle post-cru des digues fluviales en remblai - présentation synoptique des points à observer d'après [Mériaux et al, 20041].

█ = indices à observer plus particulièrement

5.5.4.3. Enseignements et suites données à l'événement

Les consignes écrites précisent les conditions entraînant la réalisation d'un rapport consécutif à un épisode de crue important ou un incident pendant la crue. Le rapport comprendra notamment :

- Diagnostic, confortement des réparations d'urgence (réparations définitives ultérieures)
- Retour d'expérience détaillé : technique, financier

L'ensemble sera archivé et mentionné sur le registre.

5.6. Déclaration des Événements Importants pour la Sûreté Hydraulique

Pour juger de l'efficacité et mesurer un niveau de sûreté, le retour d'expérience est essentiel. La détection des événements importants du point de vue de la sûreté hydraulique, leur analyse et le partage des éventuelles conclusions résultant de cette analyse sont une source de progrès importante pour la sûreté hydraulique.

C'est pourquoi, un dispositif de déclaration et de cotation des événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) a été élaboré. Toute déclaration doit être adressée au préfet, accompagnée d'une proposition de classification selon le niveau de gravité.

Dans le Tableau 5.7 est précisée la nature des événements à déclarer en fonction de l'échelle de gravité et sont donnés quelques exemples.

On observera que la limite entre l'incident grave et l'incident peut être subjective. De plus, contrairement aux barrages où la mise en eau est permanente et bénéficiant le cas échéant de dispositifs d'auscultation, la vitesse d'évolution d'une dégradation de digue au cours d'une crue est difficile à estimer. C'est pourquoi, l'importance réside davantage dans la déclaration de l'événement que dans la classification qui pourra au besoin être modifiée par le préfet.

Par contre, il ne s'agira pas de déclarer comme incident, ce qui relève de la maintenance périodique de l'ouvrage comme un terrier localisé ou des pierres déjointoyées,

La déclaration est faite par le responsable de l'ouvrage dans des délais variant selon la gravité :

- de façon immédiate pour les accidents,
- dans la limite d'une semaine pour les incidents graves,
- dans le cadre d'une déclaration annuelle pour les incidents.

Le préfet peut demander au responsable de l'ouvrage de lui transmettre un rapport précisant les circonstances de l'événement, analysant ses causes et indiquant les mesures prises ou envisagées pour éviter qu'il ne se reproduise.

Échelle de gravité	Nature des événements	Exemples et commentaires
Accident : couleur rouge	Événement à caractère hydraulique ayant entraîné : - soit des décès ou blessures graves aux personnes, - soit une inondation totale ou partielle de la zone protégée suite à une brèche.	- brèche provoquant une inondation quelle que soit son importance - au cours d'une crue conjugué à un événement météorologique concernant la zone protégée, inondation causée par le dysfonctionnement d'une station d'évacuation des eaux de ruissellement
Incident grave : couleur orange	Événement : - à caractère hydraulique ou consécutif à une crue ayant entraîné une mise en danger des personnes sans qu'elles aient subi de blessures graves, - ayant entraîné des dégradations importantes de l'ouvrage, quelles que soient leurs origines, mettant en cause sa capacité à résister à une nouvelle crue et nécessitant une réparation en urgence.	- Glissement de talus - Affouillement de grande ampleur - Fontis ou indice d'érosion interne - Ouvrage sous-cavé - Fissure importante d'un mur remettant en cause sa stabilité - Chute d'un arbre ayant entraîné tout ou partie du corps de digue - Excavation causée par un riverain
Incident : couleur jaune	Événement ayant conduit une dégradation significative de la digue nécessitant une réparation dans les meilleurs délais, sans mise en danger des personnes.	- Affouillement localisé - Pierres d'un perré emportées - Enrochements glissés - Fissure longitudinale en crête de talus, précurseur d'un glissement

Tableau 5.7 : Échelle de gravité des événements importants pour la sûreté hydrauliques

6. Bibliographie

BLANCHET C. et MORIN E. (1971). Les affouillements et la protection des berges dans les coudes des rivières à fond mobile, SOGREAH et Ministère de l'équipement et du logement, 47 p.

Bonelli S. and Benahmed N. (2011) -Piping Flow erosion in water retaining structures –The international journal on hydropower and dams – issue 3

Bonelli (coord.)- Erosion des géo-matériaux – érosion interne de surface – Editions Lavoisier - 2012

Bonelli (editor) – Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees – Editions Wiley-ISTE - 2013

BRETESCHE B. (2000)., La méthode APTE : Analyse de la valeur, analyse fonctionnelle, Pétrelle éditions.

CETMEF, (2009). Guide enrochements : l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques – version française du Rock Manual- 2^{ème} édition, <http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/guide-enrochement-a130.html>

CETMEF (2009). Guide d'utilisation du béton en site maritime. Guide technique ref CETMEF : PM 08.01, 133 p.

CFGB (1997). Petits barrages – Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi, Cemagref éditions, 176p. <http://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/pb2002-fr.pdf>

CFBR (2010). Petits barrages – Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai, 84 p. + annexes,. <http://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/barremblai2012.pdf>

CFG, (2003). Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion. <http://www.cfg.asso.fr/publications-supports-pedagogiques/guides-de-recommandations>

CFG, (2013). Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration. <http://www.cfg.asso.fr/publications-supports-pedagogiques/guides-de-recommandations>

CFG, (1991). Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes – fascicule 10, version en cours d'actualisation et à paraître.

Comité International des Grands Barrages (CIGB/ICOLD) : internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations – bulletin n°164 – Volume 1 : internal erosion processes and engineering assessment – 2013

DEGOUTTE, (2006). Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : hydraulique et morphologie fluviales appliquées, éditions Tec & Doc Lavoisier, 394p.

DEGOUTTE G., (2012). Les déversoirs sur digues fluviales, QUAE éditions, 184 p.

Deroo L., FRY J.J. – Recommandations ERINOH (volume 3) : maîtrise de l'érosion interne – 2ème Colloque National sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions – 2013 – Comité Français des Barrages et Réservoirs ;

ERINOH, (2009). Caractérisation de l'érosion interne au laboratoire, rapport final axe 1 du projet national ANR sur l'ERosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques, 94 p. <http://erinoh.lyon.cemagref.fr/>

EurOtop, (2007). Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual, 193 p. <http://www.overtopping-manual.com/eurotop.pdf>

FAUCHARD C. et MERIAUX P. (2004). Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues, Cemagref éditions, 114 p.

FELIX H., BEULLAC B., TOURMENT R., MERIAUX P., PEYRAS L. (2011) Méthodologie pour l'analyse fonctionnelle des ouvrages hydrauliques à grand linéaire. Colloque CFBR/AFEID, Etudes de dangers 2011, 22 p.

FLOODPROBE work package 3 : 3.1 érosion interne, résistance à l'érosion externe par végétation, transitions ; 3.2 Levé Lidar et géophysique ; 3.3 Diagnostics et SIG. Documents en cours d'édition, <http://www.floodprobe.eu/project-documents.asp>

Fry J.J., Courivaud J.R. – Analyses de modes de rupture peu communs pouvant affecter des digues – 2ème Colloque National sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions – 2013 – Comité Français des Barrages et Réservoirs ;

IGIGABEL M. et al (2013). Définition des systèmes de protection contre les submersions et analyse de leur fonctionnement : méthodologie issue du retour d'expérience Xynyhia, 2^{ème} colloque national, Dignes 2013 Hermes-Lavoisier, 8 p.

GIROUD JP., (1997). Filtres géosynthétiques : dimensionnement et installation fiables, Rencontres géosynthétiques 1997, 17 p.

International Levee Handbook. Coordonné par CIRIA, 2013, 1332 p. <http://www.leveehandbook.net/>

ISO 21650, (2007). Effets des vagues et des courants sur les structures côtières. Uniquement en anglais

LAMBERT G., (2000). Les géotextiles : fonctions, caractéristiques et dimensionnement. Ingénieries EAT n° 22, juin 2006, p 17 à 26

LANG M. et LAVABRE J., (2007). Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations, Editions QUAE, 232 p.

LCPC (1994). Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction. Document LCPC 53 p.

LCPC (2007). Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne. Collection guides techniques LCPC, 60p.

LINO M., MERIAUX P. et ROYET P. (2000). Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne, Cemagref éditions, 224 p.

MALLET T., DEGOUTTE G. et ROYET P. (2013). Niveaux de protection, de sûreté et de danger pour les digues fluviales : définitions, conséquences et responsabilités, 2^{ème} colloque national, Dignes 2013 Hermes-Lavoisier, 9 p.

MERIAUX P., ROYET R. et FOLTON C. (2004). Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations, Cemagref éditions, 134 p. + annexes

MERIAUX P., MONIER T., TOURMENT R., MALLET T., PALMA LOPES S., MAURIN J. et PINHAS M. (2012). L'auscultation des digues de protection contre les inondations : un concept encore à inventer. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues - Pratiques et perspectives », 27-28 novembre 2012, Chambéry, 17 p.

MERIAUX P., AURIAU L., MAURIN J., BOULAY A., LACOMBE S. et MARMU S., (2013). La télédétection LiDAR héliportée haute résolution, un outil efficace pour étudier la topographie et contribuer au diagnostic des digues de protection. 2^{ème} colloque national, Dignes 2013 Hermes-Lavoisier, 10 p

Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer, (2010). La gestion du trait de côte, Editions QUAE, 304 p.

NF P 94-500 (2013). Missions d'ingénierie géotechnique - classification et spécifications. Norme Afnor.

ROYET P. et BONELLI S. (2013). Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions, actes du 2^{ème} colloque national, Dignes 2013 Hermes-Lavoisier.

SERRE D., (2005). Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations, modélisation de critères de décision dans un Système d'Information. Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée, ED sciences de l'information géographique.

SETRA, (2006). Aide à la rédaction des CCTP terrassements. Cédérom, <http://www.setra.equipement.gouv.fr/Aide-a-la-redaction-des-CCTP,2823.html>

SETRA, (2010). Analyse d'un Plan d'Assurance Qualité (PAQ) de marché de terrassements.

SETRA/LCPC, (2000). Réalisation des remblais et des couches de forme. Edité par le Ministère de l'Equipement, du logement et des transports.

SETRA (2005). MEMOAR : Mémento pour la mise en oeuvre sur ouvrage d'art. Cédérom mis à jour régulièrement, <http://memoar.setra.developpement-durable.gouv.fr/>

SIMM J., WALLIS M., SMITH P., TOURMENT R., VEYLON G., DENIAUD Y., DURAND E., McVICKER J., HERSH-BURDICK R. (2012) The significance of failure modes in the design and management of levees-a perspective from the International Levee Handbook team. 2nd European conference on Flood Risk Management, FLOODrisk2012, Rotterdam, 2012, 9 p.

SIMON B., (2007). La mare océanique côtière, édité par l'Institut Océanographique, 433 p.

SOGREAH (1971). Les affouillements et la protection des berges dans les coudes des rivières à fond mobile. Etude STCPM

TOURMENT R., BEULLAC B., DENIAUD Y., SIMM J., WALLIS M., SHARP M., POHL R., VAN HEMERT H. (2013) De l'EDD des digues en France aux travaux de l'ILH sur les mécanismes élémentaires et les scénarios de défaillance. 2^{ème} colloque national, Dignes 2013 Hermes-Lavoisier, 8 p.

TOURMENT R., BEULLAC B., DEGOUTTE G. (2013) Une méthode d'analyse de la défaillance hydraulique des systèmes de protection contre les inondations utilisable dans les études de dangers, Congrès SHF : «Evènements extrêmes d'inondation 2013», Lyon, 13-14 novembre 2013, 8 p.

TRATAPEL G., Etat du patrimoine des digues du Rhone ; <http://www.symposcience.org/exl-doc/colloque/ART-00000602.pdf>

URSAT P., (1992). Le Perméafor : Appareillage de diagraphie de perméabilité. Bulletin de liaison du LPC, n°178, mars-avril 1992, p. 19 à 26.

VUILLET M. (2012). Élaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Ecole doctorale Ville, transport et Territoires.

Zanetti et al, (2008). L'enracinement des arbres dans les digues en remblai : étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages. Ingénierie EAT n°53, p. 49 à 67.