



Recueil de méthodes de confortement et réparations des digues de protection en remblai

Rémy Tourment, Adrien Rulhiere, Daniel Poulain, Mathieu Sutter, Christophe Chevalier, Yann Deniaud, Lucile Saussaye, Patrick Ledoux, Jean-Charles Palacios, Thibaut Mallet

► To cite this version:

Rémy Tourment, Adrien Rulhiere, Daniel Poulain, Mathieu Sutter, Christophe Chevalier, et al.. Recueil de méthodes de confortement et réparations des digues de protection en remblai. 2021, 979-10-96371-17-4. hal-03285822

HAL Id: hal-03285822

<https://hal.inrae.fr/hal-03285822>

Submitted on 13 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai



mai 2021

Partie I – Cadre Général

Edition CFBR – 2021
www.barrages-cfbr.eu

Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai

ISBN : 979-10-96371-17-4 – dépôt légal 3^{ème} trimestre 2021



Ce document est mis à disposition selon les termes de la licence [Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 3.0 France](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr). Pour accéder à une copie de cette licence, merci de vous rendre à l'adresse suivante <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr>.

Crédit photo page de couverture : Vue du chantier de confortement de la Grande Levée de l'Authion en mars 2021 à Varennes-sur-Loire (49) (Crédit photo : Cédric Helsly).

PRÉFACE

La France dispose d'un important patrimoine de digues de protection fluviales et maritimes et les problématiques de l'identification, du diagnostic et du confortement des digues se sont progressivement imposées comme un sujet majeur dans le monde des ouvrages hydrauliques.

Ma première expérience en matière de digues remonte à la fin des années 90 avec les diagnostics des levées de la Loire Moyenne dans le cadre du Plan Loire. À cette époque le corpus technique sur les digues était limité et la dimension géotechnique était dominante. Le Cemagref, aujourd'hui INRAE, a joué un rôle prépondérant dans l'animation technique de cette nouvelle discipline. De grands maîtres d'ouvrage de digues ont joué pleinement leur part dans la remise à niveau de nos ouvrages. L'État, pour les digues domaniales, a joué un rôle de premier plan avec par exemple le Plan Loire déjà cité au début des années 2000 ou le confortement des digues de Toulouse dans la dernière décennie. De grands maîtres d'ouvrages régionaux comme le SYMADREM sur le territoire du delta du Rhône ou le SYMBHI dans l'Isère, ont également contribué à animer et financer de nombreuses études et réalisations.

Le CFBR s'est saisi de la problématique des digues en 2004 et le groupe de travail sur le confortement et la réparation des digues du CFBR a été créé en 2014. Il répondait à une demande des acteurs, maîtres d'ouvrages et bureaux d'études, d'une synthèse du retour d'expérience sur le confortement et la réparation des digues dans la dernière décennie. Il livre aujourd'hui un guide opérationnel sur les techniques de confortement et de réparation des digues.

La problématique des digues s'est progressivement développée en France à partir du milieu des années 90 et un vaste effort de remise à niveau du patrimoine national a été réalisé. La crue du Rhône de l'hiver 1993-1994 a incontestablement constitué un élément déclencheur.

Plusieurs colloques ont accompagné cette mobilisation nationale sur la problématique des digues de protection contre les inondations.

En 2004, le colloque technique du CFBR est consacré à la « *Sécurité des digues fluviales et de navigation* », préparant l'entrée des digues dans le champ de compétences du CFBR. Ce colloque faisait le point sur la première décennie de mise en œuvre du plan national de remise à niveau des digues françaises. Il s'est tenu moins d'un an après la crue exceptionnelle du Rhône de décembre 2003 qui a démontré la fragilité des digues de protection en Camargue.

En 2011, les digues font leur entrée officielle dans le champ de compétences du CFBR à l'occasion d'une mise à jour de nos statuts.

Sur une thématique recentrée sur les ouvrages de protection (digues fluviales et maritimes), *Digues 2013* s'est déroulé en juin 2013 à Aix-en-Provence et a permis de mesurer le chemin parcouru en un peu moins de 10 ans. Le Groupe de travail sur le confortement et la réparation des digues est créé dans la foulée de cet événement avec l'ambition d'établir un recueil sur les méthodes de confortement et de réparation des digues à partir de l'important retour d'expérience disponible et des avancées dans la conception et la mise en œuvre de ces confortements et réparations.

En 2015 est créé au sein du Club européen de la CIGB (EURCOLD) un Groupe de travail européen sur les digues qui permet de prendre en compte les expériences de nos voisins et particulièrement les Pays-Bas et la Grande-Bretagne ; les États-Unis étant également associés étroitement à la dizaine de pays européens membres. La France est très active dans ce groupe.

En 2017, la CIGB s'empare de la thématique des digues en créant le Comité Technique *LE* (Levees). Dès le congrès de la CIGB à Vienne en 21018, une des quatre questions est consacrée aux digues : Mode de rupture des digues, Études, Construction et Renforcement, Gestion, Inspection et Auscultation, débouchant alors sur une vision mondiale de la problématique des digues.

En 2019, se tient à Aix-en-Provence le 3^{ème} colloque *Digue 2019* sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations, organisé par IRSTEA (désormais INRAE) et dont le CFBR fut partenaire. Un an après la promulgation de la GEMAPI, ce colloque de la maturité a été un grand succès.

Le domaine des digues connaît une forte activité avec la mise en place en 2018 de la compétence GEMAPI qui suscite de nombreuses études de structuration des maîtrises d'ouvrages, d'identification et de mise à niveau des ouvrages de protection contre les inondations. De nombreux chantiers sont en cours. On note également une forte activité de R&D, en particulier au niveau : de nouveaux matériaux de construction (sols traités, biosols, protections...), des technologies d'auscultation et de surveillance, des modélisations des mécanismes à l'origine des dégradations et des ruptures et enfin des méthodes de diagnostic et d'analyse de risque. Cette réflexion est alimentée par une accidentologie riche, tout au moins si on la compare à celle des barrages. Les incidents et brèches lors des crues sont plus fréquents et fournissent une large source d'informations.

Je ne terminerai pas cette préface sans mettre avant le rôle exceptionnel joué par Rémy Tourment. Il est présent d'un bout à l'autre de la saga que je viens de présenter, tant au plan national en tant qu'animateur du GT du CFBR, qu'europpéen en tant qu'animateur du GT européen et international en tant que président du Comité technique *LE* de la CIGB. J'associe volontiers à cet hommage INRAE (ex Cemagref, IRSTEA) qui depuis les années 90 a animé avec constance et talent la problématique des digues au sein de notre communauté. Je remercie également au nom du CFBR l'ensemble des membres du groupe de travail pour leur travail au service de notre association.

Le présent recueil présente la démarche globale du confortement et des réparations, depuis le diagnostic, puis la conception et enfin la réalisation. Il est basé sur le retour d'expérience de plus de 150 chantiers, ce qui lui confère une forte crédibilité. Je suis convaincu que le recueil des méthodes et techniques de confortement et de réparation des digues de protection en remblai et ses nombreuses fiches techniques et fiches de cas seront extrêmement utiles aux maîtres d'ouvrages, bureaux d'études et entreprises qui œuvrent pour la mise à niveau de notre riche patrimoine de digues.

Michel Lino
Président du CFBR

Avertissement

Les présentes pratiques françaises sont issues des travaux d'un Groupe de Travail (GT) du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR), menés de mai 2014 à mai 2021.

La présente version de ce document constitue une première version de ce retour d'expériences par les membres du CFBR. Il est composé d'une première partie de type "guide" et d'une deuxième partie regroupant des fiches basées sur le retour d'expérience sur des travaux. La profession est à ce titre invitée à faire part de contributions complémentaires, principalement sous la forme de fiches de cas ou de fiches "technique". Le CFBR prévoit, dans un délai de quelques années (3 à 5 ans en général), et sur la base du retour d'expériences et de la pratique de la profession, de :

- compléter ce document par de nouvelles fiches descriptives de techniques,
- enrichir le retour d'expérience par la présentation d'études de cas réels en lien avec une ou plusieurs techniques présentées dans des fiches techniques.

Par ailleurs le recueil des techniques présentées ne prétend pas à l'exhaustivité, et le document n'a pas de valeur prescriptive, par contre lorsqu'elles existent les références normatives ou les recommandations concernées sont citées.

Table des matières

Partie I

PRÉFACE	1
TABLE DES MATIERES	4
PARTIE I	4
PARTIE II	8
AVANT-PROPOS	11
Contexte	11
Les digues et les autres ouvrages hydrauliques	11
Portée du document	12
Contenu du document	12
Mandat du groupe de travail	13
Démarche conceptuelle et l'utilisation du guide	13
Groupe de travail	13
Terminologie	14
1 OBJECTIFS ET CONTENU DU DOCUMENT	15
1.1 CONSTRUCTION, CONFORTEMENTS ET REPARATIONS	15
1.2 OBJECTIFS DU DOCUMENT	15
1.3 DEMARCHES DE REALISATION ET D'UTILISATION DU DOCUMENT	16
1.4 CONTENU DU DOCUMENT	17
2 ÉLÉMENTS COMMUNS A LA DEMARCHE DE CONCEPTION D'UN CONFORTEMENT OU D'UNE REPARATION	20
2.1 UNE ETAPE PREALABLE INDISPENSABLE : LE DIAGNOSTIC	20
2.1.1 Objectifs et contenus d'un diagnostic	20
2.1.2 Mécanismes et scénarios de défaillance	22
2.1.3 Choix des principes de confortement	25
2.1.4 Diagnostic et/ou analyse de risque	25
2.1.5 La prise en compte du retour d'expérience historique	26
2.2 LA CONCEPTION D'UN CONFORTEMENT/D'UNE REPARATION SUR UNE DIGUE	27
2.2.1 Données	28
2.2.1.1 Caractéristiques techniques	28
2.2.1.2 Autres contraintes de projet	29
2.2.2 Modélisations	30
2.2.3 Autres éléments à prendre en compte dans la conception	31
2.3 LA REALISATION (CHANTIER)	32
2.4 NOTION D'URGENCE	33
3 ÉTANCHEITE	35
3.1 MAITRISE LES ECOULEMENTS DANS LA DIGUE ET SA FONDATION	36
3.1.1 Fonctions principales, secondaires et/ou induites	37
3.1.2 Problématiques techniques traitées	37
3.1.3 Variantes	38
3.1.4 Solutions alternatives aux écrans d'étanchéité	39
3.1.5 Éléments additionnels	40
3.1.6 Défaillances potentielles induites	40
3.2 CONCEVOIR UN ECRAN D'ÉTANCHEITE	41
3.2.1 Recueillir des informations préalables spécifiques à ce type de confortement	41

3.2.2	<i>Préciser les caractéristiques attendues</i>	41
3.2.3	<i>Choisir la technique</i>	41
3.2.4	<i>Principes de dimensionnement de l'écran d'étanchéité</i>	43
3.3	REALISATION D'UN ECRAN D'ETANCHEITE	43
3.3.1	<i>Etudes et essais préalables</i>	43
3.3.2	<i>Réalisation</i>	44
3.3.3	<i>Nuisances/environnement</i>	44
3.3.4	<i>Contraintes liées à une crue ou à des travaux avoisinants au chantier</i>	44
3.4	SUIVRE UN ECRAN D'ETANCHEITE	45
3.4.1	<i>Récolement</i>	45
3.4.2	<i>Suivi à long terme</i>	45
4	FILTRATION ET DRAINAGE	46
4.1	PREVENIR LES PHENOMENES D'EROSION INTERNE, MAITRISER LES ECOULEMENTS DANS LA DIGUE ET SA FONDATION	46
4.1.1	<i>Fonctions principales, secondaires et/ou induites</i>	50
4.1.1.1	Filtration	50
4.1.1.2	Drainage	51
4.1.2	<i>Problématiques techniques traitées</i>	53
4.1.3	<i>Variantes</i>	54
4.1.3.1	Filtre	54
4.1.3.2	Drain	54
	Drainage du corps de digue	54
	Drainage de la fondation	56
4.1.4	<i>Techniques alternatives</i>	57
4.1.4.1	Renforcement de l'étanchéité	57
4.1.4.2	Utilisation de sols traités à la chaux	57
4.1.5	<i>Éléments additionnels</i>	57
4.1.6	<i>Défaillances potentielles induites</i>	57
4.2	CONCEPTION DES ELEMENTS DE FILTRATION ET DE DRAINAGE	58
4.2.1	<i>Recueillir des informations préalables spécifiques à ce type de confortement</i>	58
4.2.2	<i>Calcul et modélisation des écoulements dans les digues de protection</i>	58
4.2.3	<i>Préciser les caractéristiques attendues</i>	60
4.2.4	<i>Choix de la technique</i>	61
4.2.5	<i>Principes de dimensionnement et conditions aux limites</i>	62
4.2.5.1	Dimensionnement d'un filtre géotextile	62
4.2.5.2	Dimensionnement du filtre granulaire	63
4.2.5.3	Dimensionnement du dispositif drainant	63
4.2.5.4	La recharge	66
4.2.5.5	Autres éléments de conception	67
4.3	REALISATION	67
4.3.1	<i>Etudes et essais préalables</i>	67
4.3.2	<i>Réalisation</i>	67
4.3.2.1	Généralités	67
4.3.2.2	Conditions de pose	68
4.3.2.3	Assurance de la qualité	69
4.3.3	<i>Nuisances/environnement</i>	70
4.3.4	<i>Contraintes liées à une crue ou à des travaux avoisinants au chantier</i>	70
4.4	SUIVI APRES TRAVAUX	71
4.4.1	<i>Récolement</i>	71
4.4.1	<i>Suivi de l'ouvrage de filtration réalisé</i>	71
4.4.2	<i>Suivi de l'ouvrage de drainage réalisé</i>	71
5	STABILITE AU GLISSEMENT	72
5.1	AMELIORER LA STABILITE AU GLISSEMENT DES DIGUES	73
5.1.1	<i>Fonctions principales, secondaires et/ou induites</i>	74

5.1.2	Problématiques techniques traitées	74
5.1.3	Variantes et/ou solutions en développement	75
5.1.3.1	Inclusions rigides ou semi-rigides	75
5.1.3.2	Sols traités à la chaux ou au ciment	75
5.1.4	Solutions alternatives	75
5.1.5	Éléments additionnels	76
5.1.6	Défaillances potentielles induites	76
5.2	CONCEPTION	76
5.2.1	Recueillir les informations préalables spécifiques à ce type de confortement	76
5.2.2	Préciser les caractéristiques attendues	77
5.2.3	Choisir la technique (comparatif technique et financier, retours d'expériences)	77
5.2.4	Principes de dimensionnement et conditions aux limites (raccordements, contraintes par rapport aux techniques relatives aux autres fonctions...)	78
5.3	REALISATION	79
5.3.1	Études et essais préalables	79
5.3.2	Travaux	80
5.3.3	Nuisances/environnement	80
5.3.4	Contraintes liées à une crue ou à des travaux avoisinants au chantier	80
5.4	SUIVI APRES TRAVAUX	80
6	REHAUSSE	81
6.1	REHAUSSER UNE DIGUE	81
6.1.1	Fonctions principales, secondaires et/ou induites	81
6.1.2	Problématiques techniques traitées	83
6.1.3	Variantes	83
6.1.4	Techniques alternatives	84
6.1.5	Éléments additionnels	84
6.1.6	Défaillances potentielles induites	84
6.2	CONCEPTION	85
6.2.1	Recueillir les informations préalables	85
6.2.2	Préciser les caractéristiques attendues	85
6.2.3	Choisir la technique (comparatif technique et financier, retours d'expériences)	85
6.2.4	Principes de dimensionnement et conditions aux limites (raccordements, contraintes par rapport aux techniques relatives aux autres fonctions...)	86
6.3	REALISATION	87
6.3.1	Études et essais préalables	87
6.3.2	Réalisation	87
6.3.3	Nuisances/environnement	88
6.3.4	Contraintes liées à une crue ou à des travaux avoisinants au chantier	88
6.4	SUIVI APRES TRAVAUX	88
7	PROTECTION CONTRE L'EROSION EXTERNE	89
7.1	POURQUOI REALISER CE TYPE DE CONFORTEMENT ?	90
7.1.1	Fonctions principales, secondaires et/ou induites	90
7.1.2	Quels sont les problèmes traités ?	90
7.1.3	Techniques alternatives	93
7.1.4	Techniques complémentaires (fondations, transitions...)	93
7.1.5	Éléments additionnels	94
7.1.6	Défaillances potentielles induites	94
7.2	CONCEPTION	94
7.2.1	Recueillir les informations préalables	94
7.2.2	Préciser les caractéristiques attendues	95
7.2.3	Choisir la technique (comparatif technique et financier, retours d'expériences)	96
7.2.4	Principe de dimensionnement	96

7.3	REALISATION	96
7.3.1	Études et essais préalables.....	96
7.3.2	Réalisation.....	96
7.3.3	Nuisances/environnement	96
7.3.4	Contraintes liées à une crue ou à des travaux avoisinants au chantier.....	96
7.4	SUIVI APRES TRAVAUX.....	97
7.4.1	Récolement.....	97
7.4.2	Suivi de l'ouvrage réalisé.....	97
8	TRANSITIONS, DONT OUVRAGES INCLUS OU TRAVERSANTS.....	99
8.1	PROBLEMATIQUES LIEES AUX TRANSITIONS.....	99
8.1.1	Les transitions	99
8.1.2	Modes de rupture liés aux transitions	100
8.2	TYPLOGIE DES TRANSITIONS	101
8.3	LES MECANISMES DE DEGRADATION ET DE RUPTURE AU DROIT DES OUVRAGES TRAVERSANTS ET/OU DES TRANSITIONS	104
8.3.1	Érosion interne au droit d'un ouvrage traversant ou d'une transition	104
8.3.2	Érosion externe en lien avec une transition.....	104
8.3.3	Instabilités en lien avec des transitions	105
8.3.4	Exemple de scénario de brèche	105
8.4	DESCRIPTION DES TRANSITIONS	107
8.4.1	Ouvrages linéaires traversants.....	107
8.4.2	Ouvrages non-linéaires traversants	108
8.4.3	Transition entre un tronçon de digue en remblai et un tronçon en béton ou en maçonnerie	110
8.4.4	Transition entre deux segments de digue en remblai différents	111
8.5	REMARQUES GENERALES	112
9	ANIMAUX FOUSSEURS ET VEGETATION ARBOREE	113
9.1	IMPORTANCE DE L'ENTRETIEN REGULIER ET BESOIN DE REPARATIONS.....	113
9.2	DIAGNOSTICS.....	114
9.2.1	Végétation : le diagnostic spécifique.....	114
9.2.2	Animaux : estimation de la nécessité d'intervenir.....	115
9.3	INTERVENTIONS ET TRAVAUX PREVENTIFS	116
9.3.1	Arbres	116
9.3.2	Animaux fousseurs	117
9.4	LES TRAVAUX DE REMISE EN ETAT	117
9.4.1	Arbres	117
9.4.2	Animaux	119
9.4.3	Reconstitution d'une partie de digue	122
9.5	SUIVI APRES TRAVAUX.....	122
9.6	PERSPECTIVES	122
10	REPARATION DES BRECHES.....	123
10.1	REPARATIONS PENDANT LES DIFFERENTES PHASES DE FORMATION D'UNE BRECHE	123
10.1.1	Phasage et terminologie	123
10.1.2	Possibilité d'interventions et phases	124
10.2	DEGRE D'URGENCE	125
10.3	LARGEUR DE LA BRECHE	125
10.4	PRESENCE D'UNE FOSSE D'EROSION	126
10.5	PROBLEMATIQUE DES TRANSITIONS AVEC LA DIGUE EXISTANTE AUX EXTREMITES DE LA BRECHE.....	127
10.6	PERSPECTIVES	127
11	REFERENCES.....	128
11.1	REFERENCES MAJEURES.....	128
11.2	REFERENCES PAR CHAPITRE.....	129

11.2.1	Chapitre 2.....	129
11.2.2	Chapitre 3.....	131
11.2.3	Chapitre 4.....	131
11.2.4	Chapitre 5.....	133
11.2.5	Chapitre 6.....	134
11.2.6	Chapitre 7.....	134
11.2.7	Chapitre 8.....	134
11.2.8	Chapitre 9.....	135
11.2.9	Chapitre 10.....	135
ANNEXE A :	GLOSSAIRE	137
ANNEXE B :	LISTE DES FICHES TECHNIQUES	147
ANNEXE C :	LISTE DES FICHES DE CAS	148
ANNEXE D :	INTERVENTIONS D'URGENCE.....	149
D.1.	INTERVENTION EN CAS DE FUITES OU DE SUITEMENTS D'EAUX BOUEUSES TRADUISANT L'EROSION INTERNE DU REMBLAI..	149
D.2.	INTERVENTION EN CAS DE SUITEMENTS D'EAUX CLAIRES	150
D.3.	INTERVENTION EN CAS DE GLISSEMENT DE TALUS COTE ZONE PROTEGEE.....	152
D.4.	INTERVENTION EN CAS D'EROSION DU TALUS COTE FLEUVE OU AFFOUILLEMENT PRESUME EN PIED DE TALUS	153
D.5.	INTERVENTION EN CAS DE SURVERSES LOCALISEES	154
D.6.	INTERVENTION EN CAS DE NON FERMETURE OU DE RUPTURE D'UN ORGANE DE FERMETURE.....	154
D.7.	INTERVENTION EN CAS DE DEPART DE BRECHES AU DROIT D'UNE DIGUE COMPORTANT UN FRANC-BORD.....	156

Partie II

1. Fiches techniques

FT G1. Généralités sur les palplanches

FT 3.1. Rideau de palplanches à fonction d'étanchéité

FT 3.2. Paroi mince

FT 3.3. Paroi moulée à fonction d'étanchéité

FT 3.4. Sol mixé/mélangé en place

FT 3.5. Écran d'étanchéité réalisé au moyen de la technique du jet grouting

FT 3.6. Masque en matériaux naturels faiblement perméables

FT 4.1. Dimensionnement d'un géotextile de filtration

FT 4.2. Dimensionnement d'un sol de filtration

FT 4.3. Ouvrage de drainage en talus sous recharge peu perméable

FT 4.4. Ouvrage de drainage sans recharge

FT 5.1. Remblai stabilisateur avec géoconteneur

FT 5.2. Remblai renforcé

FT 5.3. Stabilité au glissement apporté par un mur poids, un mur cantilever ou une paroi béton

FT 5.4. Rideau de palplanches de soutènement

FT 5.5. Soutènement en gabions pour conforter la stabilité au glissement de la digue

- FT 6.1. Rehausse de digue par mur, muret et murette
- FT 6.2. Rehausse temporaire à fondation permanente sur un linéaire de digue
- FT 6.3. Recharge/épaississement et/ou rehausse en remblai

- FT 7.1. Protection externe par enrochements libres
- FT 7.2. Protection externe par enrochements liés au béton
- FT 7.3. Protection en gabions contre l'érosion externe
- FT 7.4. Protections minces contre l'érosion externe
- FT 7.5. Réparation de perré maçonné
- FT 7.6. Perrés bétonnés
- FT 7.7. Protection externe par blocs artificiels
- FT 7.8. Protection externe de la digue par mise en place d'épis de protection
- FT 7.9. Protection externe par la reprise d'un mur par béton projeté
- FT 7.10. Recharge ou réserve de pied en enrochements
- FT 7.11. Palplanches de protection contre l'érosion externe en pied de talus côté eau
- FT 7.12. Protection externe de talus par technique d'enherbement
- FT 7.13. Protection externe de talus par technique par association Génie Civil – Génie Écologique

2. Fiches de cas

- FC.1. Confortement de la digue de protection contre les inondations d'Albaron (13) – Petit Rhône RG
- FC.2. Confortement des digues du Lez à Lattes et Montpellier (34)
- FC.3. Travaux de la digue de l'Yzeron à Oullins (69)
- FC.4. Renforcement et filtration/drainage de la digue de « Bou – La Binette » sur la Loire à Bou (45)
- FC.5. Confortement de la digue en amont de la colline du Wawel à Cracovie (Pologne)
- FC.6. Renforcement de corps de digue des zones de non-recouvrement du val d'Orléans par technique de mélange en place sur les communes de Guilly et Sigloy (45) – Plan Loire Grandeur Nature
- FC.7. Réalisation d'un écran étanche dans la digue de Loire par mise en œuvre d'un rideau de palplanches sur la commune de Saint-Père-sur-Loire (45) – Plan Loire Grandeur Nature
- FC.8. Paroi mince au coulis de Ciment – Digue de la Polka – Jouy-aux-Arches (57)
- FC.9. Reconstitution en eau du talus et du pied de digue côté rivière par banquettes de pied en tout-venant de carrière
- FC.10. Confortement des digues des Amidonniers/Sept-Deniers (Digues D12, D13 et D14) – Raccordement entre le nouveau parement béton des digues en remblai et une digue type mur béton – Toulouse (31)
- FC.11. Travaux spécifiques au droit d'une zone de transition pour raccorder un écran étanche sur la digue de la Blanchisserie et l'ouvrage hydraulique de l'ancienne écluse de la Jonction – NEVERS (58)
- FC.12. Reconstruction après démontage d'un tronçon de digue du val d'Orléans – Commune de Saint-Pryvé - St-Mesmin (45)

- FC.13. Confortement des digues des Amidonniers/Sept-Deniers (Digues D12, D13 et D14)
– Traitement du talus aval par grillage anti-fouisseurs – Toulouse (31)
- FC.14. Confortement et protection des digues de l’Aude en RD et RG sur les communes
de Sallèles d’Aude, Narbonne, Cuxac d’Aude et Coursan (11)
- FC.15. Traitement des terriers de lapins présents dans le corps de la digue du val
d’Orléans – Commune de Sandillon (45)
- FC.16. Déboisement avec enlèvement des souches et reconstitution du talus de digue
côté Loire – Commune de Mareau-aux-Prés (45) – Plan Loire Grandeur Nature

AVANT-PROPOS

Contexte

En France, les digues de protection contre les inondations représentent un parc d'un linéaire d'environ 10 000 km (dont près de 10% sur le littoral). Ces digues sont organisées en « systèmes d'endiguement » réglementaires¹, la protection étant dans de nombreux cas assurée par un système de protection englobant, en plus des ouvrages du système d'endiguement, des éléments naturels.

À ce jour, l'état de l'art en termes de méthodes de confortement et de réparation des digues de protection en remblai² se base essentiellement sur :

- les méthodes de confortement, de réparation et sur le retour d'expérience de mise en œuvre des techniques développées pour les barrages en remblai et parfois pour les digues à charge permanente. Dans une perspective économique, les techniques présentant les meilleurs rendements et des coûts faibles sont généralement privilégiées, moyennant des adaptations à la marge notamment sur la méthodologie de mise en œuvre ;
- d'autres domaines du génie civil (aménagements fluviaux ou maritimes, terrassements routiers, renforcement des sols, soutènements...), avec des adaptations prenant en compte les contraintes supplémentaires liées à la présence permanente ou temporaire de l'eau (écoulements internes et externes par exemple).

Les digues et les autres ouvrages hydrauliques

Bien que similaires par de nombreux aspects, les digues sont des ouvrages différents des barrages. On peut citer entre autres les différences principales suivantes, qui auront des conséquences sur la conception et la réalisation des travaux :

- les barrages sont la plupart du temps soumis à une charge permanente, alors que pour les digues la mise en charge est rare et de durée relativement courte (de quelques heures à quelques jours en général), bien qu'il existe des barrages à charge occasionnelle (barrages écrêteurs) et des digues à charge permanente (digues de canaux³ ou de rivières canalisées) ;
- la géométrie (rapport longueur/hauteur) : les digues peuvent avoir des longueurs en crête très importantes par rapport à leur hauteur (plusieurs milliers de fois) et beaucoup plus importantes en comparaison des barrages ;
- la prise en compte des fondations : à cause d'une part de la considération déjà citée ci-dessus sur la mise en charge permanente ou non des ouvrages et donc de la moindre nécessité d'avoir une fondation imperméable, d'autre part à cause du lieu d'implantation des digues (généralement sur des terrains alluvionnaires d'une épaisseur souvent très grande par rapport à la hauteur de l'ouvrage), les fondations de digues sont généralement traitées uniquement sur une tranche supérieure, voire pas du tout ce qui n'est évidemment pas à recommander ;
- les digues de protection sont très souvent des ouvrages anciens voire très anciens et leur composition (section en travers, zones et matériaux) est donc mal connue. Les petits barrages anciens sont dans le même cas, mais le grand linéaire des digues et la variabilité qui y est

¹ Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques

² Dans la suite du document et afin de faciliter la lecture, nous utiliserons le terme « digue » qui fera exclusivement référence aux digues en remblai, sujets de ce document.

³ Les digues de canaux, liées aux ouvrages transversaux associés sont considérés comme des barrages par la réglementation française

associée du fait du réemploi des matériaux locaux dans leur construction, renforcent la méconnaissance de l'existant ;

- la plupart des barrages sont établis sur le réseau hydrographique continental, alors que de nombreuses digues (environ 1000 km soit à peu près 10% du linéaire du parc français) sont établies sur le littoral ou dans des estuaires ;
- les digues de protection ont fait l'objet de réparations et confortements réguliers au fil du temps, ces travaux, souvent menés à des époques différentes et avec des techniques diverses, confèrent à ces ouvrages une grande hétérogénéité, source de vulnérabilité en cas de mise en charge ;
- le talus amont des barrages n'est soumis à des écoulements latéraux de l'eau que de manière exceptionnelle, alors que les talus côté eau (voire côté terre en cas de franchissements) des digues fluviales, estuariennes ainsi que de certaines digues littorales sont soumis régulièrement à cette action de l'eau.

De plus, les retours d'expérience concernant des travaux de confortement ou de réparation sur les digues de protection sont à ce jour peu développés et non centralisés ou partagés entre les différents acteurs en lien avec les digues. Cela limite le développement et le perfectionnement de techniques de confortement et de réparation.

C'est pourquoi, afin de permettre à chacun d'avoir une vision la plus large possible des techniques à sa disposition pour mener des travaux de confortement de digues, et afin de pouvoir se baser sur une démarche analytique pour la définition de ces travaux, le CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs) a engagé dès 2014 des réflexions ayant pour objectif de fournir une première base de connaissance sur le thème des confortements de digues et a initié un groupe de travail sur ce sujet.

Portée du document

Ce document a pour objectif de présenter différentes techniques appliquées aux réparations et/ou aux confortements de digues de protection contre les inondations en remblai, que ce soit en domaine fluvial ou littoral, avec les éléments permettant de concevoir et de réaliser chacune de celles-ci, prises de manière indépendante.

Certaines des techniques présentées ont été décrites sur la base d'études de cas sur des digues de canaux ou de rivières canalisées (ce sont des digues en charge permanente) ; elles sont tout de même applicables à des digues de protection contre les inondations. Inversement l'ensemble des techniques présentées sont probablement également partiellement transposables aux digues de canaux ou de rivières canalisées, sous réserve d'adaptation prenant en compte leurs spécificités, liées à la charge permanente et aux sollicitations spécifiques d'usage (batillage...) entre autres.

Ce document s'adresse principalement aux bureaux d'études et gestionnaires d'ouvrages amenés à concevoir et à faire réaliser des travaux sur des digues existantes. Les entreprises de travaux sont également concernées, ainsi que les services de contrôle de l'État. Enfin, toute personne ou organisation intéressée par les questions relatives aux digues (citoyens, étudiants), pourra y trouver des éléments de connaissance intéressants.

Contenu du document

Cette première version du document issu des travaux du groupe de travail comprend deux parties : une première partie générale et une deuxième partie présentant trente-six techniques, chacune sous la forme d'une fiche au format standardisé. Les techniques présentées concernent les fonctions d'étanchéité, de drainage, de filtration, de stabilité au glissement et de protection contre l'érosion externe ainsi que les rehaussements. Des éléments sont également présentés, sans fiche spécifique, sur les problématiques liées aux transitions, entre autres avec les ouvrages traversants, aux animaux

fouisseurs, à la végétation arborée et aux réparations de brèches. Des révisions du document sont envisagées, pour présenter d'une part des techniques supplémentaires, nouvelles ou mieux éprouvées, et éventuellement des fiches de retours d'expérience sur des cas réels.

Mandat du groupe de travail

Le Groupe de Travail a été créé en 2014 sous l'impulsion de Jean Maurin, alors membre de la CE et en poste à la DREAL Centre-Val de Loire. Le format et le contenu du document a été plusieurs fois présenté et discuté à la Commission Exécutive, et en Assemblée Générale du comité. Le document a été validé en CE du 2 juin 2021, après une phase de relecture et d'échanges avec les membres de la CE.

Démarche conceptuelle et l'utilisation du guide

La démarche de réalisation et le mode d'utilisation du document, intimement liées, sont développés dans les chapitres 1 et 2.

Groupe de travail

Le groupe de travail était constitué des personnes suivantes :

Patrick	ARGENTIER	SYMBHI	
Olivier	ARTIÈRES	TenCate Geosynthetics	
Nicolas	AUGER	DREAL Centre-Val de Loire	
Patrick	BERTHELOT	Veritas	
Yasmina	BOUSSAFIR	Université Gustave Eiffel	
Luc	BOUTONNIER	Egis	
Bertrand	CHALUS	CNR	
Caroline	CHARTON	Maia Sonnier	
Christophe	CHEVALIER	Université Gustave Eiffel	Pilote du sous-groupe 3
Romain	CLOIX	DREAL Auvergne-Rhône-Alpes	
Benoît	CORTIER	Hydratec	
Arthur	COULET	DREAL Centre-Val de Loire	
Yann	DENIAUD	Cerema	Pilote du sous-groupe 2
Edouard	DURAND	Cerema	
Jean-Marc	FLOHR	Egis	
Laurent	FOURQUET	DDT Haute Garonne – VNF	
Jean-Francois	FREZET	Egis	
Loïc	GERVAIS	DREAL Centre-Val de Loire	
Vincent	GILI	DDT Haute Garonne	
Jean-François	GOMES	SYMBHI	
Nathalie	GRASSET	FUGRO	
Olivier	HESSE	BOTTE Fondations	
Guillaume	HIBON	Antea Group	
Serge	LAMBERT	KELLER Fondations Spéciales	
Alain	LE KOUBY	Université Gustave Eiffel	
Patrick	LEDOUX	Cerema	Pilote du sous-groupe 5
François	LOUVEL	SPIE FONDATION	
Thibaut	MALLET	Symadrem	Pilote du sous-groupe 6
Jean	MAURIN	DREAL Centre-Val de Loire	Initiateur du GT
Patrice	MÉRIAUX	INRAE	
Mathieu	MONACO	DREAL Centre-Val de Loire	
Thierry	MONIER	Artelia	
Stéphane	MONLEAU	Soletanche Bachy	
David	MORELLATO	DIRSO	
Mathieu	NORMAND	Egis	
Jean-Charles	PALACIOS	SAFEGE	Pilote du sous-groupe 4
Sylvain	PALIX	Antea Group	
Sébastien	PATOUILLARD	DREAL Centre-Val de Loire	
Loïc	PERRET	ESTHI	
Michel	PINHAS	SYMBHI	
Alexandre	PLASTRE	Maccaferri	
Jacques	POUDEVIGNE	FUGRO	

Daniel	POULAIN	INRAE	Animateur du GT (jusqu'en avril 2019)
Didier	RAULIN	FUGRO	
Alain	REBOUL	Fondasol	
Pierre - Louis	REGAZZONI	Egis	
Michel	ROCHE	SEFI Intrafor	
Anthony	ROST	DDT Nièvre	
Adrien	RULLIERE	INRAE	Secrétaire du GT à partir de juin 2020
Akim	SALMI	ISL	
Lucile	SAUSSAYE	Cerema	Pilote du sous-groupe 1
Patrick	SOULAT	SAFEGE	
Xavier	SUISSE DE SAINTE CLAIRE	SAFEGE	
Mathieu	SUTTER	INRAE	Secrétaire du GT (jusqu'en août 2019)
Fabien	SZYMKIEWICZ	Université Gustave Eiffel	
Remy	TOURMENT	INRAE	Animateur du GT
Alexandre	VALENZIANO	Antea Group	
Claire	VARAGNAT	SAFEGE	
Thierry	VOILLOT	DDT Loiret	
Éric	VUILLERMET	BRLi	

Le travail du groupe a été réparti en sous-groupes (explicités en début des chapitres concernés par le travail de ces sous-groupes), avec une animation générale assurée par Daniel Poulain (jusqu'à son départ en retraite) et Rémy Tourment (INRAE). Le secrétariat a été réalisé par Mathieu Sutter puis Adrien Rulière (INRAE).

Terminologie

Un glossaire est proposé en annexe A.

1 Objectifs et contenu du document

Après une présentation des concepts de confortement et de réparation, ce chapitre détaille les objectifs, les modes de réalisation et d'utilisation, et enfin le contenu du document.

1.1 Construction, confortements et réparations

Dans l'état actuel du parc français de digues, la majorité des travaux sur les digues concerne des ouvrages existants et non pas la construction d'ouvrages neufs. Tenir compte d'un ouvrage existant rend alors la conception et la réalisation de travaux plus complexes que la construction ex nihilo.

Ainsi, bien que la plupart des techniques présentées dans ce document soient applicables à la réalisation d'ouvrages neufs, nous nous sommes attachés à présenter des techniques de travaux de **confortement** ou de **réparation** d'ouvrages existants. Une large majorité des digues étant des ouvrages en remblai ou partiellement en remblai, nous n'avons pas abordé les techniques applicables aux ouvrages rigides exclusivement en béton et/ou maçonnerie.

L'objectif d'une **réparation** est de remettre, à la suite de désordres ou d'endommagements plus ou moins importants, une digue dans un état (au moins) équivalant à l'original avant l'apparition des désordres. L'objectif d'un **confortement** est de renforcer une digue, soit : i) parce que cette dernière se trouve dans un état médiocre en raison d'un vieillissement, d'une gestion ou d'un entretien plus ou moins défailants au cours d'un long historique, afin d'améliorer ses performances et revenir à des niveaux de sûreté et de protection souhaités ; soit : ii) les niveaux de sûreté attendus ont évolué ; soit : iii) l'environnement de l'ouvrage a évolué de manière défavorable pour l'ouvrage ou la protection qu'il offre.

1.2 Objectifs du document

Comme il a été dit dans l'avant-propos, ce document a pour objectif de présenter différentes techniques de construction appliquées aux réparations et/ou aux confortements de digues de protection contre les inondations en remblai, que ce soit en fluvial ou en maritime, avec les éléments permettant de concevoir et de réaliser chacune de celles-ci, prises de manière indépendante (un projet pouvant associer différentes techniques, ce qui est généralement le cas d'ailleurs). Certaines des techniques présentées ont été décrites sur la base d'études de cas sur des digues de canaux ou de rivières canalisées (ce sont des digues en charge permanente) ; elles sont tout de même applicables à des digues de protection contre les inondations. Inversement l'ensemble des techniques présentées sont probablement également partiellement transposables aux digues de canaux ou de rivières canalisées, sous réserve d'adaptation prenant en compte leurs spécificités, liées à la charge permanente et aux sollicitations spécifiques d'usage (batillage...) entre autres.

Une première partie du document présente les principes généraux, il est complété dans une deuxième partie par les fiches descriptives de techniques. La section 1.4 présente plus en détail le contenu du document.

Les fiches descriptives de techniques présentées dans cette première version ont été construites à partir de retours d'expérience sur plus de 150 chantiers de confortement et de réparation de digues, essentiellement en France. Il va sans dire que ce retour d'expérience n'est pas exhaustif et que des chantiers plus récents ont pu mettre en œuvre d'autres techniques. Par ailleurs, les techniques présentées ne transcrivent pas l'intégralité des techniques identifiées dans la phase d'identification des études de cas. Des techniques innovantes, dont le retour d'expérience a été jugé insuffisant ou

non complètement conclusif sur l'ensemble des questions étudiées n'ont pas, à ce jour, fait l'objet de fiches spécifiques.

L'évolution des techniques et la multiplication des retours d'expérience mèneront dans le futur à proposer des mises à jour du document, entre autres sous la forme de fiches techniques complémentaires.

Ce document concerne principalement les confortements et réparations en conditions normales et non pas en situation d'urgence (voir [section 2.4](#)). Néanmoins les principes généraux et les techniques qui sont présentés sont adaptables, plus ou moins directement, aux situations d'urgence. L'annexe D est consacrée à la présentation d'exemples spécifiques d'interventions d'urgence.

NB : nous décrivons dans ce document uniquement les aspects techniques et ne traitons pas les aspects administratifs (procédures d'autorisation et autres).

1.3 Démarches de réalisation et d'utilisation du document

Les démarches de réalisation et d'utilisation du document, schématisées sur la Figure 1.1, identiques sur le principe, sont basées sur la démarche analytique à suivre en cas de nécessité de travaux de confortement ou de réparation (voir [section 2](#) pour plus de détails) :

- identification à la suite d'un diagnostic ou d'une analyse de risque, des causes de désordres et dégradations, possibles ou avérées ;
- identification des fonctions à améliorer ou à rétablir pour réparer ou se prémunir de ces désordres et dégradations ;
- liste des techniques correspondant à ces fonctions (voir sections 3 à 7).

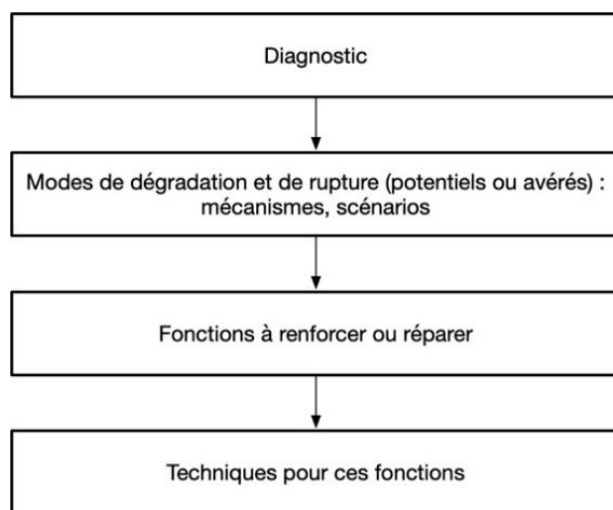


Figure 1.1 : Démarche de choix de techniques pour un confortement ou une réparation (Source : Rémy Tourment)

Si certaines des techniques présentées permettent de réparer/conforter plusieurs des fonctions principales des digues, l'association de diverses techniques pourra être nécessaire pour traiter totalement les différentes fonctions défaillantes ou insuffisamment performantes. Les fiches techniques sont rédigées de manière à être utilisées pour la définition opérationnelle et la conception des travaux, d'une part en présentant la fonction principale mais aussi les fonctions secondaires éventuelles assurées par chaque technique, et d'autre part en évoquant aussi d'éventuelles techniques alternatives. Ce style de rédaction devrait permettre au lecteur du document une compréhension objective des techniques et ainsi faciliter le choix d'une technique de confortement ou de réparation plutôt qu'une autre selon les spécificités du cas auquel il fait face.

1.4 Contenu du document

La partie 1 comporte deux chapitres introductifs (le présent chapitre 1 qui présente les objectifs et le contenu du document et le chapitre 2 qui présente les éléments communs à l'ensemble de toutes les techniques de confortement et de réparation), puis cinq chapitres qui présentent les éléments communs à chaque type de fonction assurée :

- chap. 3 Étanchéité (externe et interne)
- chap. 4 Drainage et filtration
- chap. 5 Stabilité au glissement
- chap. 6 Rehausse
- chap. 7 Protection contre l'érosion externe

et enfin, trois chapitres présentant l'association de plusieurs fonctions pour traiter les problèmes liés aux :

- chap. 8 Transitions,
- chap. 9 Animaux fouisseurs et végétation
- chap. 10 Réparations de brèche

Les chapitres 3 à 7 suivent le même plan et abordent les points suivants :

- **l'objectif du type de confortement ou de réparation** (les fonctions principales, secondaires et induites, les problématiques traitées, les variantes et techniques alternatives ou additionnelles et les défaillances potentielles induites) ;
- **la conception** (recueil des données, caractéristiques attendues, précisions permettant le choix de la technique et les principes de dimensionnement) ;
- **la réalisation** des travaux (études et essais préalables, précisions sur la réalisation proprement dite, des considérations sur les nuisances, l'environnement et les contraintes liées à une crue durant la phase chantier ou à d'autres travaux) ;
- **le suivi** après travaux (récolement et suivi de l'ouvrage réalisé).

Ces chapitres sont complétés par des fiches descriptives des techniques, disponibles dans la partie 2 du document (PDF seulement). Ces fiches techniques, écrites de façon analytique, suivent également le même plan :

- indications sur la technique abordée (définitions, fonctions principales et secondaires) ;
- description de la technique de confortement ou de réparation (performance(s) à atteindre, utilisation et variantes⁴) ;
- éventuelles techniques alternatives ;
- dimensionnement (principes, éléments de conception et modèles disponibles) ;

⁴ La distinction suivante est faite entre les termes "alternative" et "variante", utilisés tout au long du document dans les différents chapitres présentant des familles de technique répondant à une fonction :

- une solution alternative est une solution permettant de répondre aux problématiques souhaitées mais sans faire appel à la fonction décrite dans le chapitre, par exemple renforcer l'étanchéité au lieu du drainage peut avoir le même effet bénéfique sur les écoulements internes et les mécanismes de dégradation associés ;
- une variante est une famille de techniques de confortement/réparation différente de celle présentée mais répondant à la fonction envisagée (par exemple, on réalisera des filtres granulaires d'une ou plusieurs couches, ou encore un filtre granulaire ou bien géotextile).

- aspects pratiques (cahier des charges, chantier, matériaux et matériel nécessaires, nuisances/environnement et contrôle d'exécution)⁵.
- Par contre, les fiches ne fournissent pas d'éléments sur le coût des techniques, ces informations ne figurant que dans les « études de cas ».

Les chapitres 8 à 10 présentent des généralités sur les problématiques concernées et la possibilité de réalisation de travaux de réparation ou de confortement. Cependant, nous ne présentons pas dans cette version du document de fiches techniques relatives à ces problématiques mais uniquement des fiches de cas, les problématiques nécessitant le plus souvent l'association de plusieurs fonctions et donc de techniques.

Comme il a été souligné précédemment, préalablement à la rédaction des fiches descriptives de techniques, il a été procédé à l'analyse de retours d'expérience, ayant chacun fait l'objet de la rédaction d'une fiche « d'étude de cas ». Ces fiches n'ayant pu être rédigées avec un niveau homogène de détails et d'informations, il a été décidé de ne pas les présenter dans cette version du document, contrairement aux intentions initiales du groupe de travail. Quelques exemples de fiches d'étude de cas sont présentés dans cette première version du document (voir l'Annexe C), afin d'illustrer avec des cas réels de confortement ou de réparation. Une version ultérieure du document pourra présenter de plus nombreuses fiches d'étude de cas ainsi que des fiches de retour d'expérience plus spécifiques.

La Figure 1.2 illustre la logique d'organisation du document entre les différents types de chapitres et les deux types de fiches.

⁵ Pour ce qui est du dimensionnement des techniques de confortement/réparation et les aspects pratiques, **des éléments communs à l'ensemble des fonctions** seront abordées dans ce document. Ces éléments communs sont présentés au chapitre 2 et le lecteur sera alors invité à s'y référer.

Cependant, certaines techniques de confortement/réparation se basent sur **des éléments génériques à une fonction** et dans ce cas, ces éléments seront abordés dans le chapitre en question.

Enfin, pour **des éléments très spécifiques à une technique particulière permettant le confortement ou la réparation d'une fonction**, le lecteur sera invité à se référer aux fiches techniques.

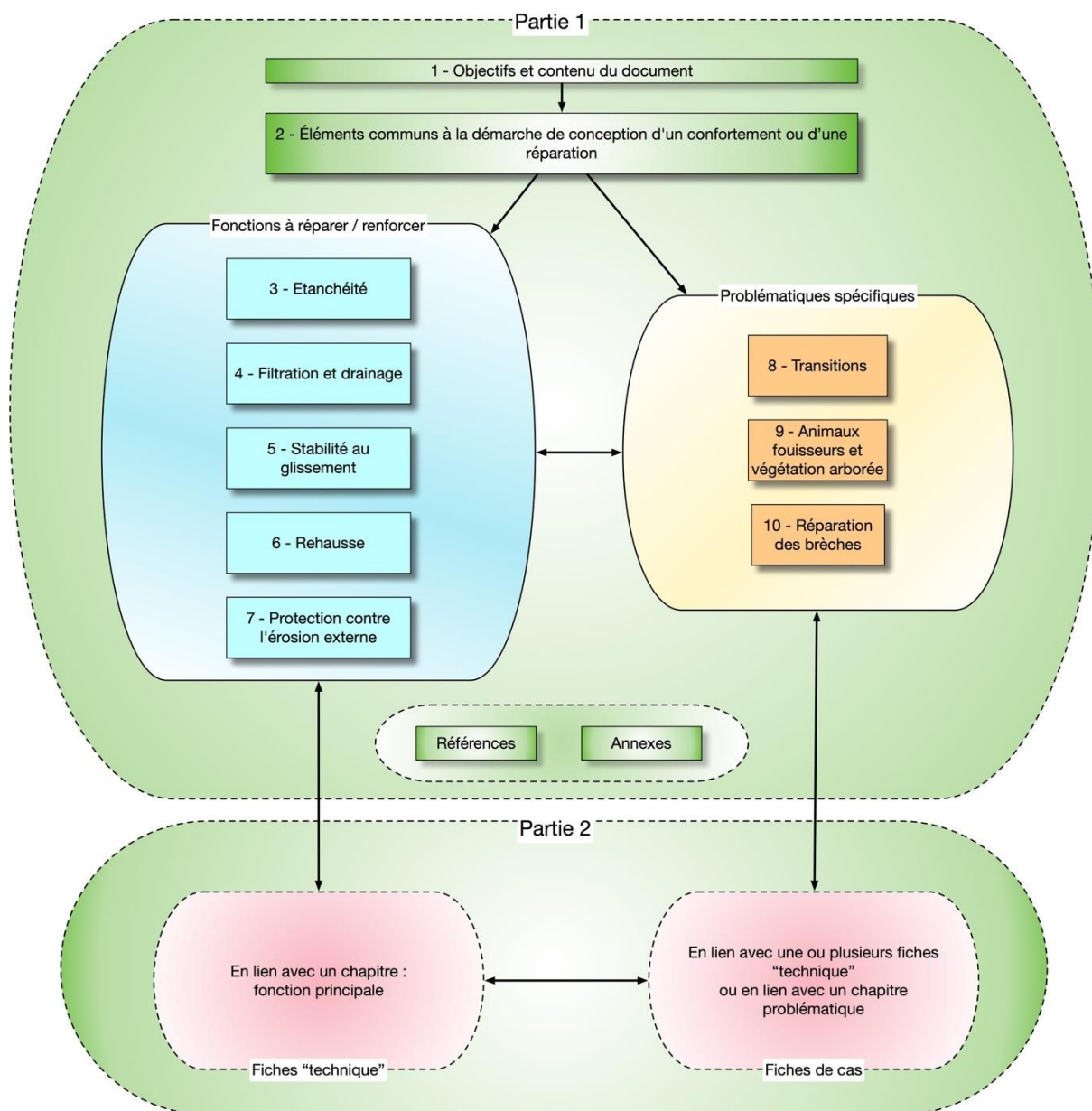


Figure 1.2 : Organisation du document et liens entre les différents éléments (Source : Rémy Tourment)

2 Éléments communs à la démarche de conception d'un confortement ou d'une réparation

Ce chapitre présente les éléments communs à tous les types de travaux de confortement et de réparation sur les digues. Dans la première section, il est rappelé la nécessité de conduire un diagnostic préalable aux travaux, afin d'identifier et de traiter les causes des dégradations (existantes ou à venir du fait du vieillissement ou d'un défaut d'entretien)). La seconde et la troisième section présentent respectivement les principes généraux relatifs à la conception et à la réalisation des travaux, ces principes étant complétés pour chacune des grandes familles dans les chapitres 3 à 10, et pour chaque technique dans les fiches descriptives de techniques (qui seront ensuite nommées Fiches Techniques ou FT). Enfin la dernière section 2.4 introduit la notion d'urgence dans la réalisation de travaux qui peut avoir une influence sur le niveau de détail des reconnaissances et des études préalables aux travaux.

Il est important de rappeler que dans la démarche de diagnostic comme dans la démarche de conception, il faut s'intéresser à la fois à la digue ET à sa fondation. De nombreuses défaillances et ruptures de digues proviennent d'une mauvaise connaissance et/ou de défauts dans la fondation, ou au contact entre la digue et la fondation. L'ensemble des éléments présentés dans la partie 1 de ce document concerne donc, sauf mention explicite, aussi bien la digue elle-même que sa fondation, entre autres lorsqu'on désigne "l'ouvrage".

Dans ce chapitre 2, le mot « stabilité » reviendra à plusieurs reprises. Ce terme sera alors à comprendre dans sa forme générale, c'est-à-dire la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis de tous les mécanismes envisageables (au glissement, à l'érosion externe, à l'érosion interne, etc.) tels que listés au 2.1.2. C'est le sens du mot stabilité tel qu'utilisé dans les recommandations du CFBR pour la justification de la stabilité d'un ouvrage.

Ce chapitre, comme l'ensemble du document, se concentre sur les aspects directement liés à la technique. Bien entendu, comme dans chaque projet, la démarche de conception doit prendre en compte de nombreux autres critères que ceux purement techniques, tels que les aspects réglementaires, environnementaux, fonciers, urbanistiques, ... éventuellement analysés à travers une analyse multicritère.

2.1 Une étape préalable indispensable : le diagnostic

Afin d'adapter les confortements ou les réparations aux causes des problèmes, il convient d'effectuer, préalablement à la conception et à la réalisation des travaux, un diagnostic de l'ouvrage et de son environnement. Dans certains cas, la décision de réaliser un confortement pourra être prise à la suite d'un diagnostic, par exemple après la réalisation de l'Étude de Dangers réglementaire.

L'objectif de ce document n'est pas de présenter une méthode de diagnostic mais plutôt de rappeler dans cette section les attendus d'un diagnostic.

2.1.1 Objectifs et contenus d'un diagnostic

Dans le cas d'un système d'endiguement en service et sans désordres apparents, comme on le voit sur la partie droite de la

Figure 2.1 ci-dessous, l'objectif d'un *diagnostic* est double. Il s'agit de connaître, dans ce diagnostic complet, pour différents événements de sollicitation hydraulique et des niveaux d'eau associés, les niveaux effectifs de performance :

- hydraulique : niveau(x) de protection ;
- structurelle : niveau(x) de sûreté (résistance aux différents modes de rupture).

La performance mesure l'atteinte des objectifs fixés, lorsqu'ils sont connus, ce qui n'est pas toujours le cas des systèmes de digues anciens. Pour évaluer du mieux possible les niveaux de performance, il est nécessaire d'identifier l'origine des défaillances possibles ou avérées. On confond d'ailleurs parfois dans le langage courant *diagnostic* et *évaluation de la performance*. Le niveau de protection est une caractéristique du système dans son ensemble, alors que, dans le cas d'une digue ou d'un tronçon de digue, le *diagnostic* ne concerne que les aspects structurels.

Pour des désordres avérés, comme on le voit sur la partie gauche de la

Figure 2.1 ci-dessous, le *diagnostic* a pour objet de déterminer le (ou les) mécanisme(s) de dégradation (et le scénario qui les associe) à l'origine des désordres. C'est ainsi une interprétation de la nature et des causes des anomalies observées.

Dans l'optique de réaliser des travaux de confortement ou de réparation, le diagnostic devra clairement afficher dans ses conclusions :

- chacun des mécanismes de dégradation et de rupture ;
- les scénarios qui combinent différents mécanismes ;
- leur probabilité respective.

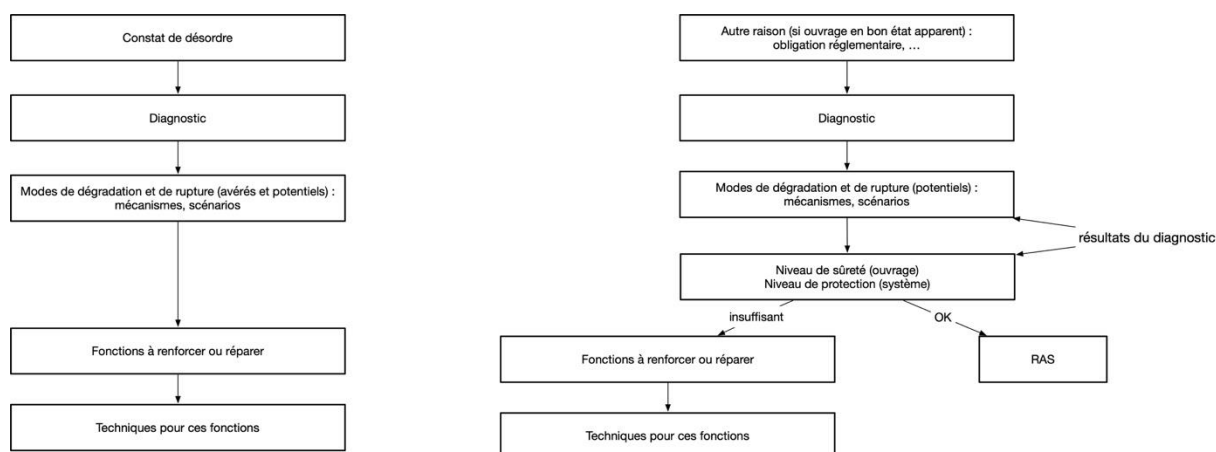


Figure 2.1 : Insertion du diagnostic et attendus de celui-ci dans la démarche de choix de techniques pour une réparation (à gauche) ou un confortement (à droite) (Source : Rémy Tourment)

Un diagnostic est une synthèse experte d'éléments de :

- topographie et de bathymétrie ;
- inspection visuelle détaillée ;
- géotechnique et de structuration de l'ouvrage ;
- fondations ;
- morphodynamique ;
- hydrologie, hydraulique ;
- hydrogéologie ;
- ouvrages inclus ;
- autres facteurs de l'environnement (végétation, animaux fouisseurs, activités humaines, ...).

Ces éléments proviennent soit de :

- données existantes (disponibles auprès du gestionnaire dans son dossier d'ouvrage, de fournisseurs de données ou de recherches historiques spécifiques dans le cadre du diagnostic) ;
- données d'inspections visuelles ;
- données acquises via des reconnaissances spécifiques, en particulier géotechniques ou géophysiques.

Les données et reconnaissances acquises et utilisées dans le cadre d'un diagnostic peuvent servir ensuite dans le cadre de la conception du confortement (voir [section 2.2](#)).

Pour avoir plus de détails sur les diagnostics de digues et les méthodes de réalisation associées, on pourra se reporter aux documents cités ci-après, déjà largement utilisés par la profession : [2-1 ; 2-2 ; 2-3 ; 2-4 ; 2-5 ; 2-6].

Notons néanmoins qu'il n'existe pas de méthode "clé en main" de diagnostic de digue applicable génériquement, et que les documents listés ci-dessus présentent "simplement" un cadrage de la méthodologie. Pour des exemples de méthodes pratiques de diagnostic il faut se référer à des présentations de méthodes opérationnelles, comme par exemple dans les communications suivantes : [2-7 ; 2-8 ; 2-9].

2.1.2 Mécanismes et scénarios de défaillance

Dans la grande majorité des cas, le processus de détérioration d'un tronçon de digue pouvant conduire jusqu'à la brèche combine différents mécanismes élémentaires qui s'enchaînent dans un scénario (voir la Figure 2.2) [2-10 ; 2-11]. Ces derniers dépendent alors de la nature des composants, des caractéristiques de l'environnement et des actions qui affectent le tronçon de digue. Il existe donc une relation très forte entre les formes, les fonctions et les modes d'endommagement et de rupture des digues. [2-12 ; 2-13].

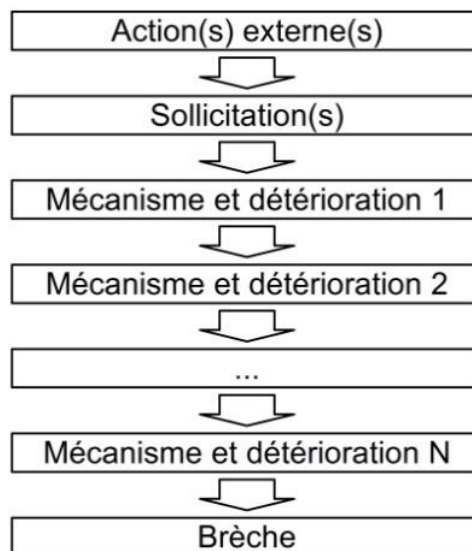


Figure 2.2 : Les mécanismes s'enchaînent et forment des scénarios de brèche (issu de [2-6])

Les mécanismes de dégradation et de rupture les plus communs sur les digues, regroupés en familles, sont les suivants :

- érosion externe :
 - érosion par surverse (crête, talus côté zone protégée, terrain naturel côté zone protégée),
 - érosion par le courant :
 - affouillement (érosion de la fondation et/ou du pied de digue),
 - érosion externe du talus (côté eau) ;
 - érosion par impact des vagues :
 - direct (talus côté eau),
 - par franchissement (crête, talus côté zone protégée, terrain naturel côté zone protégée) ;
- érosion interne :
 - suffusion,
 - érosion de contact,
 - érosion régressive,
 - érosion de conduit ;
- instabilités :
 - glissement (rotationnel ou translationnel, profond ou de surface) (voir Figure 2.3),
 - effondrement (voir Figure 2.3),
 - liquéfaction (perte de la résistance au cisaillement sous augmentation des pressions interstitielles ou suite à une sollicitation sismique),
 - claquage hydraulique.

L'érosion par surverse et l'érosion interne sont généralement les plus susceptibles de conduire à une brèche dans le corps de la digue [2-14]. Les autres mécanismes ne conduisent, dans la plupart des cas, qu'à des dégradations, parfois importantes, et nécessitent l'interaction avec d'autres mécanismes au sein d'un scénario pour conduire à la formation d'une brèche, comme par exemple :

- érosion externe par le courant (affouillement) → sape puis effondrement du talus côté eau (voir Figure 2.4 ci-dessous) → érosion interne → brèche ;
- érosion interne → tassement de la digue et abaissement de la crête → surverse → brèche ;
- fissuration d'un revêtement rigide côté eau → érosion externe de la recharge étanche → infiltrations dans le corps de digue → érosion régressive → formation d'un conduit → effondrement au-dessus du conduit → brèche (voir Figure 2.5 ci-dessous).

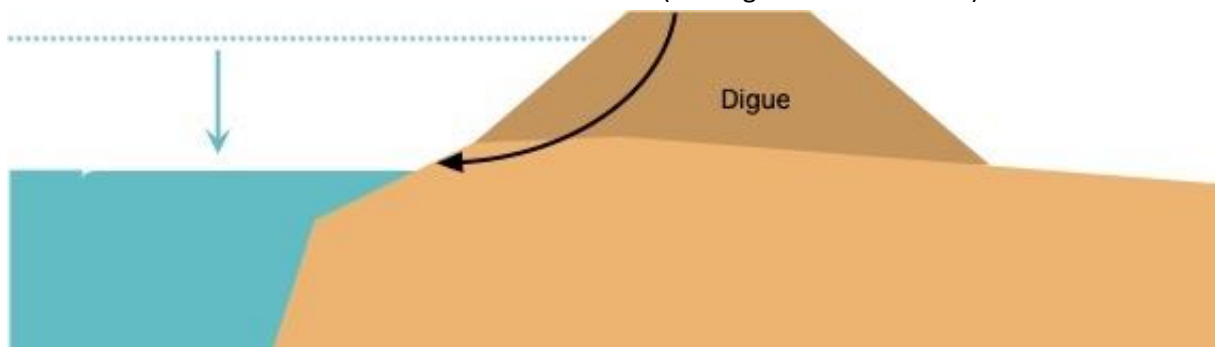


Figure 2.3 : Glissement de talus coté eau (dans ce cas causé par un abaissement rapide du niveau d'eau)
(Source : Rémy Tourment)

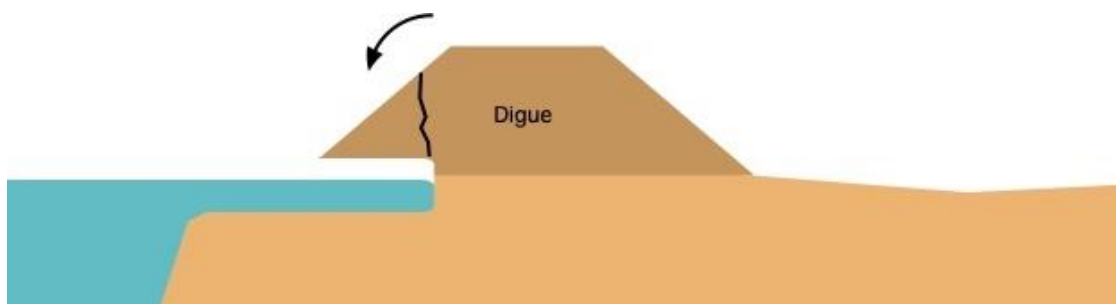


Figure 2.4 : Effondrement précédé d'un affouillement (Source : Rémy Tourment)

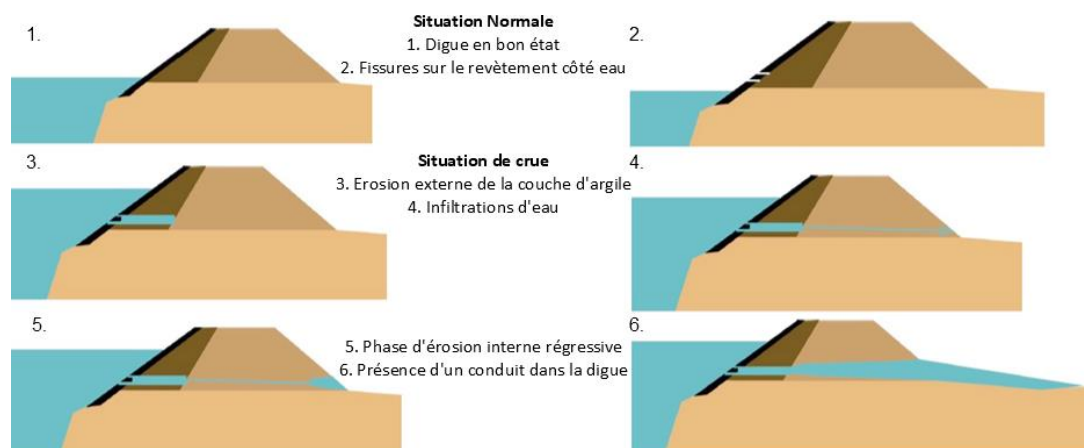


Figure 2.5 : Processus de détériorations menant à la formation d'un conduit dans la digue (Source : Rémy Tourment)

On peut également mentionner le scénario de rupture par érosion régressive « de Sellmeijer » (Figure 2.6), mentionné dans [2-15], qui concerne les digues construites sur une couche de fondation étanche et cohésive surplombant une fondation perméable et granulaire :

- développement de sous-pressions dans la fondation perméable ;
- claquage de la couche de fondation cohésive en pied de digue côté zone protégée ;
- érosion régressive de la fondation granulaire ;
- initiation de la brèche dans la digue (plusieurs mécanismes possibles), puis formation d'une brèche totale.

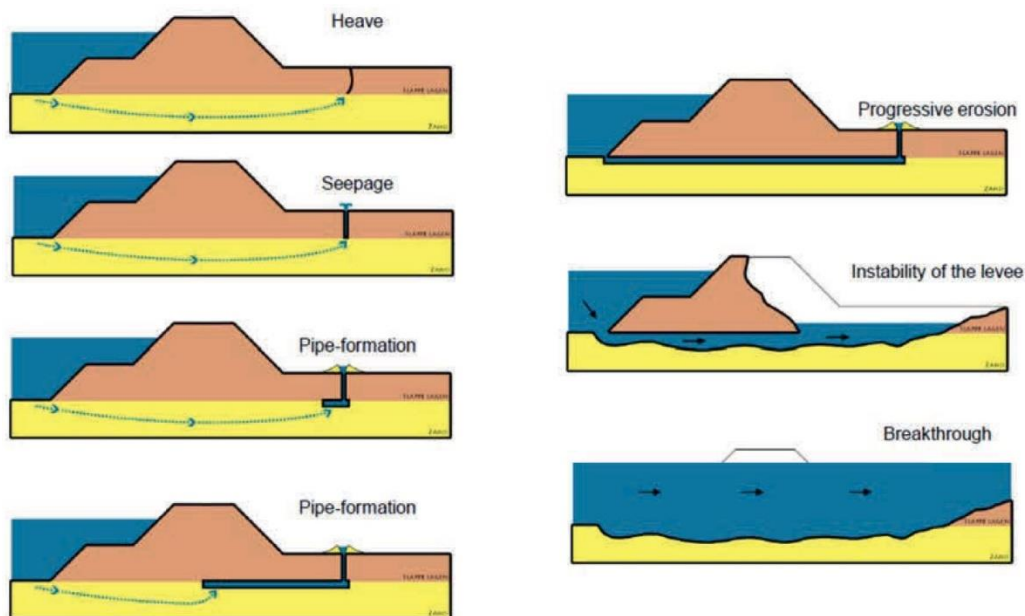


Figure 2.6 : scénario d'érosion régressive de Sellmeijer [2-15]

Au-delà de l'analyse des mécanismes effectivement actifs dans les processus de détérioration et de défaillance, il faut considérer également les phénomènes intervenant au préalable et pouvant déclencher un des mécanismes listés ci-dessus. Il faut par exemple mentionner la fissuration, qui peut se produire sous l'effet d'autres mécanismes (tassements différentiels, dessiccation...) et qui peut intervenir en tant que cause dans différents scénarios de défaillance.

On pourra se reporter à [2-16] pour plus de précisions sur les mécanismes et scénarios conduisant à des désordres ou à des brèches sur les digues.

2.1.3 Choix des principes de confortement

Les principes de confortement doivent être adaptés aux fonctions qui sont défaillantes et qui doivent donc être renforcées. Ces principes sont déterminés sur la base des mécanismes de dégradation et de rupture constatés, comme indiqué dans le Tableau 2.1 suivant (non exhaustif).

2.1.4 Diagnostic et/ou analyse de risque

Les activités de diagnostic et d'analyse de risque sont fortement liées, à telle enseigne que l'EDD (qui est l'objet réglementaire défini par l'arrêté du 7 avril 2017 modifié) s'appuie désormais sur un diagnostic approfondi et une analyse de risque incluant analyse fonctionnelle et analyse des modes de défaillance. L'analyse des modes de défaillance permet entre autres d'identifier les mécanismes et scénarios de défaillance que le diagnostic doit caractériser en termes de probabilité.

Les activités de diagnostic et d'analyse de risque sont fortement liées :

- une analyse de risque nécessite un diagnostic des ouvrages composant un système et une étude de dangers – l'EDD (qui est un objet réglementaire basé sur une analyse de risque) comprend désormais explicitement (arrêté du 7 avril 2017 modifié) un diagnostic exhaustif ;
- un diagnostic, qui est par ailleurs facilité par l'application des méthodes de l'analyse de risque dont entre autres l'analyse des modes de défaillance basée sur une analyse fonctionnelle, doit identifier et caractériser l'ensemble des mécanismes et scénarios de défaillance.

Pour concevoir des confortements adaptés aux modes de défaillance potentiels d'un ouvrage, un diagnostic sera généralement suffisant. Une analyse de risque de l'ensemble d'un système, prenant en compte les conséquences des différentes défaillances possibles, permettra en plus de hiérarchiser les priorités en termes de tronçons à renforcer et/ou de mécanismes à traiter.

Tableau 2.1 : Correspondances entre mécanismes de dégradation et de rupture et principes de confortement/réparation

Mécanisme de dégradation	Travaux de réparation/confortement à entreprendre
Érosion interne	• Étanchéité (amont ou centrale) : réduit les vitesses d'écoulement à l'origine des phénomènes d'érosion interne. • Filtration (associée si nécessaire à un drainage en aval) : stabilise les particules du sol soumises aux forces d'un écoulement interne et évite leur entraînement.
Érosion par surverse (point bas)	• Comblement des points bas : empêche la surverse aux points où elle pourrait se produire préférentiellement. • Renforcement de la résistance à l'érosion externe du talus côté zone protégée et de la crête : n'empêche pas la surverse mais empêche ou ralentit l'érosion consécutive.
Érosion par surverse (généralisée)	• Nécessite une modification du système pour gérer les surverses et créer des déversoirs ou des tronçons de digues résistants à la surverse, de manière à éviter les surverses sur les zones non résistantes [2-17].
Érosion externe par le courant ou par les vagues	• Éloignement de la digue du cours d'eau, du lac ou de la mer : diminue les sollicitations hydrauliques. • Renforcement de la résistance à l'érosion externe (talus côté eau, voire crête et talus côté terre en cas de franchissement par les vagues) : empêche ou a minima ralentit l'érosion. • Mise en place d'ouvrages de protection indirecte (épis, brise-lames, seuils...) : diminue les sollicitations hydrauliques.
Glissement	• Reprise du système d'étanchéité / drainage. • Renforcement mécanique des talus : recharge / substitution (matériau compacté), reprofilage de talus (adoucissement), ouvrages de soutènement (palplanches, gabions, etc.).
Érosion par animaux fousseurs	• Protection externe rigide, grillage anti-fousseurs enterré ou déplacement des fousseurs.

2.1.5 La prise en compte du retour d'expérience historique

Les retours d'expérience historique et accidentologique sont des éléments importants à prendre en compte dans le choix des techniques de confortement et de réparation pour s'assurer d'une part de la robustesse du traitement proposé en phases de conception et de réalisation et d'autre part de la durabilité dans le temps de la technique retenue.

La CIGB dans son bulletin 164 a analysé, sur la base de ce retour d'expérience, la vulnérabilité de différents types de conception (zonage) de barrages en remblais vis-à-vis de l'érosion interne [2-15] (voir page 51, §2.3). Ces conceptions ont été regroupées en quatre classes, en fonction de leur capacité à arrêter l'érosion interne dans le corps de l'ouvrage. Le Tableau 2.2 ci-dessous est une adaptation par notre GT CFBR « Confortement et Réparation des Dignes de protection en remblai » du travail du

Comité Technique « Barrages en remblai » de la CIGB [2-15] (voir page 51, §2.3). Ce tableau présente en quatre classes la capacité de différents types de conception d'ensemble des digues à maîtriser l'érosion interne, sans distinction des différents mécanismes d'érosion interne. Le tableau renvoie à des illustrations figurant dans la suite du présent guide correspondant aux différents types de zonage du tableau du bulletin 164.

Tableau 2.2 : lien, sur la base d'un retour d'expérience, entre le type de zonage de la digue et le risque d'érosion interne (adapté de [2-15] (voir page 51, §2.3))

Type de conception de la digue	Maîtrise de l'érosion interne	Risque d'érosion interne
Digue existante ("homogène") (Figure 4.9 a) Digue en remblai avec butée de pied drainante (Figure 4.9 b)	Faible ou non maîtrisée	Important
Digue en remblai avec recharge aval drainante « sans filtre » ⁶	Quelques arrêts de l'érosion interne variant avec la nature du filtre et/ou du zonage	Modéré
Digue en remblai avec étanchéité externe (Figure 3.1 et 3.2) Digue en remblai avec étanchéité interne (Figure 3.3)	Un arrêt global de l'érosion interne qui dépend de la qualité du filtre et du dispositif d'étanchéité	Faible
Digue en remblai avec système de filtre-drain cheminée et tapis (Figure 4.8 b et Figure 4.8 c) Digue en remblai avec recharge aval drainante (Figure 4.10) Digue en remblai avec recharge drainée (Figure 4.12)	Arrêt quasi-systématique de l'érosion interne grâce à la qualité de la conception	Très faible

2.2 La conception d'un confortement/d'une réparation sur une digue

Un projet de confortement concerne en général un grand linéaire de digues avec potentiellement des tronçons soumis à des problématiques diverses. La discrétisation du linéaire peut être très fine donc conduire à une multitude de possibilités. Pour des raisons pratiques, le nombre de sections types de confortement devra rester limité. Le choix de la méthode de confortement devra donc prendre en compte que l'on a rarement une seule problématique à traiter au sein d'une même section en travers, et que différentes techniques décrites dans ce document seront probablement à associer.

⁶ Dans notre guide, il n'y a pas de figures correspondant à ce zonage car nous ne préconisons pas l'absence de filtre entre le remblai et une recharge aval drainante sauf dans le cas où les conditions de filtre entre les matériaux constituant le remblai de la digue et le drain seraient respectées

Sur la base des résultats du diagnostic, on s'attachera à traiter les problématiques rencontrées, comme indiqué dans le 2.1.3, avec éventuellement un programme de travaux en différentes phases, basé sur les résultats d'une analyse de risque comme indiqué dans le 2.1.4. Les enjeux impactés en cas de défaillance ou de rupture sont également à prendre en compte dans les choix de conception.

Il faut garder en tête que les alternatives à des confortements en place, citées ci-après de manière non exhaustive, sont à étudier systématiquement :

- le déplacement de la digue ; l'éloignement de la digue de l'eau va diminuer les sollicitations en termes de courant, de vagues, voire de charge ;
- l'arasement complet de la digue et sa reconstruction en place ; suivant l'importance des travaux de confortement cette alternative peut permettre une simplification du chantier et avoir un impact économique très favorable.

Bien entendu ces alternatives doivent être comparées dans leur ensemble avec celle d'un confortement sur place, en tenant compte entre autres des sujétions liées à la géotechnique, à l'environnement, à la réglementation, au foncier, ... Cette comparaison pourra être faite suivant les cas en phase préliminaire, lors de l'avant-projet ou lors du projet détaillé, suivant le niveau de détail des informations nécessaires pour pouvoir trancher.

À l'inverse d'un confortement, une réparation peut rester ponctuelle (sur un faible linéaire de digue). Une réparation doit cependant nécessiter une étude spécifique. La conception d'un confortement ou d'une réparation s'appuie sur des données qu'il faut recueillir (2.2.1 pour les généralités et fiches pour les détails suivant les techniques) et sur des modélisations (2.2.2 pour les généralités et fiches pour les détails suivant les techniques).

2.2.1 Données

Cette section présente les données qui sont généralement à recueillir pour un projet de confortement. Les chapitres 3 à 7 complètent pour ce qui est spécifique aux familles de techniques, et les fiches ce qui est spécifique à une technique particulière. Dans une première sous-section (2.2.1.1) nous listons les données techniques, puis dans une seconde (2.2.1.2) les autres données. Suivant la fonction et le type de confortement visé, toutes ou certaines de ces données seront primordiales ou simplement utiles. Cela est détaillé dans les chapitres suivants et les fiches techniques respectives.

Comme indiqué plus haut, les données utilisées dans le cadre du diagnostic sont à réutiliser pendant la phase de conception, et souvent à compléter par des reconnaissances complémentaires.

Nous insistons sur le fait que la collecte d'information doit être faite sur l'ensemble du linéaire à conforter (ou en des endroits judicieusement choisis au regard de l'ensemble du linéaire) et non uniquement au niveau de quelques profils. En particulier, il sera nécessaire d'avoir des informations sur les extrémités de la zone à conforter (en lien avec les problématiques de transition, voir chapitre 8).

La connaissance de l'historique de l'ouvrage (construction, renforcements antérieurs, crues et désordres subis...) et des campagnes de reconnaissances de sol antérieures peut également orienter de manière utile le programme d'investigations à réaliser.

2.2.1.1 Caractéristiques techniques

La liste suivante présente les données techniques qui seront nécessaires à la conception d'un projet de confortement/réparation (à mettre en perspective avec l'historique de l'ouvrage : construction, renforcements antérieurs, crues et désordres subis...) :

- la topographie/bathymétrie de l'ouvrage et de ses avoisinants ;
- la géométrie des terrains de fondation ;
- l'identification des terrains en place (le remblai existant et sa fondation), notamment :
 - granulométrie (dont sédimentométrie) et indice de plasticité (ou valeur au bleu des sols),
 - densité en place,
 - teneur en eau en place ;
- les caractéristiques géomécaniques des terrains en place (remblai existant et son sol de fondation). Les études visant à reconnaître la nature des sols en place dans la digue et dans sa fondation comprennent des investigations purement géotechniques qui sont utilement guidées ou complétées par des campagnes de mesures géophysiques [2-3]⁷. On pourra notamment se référer aux éléments contenus dans les Eurocodes [2-18] ou plus spécifiquement dans les « Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai » [2-19] pour déterminer les grandeurs suivantes :
 - angles de frottement,
 - cohésions,
 - poids volumiques apparents,
 - contraintes admissibles du sol de fondation,
 - perméabilités,
 - résistance à l'érosion (contrainte critique et taux d'érosion), résultats des essais d'érosion HET (érosion interne) ou JET (érosion externe);
- les conditions hydrologiques et hydrauliques du cours d'eau (initiales, envisageables au cours du projet et une fois le projet fini). Suivant les enjeux du projet, il pourra notamment être pertinent de prendre en compte l'évolution des aléas futurs, en particulier climatiques ;
- la morphodynamique du/des cours d'eau et/ou de la mer avoisinant(s) l'ouvrage ;
- la disponibilité de zones d'emprunts et/ou matériaux et les possibilités d'approvisionnement extérieurs ;
- l'hydrogéologie du site ;
- les sollicitations sismiques ;
- les données climatiques (périodes de gel, de sécheresse) ;
- d'éventuels aléas géologiques dans la zone du projet (karstique notamment) ;
- la présence et la position des avoisinants, des réseaux concessionnaires, d'ouvrages traversants, de bâtiments, de murs (de quais ou autre), ...etc.
- l'absence d'obstacle(s) souterrain(s) ou aérien(s) compromettant la faisabilité du projet.

2.2.1.2 Autres contraintes de projet

D'autres données, listées ci-dessous de manière non exhaustive, sont également nécessaires à la conception d'un projet de confortement/réparation :

- les emprises disponibles pour l'ouvrage en situation définitive ;
- les contraintes du futur chantier :

⁷ Pour la définition et la mise en œuvre de ces investigations, il est utile que l'ensemble des intervenants du chantier travaillent en concertation (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, bureau d'étude, prestataires géotechnique et géophysiques).

- accessibilité au site lors de la mise en œuvre,
- gestion du risque de crue pendant les travaux : peu impacter le calendrier des travaux. Il est nécessaire d'assurer la continuité de la protection de la zone protégée et risques pour le chantier lui-même,
- possibilité des approvisionnements extérieurs (carrières, matériaux spécifiques...),
- emprises mobilisables en phase chantier en surface (présence d'ouvrage, bâtiments, possibilité de stockage à proximité de matériaux, de déblais, de matériel...) ainsi qu'en hauteur (présence de réseaux aériens, travaux à réaliser sous ouvrage d'art...),
- nuisances acceptables par le site et les riverains : bruit, poussières, vibrations, restriction de circulation...
- la pollution de l'eau et d'une manière plus générale, les incidences « loi sur l'eau »,
- incidence des travaux sur les avoisinants ou mitoyens,
- possibilité de vestiges archéologiques (voire pyrotechniques) ;
- les enjeux environnementaux (périodes de reproduction d'espèces qui peuvent par exemple influencer le calendrier des travaux) et la gestion des espèces envahissantes ;
- les contraintes réglementaires ;
- la pollution existante éventuelle des terrains ;
- le délai ou la période de réalisation et/ou vitesse d'exécution requise (rendement) ;
- les moyens financiers mobilisables pour le projet ;
- les contrôles d'exécution qui seront effectués au cours du chantier afin de garantir la conformité de l'ouvrage, que ce soit avec les besoins du maître d'ouvrage ou alors avec des réglementations et normes relatives aux techniques et/ou matériaux employés.

2.2.2 Modélisations

Bien que les techniques présentées dans les différents chapitres puissent nécessiter des modélisations particulières, il conviendra de prendre en considération les modèles suivants, communs à l'ensemble des techniques :

- calcul des écoulements dans le remblai et la fondation⁸, la maîtrise des écoulements au sein d'un ouvrage hydraulique étant essentielle à sa résistance à différents modes de rupture (érosion interne et glissement entre autres) ;
- calcul de stabilité au glissement de l'ouvrage ;
- résistance aux différents autres mécanismes de dégradation et de rupture (érosion interne, érosion externe latérale ou par surverse, liquéfaction...) ;
- déformation de l'ouvrage et de sa fondation (tassements) ;
- autres états limites (fissuration, claquage hydraulique, ...).

Pour avoir plus d'éléments sur ces modèles de dimensionnement qui sont communs à l'ensemble des techniques de confortement ou de réparation, le lecteur est invité à consulter entre autres les recommandations du CFBR « barrages en remblai » [2-20] et « barrages-poids » [2-21] ainsi que le chapitre 8 de l'ILH [2-22].

⁸ On pourra se reporter au 4.2.2 du présent document pour des considérations sur cette modélisation dans le cas des digues de protection contre les inondations

Nous insistons également sur la nécessité de vérifier à nouveau la stabilité de la digue une fois que les techniques de confortement ou de réparation envisagées ont été définies et dimensionnées, à la fois pour la phase chantier et pour les situations futures d'exploitation.

2.2.3 Autres éléments à prendre en compte dans la conception

Au-delà de la conception des confortements proprement dits, il y a lieu :

- de prévoir les pistes de service (en crête et en pied) et les accès divers (accès à la piste de crête, passages d'un côté de la digue à l'autre) pour faciliter la maintenance ultérieure de l'ouvrage (entretien des talus enherbés, des maçonneries, des ouvrages inclus...) et les visites, zones de retournement, etc. ;
- d'étudier la possibilité de profiter des travaux pour installer des dispositifs d'auscultation (par exemple fibre optique, mesure des débits des drains, ...), ainsi que détaillé ci-dessous :

Lors de la réalisation de travaux, il peut judicieux de mettre en place un dispositif d'auscultation qui permettra de confirmer leur efficacité/pérennité, et pourra ensuite être maintenu (totalement ou partiellement) en exploitation. Si le lecteur est invité à consulter des ouvrages de référence [2-4 ; 2-23 ; 2-24], on pourra évoquer rapidement les solutions suivantes à titre d'exemple : mesures de déformations (tassements, déplacements), mesures piézométriques, mesures de pression interstitielle, mesures de débit de drains par jaugeage des collecteurs ou mesures dans des canaux, mesures thermométriques locales ou réparties par fibre optique, repères topographiques facilitant la mise en œuvre de mesures à grand rendement (LiDAR, interférométrie, photogrammétrie). De tels systèmes doivent permettre de s'assurer de la performance de l'ouvrage et des fonctions principales confortées ou réparées lors des travaux. En période de mise en charge, les gestionnaires de digues sont particulièrement occupés et il leur est difficile d'assurer à la fois des mesures d'auscultation et leur analyse en temps réel. De ce fait, l'auscultation est le plus souvent réalisée après les sollicitations pour identifier et quantifier des impacts éventuels. Néanmoins, la surveillance en crue peut aujourd'hui être envisagée grâce à des systèmes automatisés d'acquisition et de traitement des mesures (fibre optique par exemple).

Bien entendu, le concepteur doit viser à assurer la pérennité des solutions de confortement ou de réparation envisagées. La durée de vie d'un confortement ou d'une réparation peut néanmoins être délicate à estimer : par exemple, les digues en charge sont confrontées en permanence aux sollicitations hydrauliques la ou les sollicitations observables au droit des digues « sèches » sont plus occasionnelles (lors d'une crue).

Du fait de cette difficulté à proposer une estimation objective de leur durée de vie, les techniques de confortement ou de réparation qui sont présentées dans ce guide n'abordent que partiellement cette question. Sur la base d'un retour d'expérience plus important dans le futur, il est envisagé une mise à jour de ce document, intégrant la notion de durée de vie / pérennité des solutions de confortement et de réparation des digues en remblai.

Il est évident que la question du coût d'un projet de confortement ou de réparation fait partie intégrante du choix final de la technique. Il est délicat de proposer une estimation du coût de chacune des techniques présentées dans ce guide, d'une part parce que nous ne disposons pas des données pour les cas étudiés et d'autre part car le coût est intimement lié aux conditions de site et de mise en œuvre. Le lecteur intéressé par ces questions pourra trouver quelques éléments de réponse dans la bibliographie comme par exemple [2-25 ; 2-26] ou dans les comptes-rendus des colloques suivants [2-27 ; 2-28 ; 2-29].

2.3 La réalisation (chantier)

La réalisation d'un confortement ou d'une réparation comprend en général de multiples postes de chantier qu'il convient d'organiser avant le début des travaux. On distinguera trois phases de travaux : ceux préparatoires, nécessaires à l'aménagement du chantier, les travaux de confortement ou de réparation proprement dits et les travaux de remise en état du site.

Les travaux préparatoires au futur chantier consistent à (liste non exhaustive) :

- déboiser et même dessoucher si possible le site ;
- le cas échéant, prévoir le dévoiement des réseaux existants sur l'emprise du chantier ;
- aménager et signaler les accès, circulations, emprises et zones d'emprunt, zones d'espèces naturelles sensibles à protéger ;
- effectuer le piquetage et l'implantation des ouvrages ;
- protéger le chantier contre le risque de crues [2-30] (éviter l'emprise de la base de vie ou des zones de stockage sur les zones inondables du site, suivi météorologique, du risque de crues) ;
- préparer le Plan d'Assurance Qualité (PAQ).

À la suite de cela, les travaux de confortement ou de réparation peuvent démarrer, ces derniers comprenant les grandes étapes suivantes :

- déblayage/remblais ;
- réalisation de sous-couches ;
- reprise des ouvrages existants, traversants ou de transition ;
- mise en œuvre de(s) la technique(s) de confortement ou de réparation ;
- suivi et contrôle d'exécution des travaux [2-31] ;
- adaptations éventuelles du projet en cours de chantier (et documentation des adaptations réalisées) ;
- gestion des déchets et de l'environnement ;
- végétalisation des talus ;
- récolement, réception et suivi de l'ouvrage après travaux[2-31].

Enfin, les travaux de remise en état permettent de remettre la zone de travaux dans un état idéalement le plus proche possible de l'état initial : retrait de la signalisation, des zones de circulation, de retournement, de stockage, etc.

Il faut enfin garder en mémoire que comme tout type de travaux, les chantiers de confortement ou de réparation des digues s'accompagnent de nuisances diverses et d'enjeux spécifiques quant à l'environnement. Ces nuisances ou enjeux, listés ci-dessous, peuvent fortement influencer le mode opératoire des travaux :

- circulations d'engin sur les voiries existantes riveraines, risque routier, bruit de chantier, poussière...
- l'évacuation des déchets nécessite un plan de gestion des déchets et la localisation d'un centre de stockage de déchets a priori inerte ;
- d'un point de vue environnemental, l'utilisation de certains matériaux, le renvoi/pompage d'eau vers le milieu naturel ou la gestion du chantier doivent être anticipés par des dispositions constructives classiques ou des études/instructions spécifiques pour réduire, éviter ou compenser les nuisances faites à l'environnement. Une instruction Loi sur l'eau s'avère souvent nécessaire.

Il est particulièrement important de documenter les travaux réalisés, non seulement en établissant des plans relevés après travaux (récolement), mais également tout au long du chantier lui-même en notant tout événement ou modification par rapport au projet. Cette documentation devra rejoindre le dossier d'ouvrage et pourra servir dans le futur aux diagnostics et analyses de risque.

À noter pour le lecteur, le chapitre 10 de l'ILH [2-30] et la section 4.5 du référentiel digues [2-31] présentent également des généralités sur la réalisation de travaux sur les digues.

2.4 Notion d'urgence

Il est important de bien expliciter et distinguer ce que recouvrent les situations de crise et les situations d'urgence :

- La situation de crise se réfère à une situation de choix d'action liée à la survenance d'un événement tel qu'une inondation de la zone protégée suite à l'apparition d'une brèche, à la surverse sans brèche (par exemple via un déversoir) ou à un contournement du système de protection.
- La situation d'urgence se caractérise par un danger grave pour les enjeux humains ou matériels, induisant un péril imminent et une menace à court terme. Cette situation d'urgence nécessite une action immédiate de la part d'une autorité compétente afin de faire cesser le péril, soit par des mesures de précautions ou de mise en sécurité des populations (maire, préfet), soit par des interventions de renforcement ou de réparation en urgence des ouvrages (gestionnaire).

En fonction du contexte, la réalisation de travaux sur les ouvrages s'effectue ainsi selon des priorités et des temporalités d'intervention différentes :

- Intervention de court terme en situation d'urgence : en période de crue, l'apparition de désordres et de symptômes susceptible de conduire à la formation d'une brèche ou la volonté de ralentir ou de limiter le développement d'une brèche après son initiation, peuvent conduire au déclenchement d'interventions très rapides avec une ingénierie limitée.
- Intervention de moyen terme en situation d'urgence : après une crue ou un événement ayant endommagé la digue (accident, séisme...), le rétablissement rapide de la fonctionnalité de la digue peut être nécessaire afin d'assurer la protection contre les futures crues ou marées. L'intervention est alors à réaliser dans les quelques jours, semaines ou mois qui suivent le constat du désordre et la fin de la crue.
- Intervention hors période de crise, en situation normale : après le constat ou la crainte d'apparition d'un désordre, les travaux sont à réaliser dans un délai pouvant dépasser plusieurs mois.

Cette temporalité d'intervention va influencer sur le temps disponible pour l'ingénierie (diagnostics et conception tels que présentés dans les sections 2.1 et 2.2) et donc sur le niveau de qualité de ces prestations, y compris les données mobilisées (reconnaitances, recherche d'archives). Il sera toujours nécessaire pour les travaux de court terme effectués en situation d'urgence et encore souhaitable pour les travaux effectués à moyen terme, de produire un diagnostic complet des désordres et des travaux après le retour à la normale.

Pour les interventions à court terme en situation d'urgence, où la réactivité et la rapidité d'action sont des facteurs essentiels, il est recommandé que soient décrits dans les consignes les différents types de désordres envisageables, ainsi que les mesures à mettre en œuvre en fonction des désordres observés.

Les sections 6.5 à 6.8 de l'ILH [2-32] et l'ouvrage du Cerema [2-33] présentent les principes de telles interventions en urgence.

Enfin, l'annexe D de ce document présente le contexte des situations d'urgence et propose des solutions spécifiques aux situations rencontrées.

3 Étanchéité

Ce chapitre 3 est basé sur le travail du sous-groupe n°1 « Étanchéité interne » et du sous-groupe n°2 « Étanchéité externe », en association avec les animateurs du GT. Ces sous-groupes sont également à l'origine de sept fiches techniques, listées ci-dessous et disponibles dans la partie 2 (PDF) du document :

- FT G1. Généralités sur les palplanches
- FT 3.1. Rideau de palplanches à fonction d'étanchéité
- FT 3.2. Paroi mince
- FT 3.3. Paroi moulée à fonction d'étanchéité
- FT 3.4. Sol mixé/mélangé en place
- FT 3.5. Écran d'étanchéité réalisé au moyen de la technique du jet grouting
- FT 3.6. Masque en matériaux naturels faiblement perméables

Les membres des sous-groupes étaient :

Sous-groupe n°1 :

Nicolas AUGER, *Centre-Val de Loire*

Yasmina BOUSSAFIR, *Université Gustave Eiffel*

Bertrand CHALUS, *CNR*

Christophe CHEVALIER, *Université Gustave Eiffel*

Arthur COULET, *Centre-Val de Loire*

Yann DENIAUD, *Cerema*

Édouard DURAND, *Cerema*

Jean-Marc FLOHR, *EGIS*

Laurent FOURQUET, *DDT Haute Garonne – VNF*

Loïc GERVAIS, *Centre-Val de Loire*

Vincent GILI, *DDT Haute Garonne*

Nathalie GRASSET, *FUGRO*

Olivier HESSE, *BOTTE Fondations*

Guillaume HIBON, *Antea Group*

Serge LAMBERT, *KELLER Fondations Spéciales S.A.S*

Alain LE KOUBY, *Université Gustave Eiffel*

François LOUVEL, *SPIE Fondation*

Mathieu MONACO, *Centre-Val de Loire*

Stéphane MONLEAU, *Soletanche Bachy*

Jean-Charles PALACIOS, *SAFEGE*

Jacques POUDEVIGNE, *FUGRO*

Michel ROCHE, *SEFI Intrafor*

Lucile SAUSSAYE, *Cerema*

Animateur

Fabien SZYMKEWICZ, *Université Gustave Eiffel*

Alexandre VALENZIANO, *Antea Group*

Sous-groupe n°2 :

Yasmina BOUSSAFIR, *Université Gustave Eiffel*Christophe CHEVALIER, *Université Gustave Eiffel*Yann DENIAUD, *Cerema*

Animateur

Laurent FOURQUET, *DDT Haute Garonne – VNF*Guillaume HIBON, *Antea Group*David MORELLATO, *DDT Haute Garonne*Jacques POUDEVIGNE, *FUGRO*Alexandre VALENZIANO, *Antea Group*

Avant de procéder à la lecture de ce chapitre 3 « Étanchéité » et des fiches techniques qui en découlent, le lecteur est invité à consulter le chapitre 2 « Éléments communs à la démarche de conception d'un confortement ou d'une réparation ». Ce dernier présente en effet des éléments importants et nécessaires à la lecture du présent chapitre, qui portent notamment sur le diagnostic (objectifs, contenu, mécanisme de rupture/défaillance des digues), la conception (données nécessaires, modélisations), la réalisation chantier ou encore sur le cas des situations d'urgence. Les situations d'urgence sont abordées dans l'annexe D (section D.2).

3.1 Maîtriser les écoulements dans la digue et sa fondation

L'étanchéité d'un ouvrage hydraulique, digue ou barrage, est une fonction essentielle associée à la nature de l'ouvrage. Il est nécessaire de considérer l'ensemble constitué de la digue et de son sol de fondation pour définir les besoins de confortement de l'étanchéité d'une digue.

Au-delà de sa fonction de rétention associée à la fonction principale de l'ouvrage, l'étanchéité est également une fonction technique permettant de maîtriser les écoulements internes, et souvent associée en complément à une fonction de filtration ou de drainage (voir [chapitre 4](#)). Les défauts de maîtrise des écoulements dans l'ouvrage peuvent avoir des conséquences néfastes (voir [2.1.2](#)) comme par exemple l'érosion interne (par accélération des vitesses d'écoulement interne) ou, de manière moins fréquente pour les digues "sèches" de protection contre les inondations, le glissement du talus côté zone protégée (par saturation du talus).

Le renforcement de l'**étanchéité** d'une digue, réalisée en position amont ou interne, a pour objectif direct de **limiter les écoulements** et donc diminuer en son aval : les gradients hydrauliques, les pressions interstitielles et le niveau de la ligne de saturation. Il peut également avoir pour objectif de limiter les écoulements dans les défauts préexistants (fissures, terriers, vides le long des ouvrages traversants) qui peuvent être à l'origine de ruptures par érosion interne.

Si l'étanchéité est nécessaire pour que l'ensemble digue et fondation soit résistant par rapport à l'ensemble des mécanismes de rupture, à la différence d'un barrage réservoir, il n'est pas forcément nécessaire que :

- l'étanchéité de l'ensemble digue et fondation soit très importante dans l'absolu (la fonction de retenue d'eau ne demande généralement pas une performance aussi élevée que dans le cas d'un barrage) et on cherchera principalement à ce que le temps de saturation du remblai soit inférieur au temps de passage de la crue ou que la saturation ne conduise pas à l'effondrement de l'ouvrage ou à l'inondation en aval dans la zone protégée au passage de la crue ;
- l'étanchéité de la fondation rejoigne une couche de fondation imperméable, tant qu'elle descend suffisamment bas pour s'opposer à l'érosion interne en réduisant suffisamment les gradients hydrauliques (en rallongeant les chemins potentiels d'érosion potentiels / les lignes d'écoulement). Pour la reprise d'étanchéité sur plusieurs kilomètres de digues, les impacts de

l'entrave des écoulements entre un cours d'eau et sa nappe alluviale deviennent fortement préjudiciables. Dans ces cas, il convient de s'assurer que les couches sous la digue permettent les écoulements naturels entre le substratum et le bas d'un écran étanche

3.1.1 Fonctions principales, secondaires et/ou induites

La fonction principale d'un organe d'étanchéité est d'assurer une étanchéité entre le côté eau et le côté zone protégée (ZP). Dans le cas d'un écran interne, elle délimite deux zones dans l'ouvrage et sa fondation.

Un organe dont l'étanchéité est la fonction principale permet parfois d'assurer des fonctions supplémentaires. Ainsi, un rideau de palplanches peut renforcer la protection à l'érosion externe ou la stabilité de la digue.

À l'inverse :

- l'organe d'étanchéité participe, comme tous les composants de la digue à sa stabilité ;
- il est souvent nécessaire d'assurer la protection contre l'érosion externe des organes d'étanchéité posés sur le talus côté eau, ceux-ci étant minces et/ sensibles à l'érosion externe ;
- il faut également vérifier la nécessité ou pas d'associer un (ou plusieurs) filtres à l'organe d'étanchéité.

3.1.2 Problématiques techniques traitées

Les organes d'étanchéité permettent d'agir sur les écoulements internes et permettent donc de traiter la plupart des problèmes, comme le montre le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Effet de l'amélioration de l'étanchéité sur les différents mécanismes de dégradation

Mécanisme de dégradation	Effet du renforcement de l'étanchéité
Érosion interne	Effet positif : réduit les vitesses d'écoulement à l'origine des phénomènes d'érosion interne
Glissement	Effet positif : abaissement de la ligne de saturation en aval de l'étanchéité (attention cependant à la surélévation de la ligne de saturation amont au passage d'une crue)
Érosion par surverse	Pas d'effet sur les surverses, mais peut retarder l'érosion du talus aval
Érosion externe	Dans la plupart des cas, pas d'effet. Potentielle amélioration de la résistance à l'érosion externe dans le cas de techniques très spécifiques (étanchéité par paroi béton ou maçonnerie).
Érosion par animaux fouisseurs	Dans la plupart des cas, pas d'effet. Potentielle amélioration de la résistance aux animaux fouisseurs dans le cas de techniques très spécifiques (étanchéité par paroi béton ou maçonnerie).

Le niveau d'étanchéité recherché sera adapté à la problématique à traiter (voir [3.2.2](#)).

3.1.3 Variantes

La mise en place d'un organe étanchéité peut être regroupée en deux familles :

- les techniques d'incorporation de nouveaux composants et/ou matériaux imperméabilisants auxquels sont associés :
- les recharges amont en matériau étanche (ou faiblement perméables) (Figure 3.1),
- la mise en place masque étanche en amont (géomembrane, béton bitumineux, ...) (Figure 3.2),
- les rideaux de palplanches interne (Figure 3.3 et Figure 3.4), ou externe dans le cas d'une double fonction étanchéité et protection contre l'érosion et/ou soutènement,
- les parois minces (Figure 3.3),
- les parois moulées (Figure 3.3) ;
- les techniques consistant au traitement des matériaux existants avec adjonction de liants :
- les mélanges en place ou sols mixés,
- l'injection via la technique du jet grouting.

On note que dans cette liste les organes d'étanchéité sont réalisés soit en amont de l'ouvrage, soit en interne de celui-ci.

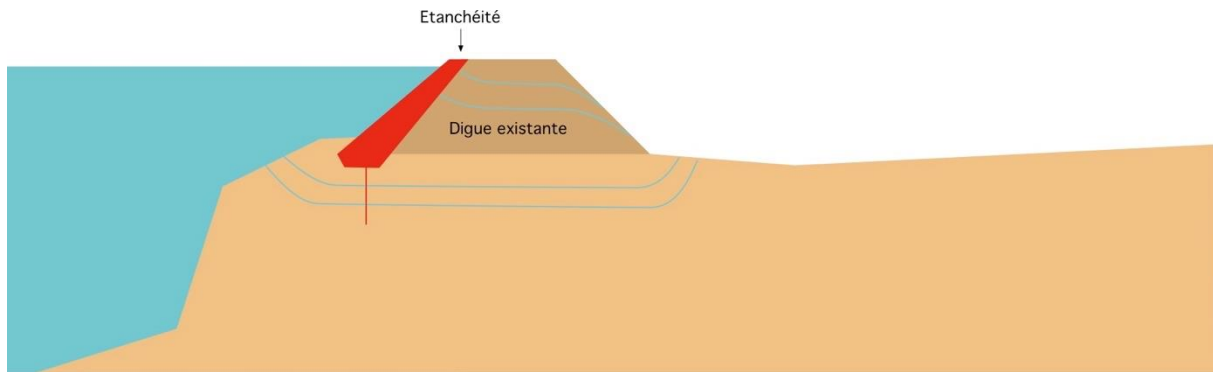


Figure 3.1 : Étanchéité par massif étanche amont pour la digue et écran mince en fondation.
 NB : les courbes correspondent aux lignes d'écoulement (et donc les chemins potentiels d'érosion) avant la mise en place des étanchéités (Source : R. Tourment)

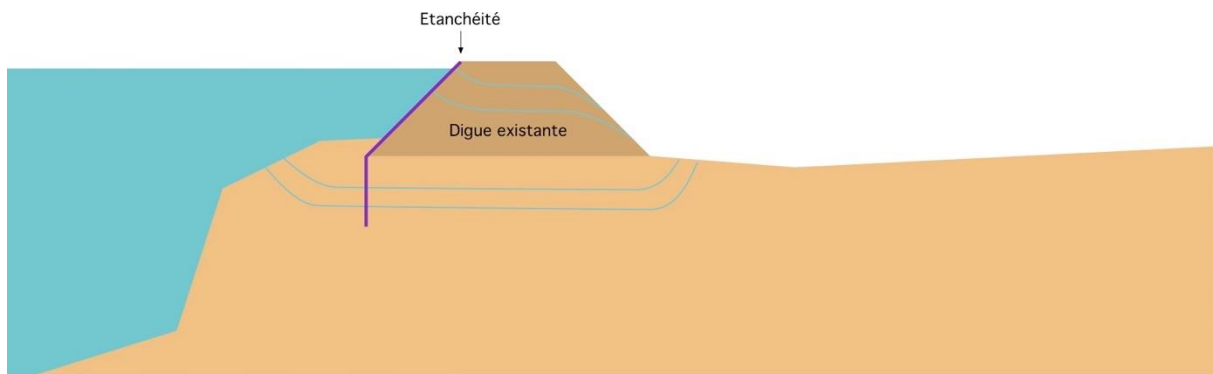


Figure 3.2 : Étanchéité par masque amont pour la digue et la fondation.
 NB : les courbes correspondent aux lignes d'écoulement (et donc les chemins potentiels d'érosion) avant la mise en place des étanchéités (Source : R. Tourment)

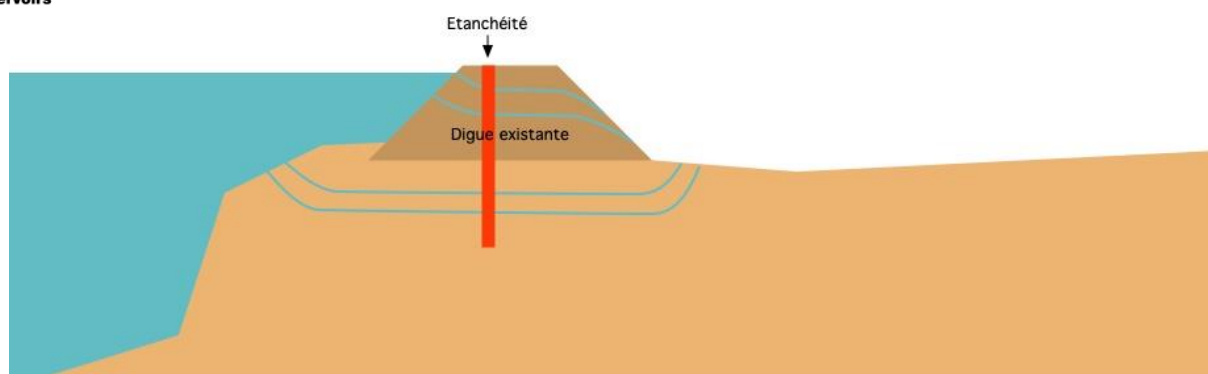


Figure 3.3: Écran d'étanchéité interne d'une digue et de sa fondation.

NB : les courbes correspondent aux lignes d'écoulement (et donc les chemins potentiels d'érosion) avant la mise en place des étanchéités (Source : R. Tourment)



Figure 3.4 : Réalisation d'un rideau de palplanches pour étanchéité en fondation côté eau d'une digue, destiné à être surmonté d'un remblai argileux pour étanchéité du corps de digue (Photo : R. Tourment)

D'autres techniques utilisées classiquement dans le domaine de la consolidation des sols sont envisageables mais ne présentent pas de retour d'expériences suffisant dans le cas des digues pour faire l'objet de fiches techniques spécifiques : injections (hors jet grouting), parois en colonnes ou panneaux sécants.

3.1.4 Solutions alternatives aux écrans d'étanchéité

Comme dans tous les cas la reconstruction intégrale de la digue, avec ou sans déplacement (voir [2.2](#)) est à étudier en alternative. Et, selon le problème à traiter, les principes de confortements alternatifs à la mise en place d'un organe d'étanchéité seront différents :

- filtration (et souvent drainage associé) pour les problèmes liés à l'érosion interne (voir [chapitre 4](#)) ;
- drainage (voir [chapitre 4](#)) et/ou amélioration de la stabilité par des techniques spécifiques (voir [chapitre 5](#)).

Il est à noter que l'ensemble étanchéité/drainage joue sur les écoulements et doit donc être conçu de manière cohérente et vérifiée par une modélisation (voir [2.2.2](#)).

3.1.5 Éléments additionnels

Il doit y avoir continuité entre les divers organes d'étanchéité. L'étanchéité d'un tronçon conforté et les étanchéités existantes des tronçons adjacents est indispensable. L'étanchéité de la digue et de sa fondation doit être cohérente avec l'étanchéité en fondation des tronçons adjacents et prendre en compte le contexte hydrogéologique (interaction nappe-rivière). Par exemple lors de la mise en place d'un écran d'étanchéité interne sur un tronçon dont les tronçons adjacents comportent (d'origine ou suite à un confortement) une étanchéité amont, il convient de raccorder ces différents organes d'étanchéité. Alternativement, un raccordement physique des étanchéités des différents tronçons peut être réalisé au moyen d'une zone de recouvrement avec étanchéités amont ET interne suffisamment longue pour que les écoulements ainsi ralentis n'aient pas de conséquences (voir [8.4.4](#)).

Comme il a déjà été dit plus haut, un dispositif de protection contre l'érosion externe est souvent à prévoir en cas de mise en place d'une étanchéité amont, si elle est sensible à l'érosion ou si elle est mince, et risque d'être rapidement détériorée en cas d'agression.

L'auscultation permettrait en théorie de contrôler l'efficacité des dispositifs d'étanchéité mis en place : mesures piézométriques et de pression interstitielle, mesures de débit des drains par jaugeage des collecteurs ou mesure des débits dans un canal collecteur, mais également mesures thermométriques locales ou réparties par fibre optique (ou autre système de mesure). Néanmoins, compte tenu des périodes et de la dynamique de mise en charge des digues de protection contre les inondations, la détection des évolutions piézométriques et des débits « à conditions de sollicitations hydrauliques identiques » reste problématique. Le lecteur est invité à consulter les ouvrages de référence suivants : ILH chapitre 5 [3-1], communication lors de congrès [3-2 ; 3-3 ; 3-4] ou les bulletins de la CIGB [3-5 ; 3-6 ; 3-7 ; 3-8 ; 3-9 ; 3-10 ; 3-11].

3.1.6 Défaillances potentielles induites

Dans le cas où la conception ou la mise en œuvre d'un écran d'étanchéité interne est inappropriée ou mal réalisée, deux situations peuvent apparaître :

- soit la situation n'a pas évolué par rapport à la situation avant confortement, l'écran étant « juste » inefficace ;
- soit l'ouvrage s'en trouve dégradé en créant/facilitant la création de chemins d'écoulement privilégiés dans le corps de l'ouvrage, favorisant alors l'apparition de phénomènes d'érosion interne. Ce peut notamment être le cas à proximité d'ouvrages traversants (chapitre 8), en pied d'écran ou en extrémité de la zone traitée.

Il faut rester vigilant sur l'impact de l'écran ancré dans le substratum sur l'écoulement général de la nappe phréatique et les échanges globaux avec le cours d'eau.

3.2 Concevoir un écran d'étanchéité

3.2.1 Recueillir des informations préalables spécifiques à ce type de confortement

Les informations préalables permettant la conception d'un renforcement de l'étanchéité concernent la digue et son environnement. De nombreux éléments de conception sont communs à l'ensemble des techniques abordées dans ce guide et le lecteur est invité à consulter la partie 2.2.1 pour en prendre connaissance. Nous évoquerons ici seulement les éléments techniques spécifiques et/ou absolument nécessaires à la conception d'un confortement de la fonction d'étanchéité ainsi que les éléments qui influencent le choix d'une technique parmi les autres, en particulier :

- des informations concernant les sols formant la digue et sa fondation (nature, caractéristiques mécaniques et hydrauliques), en particulier la conductivité hydraulique et la granulométrie (résistance à l'érosion interne) des horizons traversés et sous-jacent ;
- l'hydrogéologie générale du site ;
- la présence de réseaux longitudinaux et/ou transversaux ;
- l'emprise disponible pour sa réalisation, notamment en crête dans le cas d'un écran interne (possibilité de circulation et d'intervention, possibilité d'interrompre le trafic pendant les travaux).

D'autres informations pourront en outre être nécessaires dans le cas de techniques spécifiques ; elles sont alors détaillées dans les fiches techniques correspondantes.

3.2.2 Préciser les caractéristiques attendues

Au-delà des fonctions définies précédemment, l'organe d'étanchéité devra atteindre certaines caractéristiques définies dans le cadre du projet. En particulier une :

- valeur/classe de perméabilité ;
- épaisseur ;
- profondeur (en fondation) ;
- résistance mécanique ;
- déformabilité ;
- homogénéité.

Les performances de cet organe seront à adapter en fonction des différentes contraintes définies dans la section 3.2.1 précédente.

La bonne tenue dans le temps de l'ouvrage dépendra du respect des caractéristiques définies.

3.2.3 Choisir la technique

Dans un premier temps, il faut choisir entre la mise en œuvre d'une étanchéité amont ou interne, ce qui se fait souvent en fonction de contraintes d'emprise, de mise en œuvre et d'environnement (visuel, agressions du milieu...).

La Figure 3.5 fait une synthèse des principales méthodes actuelles susceptibles d'être utilisées pour la réalisation d'un écran d'étanchéité interne ; parmi celles-ci, les cinq citées au 3.1.3 ont été retenues pour une description technique détaillée : i) recharges amont en matériau étanche ou faiblement perméables, ii) écran étanche mince en amont, iii) rideaux de palplanches internes ou externe dans le cas d'une double fonction étanchéité et protection contre l'érosion et/ou soutènement, iv) parois minces et v) parois moulées).

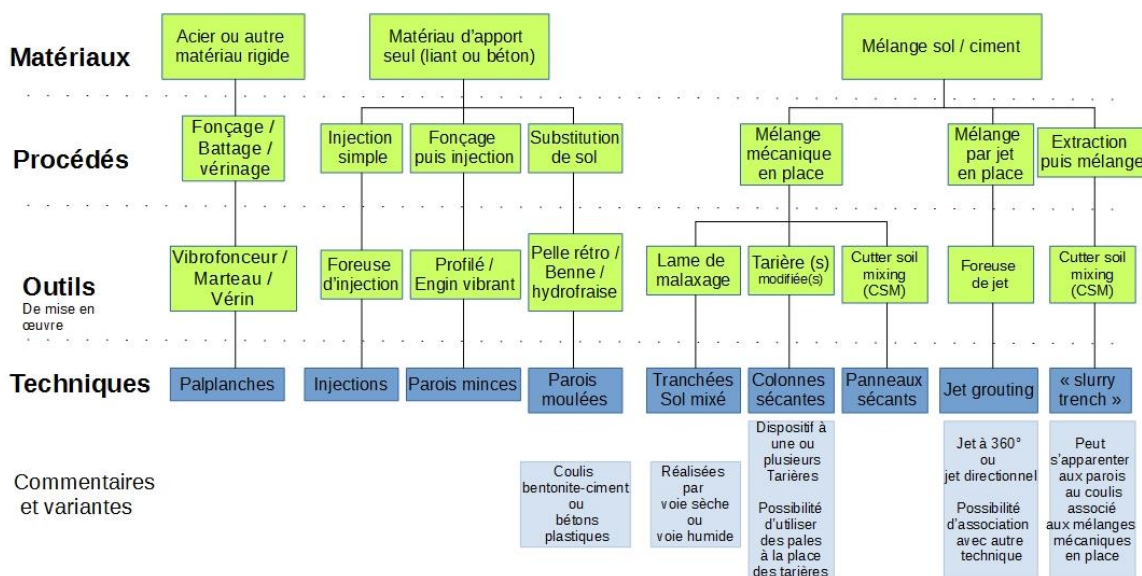


Figure 3.5 : Synthèse des techniques de réalisation d'écrans d'étanchéité interne

Les solutions mettant en œuvre un écran d'étanchéité interne sont souvent envisagées en cas de manque d'emprise pour mettre en place une solution de type drainage par recharge du côté zone protégée. Le choix entre les cinq techniques précitées sera donc en général retenu en fonction des critères supplémentaires suivants :

- possibilité d'obtenir les performances attendues en tenant compte du contexte et en particulier :
- la nature des matériaux (dont granulométrie, présence de blocs),
- la profondeur à atteindre,
- l'épaisseur éventuelle,
- les emprises disponibles et encombrement du matériel (sur et hors digue),
- la production de déblais et lieux de stockage,
- la vitesse d'exécution requise (rendement),
- le prix,
- les possibilités de s'assurer de la conformité ;
- la gestion des risques, dont :
- la survenance d'une crue lors du chantier,
- l'adaptabilité de la technique en cas d'imprévu ;
- l'impact environnemental.

Du fait de son unique fonction, le choix de la technique de réalisation d'un écran d'étanchéité interne reposera essentiellement sur les aspects suivants liés au contexte et à la mise en œuvre (

Tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Critères de choix de la technique de renforcement

Choix de la technique de renforcement	Rideau de palplanches	Jet grouting	Parois minces	Parois moulées	Sol mixé
Adaptation des matériaux d'apports à la géométrie de l'ouvrage	+	≈	-	++	+
Présence de conduites et/ou d'ouvrages traversants		++			+
Déstructuration du sol adjacent	+	+	+	+	+
Emprise nécessaire	-	-	-	-	-
Coût d'investissement	+		+	≈	++
Rapidité de mise en œuvre	+		+	+	++
Profondeur à atteindre	≈	++	+	++	≈

Ø : Critère non pertinent pour la technique

≈ : Dépendant des situations

- : Non adapté

+

++ : Bien adapté

3.2.4 Principes de dimensionnement de l'écran d'étanchéité

Le dimensionnement d'un écran d'étanchéité interne ou externe doit vérifier les éléments suivants :

- au niveau hydraulique, les gains attendus vis-à-vis de la fonction d'étanchéité à assurer se traduiront par une maîtrise des écoulements internes à l'ouvrage tels que définis par le projet. Ce dimensionnement hydraulique interne a pour objectif de fournir le gradient hydraulique dans l'ouvrage. En partant de modèles regroupant les propriétés intrinsèques de l'ouvrage et de son sol de fondation, des matériaux le constituant (porosité, perméabilité horizontale et verticale, degré de saturation, courbes de succion, courbe de perméabilité relative, modules de compressibilité et coefficient d'emménagement) et des conditions hydrauliques aux limites (nappes amont et aval, sources, puits, zones imperméables...), un calcul en régime permanent ou transitoire est mené⁹. Selon les enjeux et besoins le calcul est mené avec, des méthodologies spécifiques allant de simples formules à des modélisations aux éléments finis couplant les comportements hydrauliques et mécaniques de la digue. Il est d'ailleurs envisageable d'aller jusqu'à des modélisations 3D afin de prendre en compte des linéaires de digue complexes ;
- les risques potentiels d'érosion interne notamment aux frontières du rideau ;
- la stabilité globale après travaux.

3.3 Réalisation d'un écran d'étanchéité

3.3.1 Études et essais préalables

Les études et essais préalables aborderont notamment, au-delà des prescriptions générales données dans le chapitre 2, les éléments suivants pour les écrans d'étanchéité :

⁹ On pourra se reporter au 4.2.2 du présent document pour des considérations sur cette modélisation dans le cas des digues de protection contre les inondations

43

02/06/2021

- études préalables :
- essais de convenance des matériaux employés (en particulier pour les coulis ou les mélanges),
- gestion des risques (perte de coulis, instabilité de la digue, crue/décru, matériaux non prévus dont présence de blocs...),
- traitement des points singuliers : réseaux enterrés (chapitre 8) en lien avec les concessionnaires concernés (s'il y a), obstacles aériens (vérification par rapport au tirant d'air des engins de chantier)...
- constats sur les avoisinants en fonction des nuisances générées ;
- études complémentaires au besoin : géophysique/géotechnique, topographie, recherche amiante dans les chaussées...
- réalisation de plots d'essais, d'une part pour valider la méthode d'exécution, d'autre part pour vérifier les performances hydrauliques et mécaniques atteintes (cf. détails, selon les procédés, dans chacune des fiches techniques).

Les essais et études préalables peuvent permettre de préciser les performances visées, mais également la vitesse d'avancement, le respect des procédures d'exécution (vérifier si elles sont adaptées et les modifier en conséquence).

3.3.2 Réalisation

La réalisation d'un écran d'étanchéité, au-delà des prescriptions générales données dans le chapitre 2, comprend :

- la mise en place de contrôles d'exécution incluant :
- la géométrie et la continuité de l'écran,
- en cas d'ancrage dans une couche de sol spécifique, la validation de celui-ci (contrôle de la profondeur atteinte, enregistrement des paramètres de forage...),
- le suivi de la consommation de coulis ou de ciment et d'eau...
- des essais réguliers sur les matériaux (notamment résistance et perméabilité sur éprouvettes, échéances d'essais à convenir pour estimer le nombre d'éprouvettes),
- un suivi piézométrique en cours de travaux des nappes d'eau souterraines traversées dont la nappe phréatique,
- un enregistrement des paramètres machine (profondeurs atteintes, vitesse d'avancement, points durs...) ;
- l'établissement de rapports précisant :
 - l'avancement,
 - les contrôles effectués ;
 - des essais de réception :
 - critère piézométrique,
 - essais de pompages,
 - débits de fuites,
- ...

3.3.3 Nuisances/environnement

Voir points généraux dans l'introduction générale et points spécifiques dans les fiches techniques

3.3.4 Contraintes liées à une crue ou à des travaux avoisinants au chantier

Les crues sont à prendre en compte au stade de la gestion des risques. La conduite à tenir est commune à la plupart des techniques de réparation. Notons néanmoins que les techniques de réalisation d'écran

interne sont a priori beaucoup moins affectées par une crue en cours de chantier que celles de mise en place d'une étanchéité amont.

3.4 Suivre un écran d'étanchéité

3.4.1 Récolement

Après l'exécution des travaux, un dossier de récolement complet doit être fourni avec l'ensemble des contrôles effectués, le repérage exhaustif de l'écran, les difficultés rencontrées et les modifications dans l'exécution de celui-ci.

Une attention particulière sera également donnée au récolement des traitements d'étanchéité au niveau des ouvrages de transition (chapitre 8).

3.4.2 Suivi à long terme

Au-delà des prescriptions générales de suivi communes à tous les types de réparations, un accent particulier sera mis sur les éléments suivants :

- prévoir un ou des suivis piézométriques si nécessaire (selon le contexte et en fonction des sollicitations hydrauliques) ;
- pour les écrans d'étanchéité interne :
- effectuer des essais sur les matériaux prélevés :
- à l'état frais pour les coulis et les mélanges,
- après réalisation (les techniques de prélèvement doivent permettre de récupérer des échantillons intacts et ne pas porter atteinte à la fonctionnalité de l'écran),
- planifier les essais et mes contrôles à long terme (sur plusieurs années),
- envisager, si nécessaire, des suivis non destructifs à grande échelle ou ponctuels.

4 Filtration et drainage

Ce chapitre 4 est basé sur le travail du sous-groupe n°3 « Filtration-Drainage », en association avec les animateurs du GT. Ce sous-groupe est également à l'origine de la rédaction de quatre fiches techniques, listées ci-dessous et qui sont disponibles dans la partie 2 (PDF) du présent document :

- FT 4.1. Dimensionnement d'un géotextile de filtration
- FT 4.2. Dimensionnement d'un sol de filtration
- FT 4.3. Ouvrage de drainage en talus sous recharge peu perméable
- FT 4.4. Ouvrage de drainage sans recharge

Les membres du sous-groupe étaient :

Olivier ARTIÈRES, <i>TenCate Geosynthetics</i>	
Yasmina BOUSSAFIR, <i>Université Gustave Eiffel</i>	
Christophe CHEVALIER, Université Gustave Eiffel	Animateur
Guillaume HIBON, <i>Antea group</i>	
Alain LE KOUBY, <i>Université Gustave Eiffel</i>	
Pierre-Yves MASSY, <i>BRLi</i>	
Jacques POUDEVIGNE, <i>FUGRO Géotechnique</i>	
Pierre-Louis REGAZZONI, <i>Egis</i>	
Fabien SZYMKIEWICZ, <i>Université Gustave Eiffel</i>	
Alexandre VALENZIANO, <i>Antea group</i>	

Avant de procéder à la lecture de ce chapitre 4 « Filtration et drainage » et des fiches techniques qui en découlent, le lecteur est invité à consulter le chapitre 2 « Éléments communs à la démarche de conception d'un confortement ou d'une réparation ». Ce dernier présente en effet des éléments importants et nécessaires à la lecture du présent chapitre, qui portent notamment sur le diagnostic (objectifs, contenu, mécanisme de rupture/défaillance des digues), la conception (données nécessaires, modélisations), la réalisation chantier ou encore sur le cas des situations d'urgence. Les situations d'urgence sont abordées dans l'annexe D (section D.1).

4.1 Prévenir les phénomènes d'érosion interne, maîtriser les écoulements dans la digue et sa fondation

Filtration et drainage sont des fonctions différentes qui répondent à des problématiques et mécanismes de dégradation et de rupture différents :

- un **filtre** a pour objectif de **bloquer l'initiation et/ou la continuation des mécanismes d'érosion interne** à l'interface entre deux volumes de sol de caractéristiques granulométriques différentes. Les sols naturels sont des milieux poreux qui présentent une porosité généralement comprise entre 15 et 50 %, formés par les interstices entre les particules de sol. Lorsque le sol est saturé, l'eau qu'il contient remplit ces pores. L'eau se déplace sous l'effet des gradients de charge hydraulique (terme sommant l'effet de la pression du fluide, de l'altitude du fluide et son énergie cinétique). Ces gradients peuvent générer des écoulements suffisants pour provoquer des phénomènes d'érosion interne : arrachement et/ou transport de particules ;

- un **drain** a pour fonction de participer à la **maîtrise des écoulements au sein de l'ouvrage et/ou de sa fondation** en facilitant le transit des eaux d'infiltration vers l'aval sans dommages. Le drainage est donc un complément ou une alternative à l'étanchéité, celle-ci ayant pour but de ralentir la pénétration ou les écoulements des eaux dans ou à travers l'ouvrage. Cette maîtrise des écoulements au sein de l'ouvrage est nécessaire à la conception d'ensemble d'un ouvrage stable et résistant à l'ensemble des mécanismes de dégradation et de rupture (voir [section 2.1.2](#)).

Néanmoins, les deux types de confortement sont présentés au sein du même chapitre parce que :

- ils sont complémentaires :
 - il est souvent nécessaire d'associer un filtre à la mise en place d'un drain, le drain ayant souvent des caractéristiques granulométriques non compatibles avec celles du massif voisin (possibilité de migration des particules fines du sol du massif vers les pores du drain),
 - il est parfois ou souvent nécessaire de drainer un ouvrage lors de la mise en place d'un filtre ou de profiter de la mise en place d'un filtre pour drainer le talus aval de l'ouvrage,
 - un filtre, granulaire ou géotextile, n'est jamais exposé au milieu extérieur. Il est toujours recouvert par un matériau : soit le sol à filtrer en amont de l'écoulement, soit une recharge granulaire en aval de l'écoulement, en général perméable voire drainante, qui le stabilise et le protège ;
- même si leurs caractéristiques sont différentes, les mêmes types de matériaux sont utilisés pour filtre et drain : matériau sol à granulométrie bien définie ou géosynthétiques, et les épaisseurs et volumes concernés sont la plupart des temps faibles par rapport au volume global de l'ouvrage ;
- traditionnellement, les systèmes de drain/filtre étaient toujours associés (voir Figure 4.1 ci-dessous) [4-1].

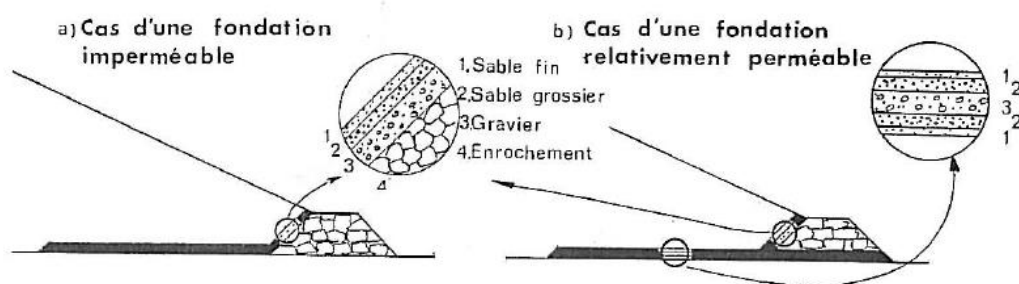


Figure 4.1 : Drain tapis filtrant (issu de [4-1])

Sur le sujet de la différence et de la complémentarité des organes et fonctions de filtre et de drain, il faut également préciser que :

- il est possible de concevoir, en particulier pour les ouvrages ayant des besoins limités en capacité de drainage), un organe unique "filtre-drain" composé d'un matériau ayant les caractéristiques granulométriques appropriées ou d'un géocomposite ;
- il est nécessaire que les règles de filtre soient vérifiées à chaque interface entre des couches de matériaux différents (et pas seulement en aval du massif étanche et/ou en amont du drain)

et ce dès lors que des lignes d'écoulement traversent ces couches. On peut donc être amené à réaliser des filtres indépendamment de drains, par exemple à l'interface fondation/corps de digue (pour éviter de l'érosion de contact) ou en amont de l'étanchéité, ou encore sous une couche de protection contre l'érosion externe. Pour les questions plus spécifiques à l'érosion interne (reconnaissance, détection et essais en particulier), le lecteur pourra se reporter aux travaux menés dans le cadre des projets ANR et PN ERINOH (érosion interne dans les ouvrages hydrauliques) faisant notamment l'objet de deux guides [4-2 ; 4-3].

La Figure 4.2 et la Figure 4.3 ci-dessous présentent un projet de confortement de digue associant filtration et drainage sur toute la hauteur de digue et sur une partie supérieure de la fondation.

Le présent chapitre apporte un éclairage sur les organes de filtration et de drainage qui peuvent être mis en place à différents endroits de la digue selon la nature des défaillances auxquelles il est souhaité de remédier. Ces éléments de filtration et de drainage constituent le cœur des types de confortement décrits dans ce chapitre mais sont également souvent associées (dans un projet plus global) à différentes autres méthodes de confortement et de réparation qui seront décrites dans les autres chapitres.

En termes de filtration, on s'intéresse principalement au dimensionnement :

- des géotextiles de filtration ;
- des filtres granulaires ;

En termes de drainage, on peut notamment distinguer :

- les recharges drainantes ;
- les organes de drainage sous recharge peu perméable ;
- les organes de drainage réalisés par décaissement sans recharge (tranchée, éperons...).



Figure 4.2 : Projet de renforcement de la digue du Rhône entre Beaucaire et Fourques. On distingue bien les différents composants : corps de digue en remblai puis filtre géotextile puis drain en grave puis nouveau géotextile de filtration avant la mise en place du remblai de protection (Crédit Photo : Symadrem)

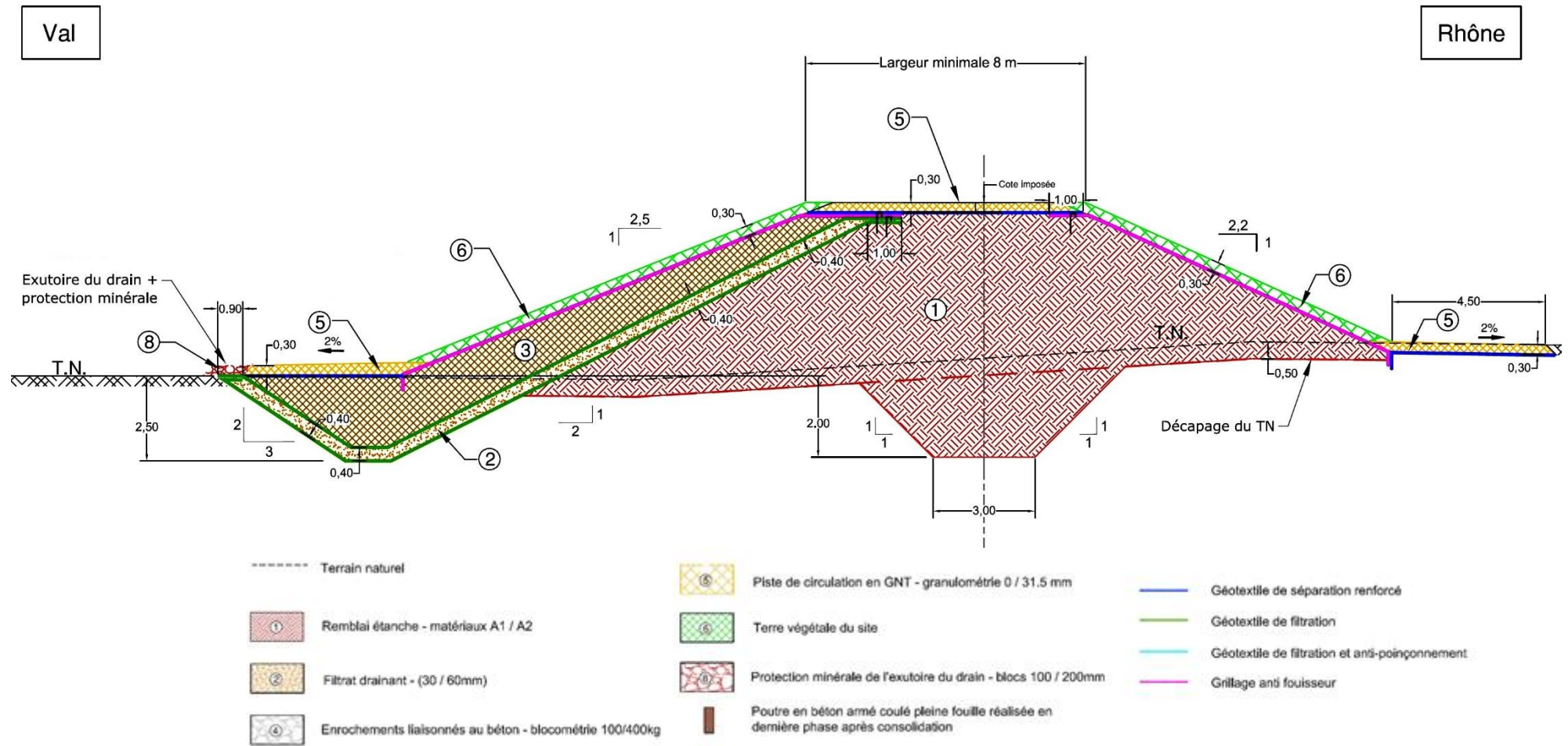


Figure 4.3 : Projet de renforcement de la digue du Rhône entre Beaucaire et Fourques (Source : Symadrem)

4.1.1 Fonctions principales, secondaires et/ou induites

4.1.1.1 Filtration

Les techniques de filtration d'un sol ont pour fonction principale de stabiliser les interfaces du sol considéré. Elles évitent que les particules du sol à filtrer soient déplacées par les écoulements (contrôle de l'érosion interne), tout en laissant la libre circulation de l'eau.

Par rapport aux quatre mécanismes d'érosion interne désormais connus [4-4 ; 4-5 ; 4-6] et dont la caractérisation expérimentale était un des objets des projets ANR et PN ERINOH [4-2], un filtre va pouvoir :

- empêcher la migration, vers l'aval de l'écoulement, des particules d'un massif de sol soumis à de la suffusion (sans effet direct sur cette suffusion au sein du massif amont) comme montré par la Figure 4.4,
- empêcher la migration des particules d'un massif de sol vers un autre par le mécanisme d'érosion de contact (bloque directement ce mécanisme), comme montré par la Figure 4.5,
- empêcher la migration, vers l'aval de l'écoulement, des particules d'un massif de sol potentiellement soumis à de l'érosion interne régressive (bloque directement ce mécanisme) comme montré par la Figure 4.6,
- empêcher la migration, vers l'aval de l'écoulement, des particules d'un massif de sol soumis à de l'érosion de conduit (sans effet direct sur cette érosion de conduit au sein du massif amont) comme montré par la Figure 4.7.

Il est à noter que les notions d'amont et aval peuvent être variables au cours du temps. Le sens des écoulements peut s'inverser dans l'ouvrage comme dans la fondation, surtout s'agissant de digues occasionnellement mises en charge et de leurs fondations alluviales.

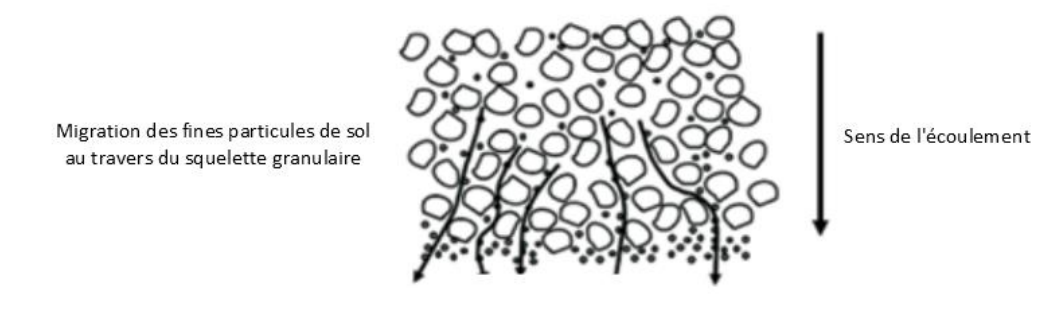


Figure 4.4 : Principe de la suffusion [4-6]

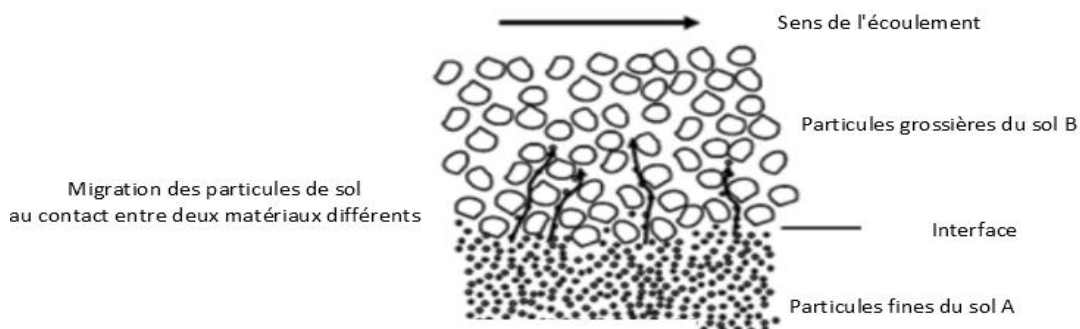


Figure 4.5 : Principe de l'érosion de contact [4-6]

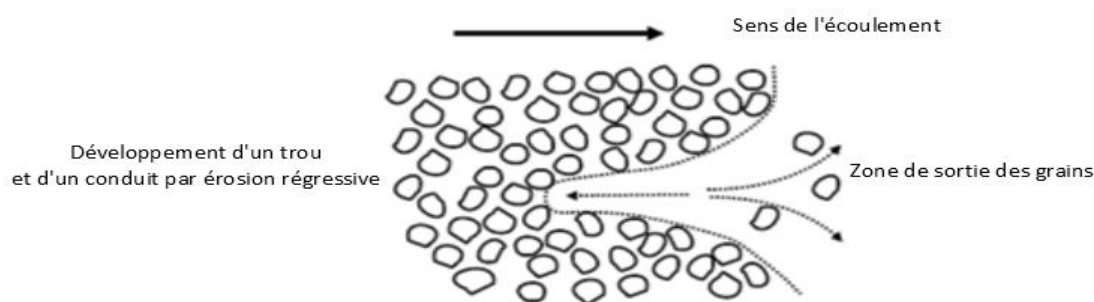


Figure 4.6 : Principe de l'érosion régressive [4-6]

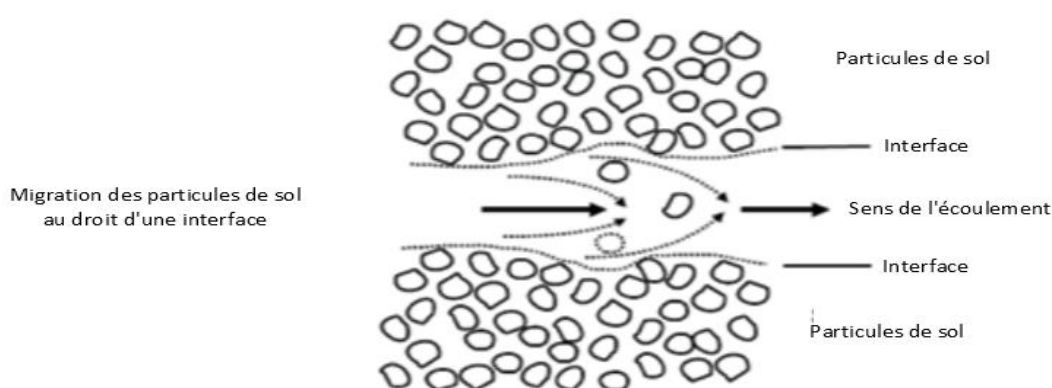


Figure 4.7 : Principe de l'érosion de conduit [4-6]

Lorsqu'un ouvrage est constitué de différents types de sols (par exemple un corps de remblai, un système de drainage et une recharge en enrochement), les granulométries au niveau des interfaces entre ces trois matériaux doivent respecter les conditions de filtre (par exemple les règles de Terzaghi [4-7] – voir FT 4.2 dimensionnement d'un sol de filtration) afin d'éviter l'entraînement de particules fines entre deux couches de matériaux en contact dans l'ouvrage. Selon le non-respect (réciproquement le respect) de ces règles, un filtre sera nécessaire (réciproquement non-nécessaire).

Précisons aussi que certains sols ont une granulométrie uniforme, ce qui s'apprécie au travers du coefficient d'uniformité ($C_u < 6$). De tels sols résistent généralement d'eux-mêmes à l'entraînement des grains par suffusion et sont dits auto-filtrants.

En résumé, la fonction filtration peut donc être assurée :

- soit par les matériaux eux-mêmes, s'ils présentent une capacité d'autofiltration ;
- soit par un filtre granulaire correctement dimensionné ;
- soit par un filtre géotextile correctement dimensionné ;
- soit par des combinaisons de ces différentes techniques.

4.1.1.2 Drainage

Le drainage est destiné à intercepter puis à évacuer les eaux d'un ouvrage afin de contrôler les écoulements dans cet ouvrage et/ou sa fondation, en abaissant la ligne de saturation et les pressions interstitielles en zone saturée. La présence d'un système de drainage fonctionnel et bien conçu permet indirectement d'améliorer la stabilité de l'ouvrage. La Figure 4.8 et la Figure 4.9 présentent différents exemples d'ouvrages de drainage internes et en pied d'ouvrage.

Le lecteur notera cependant que ces conceptions, issues de la littérature sur les petits barrages en terre, peuvent ne pas être adaptées directement aux digues de protection "sèches", pour lesquelles des défauts peuvent apparaître seulement lors de la mise en charge de la digue. De la même manière le lecteur se rappellera que les règles de l'art sur les barrages en terre ont évolué depuis la publication du document dont sont issus ces figures et qu'on recommande désormais que les drains (comme les noyaux étanches) soient élevés au moins au niveau des plus hautes eaux. Enfin, il n'y avait jusqu'à une date récente (entre autres avec les travaux de l'ILH) pas de document général de règles de l'art sur les digues en remblai et on se réfère naturellement aux ouvrages sur les barrages en terre.

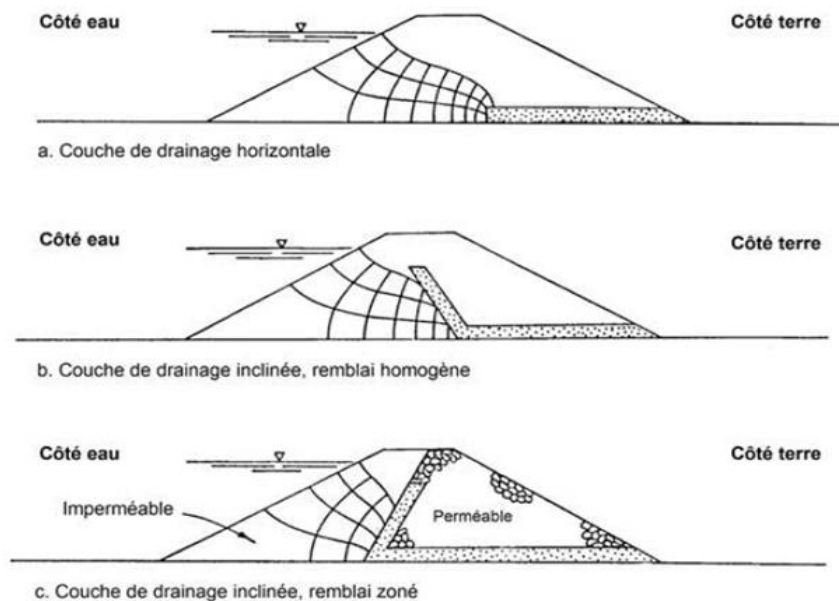


Figure 4.8 : Différents exemples de types de drain à l'intérieur d'un ouvrage hydraulique en remblai [4-4]

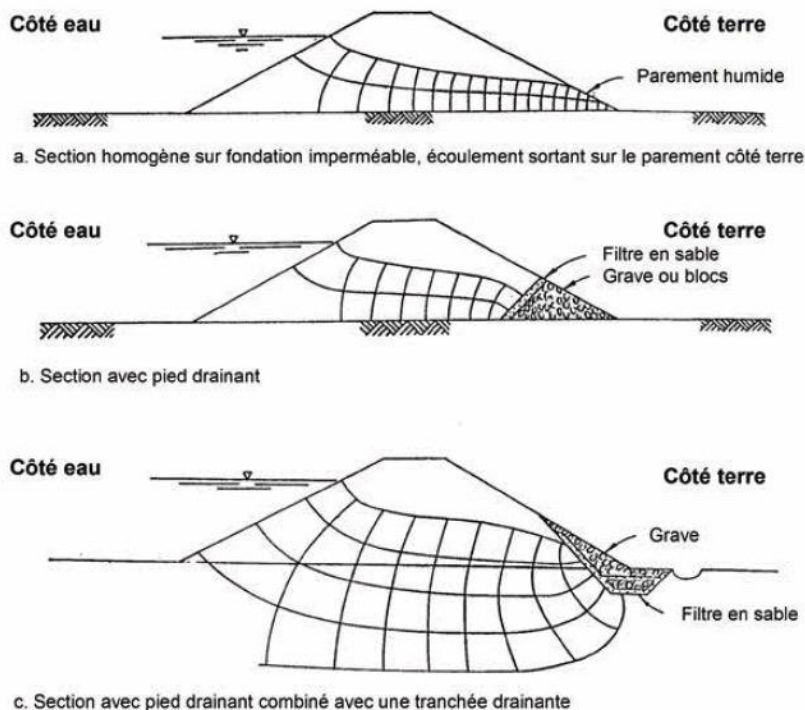


Figure 4.9 : Différents exemples de lignes d'écoulement, en fonction de l'existence d'un drain de pied et de son type pour un ouvrage hydraulique en remblai [4-4]

4.1.2 Problématiques techniques traitées

Sur une digue, un filtre permet de prévenir l'occurrence ou le développement des phénomènes d'érosion interne, tandis qu'un ouvrage de drainage permet de récupérer et d'évacuer les eaux d'infiltration, limitant alors la saturation et la mise en charge de certaines parties du remblai.

Le Tableau 4.1 présente des exemples de pathologies dont la réponse à apporter peut être un renforcement ou une réparation de la filtration ou du drainage. Rappelons que la mise en œuvre d'une solution ou d'une autre doit nécessairement s'accompagner de la vérification à nouveau de la stabilité globale de la digue une fois que les techniques de confortement ou de réparation envisagées ont été définies et dimensionnées.

Tableau 4.1 : Usage des ouvrages de filtration et de drainage

Problématique	Filtration	Drainage
Fuites d'eau détectée sur le talus aval	≈ Si l'écoulement n'est pas en évolution à la hausse ni chargé en fines, auquel cas il pourrait être le témoin d'une érosion interne en cours (une filtration est alors souhaitable)	+
Niveau d'eau détecté dans l'ouvrage (piézométrie)	∅ /- En cas de suffusion ou d'érosion de conduit en amont du filtre, il va jouer son rôle pour limiter l'érosion interne, mais s'il se colmate de manière trop importante ou étendue, il y a un risque d'élévation de la piézométrie ou de déplacement de l'écoulement vers une zone non filtrée	++ Agit directement sur la piézométrie en évacuant l'eau vers l'aval
Érosion interne	++ Pour les mécanismes d'érosion régressive et de contact + Pour les mécanismes d'érosion de conduit et de suffusion (risque de colmatage)	∅
Instabilité au glissement	∅ /- La filtration n'a pas d'effet direct sur la stabilité. Par contre, un éventuel colmatage du filtre peut causer une élévation de la piézométrie, alors préjudiciable à la stabilité.	++ Agit directement sur la stabilité du fait de l'abaissement de la piézométrie

∅ : usage non pertinent pour la problématique

≈ : Dépendant des situations

- : Non adapté

+ : Moyennement adapté

++ : Bien adapté

4.1.3 Variantes

Deux types de matériaux sont susceptibles d'être utilisés pour remplir les fonctions de filtration et/ou de drainage :

- les géosynthétiques :
 - les géosynthétiques de filtration pour la seule fonction de filtration,
 - les géosynthétiques de drainage pour la seule fonction de drainage,
 - les géocomposites intégrant les deux fonctions de filtration et de drainage ;
- les matériaux granulaires (sols naturels ou reconstitués).

Il est bien sûr envisageable de combiner les deux types de matériaux, comme par exemple un filtre géotextile et un drain granulaire, ce qui est souvent le cas.

4.1.3.1 Filtre

Un filtre granulaire peut être constitué d'une seule couche mais il n'est parfois pas possible ou aisé de trouver un matériau convenable en fonction des courbes granulométriques des deux massifs de sols à isoler ; dans ce cas il faudra concevoir un filtre composé de deux ou plusieurs couches.

Comme variante à la mise place d'un filtre proprement dit, il est possible de concevoir les différentes couches de matériaux comme "compatibles" entre elles par rapport aux problématiques d'érosion interne (c'est-à-dire respectant les règles de filtre). Le choix d'un matériau pour l'aval de l'ouvrage remplissant cette condition de filtration peut également être fait de manière à assurer la stabilité au glissement.

4.1.3.2 Drain

Drainage du corps de digue

Un ouvrage de drainage du corps de digue mis en œuvre sur un ouvrage existant est en général prévu sur le talus aval, avec trois techniques fréquemment utilisées : la recharge drainante (massif drainant sur tout le talus, voir figures Figure 4.10 et Figure 4.11), la recharge drainée (Figure 4.12 et Figure 4.13) ou le drainage de pied de talus avec deux variantes suivant la perméabilité du remblai mis en place (Figure 4.14 et Figure 4.15). Dans les deux cas, l'ouvrage permet de collecter l'eau présente dans l'ouvrage pour l'acheminer de manière contrôlée vers l'exutoire. Les drains et filtres sont rarement mis en œuvre au sein même d'un massif existant, mais au contraire en appui sur le talus côté zone protégée, éventuellement reprofilé au préalable.



Figure 4.10 : Recharge drainante et filtre (schéma : R. Tourment)



Figure 4.11 : Photographies illustrant la technique de recharge drainante (Crédit Photo : Symadrem)

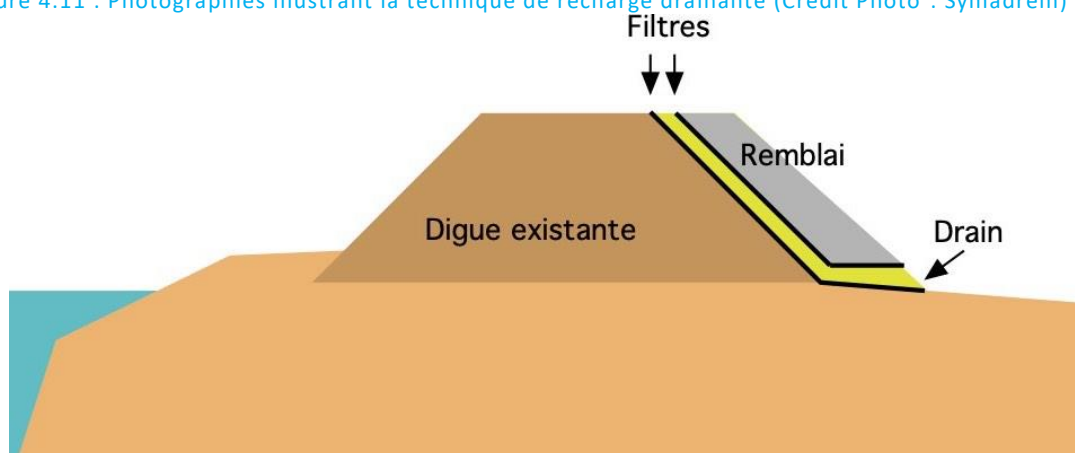


Figure 4.12 : Recharge drainée et filtre (schéma : R. Tourment)



Figure 4.13 : Photographie d'un chantier de recharge drainée (Crédit Photo : Symadrem)

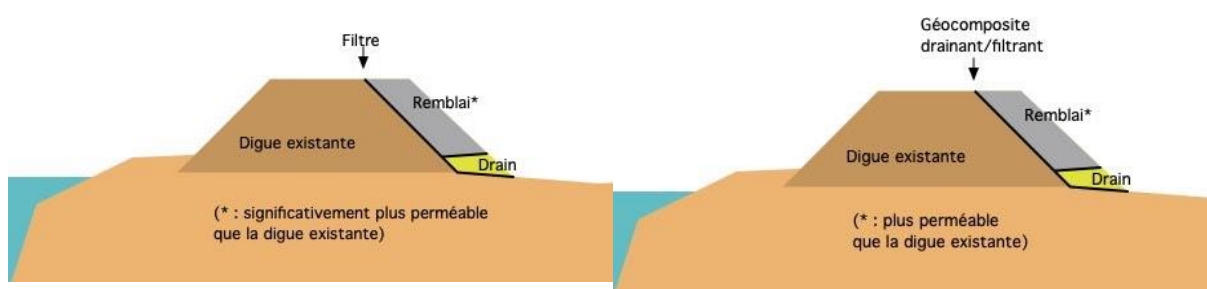


Figure 4.14 : Drain de pied et filtres (schémas : R. Tourment)



Figure 4.15 : Photographies d'un chantier de drainage en pied par utilisation d'un géo-drainant/filtrant (Crédit Photo : Symadrem)

Drainage de la fondation

Il peut être également nécessaire de drainer la fondation. Dans ce cas les techniques les plus couramment utilisées sont les tranchées drainantes et les massifs en pied aval de digue pénétrant dans la fondation, illustrés dans les Figures 4.16 à 4.18.

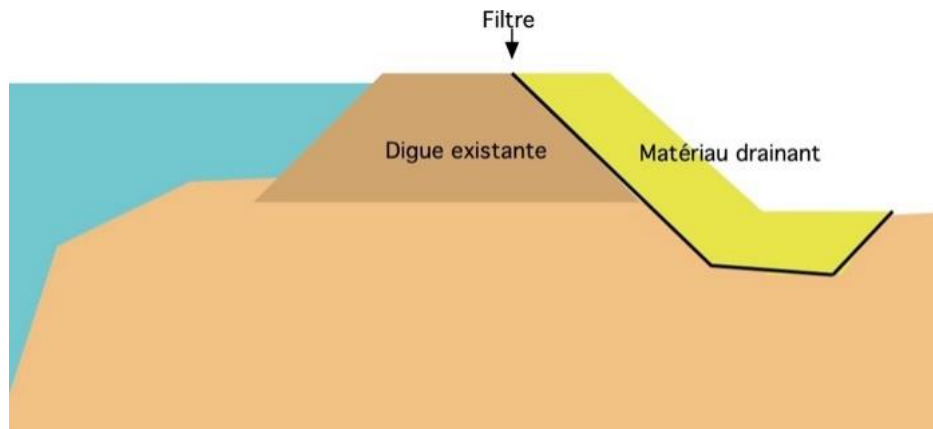


Figure 4.16 : Recharge drainante du remblai et massif drainant en fondation (Schéma R.Tourment)

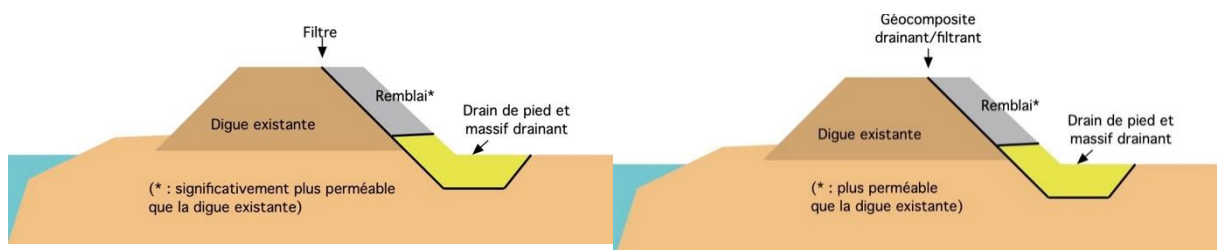


Figure 4.17 : Drain de pied du remblai et massif drainant en fondation (Schéma R.Tourment)

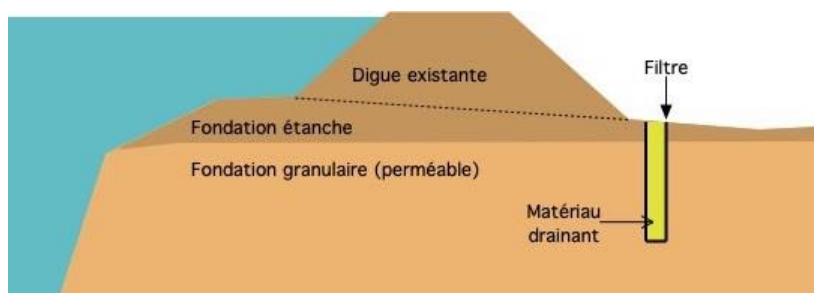


Figure 4.18 : Tranchée drainante (Schéma : Rémy Tourment)

4.1.4 Techniques alternatives

4.1.4.1 Renforcement de l'étanchéité

Afin de traiter des problématiques liées à la maîtrise des écoulements par des drains, en cas de circulations d'eau trop importantes, il est également envisageable de renforcer plutôt l'étanchéité (voir [chapitre 3](#)). En limitant les circulations d'eau par des ouvrages verticaux, des parements ou des remblais côté eau, de faible perméabilité, et donc en bloquant le vecteur de mobilité des particules dans le remblai (dû au gradient hydraulique et à la vitesse de l'eau), on espère ainsi fortement ralentir le développement du désordre. Il peut également être recommandé de mettre en aval de l'étanchéité une structure de drainage et de collecte des eaux infiltrées pour maîtriser les écoulements et vérifier/compléter l'efficacité du complexe d'étanchéité. Dans tous les cas, il convient de concevoir l'ensemble de l'ouvrage de manière à ce que les écoulements internes ne lui soient pas préjudiciables (voir [chapitre 2](#) et en particulier [2.2.2](#)). Selon le point de vue l'étanchéité peut donc être considérée comme une technique alternative ou complémentaire.

4.1.4.2 Utilisation de sols traités à la chaux

Une alternative à l'utilisation de filtre granulaire pourrait consister à mettre en place des sols traités à la chaux et/ou à des liants hydrauliques lors de la construction de la digue. Plusieurs programmes de recherche en cours tendent à montrer que ces sols traités seraient en effet nettement moins sensibles à l'érosion interne [4-6].

4.1.5 Éléments additionnels

Comme indiqué au 2.2.3, la réalisation des travaux peut être une bonne occasion pour mettre en place un dispositif d'auscultation. Celui-ci pourra aider à détecter les évolutions de l'ouvrage et entre autres l'efficacité des dispositifs de filtration et/ou de drainage.

Il faut également penser aux transitions entre le tronçon renforcé et les tronçons voisins existants, en évitant de ne travailler que sur des sections en travers type, et au voisinage de ces transitions essayer de raisonner et de modéliser en trois dimensions [4-9 ; 4-10 ; 4-11 ; 4-12].

4.1.6 Défaillances potentielles induites

Une attention particulière doit être portée au dimensionnement (tenue mécanique et maîtrise des écoulements), au choix des matériaux (par exemple leur compatibilité chimique) et à leur condition de mise en œuvre. En particulier, le projeteur devra prendre en compte le vieillissement des matériaux géosynthétiques en lien notamment avec les éventuelles agressions chimiques et, d'autre part, le risque de développement de sous-pressions associées au colmatage des drains et/ou filtres. Le phénomène de colmatage n'est d'ailleurs pas limité aux géosynthétiques, les matériaux granulaires peuvent également, dans une moindre mesure, y être sensibles, ainsi que les canalisations drainantes. Les 50 années de retour d'expérience sur l'emploi des géosynthétiques dans les ouvrages de drainage

et de filtration, notamment sur des digues et des barrages, ont permis l'élaboration de méthodes de dimensionnement sûres et éprouvées ainsi que la mise au point de procédures de mise en œuvre détaillées pour limiter ces risques éventuels (voir les travaux et recommandations du Comité Français des Géosynthétiques – CFG). D'autres informations pourront en outre être nécessaires dans le cas de techniques spécifiques ; elles sont alors détaillées dans les fiches techniques correspondantes.

4.2 Conception des éléments de filtration et de drainage

4.2.1 Recueillir des informations préalables spécifiques à ce type de confortement

Voir points généraux dans le [chapitre 2](#) et points spécifiques dans les fiches techniques.

Concernant l'érosion interne, les projets ANR et PN ERINOH ont permis une avancée significative des connaissances sur les méthodes de détection de l'érosion interne. Le guide "Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai" [4-3 ; 4-13] propose en particulier une méthodologie d'aide au diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai, s'appuyant sur les méthodes de reconnaissance et de surveillance. Il s'intéresse prioritairement à l'étude des ouvrages hydrauliques à long linéaire, en service, c'est-à-dire déjà construits et en exploitation, et a comme cadre une démarche de diagnostic.

4.2.2 Calcul et modélisation des écoulements dans les digues de protection

Le calcul et/ou la modélisation des écoulements internes au sein d'une digue permet d'évaluer les gradients hydrauliques en jeu ainsi que les débits dans l'ouvrage. Les données issues de ces calculs/modélisations sont utiles au diagnostic de l'ouvrage ; le cas échéant, ils permettent de concevoir et de dimensionner l'organe de drainage à réaliser... Selon les enjeux et besoins le calcul est mené avec des méthodologies spécifiques, allant de simples formules à des modélisations aux éléments finis couplant les comportements hydrauliques et mécaniques de la digue. Il est d'ailleurs envisageable d'aller jusqu'à des modélisations 3D afin de prendre en compte des linéaires de digue complexes.

Ces modèles de calcul regroupent les propriétés intrinsèques des matériaux constituant l'ouvrage et son sol de fondation (porosité, perméabilité horizontale et verticale, degré de saturation, courbes de succion, courbe de perméabilité relative, modules de compressibilité et coefficient d'emménagement...) et des conditions hydrauliques aux limites (nappes amont et aval, sources, puits, zones imperméables...).

Dans la plupart des cas, plusieurs réalités complexifient la modélisation des régimes d'écoulement (permanent ou transitoire) :

1. une méconnaissance fine des perméabilités des matériaux qui constituent l'ouvrage, avec :
 - le problème de la mesure in situ des perméabilités et de la représentativité de ces mesures sur le linéaire de l'ouvrage (notamment dans le cas de digues historiques),
 - la prise en compte d'une anisotropie de perméabilité, i.e. du contraste entre la perméabilité horizontale K_h et verticale K_v . Un rapport K_h/K_v de 10 est souvent mesuré/considéré, mais il arrive qu'il puisse dépasser 100 ou 1000 (comme par exemple dans le cas d'une digue dont les couches successives sont composées de matériaux différents ou compactés différemment) ;

2. la prise en compte des aspects « non-saturés » pour les digues sèches avec :
 - la simulation nécessaire de régimes transitoires pour des ouvrages avec des délais de mise en charge trop courts lors de crues pour établir un régime permanent,
 - la caractérisation des paramètres de sols non saturés (courbe de rétention d'eau, loi de comportement hydraulique, etc.), avec des essais non normalisés et peu courants,
 - l'inadéquation potentielle de l'hydrogramme de crue intégré dans le modèle par rapport à la réalité de chaque évènement ou série d'évènements.

Le lecteur intéressé pourra se tourner vers les recommandations actuelles [4-14], qui rappellent ces difficultés et proposent des éléments de solution, résumés ci-après :

- l'hypothèse du régime permanent est souvent retenue en première approche car elle a le mérite de la simplicité. Elle conduit cependant à considérer le cas le plus défavorable et est en contrepartie très conservatrice/sécuritaire car cette situation sera rarement rencontrée au cours de la vie de l'ouvrage ;
- la prise en compte d'un régime transitoire est plus réaliste mais plus compliquée à modéliser, notamment pour l'implémentation des paramètres et le couplage des simulations hydrauliques et mécaniques. Les outils actuels ne permettent pas non plus de prendre en compte de manière satisfaisante, l'état initial de l'ouvrage, et/ou la présence de discontinuités de type fissures, fentes de dessiccation, terriers, etc.

Le comportement de l'ouvrage se situera probablement entre les deux types de modélisations évoquées ci-dessus. La conception pourra éventuellement être basée sur une optimisation entre les solutions modélisées et proposées par les ingénieurs et les choix du maître d'ouvrage.

La Figure 4.19 illustre les différences que l'on obtient lorsqu'on visualise les lignes d'eau pour des calculs en milieu saturé (à gauche) et non saturé (à droite), avec différentes perméabilités initiales dans un milieu totalement isotrope.

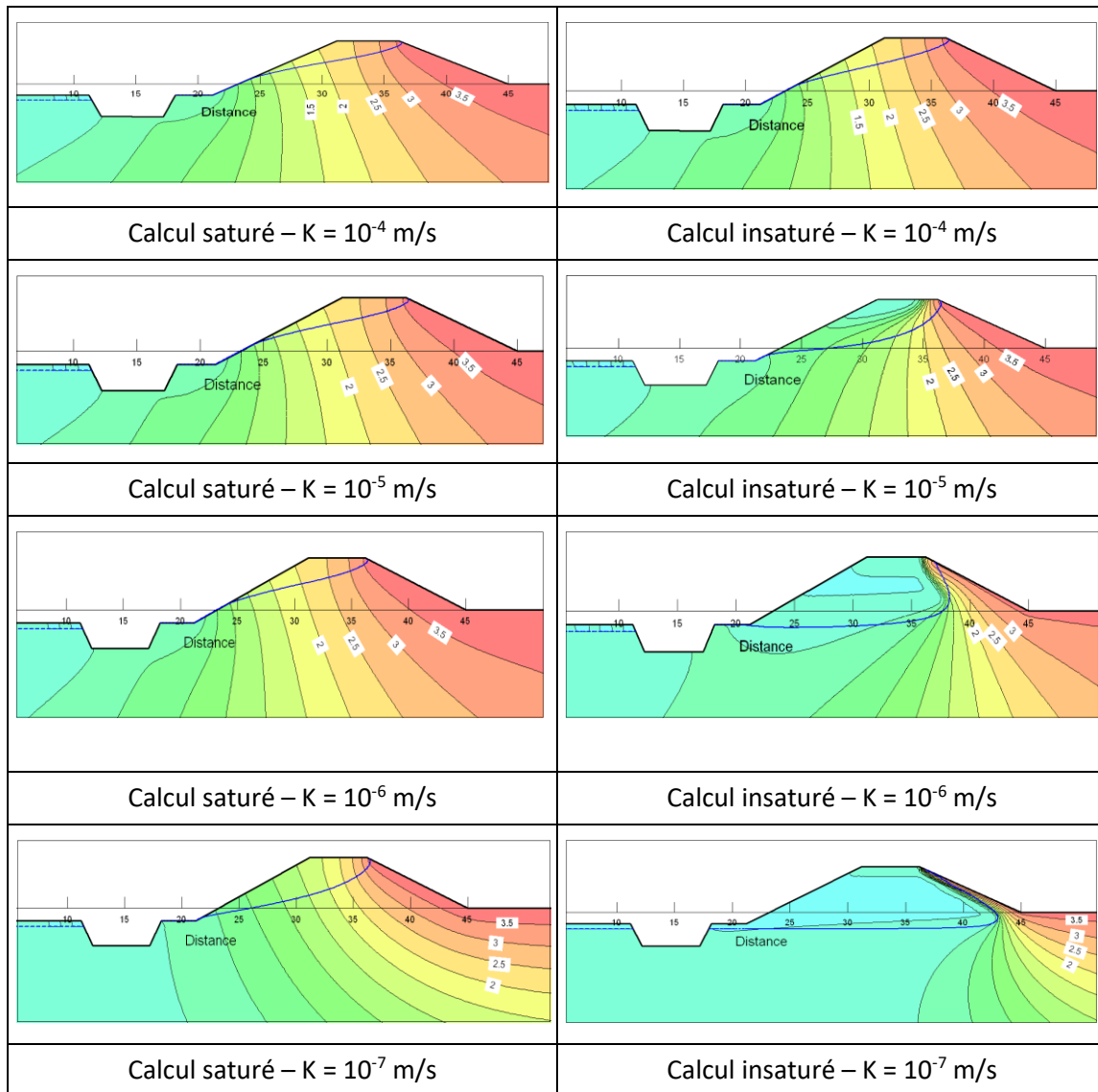


Figure 4.19 : Calculs d'écoulement menés dans le cadre du diagnostic de la digue du Rhône entre Beaucaire et Fourques (source Symadrem)

4.2.3 Préciser les caractéristiques attendues

Les caractéristiques attendues de l'analyse des données géotechniques et hydrauliques sont principalement :

- débits à drainer, en précisant éventuellement les vitesses et le gradient des écoulements ;
- granulométrie, propreté, caractéristiques mécaniques des matériaux de filtration et de drainage.

De plus, le dossier comportera forcément des éléments définissant le contexte réglementaire, de réalisation et les contraintes géométriques pour la mise en œuvre. Ces éléments sont présentés dans le chapitre 2 (section 2.2.1) mais la liste ci-dessous rappelle les éléments les plus importants pour les systèmes de filtration ou de drainage :

- localisation et capacité des exutoires en cas de drainage ;
- les contraintes environnementales : impact sur les circulations d'eau souterraines (changement du régime hydrique des sols avoisinants), la faune et la flore ;
- les contraintes d'exécution : accessibilité, emprises nécessaires, zones de stockage temporaire, etc.

4.2.4 Choix de la technique

Quatre techniques de confortement ou de réparation, basées principalement sur la mise en place d'un dispositif de filtration ou de drainage sont décrites dans ce chapitre, chacune répond à un besoin et des configurations spécifiques, à savoir :

- géotextile de filtration (FT 4.1) :
 - cette fiche s'attache à définir le dimensionnement d'un géotextile de filtration selon les recommandations émises par le Comité Français des Géosynthétiques (CFG) [4-15] et reprises dans la norme NF G 38061 [4-16],
 - l'utilisation de ce type de filtre géotextile ne se limite pas aux techniques décrites au présent chapitre mais est au contraire largement employée dans d'autres techniques ; les fiches techniques correspondantes font alors référence à la présente fiche « générique » pour la conception de la partie filtration ;
- sol de filtration (FT 4.2) :
 - cette fiche présente le dimensionnement d'un filtre granulaire. Les règles de filtre y sont notamment abordées ;
- ouvrage de drainage sous une recharge peu perméable (FT 4.3) :
 - amélioration de la stabilité d'un parement à l'aide d'une recharge en matériaux imperméables ou semi-perméables lorsqu'ils sont présents et exploitables sur le site et en l'absence sur site de matériaux drainants,
 - drainage de l'interface entre le corps de digue et la recharge pour ne pas saturer cette dernière ;
- drainage d'un ouvrage sans apport de remblai supplémentaire (FT 4.4) :
 - interception directe des écoulements dans l'ouvrage et évacuation de l'eau pour éviter :
 - la saturation et des pressions interstitielles élevées dans les parties du remblai et/ou de la fondation en aval de l'écoulement et donc améliorer la stabilité,
 - le risque d'érosion interne.

Certaines contraintes (qui peuvent être communes à toutes les fonctions – voir [§2.2](#)) sont de nature à orienter le choix de la technique (matériau naturel ou en géosynthétique) :

- le profil de l'ouvrage et ses matériaux constitutifs ;
- les situations de chargement ;
- les enjeux liés à la sûreté ;
- la localisation du filtre et/ou du drain dans la digue et les mécanismes d'érosion interne qui sont attendus ainsi que leur cinétique possible ;
- la prise en compte du risque de colmatage ainsi que par la possibilité de suivi et la facilité de d'entretenir ou de réparer ultérieurement le dispositif en cas de problème ;
- les disponibilités locales en matériaux drainants et les retours d'expériences connus localement : une faible disponibilité en sable ou grave drainante, des coûts prohibitifs sur certains matériaux ou produits, la complexité de pose nécessitant des savoir-faire de la part des entreprises, la rapidité de l'approvisionnement et de l'exécution sont des critères permettant d'orienter les choix. Cela nécessite un travail prospectif bien avant la réalisation des travaux ;
- l'impact sur l'environnement en cas d'utilisation de matériaux alternatifs (type bétons de déconstruction ou terres excavées). La réflexion sur les exutoires doit éventuellement faire l'objet d'une étude d'impact pour déclaration ou autorisation auprès des services en charge de l'application de la loi sur l'eau ;
- difficultés liées au site : appréciation de la difficulté de la pose, exigüité de la zone de circulation et d'accès au site, maintien de la propreté du site de stockage (éviter la salissure des produits et matériaux), mode de pose du matériau drainant (par plot, compactage ou non...) ;

- la possibilité de disposer de zones de stockage provisoires pour les granulats, géosynthétiques, drains..., pouvant nécessiter, selon les cas, des autorisations d'occupation temporaire de surfaces ;
- réflexion spécifique sur la gestion et l'évacuation des déchets de chantier. La pose de géocomposite nécessite un remblayage complémentaire pour lequel le réemploi en remblai d'une partie des déblais du site peut s'avérer intéressant pour limiter l'envoi en installation de stockage de déchets inertes (ISDI) ;
- réflexion sur les nuisances de chantier (bruit principalement, poussières, salissures, vibrations), recherche des points sensibles ;
- réflexion sur le phasage du chantier (réalisation par plots, mouvement des terres) ;
- problématique de reconstitution de la digue ou de sa remise en état, de la réalisation des pistes d'entretien.

4.2.5 Principes de dimensionnement et conditions aux limites

4.2.5.1 Dimensionnement d'un filtre géotextile

Ce point fait l'objet de la fiche technique FT 4.1. Quelques éléments clés sont cependant repris ici.

Pour se prémunir de l'érosion interne, un filtre géotextile peut être mis en place à l'interface de contact entre deux sols non-compatibles (qui ne respectent pas les règles de filtre). Les filtres géotextiles doivent satisfaire deux conditions s'exprimant en six critères :

- condition 1. Rester perméable à l'eau :
 - critère de perméabilité : l'indice de vitesse (V_{H50}) doit être supérieur à une valeur donnée, dépendante :
 - de la perméabilité du sol à filtrer,
 - du gradient hydraulique,
 - de l'ouvrage,
 - critère de résistance à la pénétration de l'eau : l'eau passe pour une charge $h \leq 5$ mm ;
- condition 2. Stabiliser le squelette du sol à l'interface tout en laissant passer les particules fines instables :
 - critère de non rétention des fines : l'ouverture de filtration (O_{90}) ≥ 63 μm ,
 - critère de rétention du squelette : ce critère dépend de la granulométrie et de la compacité du sol à filtrer, de l'ouverture de filtration du géotextile et du gradient hydraulique,
 - critère d'homogénéité de l'ouverture de filtration : dépend du nombre de constriction du filtre géotextile,
 - critère de stabilisation du squelette à l'interface : dépend du nombre de constriction du filtre géotextile.

Il convient également de s'assurer que les caractéristiques mécaniques du géotextile sont compatibles avec les conditions de mise en œuvre :

- la résistance à la traction « T_{max} » en kN/m, à la fois en sens production et en sens travers ;
- l'allongement à l'effort de traction maximal « ϵ_{max} » en %, en sens production et en sens travers ;
- la résistance au poinçonnement « P_s » en kN.

4.2.5.2 Dimensionnement du filtre granulaire

Ce point fait l'objet de la fiche technique FT 4.2. Quelques éléments clés sont cependant repris ici.

Selon le bulletin CIGB 164 [4-17] les cinq fonctions, qui régissent la capacité du filtre à arrêter l'érosion interne, sont :

1. Rétention : le filtre stoppe le transport (l'érosion) des particules du sol de base protégé.
2. Auto filtration ou stabilité : le filtre possède une stabilité interne et ses particules fines ne sont pas sujettes à l'érosion à l'intérieur du filtre, il ne devra pas maintenir une fissure ouverte par le processus de cimentation ou par la présence de fines plastiques.
3. Non cohésion : le filtre est pulvérulent et comble toute fissure.
4. Drainage : le filtre est suffisamment perméable pour transporter l'eau s'écoulant à travers le sol de base vers les couches drainantes ou le pied du barrage.
5. Résistance : le filtre transfère les contraintes à l'intérieur du barrage sans être écrasé et donc sans devenir plus fin.

À ces fonctions s'ajoutent le risque de soulèvement du filtre en cas d'insuffisance de drainage (dissipation des sous-pressions) et de poids sur le filtre [4-18 ; 4-19].

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 deux couches. Il faut également que la couche filtre ait une épaisseur suffisante, dépendant de deux conditions : i) de la granulométrie et ii) de la mise en œuvre sur chantier. Ainsi, l'épaisseur de chaque couche filtre doit être supérieure ou égale à 50 fois le diamètre $d_{15}(F)$ et d'une épaisseur minimale suffisante pour faciliter la mise en œuvre chantier [4-1].

L'utilisation généralisée de filtres granulaires dans les digues de protection est cependant peu commune car la technique est complexe à réaliser, la ressource plutôt rare : sable de dune, graves alluvionnaires..., etc.). La pratique actuelle privilégie la pose de géotextiles, beaucoup plus commodes à contrôler et à poser, bien que pouvant poser des difficultés pour une mise en place sous l'eau (situation néanmoins rare pour les ouvrages de protection). L'emploi de sols naturels pour réaliser des filtres granulaires est cependant nécessaire pour des ouvrages très spécifiques (par exemple pour un ouvrage dans un milieu basique, très instable pour les géosynthétiques en polyéthylène).

4.2.5.3 Dimensionnement du dispositif drainant

Le préalable à tout dimensionnement de drain est l'évaluation du débit maximal à vers exutoire. Pour ce faire, il existe quelques règles de calcul d'écoulement en milieu poreux qui permettent, en fonction de la nature des sols traversés et des conditions hydrauliques, de calculer les débits traversant la surface d'interception [4-16]. Ces règles sont rappelées à la fin de cette section.

En second lieu il est nécessaire de rechercher et/ou créer un exutoire qui pourra accepter le débit drainé. Il est recommandé d'en identifier plusieurs sur le linéaire d'une digue pour diminuer le débit à évacuer par section.

Sur cette base le dimensionnement comportera plusieurs étapes :

- la définition du matériau drainant proprement-dit ;
- la localisation et la géométrie de l'ouvrage ;
- le dimensionnement des drains, fossés ou collecteurs assurant le transit de l'eau collectée vers le(s) exutoire(s) ;
- la conception de l'exutoire.

Pour rappel, l'eau transite par le système de drainage dans l'ordre des organes suivants (Figure 4.20) :

- drain granulaire/géosynthétique ;
- canalisation de captage/collecte ;
- canalisation de transit ;
- l'exutoire (milieu naturel ou fossé à créer).

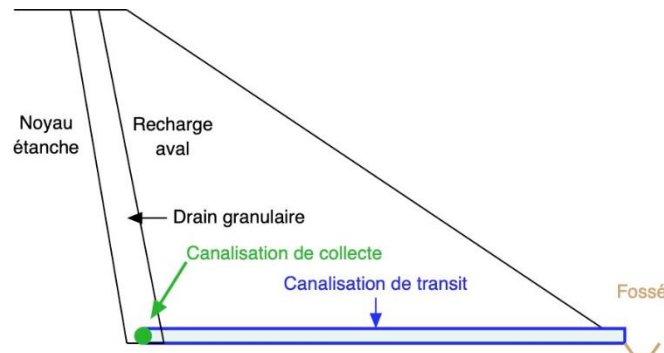


Figure 4.20 : Schéma de principe d'un système de drainage complet (Schéma : Rémy Tourment)

Les propriétés et caractéristiques des géomatériaux doivent être clairement spécifiées dans le marché. Ainsi, pour les matériaux drainants, le guide Drainage routier [4-20] recommande pour un matériau drainant les caractéristiques suivantes :

- $80 \mu\text{m} < 5 \%$;
- $2 \text{ mm} < 10 \%$;
- $\text{VBS} < 0,1 \text{ g bleu}/100 \text{ g de sol}$;
- éviter les matériaux contenant des minéraux susceptibles d'évoluer en présence d'eau et former des précipités préjudiciables au fonctionnement du drain (colmatage par dépôts de calcite, d'oxyde de fer). C'est le cas de composés ferreux (pyrite), carbonatés, sulfatés ;
- Friabilité des Sables (FS) recommandée < 60 ;
- Micro Deval en présence d'Eau (MDE) recommandé < 45 [4-21] ;
- Los Angeles (LA) recommandé < 45 [4-22].

D'autres exigences peuvent être imposées concernant le D_{max} , l'indice de concassage, la perméabilité, la masse volumique humide. En général, les coupures de type 20/40 mm sont assez appréciées mais d'autres coupures peuvent convenir. À noter que les granulométries uniformes discontinues assurent un coefficient de perméabilité plus élevé pour un même D_{50} . Les matériaux roulés sont plus faciles à mettre en place que les matériaux concassés mais rien n'interdit de les utiliser.

Les principes de dimensionnement d'un drain géosynthétique (géodrain) sont définis dans les recommandations du CFG [4-15] repris dans la norme NF G 38061 [4-16]. Les capacités des géosynthétiques pour le transfert des eaux collectées dépendent du type et de la forme du produit utilisé (ils sont nombreux et divers) et on se référera aux descriptions des produits.

Le dimensionnement d'un drain granulaire nécessitera généralement l'utilisation de logiciels de calcul d'écoulement en milieu poreux. Cependant, les débits à transiter sont souvent relativement faibles et il est conseillé de veiller à garder une épaisseur minimum pour répondre aux deux contraintes suivantes :

- épaisseur suffisante pour une mise en œuvre aisée sur chantier sans discontinuité ni mélange avec les sols adjacents ;
- sur-épaisseur pour pallier une perte d'efficacité dans le temps (colmatage partiel notamment).

Le collecteur de drainage et le dispositif d'évacuation des débits drainés

Le dimensionnement de ces organes passe par la nature et le diamètre de la canalisation drainante prévue. En cas de besoins importants (stockage ou forts débits d'eau), il faudra envisager des collecteurs.

Les canalisations de collecte (drainantes) peuvent être de nature variable : drain routier à cunette, drain type agricole, drain rigide. Elles ne sont en général pas très résistantes et peuvent se déformer lors de la pose sous le passage d'un engin ou du déchargement trop violent de matériaux. Les diamètres les plus courants sont de l'ordre de 100, 150 ou 300 mm.

Selon la longueur de la canalisation de collecte ou des canalisations de transit des eaux drainées, il peut être utile de prévoir des regards de visite pour le curage, tous les 70 à 100 m linéaires maximum.

Le fossé est intéressant dans le cas de faibles pentes, si les emprises sont disponibles et s'il est possible de passer pour l'entretenir avec un engin de type pelle mécanique et godet curage.

Les exutoires

Les exutoires doivent être précisément localisés sur le terrain et les plans d'exécution. Ils seront, selon les cas, équipés de dispositifs d'accompagnement : grille anti-rongeur, zone d'accompagnement de l'évacuation des filets d'eau par des petits enrochements ou des surfaces stabilisées pour éviter le ravinement.

Une distance de 500 m entre un point haut et un exutoire est en général le maximum recommandé [4-20]. Les eaux qui sortent d'un dispositif de drainage sont considérées comme des eaux claires. Cependant, la mise en œuvre de matériaux alternatifs en tant que matériaux drainants comme des pneus déchiquetés, des graves de recyclage, peut affecter la qualité des eaux relarguées dans le milieu et une norme régit leur usage [4-23].

Evaluation des débits à drainer

La norme NF G38-061 [4-16] donne les éléments permettant de dimensionner les ouvrages de drainage et filtration, qu'ils soient en matériaux granulaires ou géosynthétiques, verticaux ou horizontaux.

L'évaluation des débits à drainer est la partie nécessitant le plus d'expertise car il est rare d'avoir des données mesurées in situ, même si il serait très souhaitable d'en disposer.

L'évaluation et les problématiques des écoulements dans les ouvrages ont été abordés dans la partie 4.2.2.

Certaines formules existent pour déterminer les débits à évacuer dans le cas idéalisé de milieux isotropes et saturés.

Ces débits pourront être calculés selon les formules de débits mentionnées dans « *Hydraulique Souterraine* » chapitre 6 [4-24]. D'autres éléments figurent dans l'ILH [4-25]. Ces évaluations reposent sur l'établissement d'un gradient au sein de l'ouvrage dont la ligne de saturation, qui sépare la partie saturée de la partie non saturée, prend l'allure d'une parabole dont l'équation a été étudiée par Kozeny (Figure 4.21).

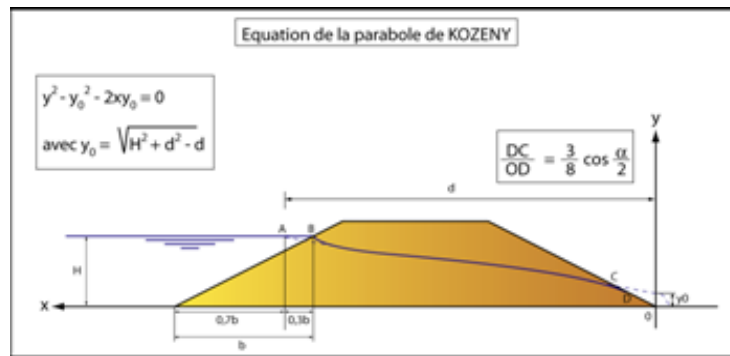


Figure 4.21 : Écoulement et localisation de la ligne de saturation dans un ouvrage en terre homogène. Celle-ci se manifeste selon une parabole dont l'équation a été étudiée par Kozeny.

Des formules de la parabole figurent dans l'ILH [4-25] qui permettent ensuite d'évaluer le débit sortant à évacuer, en supposant l'écoulement de l'eau au sein de l'ouvrage laminaire, continu et non dépendant de la température de l'eau. La formule de Kozeny est rappelée sur la Figure 4.21.

Une approximation du débit sortant peut-être évaluée selon Schneebeli [4-24]:

- pour $\alpha > 60^\circ$: $q = k \times y_0 = k \times \sqrt{H^2 + d^2} - d$
- pour $20^\circ < \alpha < 60^\circ$: $q = k \times \frac{H^2}{l + L}$

avec :

q le débit sortant en pied de talus en m³/s par unité de longueur
 α l'angle du pied de talus côté val en °
 k le coefficient de perméabilité de la digue en m/s
 H la hauteur d'eau côté eau en m
 d la longueur du chemin hydraulique au travers de la digue en m
 y_0 la hauteur sur le talus de la zone de suintement en m.

Ce débit permet de dimensionner les drains. Mis au regard des débits pouvant être évacués par les tuyaux, cela permet de définir les distances entre exutoires et d'optimiser la pente.

Le calcul étant en général complexe (anisotropie et hétérogénéité), il est devenu usuel d'utiliser des logiciels d'écoulements hydrauliques couplant l'analyse des écoulements avec le calcul de stabilité au glissement (Talren avec Plaxis, Cesar LCPC, Slope et Seep/W, Plaxis et Plaxflow...)

Les producteurs de géosynthétiques disposent de logiciels spécifiques adaptés à leurs produits.

Enfin, pour certaines parties d'ouvrages (interfaces, transitions) ainsi que pour certains types de drains (puits drainants...) une approche 3D peut s'avérer utile voire nécessaire.

4.2.5.4 La recharge

Celle-ci intervient dans la stabilisation mécanique du talus côté zone protégée (à ce sujet, voir le [chapitre 5](#) "Stabilité"). Le volume, la masse volumique, la cohésion et l'angle de frottement sont des paramètres qu'il convient de préciser lors du dimensionnement pour spécifier le choix des matériaux possibles en phase chantier.

Les caractéristiques prescriptives pour les matériaux de recharge en phase chantier sont la référence Proctor normal, la granulométrie, la cohésion et l'angle de frottement, éventuellement la perméabilité et l'acceptabilité environnementale dans le choix des matériaux.

Le matériau doit faire l'objet d'un compactage soigné dont les préconisations s'inspireront du "Guide pour réalisation des remblais et des couches de forme" [4-22] dans le cas de grands volumes ou du "Guide de réalisation des tranchées et réfection de chaussées" [4-23] pour l'utilisation de petits matériels de compactage et de petits volumes.

Le taux de compactage est une donnée à prescrire dans le cahier des charges. Cela a des conséquences sur la masse volumique sèche et sur les critères de compactage. Il existe deux objectifs de compactage pour les ouvrages en terre : la qualité q4 (ou q3 dans certains cas), en référence à la masse volumique sèche moyenne p_{dm}^{10} et à la masse volumique sèche en fond de couche p_{dfc} .

4.2.5.5 Autres éléments de conception

Au-delà des caractéristiques des filtres et des drains tels qu'ils sont définis précédemment, l'intégration de ces organes dans un ouvrage nécessite de vérifier les éléments suivants :

- stabilité globale de l'ouvrage ;
- continuité des fonctions de filtration et de drainage notamment aux abords des points singuliers et au niveau des transitions ;
- pour les géosynthétiques, définir et dimensionner les ancrages éventuels ;
- pour les géosynthétiques, définir les distances de recouvrement ;
- raccordements aux dispositifs de filtration/drainage éventuellement préexistants ;
- prévoir une possibilité de mesure des débits drainés aux débouchés des drains ;
- contraintes par rapport aux travaux de confortement et/ou de réparation d'autres fonctions.

4.3 Réalisation

4.3.1 Etudes et essais préalables

Au-delà des études et essais génériques à la plupart des travaux de confortement de digues présentés au chapitre 2, un accent particulier sera porté sur la caractérisation de l'environnement hydraulique de l'ouvrage : sollicitations hydrauliques permanentes et exceptionnelles, nature et perméabilité des matériaux et présence de nappe et/ou écoulements en fondation.

La recherche de matériaux sur site susceptibles d'être employés pour le confortement (filtre, drain et/ou recharge) constitue généralement une étape préliminaire ; en second lieu les matériaux de carrière (sols, sables ou graves) et/ou manufacturés (géosynthétiques) seront caractérisés et analysés pour définir leur convenance pour le projet.

4.3.2 Réalisation

4.3.2.1 Généralités

Lors de la réalisation, une attention particulière sera portée aux modalités et à la localisation des aires de stockage des matériaux, au soin à apporter à la pose (salissure, déchirement, continuité de la pose pour les géosynthétiques), à la durée maximum de stockage à l'air dans le cas des géosynthétiques pour éviter la dégradation aux UV, aux modalités de terrassement tels que circulation de chantier, au phasage, aux précautions lors du creusement en tranchée ou du talus existant...

¹⁰ Pour la qualité q4, p_{dm} doit être supérieure ou égale à 95% $p_{d\text{ OPN}}$ et pour la qualité q3 p_{dm} doit être supérieure ou égale à 98,5% $p_{d\text{ OPN}}$. Pour la qualité q4, p_{dfc} doit être supérieure ou égale à 92% $p_{d\text{ OPN}}$ et pour la qualité q3 p_{dfc} doit être supérieure ou égale à 96% $p_{d\text{ OPN}}$.

4.3.2.2 Conditions de pose

Pour un filtre ou un drain, la description du mode de pose et de ses conditions sont à définir au cas par cas en précisant principalement les contraintes liées aux conditions d'accès, de circulation et d'approvisionnement au site, des phasages intermédiaires (plots), des contraintes imposées pour le respect de l'environnement (déchets, bruit, poussières, vibrations...). Le choix du matériel de pose revient à l'entreprise. L'ouvrage de drainage ou de filtration est généralement mis en place sur le remblai existant. Il convient de veiller à un décapage soigneux des matériaux en place et notamment à l'élimination de la terre végétale et autres éléments organiques ou déchets.

On évitera en général de compacter les matériaux drainants qui sont simplement déposés soigneusement pour éviter la ségrégation ou la création de poussières.

En cas de pente trop forte en place (supérieure ou égale à 1H/1V), il peut être nécessaire de créer des redans ou de retailler le talus pour obtenir une pente plus douce et faciliter l'accroche à l'ouvrage existant.

Le drain géosynthétique ne doit ni être mis en tension ni poinçonné au cours de la pose du matériau drainant, tout en assurant un bon contact avec le sol, notamment sans pli. Pour éviter les malfaçons, il est impératif de monter le matériau drainant du bas vers le haut (Figure 4.22), en évitant la réalisation de couche trop épaisse (de l'ordre de 1 m maximum).

Les conditions de pose du remblai sont en général celles du GTR [4-26] : règles pour le compactage et taux de compactage à atteindre, précautions particulières à l'approche de l'ouvrage de drainage ou d'autres ouvrages sensibles (salissures, protection physique, limitation d'accès pour certains engins...), contraintes imposées pour le respect de l'environnement (comme par exemple, la gestion des eaux de ruissellement, des pollutions accidentelles, la protection de la faune et de la flore, etc. qui pourront être précisées dans le Plan d'Assurance Environnement).

Attention au soin à apporter lors de la réalisation des points singuliers tels que : exutoires, raccordement à l'existant, gestion des ouvrages traversants... (Chapitre 8)

Cas particulier de la gestion des ouvrages traversants ou encastrés : la démolition est une phase qui peut être intégrée au marché. Il convient alors d'être vigilant aux difficultés spécifiques liées dans ce cas au rétablissement des ouvrages (réseaux EDF, eau, hydrocarbures...) ou de l'expropriation (dans le cas de maison) pouvant poser des problèmes de délais et d'exécution des travaux en lien avec les gestionnaires / propriétaires.



Figure 4.22 : Exemple du chantier de Bou la Binette, sur la Loire (2004) Le talus est recouvert par un géocomposite de drainage (on distingue les mini-drains en partie haute du talus). La recharge est réalisée en tout-venant classé B5 selon NF P11-300. On devine la fin du dispositif de drainage au pied de la pelle, sous la première couche mise en œuvre et compactée par un compacteur vibrant de type V5 (Crédit Photo DREAL Centre Val de Loire).

4.3.2.3 Assurance de la qualité

Le guide Drainage Routier [4-20] ou le guide assurance de la qualité dans les travaux de terrassement [4-28] constitue des aides en matière de rédaction de clauses concernant l'assurance qualité des travaux proprement dits. Le chapitre 10 de l'ILH [4-29] fournit des indications plus globales comme par exemple des recommandations en matière de gestion du risque, de l'environnement et de gestion des phases transitoires en cas de crues soudaines, ainsi que de nombreuses illustrations de chantier et d'essais à réaliser.

Le cadre du SOPAQ (Schéma Organisationnel du Plan d'Assurance Qualité) précisera au préalable la liste des points sensibles du chantier, qu'ils soient d'arrêts ou critiques

Il peut être intéressant de demander un point d'arrêt pour valider le modèle géotechnique utilisé pour la digue existante ainsi que pour les documents définissant certains points sensibles liés à la réalisation. Un autre point d'arrêt intéressant peut-être la validation des planches de convenue.

Les éléments à faire au titre de l'assurance qualité sont les suivants :

- agrément des matériaux (fiches techniques produits des matériaux drainants, des géotextiles et des géocomposites via les certificats qualité ASQUAL, des drains, des matériaux de remblai...) et des matériels ;
- validation du PAQ et notamment les procédures de pose et d'exécution;
- contrôle de la réalisation : planches de convenue si nécessaire, essais sur les matériaux prélevés contradictoirement, contrôle topographique de l'implantation de l'ouvrage, contrôle de la qualité du compactage (validation du compacteur, contrôle par mesure de densité, par évaluation du Q/S, vérification du nombre de passes, de l'épaisseur des couches...). Contrôle du fil d'eau des dispositifs de collecte (drain, fossé, collecteur...) par méthode laser ou au fil ;
- validation des plans d'exécution de l'ouvrage : géométrie, implantation...
- plans de récolement ;
- réception : vérification des écoulements et du bon fonctionnement du dispositif drainant par injection d'eau, passage caméra...
- dispositions d'entretien / de maintenance de l'ouvrage réalisé.

Les précisions attendues de la part de l'entreprise portent sur la stabilité au glissement des talus lors de l'excavation des matériaux (le cas échéant), sur des limitations éventuelles pour certains compacteurs (en amplitude de vibration, en poids...) ou au contraire sur la préférence pour certains types de compacteurs (compactage par pétrissage, matériel de petite taille...), sur la justification de l'atteinte des performances (masse volumique, perméabilité) des matériaux proposés suite à leur mise en œuvre.

Les travaux mettant en œuvre des géosynthétiques devront respecter les critères de qualité recommandés par le CFG [4-15]:

- certification qualité ASQUAL du géotextile ou du géocomposite. Les géotextiles sont certifiés pour des fonctions précises, par exemple Filtration ou Drainage. La certification ASQUAL (Figure 4.23 et Figure 4.24) assure l'utilisateur de la conformité des caractéristiques produit indiquées sur le certificat. Cette certification ne remplace pas un dimensionnement de la fonction ;
- contrôle de réalisation (Norme NF G38-060 [4-30]) ;
- contrôle de la pose et principalement du soin apporté à la pose des géotextiles, à leur ancrage et au recouvrement des lés.



Figure 4.23 : Exemple de stockage de rouleaux de géosynthétiques (Crédit photo : Tencate Geosynthetics)



Figure 4.24 : Exemple d'étiquette apposée sur un rouleau - certification Asqual

4.3.3 Nuisances/environnement

Voir points généraux dans l'introduction générale et points spécifiques dans les fiches techniques.

4.3.4 Contraintes liées à une crue ou à des travaux avoisinants au chantier

Au-delà des précautions prises sur l'ensemble des chantiers de travaux réalisés sur des digues, l'utilisation de nappes géosynthétiques nécessite de prévoir une fixation ou un lestage des géosynthétiques à l'avancement en cas de pose sous eau.

En cas de vent, on applique la même méthode qu'en cas de pose sous l'eau, c'est à dire la pose de blocs pour maintenir le géotextile ou bien la pose d'un tas de terre en crête.

En cas de survenue d'une crue pendant la pose de géotextile, on demande à l'entreprise d'essayer de poser des agrafes pour aider au maintien mais la pose de blocs s'avère aussi souvent suffisante.

4.4 Suivi après travaux

4.4.1 Récolement

Il est important de bien veiller à la localisation des exutoires et regards de visite du réseau de drainage qui seront repérés en planimétrie et altimétrie.

4.4.1 Suivi de l'ouvrage de filtration réalisé

À priori, puisque les organes de filtration sont non accessibles, il n'existe pas de dispositif ou de moyens de suivre leur évolution au cours du temps.

4.4.2 Suivi de l'ouvrage de drainage réalisé

Comme évoqué précédemment (voir sections [2.2.3](#) et [4.1.5](#)), il peut être envisagé de mettre en place un dispositif d'auscultation afin de contrôler l'efficacité des dispositifs de drainage. Le lecteur est invité à consulter des ouvrages de référence [4-9 ; 4-11 ; 4-12].

À titre d'exemple, la présence d'exutoires de drainage permet une auscultation de l'ouvrage (mesure des débits drainés). En cas de besoin, des passages caméra dans les drains pourront être réalisés si ces exutoires sont sous forme de canalisation sans changement de direction important (angles par exemple). Dans le cas de drain granulaire, le passage caméra étant impossible, il faut plutôt mesurer les débits totalisés dans des sections du caniveau de rejet ou effectuer des vérifications de colmatage par sondage. Un entretien de l'ouvrage au droit de ces exutoires (sans les abimer) est également indispensable.

5 Stabilité au glissement

Ce chapitre 5 est basé sur le travail du sous-groupe n°4 « Stabilité et rehausse » en association avec les animateurs du GT. En plus de la fiche « Généralités sur les palplanches », ce sous-groupe est également à l'origine de la rédaction de cinq fiches techniques, listées ci-dessous et qui sont disponibles dans la partie 2 (PDF) du présent document :

- FT G1. Généralités sur les palplanches
- FT 5.1. Remblai stabilisateur avec géoconteneur
- FT 5.2. Remblai renforcé
- FT 5.3. Stabilité apportée par un mur poids, un mur cantilever ou une paroi béton
- FT 5.4. Rideau de palplanches de soutènement
- FT 5.5. Soutènement en gabions pour conforter la stabilité au glissement de la digue

NB : la technique couramment utilisée de recharge en remblai est décrite dans le §6 Rehausse et en particulier dans la FT6.3.

Les membres du sous-groupe étaient :

Olivier ARTIÈRES, <i>TenCate Geosynthetics</i>	
Luc BOUTONNIER, <i>Egis</i>	
Caroline CHARTON, <i>Maia Sonnier</i>	
Jean-Marc FLOHR, <i>Egis</i>	
Jean-François FREZET, <i>Egis</i>	
Guillaume HIBON, <i>Antea Group</i>	
Jean-Charles PALACIOS, SAFEGE	Animateur
Sylvain PALIX, <i>Antea Group</i>	
Loïc PERRET, <i>ESTHI</i>	
Alexandre PLASTRE, <i>Maccaferri</i>	
Jacques POUDEVIGNE, <i>FUGRO</i>	
Didier RAULIN, <i>FUGRO</i>	
Patrick SOULAT, <i>SAFEGE</i>	
Xavier SUISSE DE SAINTE CLAIRE, <i>SAFEGE</i>	
Claire VARAGNAT, <i>SAFEGE</i>	

Avant de procéder à la lecture de ce chapitre 5 « Stabilité » et des fiches techniques qui en découlent, le lecteur est invité à consulter le chapitre 2 « Éléments communs à la démarche de conception d'un confortement ou d'une réparation ». Ce dernier présente en effet des éléments importants et nécessaires à la lecture du présent chapitre, qui portent notamment sur le diagnostic (objectifs, contenu, mécanisme de rupture/défaillance des digues), la conception (données nécessaires, modélisations), la réalisation chantier ou encore sur le cas des situations d'urgence. Les situations d'urgence sont abordées dans l'annexe D (section D.3).

5.1 Améliorer la stabilité au glissement des digues

Dans le 2.1.2, les différents mécanismes d'instabilité concernant les digues étaient présentés, dont :

- glissement (rotationnel ou translationnel, profond ou de surface) ;
- effondrement ;
- liquéfaction.

Dans ce chapitre 5, ne sont traités que les confortements visant à renforcer la stabilité des digues (y compris éventuellement leur fondation) au glissement. Les effondrements ne peuvent se produire que suite à l'existence d'une cavité, liée par exemple à des affouillements ou encore à des phénomènes karstiques ou d'érosion interne. La liquéfaction correspond à la perte de résistance au cisaillement d'un sol saturé, sous l'augmentation des pressions interstitielles ou sous l'action d'un séisme.

Les techniques visant à améliorer la stabilité de la digue au glissement sont nombreuses, elles peuvent être classées en quatre catégories :

- recharge, reprofilage ou risberme, permettant un adoucissement de la pente générale du talus côté eau ou côté zone protégée (Figure 5.1) ;
- soutènements, solution principalement mise en œuvre lorsque l'emprise au sol est limitée. Dans ce cas plusieurs solutions peuvent être proposées :
 - rideau de palplanches ou de pieux sécants,
 - mur poids en béton ou en maçonnerie (Figure 5.2),
 - mur gabions ;
- remblais :
 - remblais techniques (avec additifs), également dans les cas d'emprise au sol limitée mais aussi dans les cas de multi-fonctions à assurer,
 - solutions à base de géosynthétiques (tubes, sacs...),
 - remblais renforcés avec armatures sous forme de géotextile, géogrilles, rubans plats, ... ;
- remblai en sols traités (à la chaux, au ciment, en BCR...) : techniques en développement et/ou recherches en cours ; aucune fiche technique n'a été rédigée en l'absence de retours d'expériences validés sur des confortements d'ouvrages. À noter que ces techniques permettent d'assurer d'autres fonctions et sont fortement liées à la nature et à la qualité du sol de remblai.

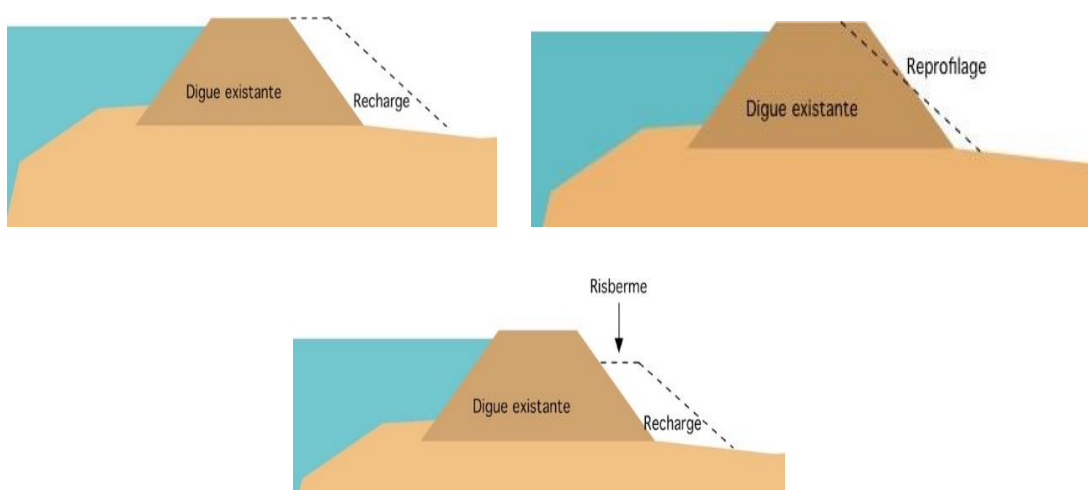


Figure 5.1 : Typologie de renforcement côté zone protégée (Schéma : Rémy Tourment)

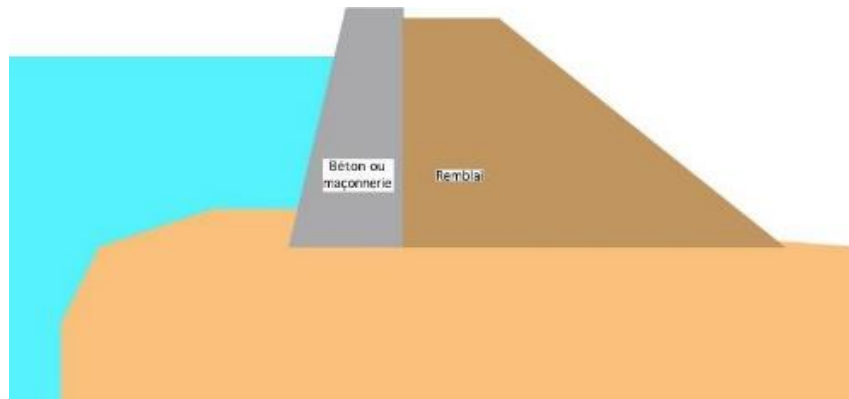


Figure 5.2 : Schéma de principe d'un mur poids (Schéma : Rémy Tourment)

5.1.1 Fonctions principales, secondaires et/ou induites

Parmi les solutions qui sont utilisées principalement pour assurer une **stabilité au glissement de l'ouvrage**, les deux principaux critères de choix sont l'emprise disponible et les autres fonctions éventuelles que le dispositif doit assurer.

Ces autres fonctions indirectes ou induites par les techniques mises en œuvre sont principalement :

- l'étanchéité de la digue (recharge étanche côté eau, rideau de palplanches côté eau et mur poids côté eau) ;
- le drainage (recharge drainante ou drainée ou gabions côté zone protégée) ;
- la filtration (entre le corps de digue existant et une recharge) ;
- la protection contre l'érosion externe du corps de digue (rideau de palplanches, remblais renforcés, mur poids....), à la fois côté eau et côté zone protégée et la protection contre les affouillements du pied de digue (palplanches, remblais renforcés, mur poids....) ;
- la rehausse de la digue (réduction de la probabilité de surverse, localement) ;
- le rallongement des chemins hydrauliques afin de réduire les risques d'érosion interne (recharges, épaissements...).

5.1.2 Problématiques techniques traitées

Pour la fonction principale de stabilisation de la digue, les problématiques techniques traitées sont les suivantes :

- pentes de talus abruptes ;
- amorces de glissement de talus ;
- insuffisance de la fondation (caractéristiques géotechniques médiocres des sols d'assise) ;
- défauts liés à l'entretien : présence de végétation et de terriers d'animaux fouisseurs ;
- différents effets des vagues et de l'état de mer hors érosion externe (solicitations cycliques, effet de la pente sur la hauteur du run-up...).

Les problématiques techniques secondaires qui peuvent être traitées par certaines des solutions de stabilisation globale du remblai sont notamment les suivantes :

- l'érosion de surface (liée aux vitesses d'écoulement tangentielles ou autres) : ravinements, affouillements...
- l'érosion interne du corps de digue et/ou de la fondation qui se manifeste par la présence de zones humides, fuites...
- les submersions ou franchissements et/ou leur conséquence en termes d'érosion de l'ouvrage.

5.1.3 Variantes et/ou solutions en développement

D'autres techniques peuvent également être utilisées pour améliorer la stabilité au glissement d'une digue ; moins fréquentes pour le traitement de cette problématique, elles ne font pas l'objet de fiches techniques spécifiques.

5.1.3.1 Inclusions rigides ou semi-rigides

Les techniques d'amélioration de sols au moyen d'inclusions rigides ou semi-rigides permettent de réaliser un confortement de sol flexible. Ces techniques d'inclusions regroupent un grand nombre de procédés, chacun ayant ses spécificités : pieux forés, battus ou foncés, colonnes ballastées, colonnes à module contrôlée (CMC), colonne de sol mélangé en place... Certaines d'entre elles sont d'ailleurs également utilisées dans le cadre de confortement de digues pour leur apport en termes d'étanchéité, sous forme de rideau (jet grouting, cf. fiche technique FT 1.7).

Dans le cadre de confortement de digues, les inclusions rigides sont préférentiellement effectuées in situ par vissage d'une tarière conçue pour le refoulement latéral du sol et l'injection d'un coulis ou de béton. Dans certains cas particuliers, ces techniques peuvent aussi être utilisées comme réducteurs de tassement total par transfert d'une partie des charges de la surface vers les couches de sol inférieures plus résistantes.

Les techniques d'inclusions présentent l'avantage d'une exécution sans vibrations et avec des nuisances sonores et des mouvements de terres limités. Elles sont cependant complexes à mettre en œuvre lors de la phase travaux et génèrent des coûts d'investissement élevés.

5.1.3.2 Sols traités à la chaux ou au ciment

Le traitement à la chaux ou au ciment des sols fins, est une technique employée avec succès depuis plusieurs décennies dans le domaine des remblais et/ou structures routières. Par contre, il y a peu de retours d'expérience dans le domaine des ouvrages hydrauliques, en particulier sur les confortements de digues de protection contre les inondations. C'est pour cette raison que plusieurs programmes de recherche sur le traitement à la chaux des sols de remblais destinés à la réalisation de digues de protection contre les inondations sont en cours. Le lecteur est invité à se référer aux résultats de ces expérimentations au cours des prochaines années.

Sur ces sujets, le lecteur est invité à consulter les travaux réalisés :

- par le GT du CFBR « matériaux cimentés pour les barrages » ;
- par le Comité Technique de l'ICOLD « *Cemented Materials for Dams (CMD)* » pour lequel un bulletin est prévu pour 2021 ;
- par le SETRA dans son guide technique sur le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques [5-1] ;
- par l'ADEME/CEREMA/SEDDRe dans leur guide sur la valorisation des matériaux par traitement à la chaux sur les installations de recyclage [5-2] ;
- par l'IDRRIM dans ses propositions de compléments au guide de traitement des sols [5-3] ;
- dans le cadre des projets DigueELITE et Digue2020 ([5-4] ; [5-5] ; [5-6] ; [5-7]).

5.1.4 Solutions alternatives

Les solutions alternatives qui permettent d'améliorer la stabilité au glissement d'une digue concernent principalement les cas mettant en jeu la stabilité de berges proches de la digue. Les alternatives aux techniques citées précédemment sont alors :

- le recul des digues du lit mineur (cas des berges instables) ;
- l'exhaussement du fond du lit mineur à proximité des berges ;

- la réalisation d'épis de protection dans le lit du cours d'eau ou sur l'estran par enrochement ou autre (effet indirect et différé) et de la même manière la réalisation de brise-lames en milieu littoral ou de seuil en milieu fluvial ;
- dans certains cas des techniques ayant pour but d'améliorer l'étanchéité ou le drainage, en ayant un effet sur la ligne d'eau, peuvent être solutions alternatives qui améliorent la stabilité au glissement.

5.1.5 Eléments additionnels

Aucun élément additionnel n'est à mentionner ici.

5.1.6 Défaillances potentielles induites

Les défaillances potentielles induites par une conception et/ou une mise en œuvre inappropriée ou mal exécutée des techniques d'amélioration de la stabilité au glissement d'une digue peuvent être de différentes natures :

- tassement ou poinçonnement du sol d'assise ou du remblai existant (recharge, mur poids, gabions) pouvant conduire à l'apparition de points bas sur la digue ;
- tassements différentiels pouvant conduire à des fissurations dans le corps de digue ;
- érosion interne dans le corps de digue et aux interfaces entre le renforcement et la digue existante (par exemple, en cas d'absence de filtre sur un soutènement en gabions ou bien en cas d'absence de drainage efficient sur une recharge) ;
- phénomène d'érosion interne au niveau des zones de contact entre le secteur renforcé et le secteur non renforcé en cas d'absence de dispositif de transition au niveau de la réparation ;
- sous-pressions dans le corps de digue en cas d'absence de drainage efficient ;
- érosion externe de la digue en cas de recharge côté eau créant une entrave aux courants et une irrégularité de la surface du talus.

La conception des confortements liés à la stabilité au glissement des remblais constituant les digues devra être menée en prenant en compte ces risques d'effets induits.

5.2 Conception

5.2.1 Recueillir les informations préalables spécifiques à ce type de confortement

Dans la mesure du possible, les informations concernant l'ouvrage et son environnement doivent être préalablement recueillies ; au-delà des informations générales nécessaires à tout projet et rappelées en section 2.2 de ce guide, les éléments particuliers nécessaires à la conception de tout aménagement de stabilisation géomécanique d'une digue sont les suivants :

- analyse géologique (localisation des anciens bras de rivière ou des méandres, qui peuvent être vecteurs d'écoulements préférentiels, ou encore les zones de dépôts sédimentaires fins qui peuvent être source de tassements différentiels) ;
- caractéristiques géomécaniques (angles de frottement, cohésions, poids volumiques et modules) des terrains en place et du remblai existant ;
- contraintes admissibles du sol de fondation déterminées à partir d'essais géotechniques en place de type pressiomètre ou pénétromètre statique ;
- sollicitations hydrauliques (crues, étiages...), morphodynamiques (érosion du lit...), hydrogéologiques (niveaux de nappe...) ;

- disponibilité de zones d'emprunts et/ou matériaux ;
- sollicitations sismiques ou aléa karstique dans la zone du projet.

D'autres informations pourront en outre être nécessaires dans le cas de techniques spécifiques ; elles sont alors détaillées dans les fiches techniques correspondantes (par exemple, capacité de collecte et d'évacuation des eaux drainées dans le cas d'un soutènement en gabions côté zone protégée).

5.2.2 Préciser les caractéristiques attendues

Au-delà de la recherche de la stabilité au glissement du tronçon de digue, le confortement devra respecter certaines caractéristiques définies dans le cadre du projet (voir [chapitre 2](#)). En particulier :

- Les tassements acceptables ;
- la compatibilité avec l'entretien de l'ouvrage (pente, accès...) ;

5.2.3 Choisir la technique (comparatif technique et financier, retours d'expériences)

Les tableaux suivants (Tableau 5.2 et Tableau 5.2) constituent une aide pour choisir la technique de confortement en abordant la question soit par les fonctions secondaires éventuellement recherchées, soit par les contraintes du projet.

Tableau 5.1 : Choix de la technique de renforcement par fonction secondaire associée

	Recharge, reprofilage	Remblais renforcés	Mur poids (soutènement)	Palplanches (soutènement)	Soutènement gabion
Amélioration stabilité au glissement (fonction principale)	++	++	++	++	++
Protection contre l'érosion externe	+	+	++	++	++
Protection contre l'affouillement	-	≈	++	++	++
Etanchéité de la digue	++	+	++	++	-
Rallongement des chemins hydrauliques	++	+	++	++	-
Drainage	≈	≈	-	-	++
Rehausse de la digue	++	+	++	+	+

Ø : Critère non pertinent pour la technique
 ≈ : Dépendant des situations
 - : Non adapté
 + : Moyennement adapté
 ++ : Bien adapté

Tableau 5.2 : Choix de la technique de renforcement par défaut à remédier et/ou contrainte

	Recharge, reprofilage	Remblais renforcés	Mur poids (soutènement)	Palplanches (soutènement)	Soutènement gabion
Pentes de talus abruptes	++	+	++	++	++
Érosion de surface	+	≈	++	++	++
Insuffisance de la portance de la fondation	+	≈	-	++	-
Déficit d'entretien du talus (végétation, fousseurs)	≈	≈	+	++	+
Érosion interne du corps de digue	++	+	++	++	-
Vagues et état de mer	≈	+	++	++	≈
Emprise foncière limitée	≈	+	++	++	++
coût d'investissement	++	+	-	-	-
coût d'entretien	+	+	++	++	++
Rapidité de mise en œuvre	+	+	+	+	-
Intégration paysagère	++	+	+	≈ (*)	+

Ø : Critère non pertinent pour la technique

≈ : Dépendant des situations

- : Non adapté

+: Moyennement adapté

++ : Bien adapté

(*) peuvent éventuellement être recouvertes à des fins de végétalisation mais cela devient très onéreux

5.2.4 Principes de dimensionnement et conditions aux limites (raccordements, contraintes par rapport aux techniques relatives aux autres fonctions...)

Les mécanismes de ruine à prendre en considération pour le dimensionnement des techniques de confortement de la stabilité au glissement d'une digue sont principalement les suivants :

- instabilités de talus à cause de pentes de parements trop fortes ;
- défaut de la capacité portante du sol de fondation se traduisant par un poinçonnement ou un basculement de l'ouvrage ;
- glissement superficiel de la protection externe (pente compatible avec la stabilité de la protection) ;
- risque d'érosion interne lié à un gradient hydraulique élevé dans le corps de digue ou le sol d'assise (voir [chapitre 3](#) sur l'étanchéité et [chapitre 4](#) sur filtration et drainage) ;

- phénomène de liquéfaction consécutif à une augmentation des sous-pressions ou une sollicitation sismique ;
- effondrements d'origine karstique ;
- claquage hydraulique.

D'une manière générale la justification de la stabilité de l'ouvrage, y compris la stabilité de la digue durant les travaux, a été évoquée au [chapitre 2.2.2](#). Pour de plus amples précisions, le lecteur est également invité à consulter les « Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai » [5-8]. Succinctement, les points suivants sont étudiés successivement lors de l'étude de la stabilité d'une digue en remblai :

- les situations de projets (normales d'exploitation, transitoires, rares de crue) : elles définissent les combinaisons d'actions et résistances prises en compte ;
- pour chaque situation de projet, les états limites de services ou ultimes (pas systématiquement tous) définissant des limites qui permettent de valider le dimensionnement sont étudiés au regard de critères de justification. Classiquement, il est recommandé de regarder les états limites suivants :
- **de glissement et de stabilité d'ensemble** (objet principal de ce chapitre) sur la base d'un calcul à l'équilibre limite se traduisant par le rapport des forces (ou moments) de glissement résistantes sur celles motrices. Le calcul est généralement réalisé au travers de la « méthode des tranches ou assimilée » (Bishop simplifiée, Spencer, Morgenstern-Price, Janbu...) ou par des calculs aux éléments finis,
- de déformation (tassement et défaut de portance) reposant respectivement sur des valeurs limites acceptables et un critère de non poinçonnement. Les calculs peuvent être réalisés analytiquement ou numériquement suivant les besoins du projet,
- de soulèvement hydraulique côté zone protégée se basant sur un équilibre entre le poids de la couche de surface (moins perméable) et les sous-pressions qui s'y appliquent,
- de résistance à l'érosion interne au travers notamment du respect des règles de filtre aux interfaces entre les sols, évoquées au chapitre 4 et liées à la granulométrie et au non dépassement de gradients hydrauliques critiques,
- de résistance à la surverse (encore au stade de la recherche), sur la base d'essais sur modèle physique (par exemple des essais réalisés pour dimensionner un déversoir de sécurité en matelas gabions [5-9]) ou d'essais JET (Jet Erosion Test) en laboratoire ou in-situ).

5.3 Réalisation

5.3.1 Études et essais préalables

Les études et essais préalables aborderont notamment, au-delà des prescriptions générales données dans le chapitre 2, les éléments suivants :

- essais de convenance des matériaux employés (sols et/ou bétons), y compris plots d'essais de compactage des matériaux de remblai ;
- protocoles de gestion des risques (instabilité de la digue, crue, matériaux non prévus dont présence de blocs, branchages...) ;
- traitement des points singuliers : réseaux enterrés, obstacles aériens, raccordement aux ouvrages existants (en complément des solutions définies à la conception).

La réalisation de plots d'essais en cas de manque de retour d'expérience et dans des contextes géotechniques particuliers peut s'avérer nécessaire. Le cas échéant, il faut laisser suffisamment de temps pour conclure sur les performances atteintes par le plot d'essai. Les essais et études préalables

peuvent permettre de préciser les performances atteintes, mais également la vitesse d'avancement. Ces plots d'essais spécifiques à chaque technique sont définis dans les fiches techniques.

5.3.2 Travaux

Voir points généraux dans le [chapitre 2](#) et points spécifiques dans les fiches techniques.

5.3.3 Nuisances/environnement

Voir points généraux dans le [chapitre 2](#) et points spécifiques dans les fiches techniques.

5.3.4 Contraintes liées à une crue ou à des travaux avoisinants au chantier

Voir points généraux dans le [chapitre 2](#) et points spécifiques dans les fiches techniques.

5.4 Suivi après travaux

Voir points généraux dans le [chapitre 2](#) et points spécifiques dans les fiches techniques.

6 Rehausse

Ce chapitre 6 est basé sur le travail du sous-groupe n°4 « Stabilité et rehausse » en association avec les animateurs du GT. Ce sous-groupe est également à l'origine de la rédaction trois fiches techniques, listées ci-dessous et qui sont disponibles dans la partie 2 (PDF) du présent document :

- FT 6.1. Rehausse de digue par mur, muret et murette
- FT 6.2. Rehausse temporaire à fondation permanente sur un linéaire de digue
- FT 6.3. Recharge/épaississement et/ou rehausse en remblai

Les membres du sous-groupe étaient :

Olivier ARTIÈRES, *TenCate Geosynthetics*

Luc BOUTONNIER, *Egis*

Caroline CHARTON, *Maia Sonnier*

Jean-Marc FLOHR, *Egis*

Jean-François FREZET, *Egis*

Guillaume HIBON, *Antea Group*

Jean-Charles PALACIOS, SAFEGE

Animateur

Sylvain PALIX, *Antea Group*

Loïc PERRET, *ESTHI*

Alexandre PLASTRE, *Maccaferri*

Jacques POUDEVIGNE, *FUGRO*

Didier RAULIN, *FUGRO*

Patrick SOULAT, *SAFEGE*

Xavier SUISSE DE SAINTE CLAIRE, *SAFEGE*

Claire VARAGNAT, *SAFEGE*

Avant de procéder à la lecture de ce chapitre 6 « Rehausse » et des fiches techniques qui en découlent, le lecteur est invité à consulter le chapitre 2 « Éléments communs à la démarche de conception d'un confortement ou d'une réparation ». Ce dernier présente en effet des éléments importants et nécessaires à la lecture du présent chapitre, qui portent notamment sur le diagnostic (objectifs, contenu, mécanisme de rupture/défaillance des digues), la conception (données nécessaires, modélisations), la réalisation chantier ou encore sur le cas des situations d'urgence. Les situations d'urgence sont abordées dans l'annexe D (section D.5).

6.1 Rehausser une digue

Ce chapitre traite de la rehausse des digues de protection en remblai. Plus encore que pour les autres fonctions traitées dans les chapitres 3, 4, 5 et 7, un projet de rehausse mettra en œuvre, dans la plupart des cas, plusieurs fonctions complémentaires à cet objectif de rehausse.

6.1.1 Fonctions principales, secondaires et/ou induites

La fonction principale d'une rehausse est **d'éviter la surverse**, en augmentant le niveau de la crête d'une digue, de manière localisée ou généralisée. Cette rehausse peut être définitive, temporaire ou provisoire. Les rehausses temporaires sont prévues pour être mises en place lors de chaque crue dépassant un certain niveau (voir la fiche technique FT 6.2 ou l'ILH tableau 6.21 [6-1]). Les rehausses provisoires sont mises en place uniquement à l'occasion d'un événement exceptionnel (des exemples

sont disponibles dans l'ILH, dans la section 6.6.1 « *Levee raising measures* » et dans les tableaux 6.19 et 6.24 [6-1]). Les rehausses provisoires et temporaires doivent également être dimensionnées hors période de crise.

Quel que soit le type de rehausse envisagé (définitive, temporaire ou provisoire), il faut que les impacts hydrauliques de cette rehausse sur d'autres parties du système d'endiguement ou sur d'autres systèmes d'endiguement aient été étudiés et qu'il n'y ait pas de risque de surverses (voire des brèches) ayant des conséquences plus graves que la surverse à l'endroit de la rehausse. Il faut particulièrement insister sur cette nécessité pour les rehausses temporaires ou provisoires. De la même manière, il est souhaitable que les rehausses sur des digues soient analysées de manière simultanées sur la totalité de chaque système d'endiguement et non tronçon par tronçon. Le Tableau 6.1, extrait du Tableau 2.1, précise la différence entre rehausse localisée et rehausse généralisée.

Tableau 6.1 Les traitements possibles des problèmes de surverse locale ou généralisée

Érosion par surverse (localisée)	• comblement des points bas : empêche la surverse aux points où elle pourrait se produire préférentiellement • renforcement de la résistance à l'érosion externe de la crête et du talus côté zone protégée : n'empêche pas la surverse mais empêche ou ralentit l'érosion consécutive
Érosion par surverse (généralisée)	• nécessite une modification du système pour gérer les surverses et créer des déversoirs ou des tronçons de digues résistants à la surverse, de manière à éviter les surverses sur les zones non résistantes [6-2]

La rehausse d'une digue peut être nécessaire lorsque :

- en un certain endroit, le niveau de la crête de digue est inférieur au niveau d'eau atteint lors de l'événement associé au niveau de protection du système, sur des tronçons résistants à la surverse ;
- le niveau de la crête de digue est inférieur au niveau de sûreté de la digue majoré de la revanche, celle-ci tenant compte des sollicitations transitoires sur la digue (par exemple le batillage), sur des tronçons non résistants à la surverse.

La Figure 6.1 présente une digue avec différents tronçons dont la crête est correctement calée et illustre également les différents niveaux qui ont été évoqués.

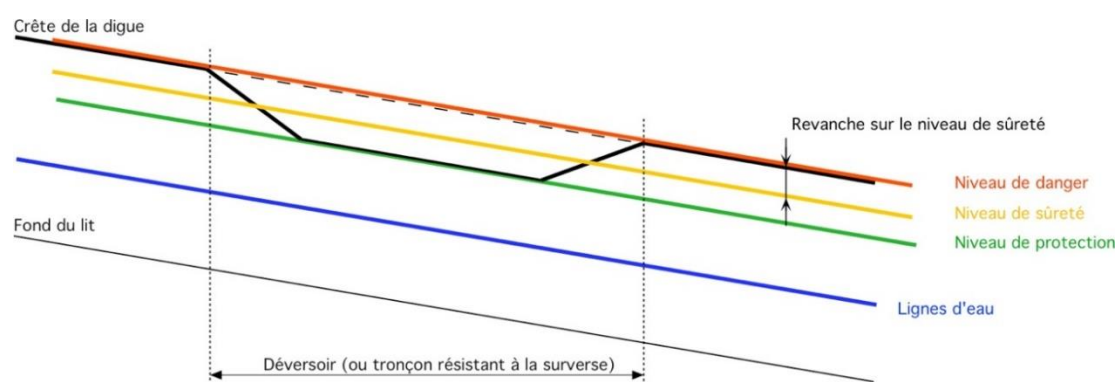


Figure 6.1 : Les différents niveaux relatifs à une digue de protection contre les inondations fluviales [6-3]

Par ailleurs, une rehausse, selon les techniques utilisées et les conditions dans lesquelles elle est employée, peut permettre la réalisation de fonctions secondaires :

- amélioration de la stabilité géomécanique de la digue (soutènement) ;
- protection contre l'érosion externe de la partie supérieure du corps de digue ;
- amélioration de l'étanchéité de la digue ;

et de fonctions complémentaires :

- reconstitution du cheminement en crête (avec ou sans élargissement) ;
- amélioration des conditions de surveillance et d'entretien (par modernisation du dispositif d'auscultation, amélioration de l'accessibilité...) ;
- aménagement paysager ;
- sécurité de la circulation en crête (piétons et/ou véhicules).

6.1.2 Problématiques techniques traitées

Pour la fonction principale de rehausse, les problématiques techniques à traiter sont les suivantes :

- un défaut local du niveau de crête sur le linéaire de digue ;
- un niveau de la cote de protection de la zone protégée insuffisant (au regard de l'évolution de l'hydrologie) ;
- des surverses/franchissements de l'ouvrage par les vagues, milieu fluvial ou maritime (paquets de mer, houle, batillage...).

Notons les problématiques techniques secondaires suivantes pouvant aussi être traitées par une rehausse :

- les effets du batillage et l'érosion de surface (liée aux vitesses d'érosion tangentielle) sur le parement côté eau ;
- une situation d'urgence nécessitant de batarder provisoirement une zone potentiellement submersible, soit selon un protocole d'alerte préétabli (cas des fermetures temporaires des accès à la rivière sur murettes anti-crue), soit pour prévenir un risque de surverse imminent (hors urgence absolue nécessitant la protection par sacs de sable ou big-bags...). Cette problématique n'est pas abordée dans le présent guide.

6.1.3 Variantes

La rehausse d'une digue peut traditionnellement être réalisée par la mise en place des solutions suivantes :

- remblais ou murettes en béton ;
- rehausse avec ou sans élargissement de l'emprise de la digue ;
- rehausse amovible : mise en place de structure support (ou de fondation) permanente.

Des variantes visant à rehausser les digues par l'utilisation de big-bags, sacs de sable ou autre conteneur géosynthétique rempli de matériaux à disposition sont provisoires et exclusivement réservées pour des travaux en urgence (et sont parfois, malheureusement, appelées à remplir la fonction de rehausse bien au-delà de la situation d'urgence). Ces variantes peuvent être utilisées sous réserve de ne pas engendrer de submersion sur un autre tronçon de digue avec potentiellement des conséquences plus graves.

6.1.4 Techniques alternatives

Toute technique visant à réduire la ligne d'eau qui sollicite la digue peut être une alternative : bassins de rétention, d'inondation, de compensation, ..., éloignement de la digue par rapport au cours d'eau / à la mer, mise en place d'épis, ... Il s'agit néanmoins de solutions de modification du système et non pas de variantes techniques sur des modifications locales de la digue (voir [6.1.1](#)).

6.1.5 Éléments additionnels

Aucun élément additionnel n'est à mentionner ici.

6.1.6 Défaillances potentielles induites

Les défaillances potentielles induites pour les rehausses sont :

- celles liées à la surélévation de la cote de l'eau et ses conséquences sur les autres portions de digues susceptibles notamment de surverser avant le tronçon rehaussé et de créer ainsi des dégâts dans certains cas plus importants ;
- plus localement au niveau des tronçons rehaussés :
- problème de la stabilité au glissement de la digue (voir Figure 6.2),
- risque d'aggravation du risque d'érosion interne (augmentation de la charge hydraulique),
- risque élevé de rupture en cas de surverse ou franchissement dans le cas de mise en place de rehausse par muret étanche si la digue en remblai n'est pas protégée côté zone protégée (voir Figure 6.3),
- aggravation des conséquences en cas de rupture par surverse.

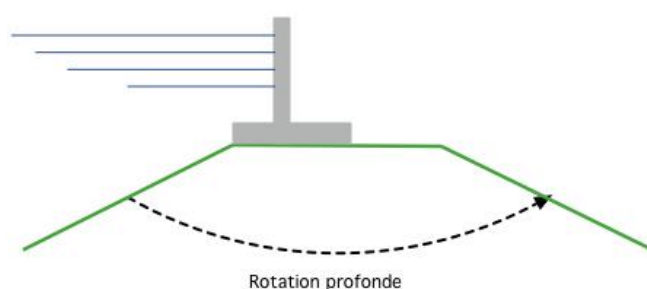


Figure 6.2 : Instabilité profonde sur une digue en remblai rehaussée par muret (NB : la digue était stable avant rehausse) (Schéma : Rémy Tourment)

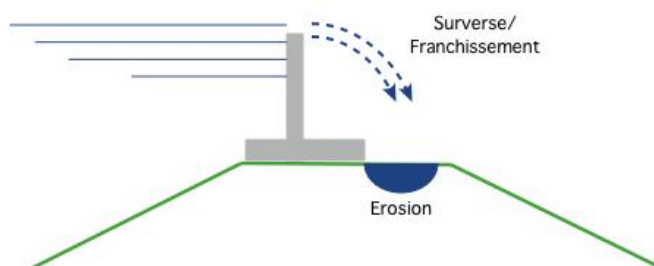


Figure 6.3 : Surverse ou franchissement sur une digue en remblai rehaussée par muret (Schéma : Rémy Tourment)

6.2 Conception

6.2.1 Recueillir les informations préalables

Dans la mesure du possible, les informations concernant l'ouvrage et son environnement doivent être préalablement recueillies ; au-delà des informations générales nécessaires à tout projet et rappelées en section 2.2 de ce guide, les éléments particuliers nécessaires à la conception de tout projet de rehausse d'une digue sont les suivants :

- caractéristiques de la sollicitation hydraulique en crue de manière à homogénéiser le niveau de protection sur la totalité du linéaire du système d'endiguement ;
- caractéristiques géomécaniques (angles de frottement, cohésions, poids volumiques et modules) des terrains en place et du remblai structural sur lequel sera implantée la rehausse ;
- contrainte admissible du sol de fondation déterminée à partir d'essais géotechniques en place type pressiomètre ou pénétromètre ;
- contexte sismique ou karstique dans la zone du projet.

D'autres informations pourront en outre être nécessaires dans le cas de techniques spécifiques ; elles sont alors détaillées dans les fiches techniques correspondantes (par exemple, capacité de stockage des équipements à proximité immédiate de la digue dans le cas de rehausse amovibles).

6.2.2 Préciser les caractéristiques attendues

Les principales caractéristiques attendues et à prendre en compte pour le projet sont les suivantes :

- niveau de crête objectif ;
- tronçon résistant à la surverse ou pas ;
- stabilité assurée de la rehausse et du remblai sur lequel elle est réalisée ;
- tassements acceptables ;
- durabilité/pérennité de la rehausse vis-à-vis des sollicitations auxquelles elle devra faire face ;
- compatibilité avec l'entretien de l'ouvrage ;
- prise en compte des usages spécifiques éventuels (circulation, loisirs...).

6.2.3 Choisir la technique (comparatif technique et financier, retours d'expériences)

Le [Tableau 6.2](#) et le [Tableau 6.3](#) suivants constituent une aide pour choisir la technique de confortement ou la technique de rehausse en abordant la question soit par les fonctions secondaires éventuellement recherchées, soit par les contraintes du projet.

Tableau 6.2 : Choix de la technique de confortement par fonction associée

	Rehausse par murette béton	Rehausse par batardeau amovible	Rehausse en remblai
Augmentation du niveau de protection contre les crues	++	++	++
Protection contre l'érosion externe de la partie supérieure de la digue	++	+	≈
Étanchéité de la partie supérieure de la digue	++	++	+
Reconstitution du cheminement de crête	++	++	+
Amélioration des conditions de surveillance et d'entretien	≈	-	+
Aménagement paysager	≈	+	++

Ø : Critère non pertinent pour la technique

≈ : Dépendant des situations

- : Non adapté

+: Moyennement adapté

++ : Bien adapté

6.2.4 Principes de dimensionnement et conditions aux limites (raccordements, contraintes par rapport aux techniques relatives aux autres fonctions...)

Les mécanismes de ruine à prendre en considération pour le dimensionnement des techniques de rehausse concernent aussi bien la rehausse elle-même que l'incidence de celle-ci sur la stabilité d'ensemble de l'ouvrage. Ce sont notamment les suivants :

- défaut de la capacité portante du sol de fondation de la rehausse se traduisant par un poinçonnement ou un basculement de l'ouvrage de rehausse ;
- glissement superficiel du talus et/ou de sa protection externe suite à la mise en place de la rehausse ;
- instabilité générale de l'ouvrage et de sa fondation : stabilité au grand glissement [6-4] ;
- risque d'érosion interne lié à un gradient hydraulique élevé dans le corps de digue ou le sol d'assise (voir [chapitre 3](#) étanchéité) ;
- risque d'érosion interne au contact rehausse/digue existante ;
- problématiques spécifiques aux extrémités du tronçon rehaussé, principalement érosion interne ou externe (cf. chapitre 8 et les travaux de FloodProBE [6-5]) ;
- sollicitations sismiques ou aléa karstique dans la zone du projet.

Tableau 6.3 : Choix de la technique de confortement par contrainte associée

	Rehausse par murette béton	Rehausse par batardeau amovible	Rehausse en remblai
Modification de la cote de protection	++	++	++
Protection contre le batillage	++	++	++
Erosion de surface	++	≈	+
Tassement du corps de digue	++	≈	++
Emprise foncière limitée	+	++	≈
coût d'investissement	+	-	++
coût d'entretien	+	-	+
Rapidité de mise en œuvre (travaux en urgence)	-	++	-
Intégration paysagère	-	-	++

Ø : Critère non pertinent pour la technique

≈ : Dépendant des situations

- : Non adapté

+: Moyennement adapté

++ : Bien adapté

6.3 Réalisation

6.3.1 Études et essais préalables

Au-delà du dimensionnement proprement dit, les études et essais préalables comprendront notamment :

- la stabilité de la digue durant les travaux ;
- les essais de convenue des matériaux employés (en particulier pour les bétons) ;
- un protocole de gestion des risques (crue, matériaux non prévus...) ;
- le traitement des points singuliers : réseaux enterrés, obstacles aériens...

6.3.2 Réalisation

Voir points généraux dans le chapitre 2 et points spécifiques dans les fiches techniques.

6.3.3 Nuisances/environnement

Voir points généraux dans le [chapitre 2](#) et points spécifiques dans les fiches techniques.

6.3.4 Contraintes liées à une crue ou à des travaux avoisinants au chantier

Contrairement à la plupart des travaux de confortement, la réalisation de la rehausse peut se faire sans contrainte forte vis-à-vis des crues dans la mesure où la digue initiale continue de jouer son rôle. Toutefois, le projet et l'organisation des travaux doivent prendre en compte les effets d'une crue éventuelle sur les installations de chantier, les voies d'accès, les zones de stockage des matériaux... qui sont à prévoir du côté zone protégée si possible. Dans le cas contraire, les prescriptions générales décrites au chapitre 2 sont à appliquer, notamment :

- arrêt de chantier en fonction du niveau atteint ;
- zone de repli du matériel ;
- réaliser les travaux par plot quand cela est possible ;
- gestion des alertes : délais et astreintes si nécessaires.

6.4 Suivi après travaux

Certaines techniques proposées demandent un entretien régulier de la végétation de manière à permettre l'examen de la surface de l'ouvrage (rehausse en gabions ou remblais techniques).

Des inspections visuelles sont à prévoir suite à des crues. Dans le cas particulier des batardeaux amovibles, des exercices de mise en place à blanc doivent être réalisés périodiquement.

7 Protection contre l'érosion externe

Ce chapitre 7 est basé sur le travail du sous-groupe n°5 « Protection externe » en association avec les animateurs du GT. En plus de la fiche « Généralités sur les palplanches », ce sous-groupe est également à l'origine de la rédaction treize fiches techniques, listées ci-dessous et qui sont disponibles dans la partie 2 (PDF) du présent document :

FT G1.	Généralités sur les palplanches
FT 7.1.	Protection externe par enrochements libres
FT 7.2.	Protection externe par enrochements liés au béton
FT 7.3.	Protection en gabions
FT 7.4.	Protections minces contre l'érosion externe
FT 7.5.	Réparation de perré maçonné
FT 7.6.	Perrés bétonnés
FT 7.7.	Protection externe par blocs artificiels
FT 7.8.	Protection externe de la digue par mise en place d'épis de protection
FT 7.9.	Protection externe par la reprise d'un mur par béton projeté
FT 7.10.	Recharge ou réserve de pied en enrochements
FT 7.11.	Palplanches de protection contre l'érosion externe en pied de talus côté eau
FT 7.12.	Protection externe de talus par technique d'enherbement
FT 7.13.	Protection externe de talus par association Génie Civil – Génie Écologique

En plus de ces fiches techniques, mentionnons qu'une fiche de cas particulièrement détaillée concernant la technique de reconstitution en eau du talus et du pied de digue côté rivière par banquette de pied en tout-venant de carrière été rédigée par le sous-groupe (voir fiche de cas FC 9).

Les membres du sous-groupe étaient :

Olivier ARTIÈRES, *TenCate Geosynthetics*

Yasmina BOUSSAFIR, *Université Gustave Eiffel*

William BRASIER, *CNR*

Bertrand CHALUS, *CNR*

Benoît CORTIER, *Hydratec*

Gérard DEGOUTTE, *CTPBOH*

Patrick LEDOUX, Cerema

Animateur

Thierry MONIER, *Artelia*

Michel PINHAS, *SYMBHI*

Gaëtan QUESNEL, *SETEC*

Éric VUILLERMET, *BRLi*

Avant de procéder à la lecture de ce chapitre 7 « Protection externe » et des fiches techniques qui en découlent, le lecteur est invité à consulter le chapitre 2 « Éléments communs à la démarche de conception d'un confortement ou d'une réparation ». Ce dernier présente en effet des éléments importants et complémentaires à la lecture du chapitre 7, qui portent notamment sur le diagnostic (objectifs, contenu, mécanismes de rupture/défaillance des digues), la conception (données nécessaires, modélisations), la réalisation chantier ou encore sur les différentes situations d'urgence. Les situations d'urgence sont abordées dans l'annexe D (section D.4).

7.1 Pourquoi réaliser ce type de confortement ?

7.1.1 Fonctions principales, secondaires et/ou induites

La « protection contre l'érosion externe » regroupe les composants structurels d'une digue dont la fonction principale est la résistance à l'érosion externe vis-à-vis de l'action de l'eau ou d'autres agents tels que : animaux fouisseurs, racines, actions anthropiques, embâcles, ... Cette protection peut concerner aussi bien la digue que sa fondation et/ou les berges (pour les digues proches du lit mineur ou de la mer) voire même le terrain naturel côté zone protégée (pour les tronçons de digue résistants à la surverse ou soumis au franchissement de manière régulière).

La protection contre l'érosion externe peut, selon les techniques utilisées et les conditions dans lesquelles elles sont employées, contribuer à d'autres fonctions :

- stabilité mécanique de l'ensemble de l'ouvrage ;
- étanchéité de la digue (par exemple enrochements liés, perrés, ...) ;
- drainage (par exemple gabions).

Il est à noter cependant que, dans certains cas, la ou les fonctions secondaires d'une protection externe n'auront peut-être pas la même pérennité en termes de performance que la fonction principale. Par exemple, considérer qu'un perré maçonné a une fonction complémentaire d'étanchéité nécessite un entretien continu dans le temps dudit perré, ce qui est très contraignant et peut sembler non garanti sur le long terme. Les défauts de joints ou même l'absence de moellons, quelques fois observés lors du vieillissement de l'ouvrage, pourront alors à terme conduire à des défauts d'étanchéité de l'ouvrage.

7.1.2 Quels sont les problèmes traités ?

L'érosion externe regroupe tous les mécanismes qui provoquent un départ de matériaux sous l'effet de sollicitations s'appliquant sur la surface extérieure de la digue. Ces mécanismes sont :

- surverse de la crête ;
- effets du courant sur la digue :
 - affouillement (érosion de la fondation et/ou du pied de digue),
 - érosion du talus ;
- impact des vagues :
 - direct (côté eau),
 - par franchissement (crête, côté zone protégée) ;
- passages répétés (humains, animaux, d'engins ...) ;
- impacts accidentels (glace, arbres, navigation, ...) ;
- ruissellement des eaux météoriques.

La Figure 7.1 illustre les mécanismes d'érosion externe liés à la surverse ou au franchissement d'une digue.

Le départ de matériaux sous les mécanismes d'érosion externe induit une diminution du volume de la digue, qui se manifeste par une diminution de sa section et/ou un raidissement local du talus, ce qui conduit à diminuer la résistance de la digue à différents mécanismes (glissement, effondrement, érosion interne...).

L'érosion externe par l'eau "contenue" par une digue touche régulièrement le parement côté eau ou mer et, pour des situations hydrologiques généralement moins fréquentes, la crête et le talus côté zone protégée qui peuvent être soumis à la surverse ou aux franchissements. L'érosion externe peut

être, dans une moindre mesure, la conséquence d'agressions météorologiques (pluie, vent, gel) ou autres (humains, animaux, accidents...).

La protection externe permet soit d'éviter le contact entre le corps de digue et l'agent érosif soit de limiter les effets de ce contact. Les agents érosifs généralement rencontrés dans le domaine des digues sont les suivants, selon les parties de l'ouvrage :

- crête et/ou risbermes de l'ouvrage :
- les écoulements en surface par surverse, par ravinement liés à la pluie,
- les passages répétés de personnes, d'animaux, d'engins divers ;
- talus côté eau :
- les écoulements fluviaux ou maritimes (liés à la houle ou à la marée),
- les embâcles (glace et autres solides transportés par certains cours d'eau)
- les effets des vagues et du clapot : impact direct des vagues, impact du franchissement, batillage par action du vent ou de la navigation ;
- talus côté zone protégée :
- les écoulements en surface par surverse, par ravinement liés à la pluie,
- les passages répétés de personnes, d'animaux, d'engins divers.

La protection externe peut également atténuer les phénomènes liés à la dessiccation du corps de digue et des zones argileuses (risque lié au retrait-gonflement). Elle peut aussi constituer une barrière dissuasive pour les animaux fouisseurs.

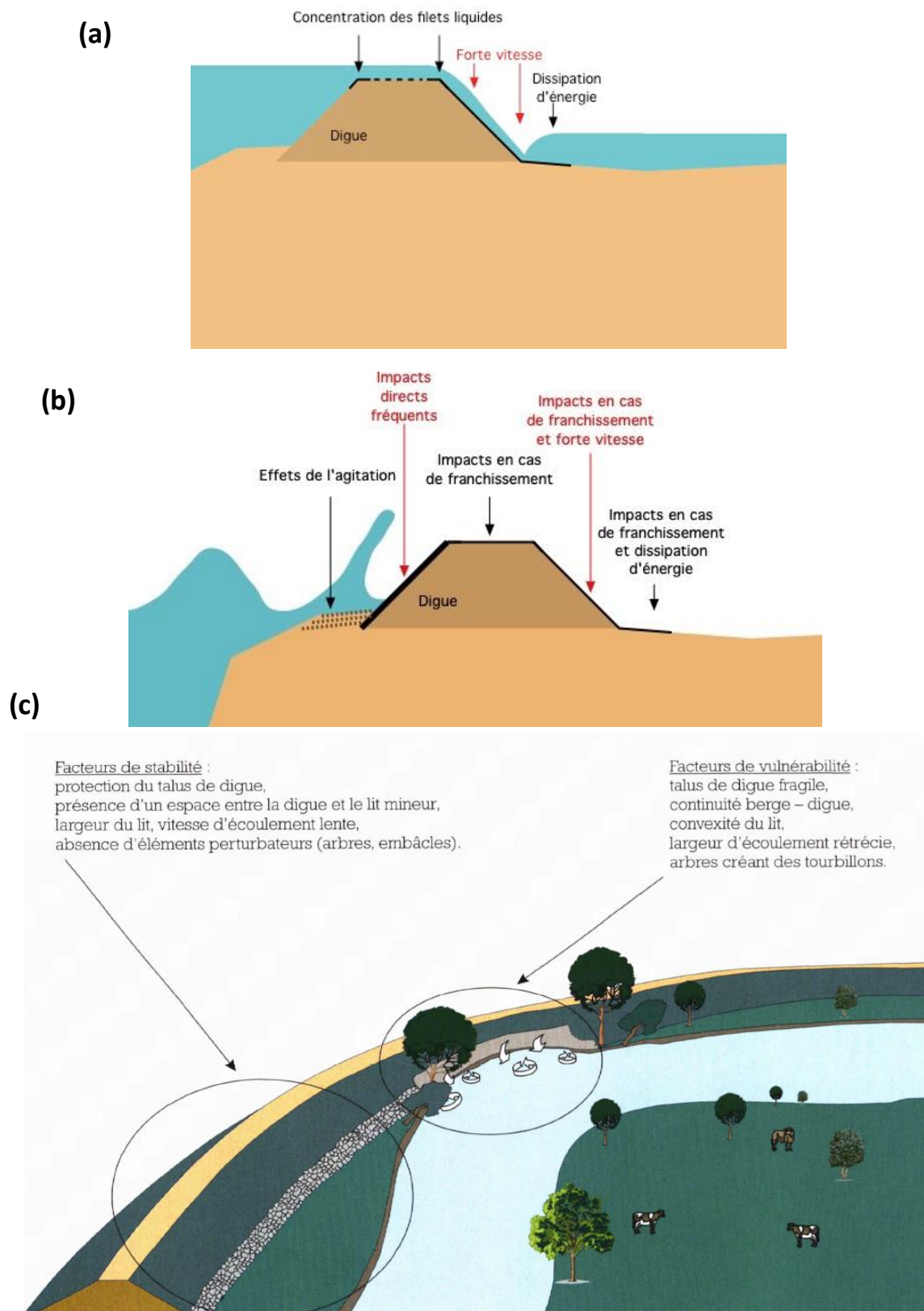


Figure 7.1 : Parties d'une digue sollicitée en cas de surverse (a), de franchissement (b) et d'érosion de courant (c). L'épaisseur des traits sur les (a) et (b) indique l'importance relative des sollicitations (Schémas a et b par Rémy Tourment ; c [7-1])

7.1.3 Techniques alternatives

Les techniques alternatives ou complémentaires (non exclusives les unes des autres) à de la protection contre l'érosion externe visent à diminuer les sollicitations hydrauliques. Ce sont :

- le recul des digues du lit mineur ou de la mer ;
- l'adoucissement de la pente des talus [7-2];
- la végétalisation (arbres, arbustes) de l'espace entre le lit mineur et la digue ;
- la protection voire l'engraissement du lit mineur à proximité des berges, par exemple à l'aide d'épis ;
- la réalisation d'épis de protection par enrochements (cette technique fait l'objet d'une fiche technique et d'une fiche de cas) ;
- la réalisation de seuils en rivière ou de brises lame en littoral ;
- l'engraissement de l'estran ;
- la création de risberme(s) pour ralentir les vitesses de ruissellement sur les talus de hauteur importante.

En plus des techniques de revêtement de protection présentées dans les différentes fiches "technique", un certain nombre d'alternatives sont possibles pour permettre de résister à l'érosion externe, la réalisation d'une recharge ou la substitution d'une partie de l'ouvrage par des sols traités à la chaux (en association ou non avec des liants hydrauliques) est une technique récemment testée sur un ouvrage expérimental, comme évoqué au 5.1.3.2 [7-3 ; 7-4].

Les résultats montrent que traitement d'un sol fin à la chaux vive (seule) permet d'améliorer, en plus de la résistance à l'érosion externe et à l'érosion interne, ses performances mécaniques (portance, résistance à la compression, à la traction, au cisaillement). Il est cependant important de préciser que, selon le mode de réalisation des sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques et le contexte d'utilisation, ceux-ci peuvent être sujets à une fissuration parfois importante : fissuration de retrait, comportement fragile sous les sollicitations mécaniques, comportement rigide face aux tassements différentiels du sol support... Les connaissances actuelles ne permettent pas d'évaluer l'évolution et les conséquences de cette fissuration et les solutions de réparation d'un sol traité qui serait fissuré ne sont pas encore identifiées. Enfin, la connaissance des propriétés de l'interface entre le sol support non traité et le sol traité, des écoulements et des phénomènes qui en résulteraient pouvant se produire au niveau de cette interface ne sont pas encore maîtrisées (gradient hydraulique, soulèvement hydraulique, érosion interne régressive, de contact ou concentrée...). Le retour d'expérience demande donc à être poursuivi.

7.1.4 Techniques complémentaires (fondations, transitions...)

Les digues de protection contre les inondations, qu'elles soient situées à proximité du lit mineur d'une rivière ou en bord de mer, sont plus régulièrement sollicitées en pied de digue que sur la partie haute. Sur de tels ouvrages, il est donc absolument nécessaire de mettre en œuvre une protection contre l'érosion externe au niveau de la fondation et/ou de la berge. Cette protection peut être effectuée avec les mêmes techniques que pour les talus et disposée à l'extérieur ou être enterrée. La technique présentée dans la FT 7.11 est particulièrement adaptée.

De manière générale, il est important voire essentiel que sous un revêtement de protection, une ou des couches filtre soient présentes. Si le revêtement est en matériau meuble (terre végétale enherbée, enrochements libres...) la problématique de filtration entre couches granulaires est classique (voir [chapitre 4](#)). Dans le cas où le revêtement est rigide, l'application des règles de filtre est malgré tout souhaitable car les joints peuvent vieillir, se dégrader et laisser échapper du matériau sous le revêtement (sous-cavage).

7.1.5 Éléments additionnels

Aucun élément additionnel n'est à mentionner ici.

7.1.6 Défaillances potentielles induites

Les digues peuvent mal vieillir à long terme si elles ne sont pas entretenues régulièrement. C'est particulièrement le cas pour les composants de la protection externe qui sont par définition mis en place dans des endroits fortement sollicités. Différentes dégradations peuvent se produire. Par exemple pour :

- les bitumes : fissures, affaissement, effondrement ;
- les enrochements : descente dans le talus, modification de la blocométrie (effet du gel, érosion chimique, chocs, usures, etc.), départ de blocs notamment en pied de talus (modification de la forme) ;
- les maçonneries : vieillissement des moellons ou plus fréquemment du liant, mais aussi parfois une dégradation des matériaux support ;
- tous les types : dégradations liées au développement de la végétation (tout type de végétation).

Sans intervention, différents stades de dégradation peuvent donc être successivement observés, auxquels correspond un degré de risque associé :

- risques modérés :
 - dégradation progressive des états de surface,
 - perte d'étanchéité (si cette fonction n'est pas essentielle),
- risques forts :
 - érosion du corps de digue, ce qui est peut être encore plus grave si l'érosion concerne un organe de contrôle des flux (étanchéité, drainage),
 - mise en charge hydraulique du talus aval (si la protection dégradée jouait également le rôle d'étanchéité),
 - affaissement du talus côté eau ou de la crête de digue,
 - affaissement ou éboulement du talus côté zone protégée,
 - rupture du parement côté eau ;
- risques graves :
 - rupture localisée par glissement du talus côté eau,
 - rupture localisée par glissement du talus côté terre,
 - brèche.

L'érosion externe côté eau conduit rarement à la formation d'une brèche à elle seule, mais elle favorise les autres mécanismes de dégradation et de rupture et est donc souvent à l'origine des scénarios de formation de brèche.

7.2 Conception

7.2.1 Recueillir les informations préalables

Les informations préalables permettant la conception de la protection contre l'érosion externe concernent l'ouvrage et son environnement. De nombreux éléments de conception sont communs à l'ensemble des techniques abordées dans ce guide et le lecteur est invité à consulter la [partie 2.2.1](#) pour en prendre connaissance. Seules les éléments techniques spécifiques et/ou particulièrement

importants à la conception d'une protection externe ainsi que les éléments qui influencent le choix d'une technique seront abordés ici :

- géométrie des surfaces à protéger ;
- caractéristiques géotechniques essentielles de ces surfaces (granulométrie, paramètres de résistance au cisaillement...) ;
- contraintes hydrauliques ;
- morphodynamique (qui pourra jouer sur l'évolution à terme des contraintes hydrauliques et de la géométrie de l'environnement).

Cependant, de nombreuses contraintes vont guider le choix d'une technique de protection externe plutôt qu'une autre :

- les emprises disponibles ;
- les autres usages de la digue (transport, loisirs ...) et son environnement immédiat ;
- le délai disponible pour les travaux (le choix de la technique de protection influant fortement sur la durée du chantier) ;
- la faune et flore du site ;
- la protection externe étant en contact direct avec le milieu naturel, les contraintes environnementales et les exigences paysagères d'intégration dans le milieu peuvent conduire à écarter certaines techniques.

Il est également à noter que les actions de confortement et de réparation sont indissociables d'une concertation à mener par les maîtres d'ouvrage avec les différents partenaires (DREAL, OFB, DDT(M)...), et à plus forte raison si le site présente de fortes contraintes environnementales ou si des objectifs sociaux s'y ajoutent.

D'autres informations pourront en outre être nécessaires dans le cas de techniques spécifiques ; elles sont alors détaillées dans les fiches techniques correspondantes.

7.2.2 Préciser les caractéristiques attendues

Concernant la fonction principale de protection externe, les caractéristiques attendues pour le revêtement de protection correspondent à une résistance (Tableau 7.1) vis-à-vis des contraintes hydrauliques suivantes :

- vitesses d'écoulement (latérales le long du talus côté eau) ;
- vitesses d'écoulement en cas de surverse ;
- vitesses de ruissellement des eaux de pluie sur les talus ;
- marnage ;
- transport solide ;
- impact des vagues dues au vent ou aux états de mer (houle, surcote, déferlement, ...) ;
- impact des franchissements ;
- turbulences liées à la navigation ;

Des caractéristiques supplémentaires, liées aux évolutions morphologiques du lit ou du littoral, peuvent également être définies lors de la conception d'un ouvrage de protection contre l'érosion externe.

Pour remplir pleinement sa fonction de protection, le revêtement devra aussi offrir une résistance aux autres agresseurs potentiels, listés ci-dessous :

- les conditions climatiques (gel ou sécheresse) ;
- les activités anthropiques (circulation de personnes, d'engins) ;
- la flore et la faune (circulation d'animaux, animaux fouisseurs...).

De plus, la protection externe correspondant à la partie visible de la digue, cette dernière pourra devoir répondre à des objectifs d'intégration environnementale (visuelle ou écologique).

Enfin, dans le cas où l'ouvrage de protection externe a vocation à remplir d'autres fonctions (secondaires et/ou induites) que celle de protection, le lecteur est invité à consulter les chapitres qui y sont associés afin de connaître les caractéristiques supplémentaires de l'ouvrage qui seraient attendues :

- étanchéité de la digue **au chapitre 3** ;
- drainage **au chapitre 4** ;
- stabilité au glissement de l'ouvrage **au chapitre 5**.

7.2.3 Choisir la technique (comparatif technique et financier, retours d'expériences)

Le Tableau 7.1 et le Tableau 7.2 suivants constituent une aide pour choisir la technique de protection en abordant la question en fonction des contraintes du projet, ou des fonctions secondaires éventuellement recherchées.

7.2.4 Principe de dimensionnement

Pas de spécifications générales, le lecteur est invité à se reporter à chaque fiche technique ainsi qu'aux documents suivants :

- Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crue du CFBR [7-5] ;
- Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai du CFBR [7-6] ;
- Manuel EurOtop sur le franchissement des vagues [7-7] ;
- Guide Enrochement – Utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques du CETMEF [7-2] ;
- Manuel de l'USACE sur l'ingénierie côtière [7-8].

7.3 Réalisation

7.3.1 Études et essais préalables

Voir points généraux dans le [chapitre 2](#) et points spécifiques dans les fiches techniques.

7.3.2 Réalisation

Voir points généraux dans le [chapitre 2](#) et points spécifiques dans les fiches techniques.

7.3.3 Nuisances/environnement

Voir points généraux dans le [chapitre 2](#) et points spécifiques dans les fiches techniques.

7.3.4 Contraintes liées à une crue ou à des travaux avoisinants au chantier

Voir points généraux dans le [chapitre 2](#) et points spécifiques dans les fiches techniques.

7.4 Suivi après travaux

7.4.1 Récolement

Voir points généraux dans le [chapitre 2](#) et points spécifiques dans les fiches techniques.

7.4.2 Suivi de l'ouvrage réalisé

Une inspection visuelle régulière et détaillée (selon la technique utilisée) est particulièrement importante pour garantir la pérennité des dispositifs de protection contre l'érosion externe. Un entretien régulier est également important, sans attendre que les désordres évoluent vers des détériorations préjudiciables.

Tableau 7.1 : Indications de valeurs de tensions tangentielles pour différents matériaux en N/m²

Matériaux	Limites de force tractrice (tensions tangentielles) en N/m ²
Géosynthétique anti-érosif, bionattes	80 à 180
Perré /enrochement, selon la taille	70 à 300
Géomatelas renforcés ou tapis antiérosif renforcés avec remplissage de fibres - pour des sollicitations < 60 h - pour des sollicitations < 24 h	180 à 300 400 à 670
Matelas gabions	250 à 500

Tableau 7.2 : Choix de la technique de protection en fonction des contraintes principales et fonctions secondaires du projet

Choix de la technique de protection :		Enherbement	Association GC – GE	Enrochements libres	Enrochements liés	Sacs et tubes géotextiles	Gabions cages	Protection mince	Perré maçonné	Perré béton	Blocs artificiels	Reprise en béton projeté	Recharge de pied	Palplanches
Par contrainte	Forte vitesse tangentielle		+	+	++	++	++	+	++	++		+	+	++
	Fond mobile		+	+	+	+		+			+		++	+
	Vague et état de mer			+	+	+			+	+	+		++	
	Surverse		+	+		+	+	+		+				
	Emprise foncière				+	+	+							+
	Faible coût d'investissement	++	+	+		+						+	+	
	Faible coût d'entretien			+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
	Rapidité de mise en œuvre			+		+							+	
	Flexibilité du support		+	+		++		+			+		+	+
	Intégration paysagère architecturale	+	+						+					
	Animaux fouisseurs et végétation			+	+	+	++	++	++	++		++		++
Par fonction secondaire	Stabilité au glissement		+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	
	Soutènement			+	+	+					+		+	
	Para-affouillement		+	+	+		+			+		++	+	
	Étanchéité							+	+		+		+	
	Drainage		+	+		+	+					+		
	Rehausse de l'ouvrage				+						+		+	
	Travaux en urgence		+		+					+		+		
	Augmentation de la débitance							+	+				+	

8 Transitions, dont ouvrages inclus ou traversants

Ce chapitre 8 est basé sur le travail du sous-groupe n°6 « Ouvrages traversants et transitions », pour la partie relative aux ouvrages traversants, en association avec les animateurs du GT. Les différentes fiches "technique" prévues sur les ouvrages traversants n'ont pas pu être achevées à temps pour cette édition du livrable, il est prévu de les intégrer à une prochaine version. Le GT a néanmoins produit quatre fiches de cas, relatives aux transitions et aux ouvrages traversants :

- FC.6. Renforcement de corps de digue des zones de non-recouvrement du val d'Orléans par technique de mélange en place sur les communes de Guilly et Sigloy (45) – Plan Loire Grandeur Nature
- FC.10. Confortement des digues des Amidonniers/Sept-Deniers (Digues D12, D13 et D14) – Raccordement entre le nouveau parement béton des digues en remblai et une digue type mur béton – Toulouse (31)
- FC.11. Travaux spécifiques au droit d'une zone de transition pour raccorder un écran étanche sur la digue de la Blanchisserie et l'ouvrage hydraulique de l'ancienne écluse de la Jonction – NEVERS (58)
- FC.12. Reconstruction après démontage d'un tronçon de digue du val d'Orléans – Commune de Saint-Pryvé - St-Mesmin (45)

Les membres du sous-groupe étaient :

Luc BOUTONNIER, *Egis*

Jean-François FREZET, *Egis*

Jean-Marc FLOHR, *Egis*

Vincent GILI, *DDT Haute-Garonne*

Thibault MALLET, *Symadrem*

Animateur

Mathieu Monaco, *DREAL Centre Val de Loire*

Matthieu NORMAND, *Egis*

Anthony ROST, *DDT Nièvre*

Akim SALMI, *ISL*

Patrick SOULAT, *Safège*

Ce chapitre 8 est aussi écrit sur la base des travaux antérieurs sur cette problématique. Dans cette première version du document, cette problématique n'est abordée qu'à travers ce chapitre de généralités. Une deuxième version du document est envisagée à court terme (de l'ordre d'un an après la finalisation de cette version), elle contiendra des fiches techniques et une mise à jour de ce chapitre.

8.1 Problématiques liées aux transitions

8.1.1 Les transitions

Dans le domaine de l'ingénierie des digues et des barrages, une **interface** est la limite entre deux couches de matériaux différents (sol A / sol B ou sol / matériau rigide ou revêtement A / revêtement B). Les **interfaces** peuvent être le lieu et la cause de défaillances potentielles, dues par exemple à de l'érosion de contact entre deux couches de sol (par exemple entre une couche perméable et l'autre imperméable) ou à de l'érosion de conduit dans un vide qui s'est développé entre un sol et un

composant rigide. La limite d'une réparation ayant donné lieu à un déblaiement, voire une ouverture globale de la digue, correspond aussi à une **interface**.

Dans les digues de protection (et peut-être aussi dans des barrages anciens), il existe de très nombreux interfaces ou zones de contact qui sont souvent à l'origine de problèmes. Ces interfaces ont été désignées au niveau international sous le nom de **transitions**, entre autres au cours du projet européen FloodProBE et dans l'International Levee Handbook ; par continuité, c'est le nom que nous adoptons dans le présent chapitre.

Dans de très nombreux cas, les **transitions** sont mal (voire pas du tout) connues, ont été construites indépendamment de la digue elle-même et généralement, en raison de leur histoire, mal conçues et/ou mal réalisées. Les digues comprennent également, étant donné leur longueur importante, beaucoup plus d'interfaces et de **transitions** qu'un barrage et celles-ci contribuent donc à un degré plus élevé au risque de rupture. Le projet de recherche européen FloodProBE [8-1 ; 8-2] a produit une typologie de ces **transitions**, présentée plus loin sur la Figure 8.1. Cet organigramme, en plus de la typologie des **transitions**, présente également les modes de défaillance potentiels associés à chaque type de **transition**.

De nombreuses transitions concernent des **ouvrages inclus ou traversants**, telles que des canalisations ou autres structures rigides. Les canalisations **traversantes**, compte tenu de leur nombre et des problématiques spécifiques (voir [8.4.1](#)), présentent une large proportion de l'ensemble des problèmes liés aux transitions.

8.1.2 Modes de rupture liés aux transitions

L'analyse des modes de rupture potentiels d'une digue est complexe, d'autant que les ruptures peuvent être la conséquence d'une succession de mécanismes d'endommagement interconnectés, affectant les différents composants et fonctions associées de la digue (voir [2.1.2](#)). Néanmoins, il est connu, sur la base de nombreux retours d'expérience, que les ouvrages inclus ou traversants et les transitions constituent des points faibles dans les digues, à tel point qu'on a pu estimer que les ruptures de digues par érosion sont, pour environ la moitié, initiées au droit des ouvrages inclus ou traversants et des transitions [8-1].

Si, dans la plupart des cas de rupture liés à une transition, ce sont des mécanismes d'érosion interne qui mènent à la rupture de l'ouvrage, il faut avoir en tête que d'importants phénomènes d'érosion externe peuvent aussi prendre place au droit des transitions, qui présentent souvent des géométries particulières et peuvent mener à une augmentation locale des courants ou à des écoulements turbulents importants... Par ailleurs, les transitions peuvent également, dans une moindre proportion, mener à des ruptures par instabilité.

Les zones de contact entre le remblai de la digue et une structure rigide sont des zones d'écoulement préférentielles, où peut se développer entre autres de l'érosion de conduit. Les canalisations traversantes peuvent elles-mêmes initier des problèmes d'érosion très spécifiques (par exemple, une fuite de l'intérieur vers l'extérieur pour les conduites en charge ou de l'extérieur vers l'intérieur pour les conduites à surface libre).

Une digue de protection, de par son linéaire important, comporte forcément de nombreux ouvrages traversants ou de transitions. En plus des problèmes intimement liés aux ouvrages traversants et aux transitions évoqués ci-dessus, le diagnostic et la conception/réalisation de travaux de confortement/réparation sur une telle digue est d'autant plus difficile que :

- les ouvrages traversants et les transitions en place présentent de nombreuses incertitudes liées à leur :
 - présence même dans la digue,
 - géométrie,
 - conception initiale,
 - construction,
 - état actuel,
 - historique ;
- les zones de transitions ont très souvent été négligées et non prises en compte dans les phases de conception d'origine.

C'est alors en phase travaux, après ouverture de fouilles/réalisation des terrassements, que le concepteur se retrouve confronté à ces problématiques. Trop souvent, il est amené à traiter ces zones sans en avoir une vision claire et d'ensemble.

8.2 Typologie des transitions

Le projet de recherche européen FloodProBE [8-1] a réalisé une typologie des transitions, présentée dans la Figure 8.1. Cette figure, en plus de présenter cette typologie, donne aussi des éléments concernant les modes de défaillance éventuels de chaque type de transition. Voici, listées ci-dessous, quelques exemples de transitions existantes sur les digues :

- structures enterrées :
 - conduites,
 - réseaux ;
- structures semi-enterrées :
 - buses,
 - portes, passages batardables,
 - bâtiments,
 - escaliers,
 - trous d'homme / regards de visite,
 - piles de ponts ;
- structures externes :
 - revêtement de surface,
 - routes/rails,
 - murs de rehausse ;
- changement du type de digue ou de la structure :
 - contact latéral entre une digue en remblai et un mur anti-inondation,
 - contact entre différents tronçons de digue en remblai ayant des sections en travers différentes,
 - contact entre la digue et le terrain naturel (extrémités, fondation) ;

Les transitions peuvent donc être de différentes natures :

- contact entre deux tronçons d'une même digue, différents de par leur géométrie, leur nature ou leur revêtement (interface entre deux segments de digues faits de remblais différents, passage d'une digue en remblai à un mur anti-inondation...) ;
- contact de la digue avec le terrain naturel ;
- interface entre la digue et son revêtement ;

- interface entre la digue et une éventuelle rehausse ;
- contact entre le remblai de la digue et une structure linéaire, traversante ou longitudinale ;
- contact entre le remblai de la digue et une structure non-linéaire.

La nature de la transition va avoir une influence directe sur les problématiques que cette dernière va générer sur la digue.

Dans le contexte de ce document, une structure (rigide) est n'importe quel type d'objet solide (bâtiment, tuyau, regard, ...) par opposition à un remblai tel une digue. Un revêtement (ou un revêtement de protection) est une couverture extérieure de la digue sur l'un de ses côtés, la recouvrant totalement ou partiellement, pour la protéger contre l'érosion externe et éventuellement d'autres types d'agression.

Principaux types de transitions, problèmes associés potentiels et solutions possibles

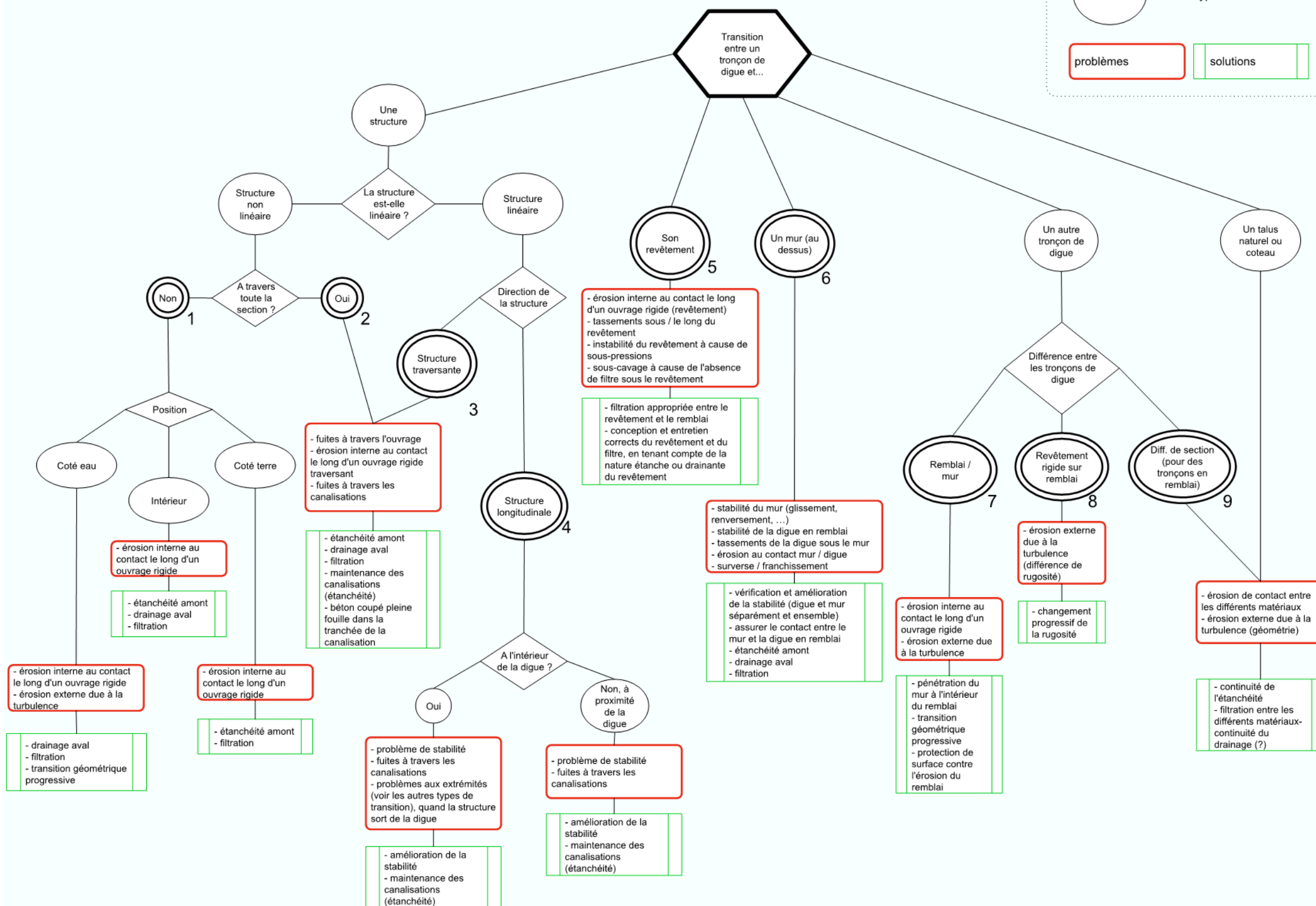
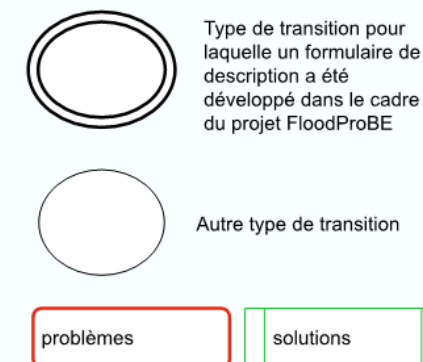


Figure 8.1 : Typologie des transitions, problèmes associés et solutions potentielles [8-1]

8.3 Les mécanismes de dégradation et de rupture au droit des ouvrages traversants et/ou des transitions

Dans la section 8.1, sont évoqués les risques de rupture liés aux transitions. Dans cette partie, ces phénomènes seront décrits de manière plus détaillée, et un exemple de scénario de brèche sera également donné.

8.3.1 Érosion interne au droit d'un ouvrage traversant ou d'une transition

Le rôle précis des mécanismes d'érosion interne qui peuvent prendre place au niveau des transitions – et entre autres des ouvrages traversants – sur la dégradation des digues est relativement mal connu. Principalement parce que ce sont des phénomènes non visibles jusqu'à ce qu'une brèche apparaisse sur la digue. Dans ce cas alors, l'endommagement de la digue est tel qu'il masque l'étendue du phénomène d'érosion interne qui a pris place auparavant. Des indicateurs d'érosion interne (écoulement d'eau, éventuellement chargée, par exemple) peuvent parfois être observés avant l'apparition d'une brèche, sans que ce soit systématiquement le cas.

Le contact entre le remblai de la digue et une structure rigide, qu'elle soit traversante (buse, conduite...) ou non (mur anti-inondations, mur de rehausse, regard ou bâtiment...) doit être étudié, conçu et réalisé avec soin car il pourra être le lieu de tassements différentiels et/ou d'écoulements préférentiels pouvant alors avoir comme conséquence l'initiation de mécanismes d'érosion interne, érosion de conduit le plus souvent en présence d'un vide créé entre le remblai et la structure rigide, les autres mécanismes d'érosion interne restant possibles.

De plus, les quatre mécanismes d'érosion interne aujourd'hui identifiés (érosion de contact, érosion de conduit, érosion régressive, suffusion) peuvent œuvrer concomitamment avant l'apparition d'une brèche. L'érosion de contact peut se produire par exemple au contact entre deux tronçons de digue en remblai constitués de matériaux différents (un matériau grossier/perméable et un matériau fin/peu perméable), ou au contact d'un tronçon de digue avec le terrain naturel (aux extrémités, ou sur la fondation, ou avec du remblai posé sur la digue postérieurement à sa construction). L'érosion de conduit peut se produire au contact entre du remblai et une structure ou canalisation incluse ou traversante. L'érosion régressive comme la suffusion peuvent être facilitées par une circulation préférentielle le long d'une zone de transition ou d'un ouvrage, ou par un raccourcissement du chemin hydraulique dû à un des autres modes d'érosion interne évoqués précédemment.

8.3.2 Érosion externe en lien avec une transition

De nombreux types de transition, comme par exemple la transition entre un tronçon de digue en remblai et une structure rigide (mur de rehausse, mur anti-inondation) ou le changement sur une digue entre un parement enherbé et un perré maçonné, sont des zones de vulnérabilité à l'érosion externe. Localement, la géométrie complexe de ces zones entraîne une augmentation des vitesses des courants de surverse et des écoulements parfois fortement turbulents.

De manière non exhaustive, les mécanismes d'érosion externe s'appliquant à des transitions sont les suivants :

- une érosion de surface due à des écoulements locaux turbulents causés par une géométrie de l'ouvrage de transition particulière ;
- une érosion de surface localisée à l'interface même entre deux tronçons de digue, qui peut constituer une zone de ruissellement préférentielle ;
- un affouillement qui peut s'initier au niveau de la transition (voir partie [8.4.3](#)).

8.3.3 Instabilités en lien avec des transitions

Bien que, en lien avec la présence d'une transition dans une digue, les mécanismes d'érosion soient prépondérants par rapport aux mécanismes d'instabilité, ces derniers ne sont pas à exclure.

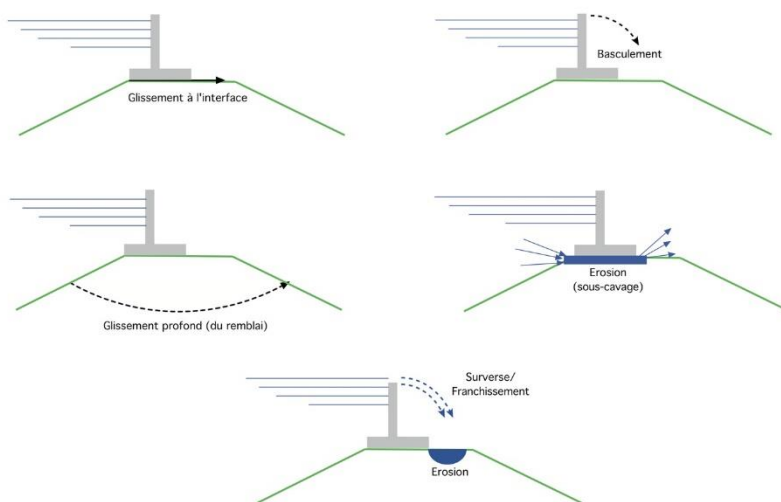


Figure 8.2 : Modes de dégradation et de rupture liés à une rehausse par mur d'une digue en remblai (schémas R. Tourment)

Par exemple, la construction d'un mur de rehausse (stable en lui-même) sur un tronçon de digue en remblai qui était initialement stable peut rendre le remblai sous-jacent instable (voir figure 8.2 « glissement profond »). De manière plus générale, ce type de rehausse, réalisé par le passé, a pu être conçu de manière empirique et ainsi donner lieu à d'autres types d'instabilité ou des modes de rupture plus classiques (Figure 8.2) : instabilité du mur, érosion de contact, érosion par surverse du remblai non protégé (dans ce cas, l'érosion sera beaucoup plus rapide qu'avant la rehausse).

D'autres types d'instabilité liés à des transitions sont possibles, pouvant conduire à des glissements d'ensemble, comme par exemple :

- l'existence d'un ouvrage inclus dans une digue mais relativement léger car "vide", par exemple un regard de vannes ;
- une canalisation longitudinale posée dans une tranchée remblayée par du sable en pied côté ZP ;
- etc.

8.3.4 Exemple de scénario de brèche

Le mode de rupture initiateur de la brèche est l'érosion de conduit (Figure 8.3) dans un vide le long d'un ouvrage traversant la digue. Ce vide n'est pas forcément traversant au moment de la mise en charge de la digue mais il peut le devenir après claquage hydraulique du débouché du conduit (ou débouillage).

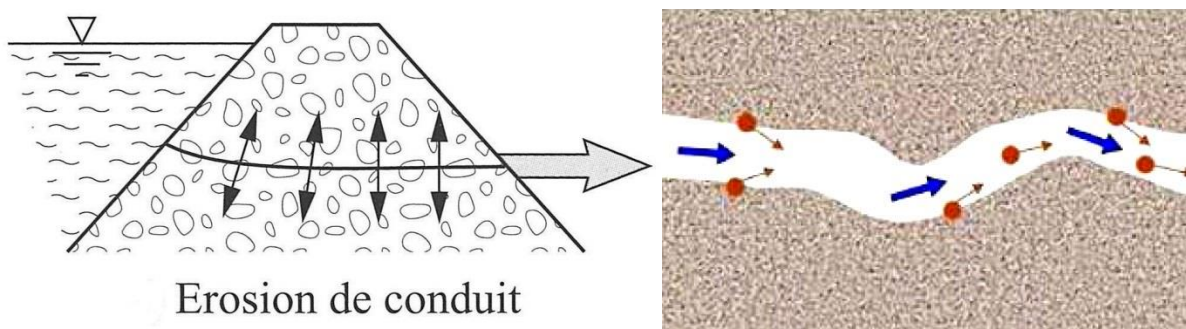


Figure 8.3 : Illustration de l'érosion de conduit (schéma de gauche S. Bonelli, schéma de droite de R. Beguin)

Pour l'exemple donné, l'origine du vide au niveau d'un ouvrage traversant peut être le suivant :

- défaut de compactage autour de l'ouvrage ;
- écoulement préférentiel le long de l'ouvrage traversant, lié à un défaut d'étanchéité de l'ouvrage traversant (fuite, vieillissement de l'ouvrage, manque d'entretien ou tassement différentiel).

Plusieurs scénarios d'érosion de conduit peuvent alors être envisagés (Figure 8.4) :

- érosion le long de la conduite depuis le fleuve ;
- érosion le long de la conduite depuis la base de la digue.

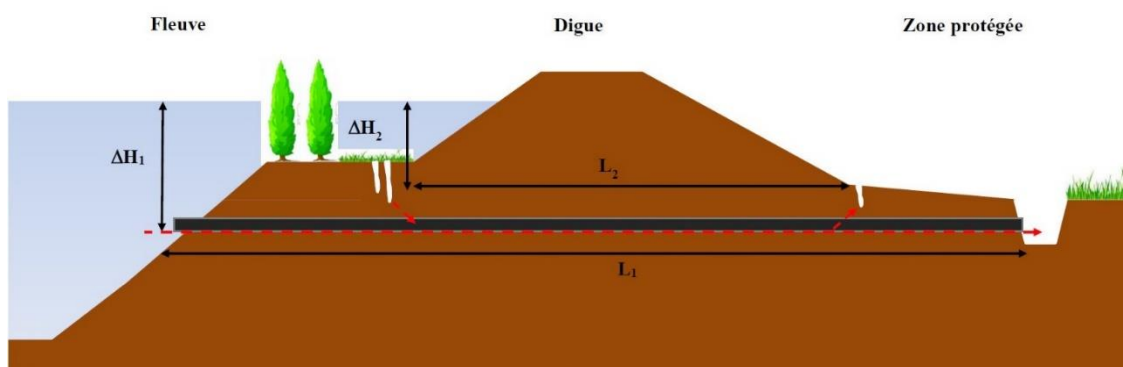


Figure 8.4 : : Scénario de brèche lié à l'érosion de conduit le long d'un ouvrage traversant la digue (Source : SYMADREM)

Le scénario de brèche peut ensuite être décrit par les sept étapes suivantes (Cf. détail dans le bulletin n°164 de la CIGB [8-3]) :

- localisation d'un vide le long d'un ouvrage traversant ou d'une transition ;
- initiation de l'érosion de conduit ;
- continuation, absence de filtration ;
- progression ;
- non détection ;
- non intervention ;
- brèche.

8.4 Description des transitions

Cette section présente, sur la base des travaux de FloodProBE [8-1] une description détaillée de quelques exemples types de transitions observables dans une digue. Cette liste, qui ne comprend d'ailleurs pas tous les exemples étudiés dans FloodProBE [8-1], ne se veut pas exhaustive.

Chacune des sous-parties suit le même plan décrivant :

1. Le type d'ouvrage de transition
2. Les mécanismes de dégradation et de rupture associés à ces ouvrages
3. Les méthodes pour détecter la transition
4. Les méthodes et indicateurs permettant de détecter l'initiation des modes de défaillance
5. Quelques pratiques permettant la conception, le confortement ou la réparation

Les données d'entrée suivantes, particulièrement importantes pour le dimensionnement des zones de transition, sont à déterminer :

- caractérisation des sollicitations externes ;
- caractérisation des sollicitations hydrauliques (et particulièrement le gradient hydraulique dans le cas de la conception vis-à-vis de l'érosion interne) ;
- identification des différents mécanismes d'érosion (interne et externe) et de leurs conséquences potentielles sur la transition ;
- prise en compte de plusieurs cas de chargement (conditions normales d'exploitation, conditions de crue...).

8.4.1 Ouvrages linéaires traversants

Description :

Les ouvrages linéaires traversants (canalisations, câbles) peuvent se trouver dans la digue, sous la digue (dans sa fondation) ou les deux (Figure 8.5). La gestion de ces ouvrages est complexe car ils peuvent appartenir à des intervenants bien différents et souvent extérieurs au gestionnaire/propriétaire de la digue.

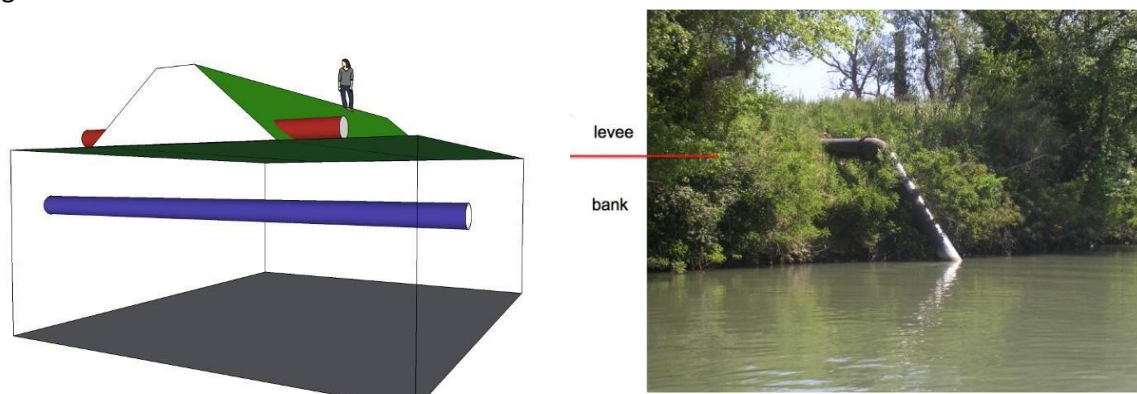


Figure 8.5 : Schéma et photographie illustrant des ouvrages linéaires traversants [8-1]

Mécanismes de défaillance :

- infiltration d'eau à l'interface entre la digue et l'ouvrage linéaire traversant, due à des tassements différentiels ;
- érosion interne initiée le long de la structure, pouvant conduire à terme à une brèche (Figure 8.6), causée par une infiltration d'eau ou une fuite sur une conduite (cf. partie 8.3.1).

Méthode de détection des ouvrages linéaires traversants :

- consultation de documents d'archives (par exemple des plans, des photos) ;
- inspections visuelles ;
- campagne géophysique.

Méthodes et indicateurs permettant de détecter l'initiation d'un mode de défaillance :

- inspections visuelles au droit de l'ouvrage traversant (recherche d'écoulement, d'affaissements, de fines... pouvant suggérer un phénomène d'érosion interne) ;
- inspection caméra de l'ouvrage (recherche d'une géométrie irrégulière) ;
- suivi topographique (recherche de tassements).

Conseils pratiques sur la conception, le confortement ou la réparation de tels ouvrages :

- conception de l'ouvrage traversant :
 - enrobage béton afin de combler les vides,
 - placement sur la partie haute de la digue (par l'usage de siphons par exemple) ;
- confortement/réparation :
 - idéalement, supprimer l'ouvrage traversant,
 - si impossible, il faut identifier le mode de défaillance qui est induit par cet ouvrage et mettre en œuvre des mesures de prévention permettant :
 - d'augmenter le chemin hydraulique (étanchéité),
 - de diminuer le gradient hydraulique (drainage),
 - d'améliorer le contact entre le remblai et l'ouvrage (enrobage béton par exemple),
 - installer des filtres et des drains le long des ouvrages traversants : attention cependant à ne pas créer un gradient élevé et un chemin d'écoulement préférentiel en drainant l'aval autour d'une canalisation dans une digue constituée d'un seul matériau étanche !



Figure 8.6 : Brèche dans une digue, au droit d'une conduite traversante sur le Rhône (Crédit photo : SNRS)

8.4.2 Ouvrages non-linéaires traversants

Description :

Ces ouvrages traversants correspondent aux structures qui entrecoupent et séparent la digue en deux segments différents (Figure 8.7). Ce sont des ouvrages qui sont souvent liés, directement ou indirectement, à la fonction de protection contre les inondations (par exemple des portes, des déversoirs, des stations de pompage...).

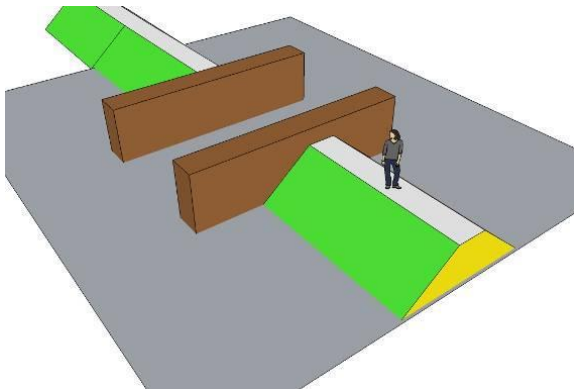


Figure 8.7 : Schéma et photographie illustrant des ouvrages non-linéaires traversants [8-1]

Mécanismes de défaillance :

- infiltration d'eau à l'interface entre la digue et l'ouvrage non-linéaire traversant, due à des tassements différentiels ;
- érosion interne initiée au droit du contact entre le remblai de la digue et l'ouvrage traversant (cf. partie 8.3.1).

Méthode de détection des ouvrages non-linéaires traversants :

- consultation de documents d'archives (par exemple des plans, des photos) ;
- inspections visuelles ;
- topographie ;
- campagne géophysique.

Méthodes et indicateurs permettant de détecter l'initiation d'un mode de défaillance :

- inspections visuelles au droit de l'ouvrage traversant (recherche de fissures ou de signes d'écoulement, d'affaissements, de fines ... pouvant suggérer un phénomène d'érosion interne) ;
- suivi topographique (recherche de tassements ou d'un changement de géométrie de l'ouvrage traversant).

Conseils pratiques sur la conception, le confortement ou la réparation de tels ouvrages :

- conception de l'ouvrage traversant : bien concevoir l'interface entre l'ouvrage traversant rigide et le remblai de la digue afin d'éviter les tassements différentiels et les chemins d'écoulement préférentiels ;
- confortement/réparation :
 - injections pour améliorer le sol au droit du contact,
 - augmenter le chemin hydraulique.

8.4.3 Transition entre un tronçon de digue en remblai et un tronçon en béton ou en maçonnerie

Description : voir Figure 8.8

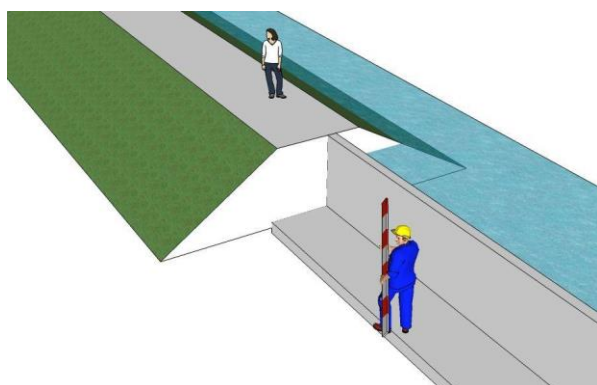


Figure 8.8 : Schéma et photographie illustrant la transition entre un tronçon de digue en remblai et un tronçon de digue en béton ou maçonnerie (appelé aussi mur anti-inondation) [8-1]

Mécanismes de défaillance :

- érosion interne de contact le long de la transition (cf. partie 8.3.1) ;
- érosion externe liée à des phénomènes hydrauliques particuliers (courants turbulents, vagues...) pouvant mener à la brèche (Figure 8.9) (cf. partie 8.3.2).

Méthode de détection de la transition :

- consultation de documents d'archives (par exemple des plans, des photographies) ;
- inspections visuelles.

Méthodes et indicateurs permettant de détecter l'initiation d'un mode de défaillance :

- inspections visuelles (recherche de signes d'érosion externe, d'écoulement d'eau ou de fines... pouvant suggérer un phénomène d'érosion interne) ;
- suivi topographique (recherche d'un changement du profil de la transition).

Conseils pratiques sur la conception, le confortement ou la réparation de tels ouvrages :

- conception de la transition : privilégier un changement progressif de géométrie entre la digue en remblai et le mur anti-inondation. Prévoir par ailleurs un recouvrement entre ces deux structures afin d'augmenter le chemin hydraulique ;
- confortement/réparation :
 - injection pour sceller le contact entre le mur anti-inondation et la digue,
 - mise en place de dispositifs de protection contre l'érosion externe.



Figure 8.9 : Photographie d'une brèche à la transition entre deux tronçons d'une digue : l'un en remblai et l'autre en béton armé [8-4]

8.4.4 Transition entre deux segments de digue en remblai différents

Description : Cette partie fait référence aux transitions entre deux segments de digues, dont la conception interne et/ou externe est différente (Figure 8.10). De telles transitions existent au droit de tronçons dont l'un au moins a connu des réparations ou une reconstruction à la suite d'une précédente rupture. Cette partie peut aussi s'appliquer aux transitions entre la digue et le terrain naturel. Elle peut également s'appliquer au cas où l'un des tronçons est constitué de sol renforcé (qui est un matériau intermédiaire, en termes de propriétés, entre un sol naturel et un matériau rigide).

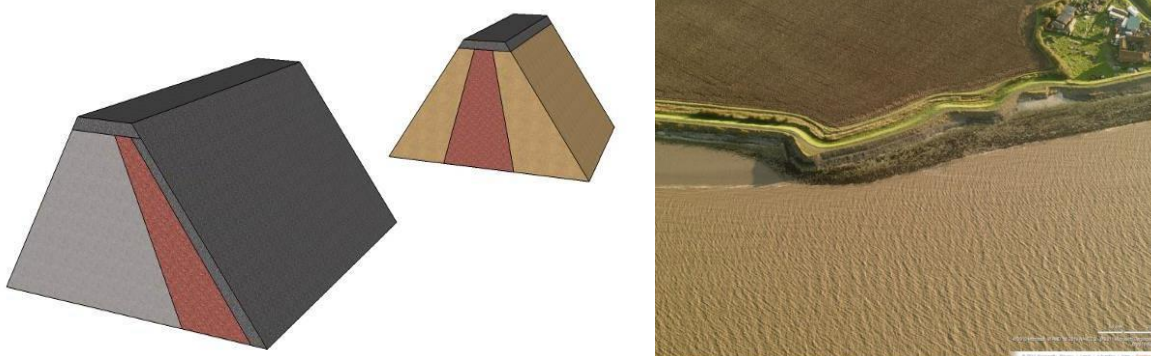


Figure 8.10 : Schéma et photographie illustrant la transition entre deux tronçons de digues de conception différentes [8-1]

Mécanismes de défaillance :

- érosion interne de contact entre les différentes natures de sol (cf. 8.3.1) ;
- érosion interne liée à des circulations préférentielles mettant en jeu les deux tronçons (contact entre des parties plus perméables, contournement des étanchéités) (cf. partie 8.3.1) (Figure 8.11) ;
 - érosion externe liée à des phénomènes hydrauliques particuliers pour des segments de géométrie différentes (courants turbulents, vagues...) (cf. 8.3.2).

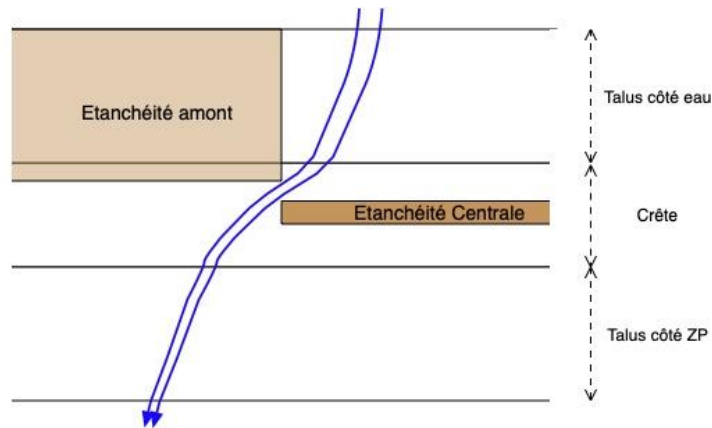


Figure 8.11 : Circulation interne d'eau mettant en jeu deux tronçons renforcés avec des modes d'étanchéité différents (schéma R. Tourment)

Méthode de détection de la transition :

- consultation de documents d'archives (par exemple des plans, des photographies) ;
- inspections visuelles ;
- forages ;
- campagne géophysique.

Méthodes et indicateurs permettant de détecter l'initiation d'un mode de défaillance :

- inspections visuelles (recherche de signes d'érosion externe, d'écoulement d'eau, d'affaissements ou de fines... pouvant suggérer un phénomène d'érosion interne) ;
- suivi géophysique ;
- suivi topographique (recherche d'un glissement, de tassements différentiels ...).

Conseils pratiques sur la conception, le confortement ou la réparation de tels ouvrages :

- conception de la transition :
 - privilégier un changement progressif de géométrie et du parement extérieur,
 - conserver une continuité des fonctions d'étanchéité, de drainage et de filtration ;
- confortement/réparation :
 - reprise de l'étanchéité de la zone de transition avec recouvrement sur les deux segments de digue (augmentation du chemin hydraulique),
 - mise en place d'une recharge filtrante et drainante au droit de la transition, côté zone protégée.

8.5 Remarques générales

Les principes de confortement et de réparations décrits dans les chapitres 2 à 7 peuvent bien entendu également être appliqués aux différentes problématiques des transitions. Ces principes sont donc à adapter et à combiner de manière intelligente pour répondre au cas par cas aux problèmes décrits dans cette section, après éventuelle analyse spécifique du type de transition.

Enfin, dans cette version du document, nous avons plutôt évoqué et proposé une analyse des problématiques liées aux transitions associées aux différents mécanismes de défaillance qui peuvent en découler. La prochaine version permettra de proposer plus de solutions, sous la forme de fiches techniques, entre autres pour les types de transitions les plus courants, mais également une révision de ce chapitre.

9 Animaux fouisseurs et végétation arborée

Ce chapitre 9 est basé sur le travail du sous-groupe n°7 « Animaux et végétation » en association avec les animateurs du GT. Le GT a produit quatre fiches de cas, relatives aux animaux fouisseurs et à la végétation arborée :

- FC.13. Confortement des digues des Amidonniers/Sept-Deniers (Digues D12, D13 et D14) – Traitement du talus aval par grillage anti-fouisseurs – Toulouse (31)
- FC.14. Confortement et protection des digues de l'Aude en RD et RG sur les communes de Sallèles d'Aude, Narbonne, Cuxac d'Aude et Coursan (11)
- FC.15. Traitement des terriers de lapins présents dans le corps de la digue du val d'Orléans – Commune de Sandillon (45)
- FC.16. Déboisement avec enlèvement des souches et reconstitution du talus de digue côté Loire – Commune de Mareau-aux-Prés (45) – Plan Loire Grandeur Nature

Les membres du sous-groupe étaient :

Patrick ARGENTIER, SYMBHI

Jean-François GOMES, SYMBHI

Loïc Gervais, DREAL Centre Val de Loire

Patrice MÉRIAUX, INRAE

Michel PINHAS, SYMBHI

Animateur

Alexandre PLATSRE, Maccaferri

Thierry VOILLLOT, DDT Loiret

Ce chapitre traite du cas particulier de la remise en état des digues en remblai endommagées par des animaux fouisseurs ou la présence de végétation arborée. Les problématiques de la fauche de la végétation herbacée et de la maîtrise des espèces végétales invasives (canne de Provence, renouée du Japon, robinier faux acacia, etc.) ne sont pas abordées ici, car relevant plus de l'entretien courant des digues. Dans cette première version du document, ce chapitre ne présente que des principes généraux et il n'y a pas de fiche technique spécifiquement associée. Une prochaine version du document pourrait présenter des descriptions plus détaillées sous forme de fiches de cas et/ou de fiches techniques.

9.1 Importance de l'entretien régulier et besoin de réparations

L'entretien régulier des ouvrages hydrauliques est nécessaire à tous points de vue par rapport aux mécanismes de dégradation en lien : i) avec l'eau comme ceux évoqués dans les chapitres précédents, mais aussi ii) à ceux liés aux autres facteurs comme les animaux fouisseurs et la végétation arborée. Cet entretien continu vise à empêcher l'apparition de dommages trop importants, en traitant les désordres à un stade encore mineur et leurs causes.

Malgré ce besoin d'entretien régulier, de nombreuses digues de protection contre les inondations, en France comme dans le reste du monde, ont été laissées longtemps (de l'ordre de plusieurs décennies) sans entretien approprié, souvent par défaut d'une structure de gestion adaptée ; la végétation arborée a eu le temps de se développer et dans certains cas, des animaux fouisseurs ont pris l'habitude de s'y installer (Figure 9.1).

La problématique de la remise en état de digues colonisées par la végétation et/ou les animaux fouisseurs concerne de très nombreux ouvrages. En ce qui concerne la végétation arborée, une fois la remise en état effectuée, il est impératif de procéder à un entretien régulier, et notamment à un fauchage périodique, pour prévenir sa réapparition. Par contre, en ce qui concerne les animaux fouisseurs, il faut souvent avoir recours à d'autres mesures préventives pour empêcher leur retour, même si une digue dont la végétation est entretenue et rase constitue une zone hors-taillis, potentiellement dissuasive pour une recolonisation par des fouisseurs craintifs, tels que les blaireaux.



Figure 9.1 : Trou de terrier de blaireau à gauche (photo R. Tourment) et dégagement d'une souche de peuplier noir à Cusset (03) à droite [9-1]

9.2 Diagnostics

9.2.1 Végétation : le diagnostic spécifique

Des travaux de recherche ont été menés afin de caractériser les risques causés par la présence de végétation arborée sur les ouvrages hydrauliques [9-1 ; 9-2 ; 9-3]. Un guide [9-4], écrit sur la base de ces recherches et dont la lecture est conseillée en complément de ce chapitre, détaille :

- les risques associés à cette présence ;
- les principes du diagnostic spécifique ;
- sur la base du diagnostic précédent, les principes de la gestion de la végétation arborée existante, en partant du principe qu'il n'est pas toujours possible, pour différentes raisons (financières, réglementaires et écologiques entre autres), de revenir rapidement d'une situation de "digue boisée" à une situation idéale de "digue enherbée" ;
- des recommandations pour les travaux de confortement des digues boisées, adaptées en fonction des résultats du diagnostic spécifique.

La présence d'arbres sur une digue peut s'avérer préjudiciable à l'ouvrage aux motifs suivants :

- risque de chute avec déracinement ;
- érosion interne liée à la pénétration du système racinaire ;
- retenue d'embâcles ;
- occultation des désordres par défaut de visibilité ;
- difficulté d'accès pour les engins d'entretien ;
- végétation dense rendant les animaux fouisseurs plus enclins à s'y s'installer.

L'analyse doit prendre en compte les facteurs suivants, par rapport :

- aux arbres eux-mêmes : taille, âge et état sanitaire général, inclinaison, système racinaire...
- ... et à leur situation (en pied, à mi pente, ou en crête de digue) et à leur densité (arbres isolés ou en formation dense) ;
- à l'ouvrage : des talus raides sont plus vulnérables au risque de déstabilisation, une digue très large est moins sensible au risque d'érosion interne qu'une digue étroite, la conséquence de l'arrachage d'arbre est moins préjudiciable sur une digue large que sur un ouvrage étroit, constitution de la digue (composants, nature des matériaux), historique de l'ouvrage...
- à l'environnement immédiat : présence de pistes en pied, continuité écologique, d'autres ouvrages...
- Le Tableau 9.1 suivant, extrait du guide [9-4], présente les risques et les mécanismes de dégradation ou de rupture créés par la végétation arborée et les solutions de confortement associées. Il complète – pour le cas spécifique des désordres liés à cette végétation – le Tableau 2.1 du présent document pour la définition des principes de confortement, en lien avec les chapitres 3 à 8 et 10, pour la description des techniques proprement dites.

Tableau 9.1: Options de confortement des ouvrages en fonction des risques créés par la végétation

Mécanismes de dégradation ou de rupture	Impact de la végétation arborée	Solutions de confortement	Commentaires
Érosion interne	• Érosion de conduit le long des racines pourrissantes ; • Colmatage des drains par les racines ; • Dégradation de la conduite ou du puits de vidange ou de prise d'eau.	• Reconstitution de l'étanchéité ou du drainage/filtration. • Chemisage de la conduite de vidange ou reprise totale de la conduite ou du puits.	
Érosion externe	En cas de renversement d'arbres : amorces d'érosion, courants tourbillonnaires, ..	Protection du talus ou de la berge. Déplacement de la digue.	Mécanisme pouvant entraîner une érosion interne (réduction de la longueur des lignes de fuites), pour les ouvrages à profil étroit.
Instabilité des talus	Renversement d'arbre (au port déséquilibré), chablis.	Recharge, reprofilage soutènement, drainage. Déplacement de la digue.	Mécanisme souvent associé à l'érosion externe côté rivière dans le cas des digues
Surverse	Chablis en crête.	Traitement des points bas. Recalibrage de l'évacuateur de crues, création d'un déversoir, digue résistante à la surverse	Crête étroite. Faible revanche ou crue en limite de surverse.

9.2.2 Animaux : estimation de la nécessité d'intervenir

Il n'existe pas à ce jour de méthodologie spécifique de diagnostic relative à la présence d'animaux fouisseurs. Leur présence doit être constatée lors des opérations régulières d'examen visuel, à travers l'observation des terriers (densité, diamètre...), de matériaux de déblai, et autres indices permettant de repérer la présence d'animaux potentiellement fouisseurs (ex : crottes, marques sur les arbres,

témoignages de riverains ou de garde-digues, ...), tout en essayant de déterminer l'espèce en question. Les animaux fouisseurs observés le plus fréquemment sur les ouvrages hydrauliques en remblai sont les blaireaux, les lapins, les renards et plus exceptionnellement, les taupes. Les ragondins, les rats musqués et les castors sont des animaux aquatiques qui, en général, ne creusent des terriers que dans des berges en contact direct et permanent avec l'eau : il est donc très rare de trouver leurs terriers dans les parties en remblai de la digue, surtout si celle-ci est éloignée du cours d'eau ; ces animaux peuvent par contre dégrader ou affaiblir des berges en contact avec une digue. Il est généralement considéré que l'extension des terriers de blaireaux est importante et présente un risque élevé pour la digue et qu'à l'inverse les terriers de lapins et de taupes présentent peu de risques. Néanmoins, ce dernier point est sujet à caution : il a été montré dans un reportage de la BBC présentant l'étude par des chercheurs de la vie d'animaux dans leurs terriers¹¹ que l'extension de terriers de lapins vivant dans des conditions optimales peut également concerner de grands volumes et distances.

Le blaireau se repère par la taille importante des entrées de ses terriers (sur la Figure 9.1, la largeur du sac témoin est supérieure à 30 cm). Dans l'ouvrage, le réseau peut être assez étendu dans toutes les directions, aussi convient-il d'inspecter les talus amont/aval pour détecter le caractère éventuellement traversant du réseau. L'utilisation de techniques géophysiques [9-5], telles que le radar (à condition, toutefois que les matériaux de la digue ne soient pas électriquement conducteurs, ce qui hélas est plutôt rare), peut parfois permettre de localiser les cavités si l'environnement physique et géotechnique s'y prête. Dans le cas des digues « pied dans l'eau », il est très peu probable d'avoir des entrées de terrier de blaireau dans la berge côté rivière, à l'inverse des terriers de ragondins et de rats musqués.

De plus amples détails concernant les animaux fouisseurs et les problématiques qui y sont liées peuvent être trouvés dans l'ILH (section 4.6) [9-6], dans le chapitre 5 du guide « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations – Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires » [9-7] ou dans un ouvrage de la FEMA [9-8].

9.3 Interventions et travaux préventifs

Ces activités de prévention (entretien ou travaux) sont à réaliser sur des ouvrages dégagés de la présence d'arbres et d'animaux fouisseurs, soit sur des digues neuves, soit sur des digues confortées, soit justement en profitant de travaux de confortement.

9.3.1 Arbres

Les activités relatives à la prévention se réduisent à des travaux d'entretien réguliers, consistant à empêcher les arbres de prospérer sur les talus de digue, la crête et les abords côté rivière et côté zone protégée sur une largeur donnée [9-6] (de l'ordre de 10-15 m). Pour cela, la fauche (Figure 9.2) ou coupe (passage de l'épareuse) réalisée de manière saisonnière (début printemps et fin d'été) constitue une mesure simple et très efficace, tout-au-moins vis-à-vis du développement d'arbres si l'on prend bien soin d'éradiquer systématiquement les ligneux sur les talus enherbés.

¹¹En trois parties, visibles sur YouTube :

<https://www.youtube.com/watch?v=W76EDYEF3b8>

<https://www.youtube.com/watch?v=U5g7x8SVgE8>

https://www.youtube.com/watch?v=Z_g61gulKi4



Courtesy Jean Maurin, DREAL Centre

Figure 9.2 : Illustration de l'entretien de l'enherbement d'une digue
(Crédit photo : Jean Maurin [9-6])

9.3.2 Animaux fouisseurs

La prévention contre l'installation des animaux fouisseurs consiste principalement à mettre en place un grillage sur les talus, compliquant/voire interdisant toute tentative de fouissage. Ceci suppose un décapage préalable du talus, suivi d'une végétalisation après pose du grillage. Il faut bien veiller à ancrer le grillage en pied dans une bêche de l'ordre du mètre, pour éviter le contournement. Cette installation se fait en général à l'occasion de travaux de confortement plus ambitieux (voir chapitres 3, 4 et 5 entre autres).

Vis-à-vis du blaireau, il semblerait que ce dernier n'apprécie pas les milieux constitués de matériaux concassés grossiers. Il est donc également possible de réaliser le talus en matériau type déchet de carrière 0-400 mm, bêche comprise, ce qui peut être l'occasion d'épauler un talus côté terre un peu trop raide ou d'améliorer la résistance à l'érosion externe du talus côté cours d'eau. La végétalisation par ensemencement hydraulique est une finition efficace.

9.4 Les travaux de remise en état

Que ce soit par rapport à une problématique de terriers d'animaux ou bien d'arbres, le mode exact de remise en état d'une digue après purge de la zone concernée dépendra principalement du volume concerné (largeur et longueur) et du type de digue (homogène ou zonée, large ou étroite, comportant ou non des parties d'ouvrage en maçonnerie, etc.).

9.4.1 Arbres

Le guide « Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai » [9-4] formule un ensemble de préconisations pratiques – adaptées à différentes natures d'ouvrages hydrauliques (dont les digues) et aux résultats du diagnostic spécifique « végétation » – pour les opérations d'entretien curatif de la végétation arborée et de confortement des ouvrages boisés¹² et dont les grands principes sont repris ici.

¹² Par ailleurs, trois des six études de cas présentées dans ce guide concernent des retours d'expérience de diagnostic et de confortement sur des digues boisées de protection contre les inondations.

Ainsi, lorsqu'il est décidé, après diagnostic et dans le cadre d'un plan de gestion (voir 9.2.1), de procéder à l'élimination des arbres sur une partie plus ou moins importante d'une digue, il convient de définir le niveau d'abattage de chaque arbre :

- simple : recépage des cépées, sans travaux de réparation en perspective, sauf si les souches sont grosses ou vieilles et meurent suite à la coupe de recépage (ce qui rend nécessaire l'extraction des souches et des grosses racines à plus ou moins court terme, notamment pour les digues étroites) ;
- définitif : le tronc est rogné au droit du terrain naturel (Figure 9.3). Cette disposition s'applique par exemple au droit de perrés maçonnés, lorsque l'on veut refaire un organe de protection externe et/ou d'étanchéité devant le système racinaire, sans démonter l'ensemble de la digue. Il faut cependant être conscient que la ou les souche(s) va (vont) pourrir à moyen terme et qu'il faudra surveiller la zone et probablement ré intervenir plus tard pour traiter ce point¹³ ;



Figure 9.3 : Photographie d'un abattage définitif avec rognage du tronc au droit du terrain naturel (Crédit photo : ADIDR – 2014 – Grenoble Isère RG (38))

- définitif avec extraction partielle (par exemple à l'aide d'une dent de rognage) : s'applique pour de petits arbres où l'arrachement de la souche est encore possible. La remise en ordre du talus est ensuite nécessaire (Figure 9.4) ;



Figure 9.4 : Photographie d'un abattage définitif avec extraction partielle de la souche (Crédit photo : ADIDR – 2009 – Drac RG – Fontaine (38))

¹³ En complément, en ce qui concerne le cas des perrés endommagés par des arbres, on pourra se reporter au guide [9-4] pages 160-161 et à la fiche technique FT 7.6 pour les généralités sur la réparation des perrés maçonnés.

- définitif avec extraction complète des racines et reconstitution de la digue : c'est la solution en cas de présence de gros arbres/souches ; le remblai de digue est l'objet de terrassements à la pelle mécanique pouvant atteindre plusieurs mètres cubes et nécessitant alors l'apport de matériaux (Figure 9.5).



Figure 9.5 : Photographie d'un abattage définitif avec extraction complète de la souche au droit du terrain naturel (Crédit photo : ADIDR – 2009 – Drac RG – Fontaine (38))

Dans ces deux derniers cas, la remise en état s'apparente à des travaux de reconstitution de tout ou partie de la digue tels que décrits en 9.4.3 ou au chapitre 10, suivant l'importance du volume démonté (une partie de la digue ou une section en travers complète). Il arrive que la/les souche(s) ne soi(en)t implantée(s) que dans des terrains superficiels, non constitutifs du corps de digue ; dans ce cas-là, un régalaie des terres peut suffire. Attention toutefois, si les souches sont nombreuses et la digue très étroite, il faudra tout de même reconstituer la digue dans les règles de l'art avec apport de matériaux.

En cas de chute d'arbre avec arrachement d'une partie du talus (correspondant à la souche et à tout ou partie du système racinaire), ou de nécessité d'éradiquer un ou plusieurs arbres isolés un terrassement très large de la cavité ainsi formée s'impose [9-4]. Le remblaiement s'effectue selon les modalités de reprises de remblai (voir [9.4.3](#) ou [chapitre 10](#)). Dans le cas d'une digue très large ou soumise à de faibles contraintes hydrauliques et, si aucun organe essentiel n'a été endommagé, le remblaiement peut être réduit au comblement de la cavité sans terrassements excédentaires.

Il faut également noter, que de récentes publications proposent d'autres méthodes pour la gestion de la végétation. Ces dernières, actuellement en cours de développement ou de mise en œuvre, sont souvent plus durables et écoresponsables et proposent des alternatives aux produits phytopharmaceutiques (interdits depuis 2006) pour la dévitalisation des essences ligneuses : écorçage, traitements thermiques et/ou biochimiques [9-9].

9.4.2 Animaux

Dans tous les cas, avant d'intervenir pour les travaux, il faudra « évacuer » les animaux des terriers avec des moyens adaptés, conformes à la réglementation sur l'Environnement et, si possible, non tuants (effarouchement ou capture des animaux vivants). Cette « évacuation » se fait en fonction du statut des espèces concernées (protégée, nuisible ou sans statut particulier).

Il est envisageable de combler les terriers d'animaux fouisseurs en injectant, par gravité ou sous pression, un coulis bentonite-ciment par exemple. L'efficacité ne peut être garantie car il est très

difficile d'avoir l'assurance que le procédé de comblement utilisé se soit répandu dans l'ensemble des galeries, qui peuvent souvent avoir des formes complexes. Par ailleurs, en fonction de la résistance du matériau de comblement, il n'est pas impossible pour certains animaux (blaireau par exemple) d'y recréuser, ou de recréuser à côté. Au vu du retour d'expériences, ce type de méthode est donc déconseillé.

Il est au contraire conseillé de reconstituer l'ensemble de la partie de digue concernée par les galeries de terriers après décaissement et purge (Figures 9.6 à 9.9) :

- si le réseau ne s'est développé que sur une partie de la section de la digue, il faut terrasser la partie concernée par les galeries et reconstituer le remblai. Côté zone protégée, on aura intérêt à remblayer avec un matériau de type déchets de carrière 0-400 mm de façon à éviter le retour de l'animal, sous réserve que la digue reconstituée reste suffisamment imperméable et que les règles de filtre aux interfaces soient respectées ;
- si le réseau est au cœur de la digue, il faut purger complètement le tronçon d'ouvrage concerné, y compris si nécessaire en sommet de fondation, et refaire un remblai compacté neuf.

Il est, dans beaucoup de cas, difficile de prévoir l'étendue des travaux à réaliser avant de procéder au décaissement. Suivant l'étendue de la zone à reconstituer, comme dans le cas des arbres, la remise en état s'apparente à des travaux de reconstitution de tout ou partie de la digue, tels que décrits en 9.4.3 ou au chapitre 10, suivant l'importance du volume démonté (une partie de la digue ou une section en travers complète).

En complément aux dispositions de reconstitution de la digue, il est souhaitable de protéger les talus contre le creusement de nouveaux terriers (voir 9.3.2) et nécessaire d'éviter l'installation des animaux sur un secteur proche et non protégé de la digue. À titre d'exemple, une solution envisageable pourrait consister à recréer, à proximité de la digue, un biotope adapté pour y fixer les animaux, blaireaux entre autres avec la mise en place d'un remblai en matériau meuble, avec pré-creusement des galeries [9-10].

TRAITEMENT DES TERRIERS DE BLAIREAUX COUPE-TYPE

AD ISÈRE-DRAC-ROMANCHE

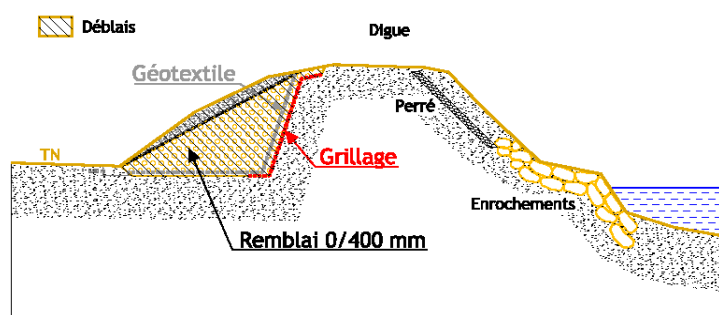


Figure 9.6 : Coupe type d'un chantier de traitement de terriers de blaireaux. Chantier Digue Isère aval à Noyarey (38) (Crédit Photo : SYMBHI)



Figure 9.7 : Terrassement du remblai aval correspondant à la présence de terriers de blaireaux (terrasssement jusqu'à ce qu'on ne trouve plus de cavités). Chantier Digue Isère aval à Noyarey (38) (Crédit Photo : SYMBHI)



Figure 9.8 : Mise en place d'un remblai drainant en 0/400mm (déchet de carrière) sur interface géotextile. Chantier Digue Isère aval à Noyarey (38) (Crédit Photo : SYMBHI)



Figure 9.9 : Remise en état du site. Chantier Digue Isère aval à Noyarey (38) (Crédit Photo : SYMBHI)

9.4.3 Reconstitution d'une partie de digue

La nature des travaux dépend de l'épaisseur totale du remblai et de l'importance relative du vide laissé par les déblais, de l'atteinte éventuelle de composants de la digue essentiels (étanchéité, protection contre l'érosion, drainage, filtration...) et du linéaire concerné.

Pour les travaux concernant un faible linéaire de digue ou plusieurs secteurs de faibles linéaires suffisamment espacés les uns des autres, il convient de respecter du mieux possible la section en travers de la digue existante. Dans le cas où un ou plusieurs des composants essentiels de la digue (étanchéité, protection contre l'érosion, drainage, filtration...) sont touchés, il convient de les reconstituer à l'identique autant que possible.

Dans le cas où les déblais sont trop volumineux ou trop denses en répartition, que ce soit sur toute l'épaisseur du tronçon de digue ou sur un côté seulement, il est nécessaire de procéder à une reconstitution du tronçon. Cela s'effectue en adaptant éventuellement la section en travers de manière différente de la digue existante et en y incluant, suivant les cas, un remblai côté eau étanche, un remblai côté zone protégée drainant, des filtres et/ou une protection contre l'érosion (voir chapitres 3 à 7). Il convient également de prêter attention, comme pour tout confortement ou réparation d'une partie seulement de digue, à la problématique des transitions aux extrémités (voir [chapitre 8](#)).

9.5 Suivi après travaux

Dès lors qu'une intervention (abattage, dessouchage, terrassements de toute nature, etc.) a été réalisée pour remédier à des dégâts ou à des risques liés aux arbres ou à des animaux fouisseurs implantés sur une digue, il est indispensable de garder la trace complète (dates, nature et localisation exactes) des travaux réalisés dans le dossier de l'ouvrage et d'adapter autant que nécessaire les consignes de surveillance (programmée, en crue, post-crue) sur les zones ou points concernés. Par exemple, il convient de garder en mémoire, et de surveiller spécifiquement, les zones ou les points où des grosses souches ont été extraites, où une coupe de recépage a été effectuée (les cépées reprennent-elles ou sont-elles en train de mourir ?), où des fraisages de souche ont eu lieu sur perré, où des terriers ont été traités, etc. Pour plus de précisions, le lecteur est invité à consulter le guide « Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai » [9-4].

Rappelons également que, une fois la remise en état effectuée, il est impératif de procéder à un entretien régulier du tronçon de digue concerné et du remblai. Par exemple un fauchage périodique pour maintenir la végétation dans un état herbacé « ras », un suivi des dispositifs anti-fouisseurs installés dans la digue suite aux désordres observés, etc.

Enfin, l'acceptabilité de tout projet visant à reconstruire ou conforter une digue en remblai (précédemment dégradée par la végétation et/ou les animaux fouisseurs) pourrait même être conditionnée par l'engagement du propriétaire à maintenir en l'état les parties de digue reconstituées et d'inscrire cela dans les nouvelles consignes d'entretien des ouvrages (sauf cas très particulier où le confortement prévoirait un écran interne potentiellement résistant à la pénétration racinaire et à l'attaque des animaux fouisseurs).

9.6 Perspectives

Dans cette version du document, il a plutôt été question d'une analyse des problématiques liées à la végétation et aux animaux fouisseurs. La prochaine version permettra de proposer plus de solutions, sous la forme de fiches techniques notamment, mais également une révision de ce chapitre.

10 Réparation des brèches

Ce chapitre 10 a été initialement rédigé par l'animateur et le secrétaire du GT (Rémy TOURMENT et Adrien RULLIERE, INRAE). Sur la base de cette première version, ce chapitre a été relu et complété par les membres du GT. Ce chapitre 10 « Réparation des brèches » n'était pas initialement prévu au plan du livrable. Il a cependant semblé pertinent de l'inclure, afin d'avoir un document qui aborde l'ensemble des thèmes liés aux confortements et réparations des digues.

Ce chapitre traite de principes généraux relatifs à la problématique de réparation des brèches. Son contenu est également applicable aux cas de reconstitution intégrale d'un tronçon de digue, comme par exemple :

- après une purge importante de racines ou de terriers d'animaux ayant nécessité le démontage de toute la largeur de la digue ;
- en cas de nécessité de purge d'un ouvrage traversant pour lequel il a été décidé de le mettre hors service ou bien de le rénover/modifier entièrement de manière à sécuriser la digue au niveau de cette traversée.

Si la réparation d'une brèche s'apparente d'une certaine manière à la construction d'un ouvrage neuf, ce qui n'est pas l'objet du présent document, il y a néanmoins des spécificités qui seront exposées dans chacune des sections de ce chapitre :

- les réparations pendant les différentes phases de formation d'une brèche ;
- le degré d'urgence des réparations ;
- l'influence de la largeur de la brèche ;
- la présence d'une fosse d'érosion ;
- la problématique des transitions avec la digue existante aux extrémités de la brèche.

10.1 Réparations pendant les différentes phases de formation d'une brèche

Cette section présente, d'une part, le phasage du processus conduisant à une brèche et introduit, d'autre part, des éléments terminologiques importants associés à ce phasage. Elle présente rapidement ce qui peut être envisagé en termes de réparation pendant les différentes phases.

10.1.1 Phasage et terminologie

La brèche d'une digue est (au sens de la CIGB) une rupture¹⁴ dont le lâcher d'eau ne peut plus être maîtrisé. Celle-ci apparaît à la fin d'un processus impliquant souvent plusieurs mécanismes de dégradation et/ou de rupture. Les différentes phases successives sont les suivantes :

- **apparition de désordres** : signes observables ou quantifiables d'une dégradation de l'état initial de la digue ou d'un de ses composants ;
- **initiation de la brèche** : en cas de surverse ou lorsque des désordres évoluent vers des dommages suffisamment importants pour continuer à évoluer vers une rupture de l'ouvrage entier ;
- **formation de la brèche** : une ouverture est apparue dans la digue, qui commence alors à laisser passer de l'eau dans la zone protégée ;

¹⁴ Cette définition confond la cause (la rupture) et la conséquence (la brèche en tant qu'ouverture dans la digue), le processus et le résultat. C'est souvent le cas en langage courant.

- **élargissement de la brèche et approfondissement dans la fondation** : du fait des fortes vitesses d'écoulement dans la brèche ;
- **arrêt du développement de la brèche** : lorsque les niveaux d'eau de part et d'autre ont commencé à s'équilibrer et que les contraintes liées au courant à travers la brèche ne sont plus suffisantes pour continuer à endommager l'ouvrage (par érosion ou tout autre mécanisme).

En termes de conséquences sur l'ouvrage, un "départ de brèche"¹⁵ se distingue d'une brèche par le fait que la phase d'élargissement n'est pas encore en cours et/ou que le lâcher d'eau a préalablement été maîtrisé ou sans impact sur la zone protégée (par exemple par une intervention d'urgence ou bien par la diminution de la charge hydraulique liée à la décrue).

Une brèche peut être partielle (seule une partie de la hauteur de la digue a disparu) ou totale (toute la hauteur de la digue a disparu). La brèche peut concerner l'ouvrage seul, mais, dans beaucoup de cas, que la brèche soit totale ou partielle, elle peut aussi concerner la fondation.



Figure 10.1 : Brèche partielle par érosion interne (Photo : Cyril Folton / Patrice Mériaux) (à gauche) et Brèche partielle par surverse (Photo : Patrice Mériaux / Paul Royet) (à droite)

10.1.2 Possibilité d'interventions et phases

Important : ce qui suit concerne uniquement les désordres et brèches sur des ouvrages sur lesquels l'accès et les interventions ne présentent pas de risques pour les personnes.

Pendant les premières phases (apparition de désordres, initiation de la brèche), il est possible d'envisager des interventions de confortement visant à interrompre les processus en cours ou à minima de l'empêcher de s'aggraver, afin d'éviter une brèche. Les interventions sont à adapter aux mécanismes à l'œuvre et il est souhaitable que le gestionnaire ait planifié dans son organisation les principes de ces interventions ainsi que les moyens en personnel, matériaux et matériel. On peut se reporter à l'ILH, sections 6.5 à 6.8 [10-1] ou l'ouvrage du Cerema [10-2], qui présentent une description de différents principes d'intervention en situation de crue en fonction des mécanismes. Par ailleurs, les principes des travaux de confortement présentés dans les chapitres 3 à 7 du présent document sont applicables, en les adaptant éventuellement à une situation où le temps est compté et où la digue est en charge (voir [2.4](#)).

Lorsque la brèche est en train d'apparaître et tant que le courant qui la traverse n'est pas encore trop important, il est possible, sous réserve d'intervenir rapidement, de la colmater par un remblai plus ou moins quelconque voire par des sacs de sable. Il est alors souhaitable une fois le processus interrompu de continuer à conforter l'ouvrage en adaptant (comme pour les premières phases ci-dessus) les confortements aux mécanismes.

¹⁵ On peut noter ici également une confusion de langage entre cause et conséquence, processus et résultat.

Lorsque la brèche est ouverte et fortement active, en phase d'élargissement et d'approfondissement, il est quasiment impossible d'intervenir pour la refermer et on connaît peu (voire pas) d'expériences réussies de fermeture de brèche, sauf peut-être sur de très petits cours d'eau. Le courant actif, de plus en plus puissant au fur et à mesure qu'on rétrécit la largeur de la brèche, en empêche la fermeture, même dans le cas d'utilisation de matériaux denses (enrochements, big bags lestés de cailloux...) qui peuvent alors être entraînés loin dans la zone protégée. Il est néanmoins envisageable par ce type d'intervention de limiter le développement d'une brèche.

Une fois la brèche stabilisée, il est peut-être possible d'intervenir, mais la présence d'eau, tant que le niveau ne s'est pas abaissé naturellement, rend néanmoins les travaux difficiles, ce qui peut éventuellement conduire à une réparation provisoire qui devra ensuite être améliorée après diagnostic de manière à la rendre définitive.

10.2 Degré d'urgence

Dans les phases avant l'ouverture complète de la brèche, les interventions visant à empêcher cette ouverture sont bien évidemment très urgentes, l'urgence étant à moduler en fonction de la cinétique en cours des phénomènes à l'œuvre. L'intervention d'une personne expérimentée sera fortement souhaitable pour évaluer ce degré d'urgence. Dans les cas où de multiples désordres sont en cours d'apparition ou d'évolution, il faudra aussi juger de la priorité d'intervention, qui pourra prendre en compte non seulement l'ouvrage lui-même mais aussi les conséquences éventuelles d'une rupture.

Après la formation de la brèche et sa stabilisation, il est souhaitable d'attendre la baisse du niveau d'eau (si l'eau doit baisser rapidement) et l'urgence de procéder à une réparation est à juger en fonction de l'équilibre, présenté sur la Figure 10.2. Les situations d'urgence sont également abordées dans l'annexe D (section D.7).

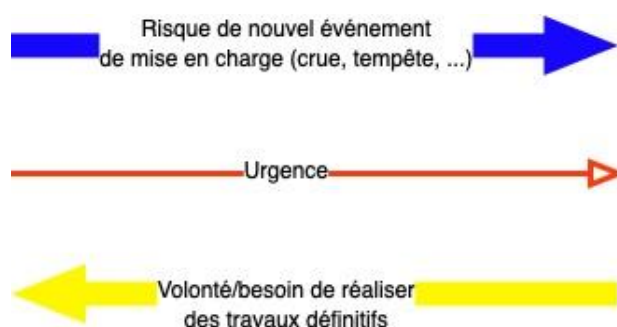


Figure 10.2 : Schéma de principe présentant l'équilibre à trouver pour le démarrage de la réparation d'une brèche (Schéma : Rémy Tourment)

10.3 Largeur de la brèche

La largeur de la brèche influera sur la complexité de la solution de réparation définitive. Sur une brèche de grande largeur (de l'ordre de plusieurs fois la largeur moyenne de la digue), on procédera de la même manière que pour la conception de la réparation de la digue elle-même (hors problèmes relatifs à la fondation et aux transitions aux extrémités vus plus loin) ou que pour un ouvrage neuf et on pourra complexifier, "moderniser" la section en travers. Au contraire, pour une brèche de courte largeur (de l'ordre de la largeur moyenne de la digue ou moins), il s'agira de reconstituer au mieux la section en travers d'origine (même zonage, même matériaux et caractéristiques de compactage) afin d'éviter toute singularité qui constituerait un point de faiblesse lors d'une prochaine mise en charge.

10.4 Présence d'une fosse d'érosion

Lorsque la brèche a affecté le remblai de la digue mais également sa fondation avec la création d'une fosse d'érosion, la problématique de réparation peut être plus complexe.

Si la fosse d'érosion est partielle (uniquement côté zone protégée et ne remontant pas jusqu'au lit mineur ou à la mer), si les travaux peuvent avoir lieu après la baisse du niveau d'eau, et s'il est possible de la mettre hors d'eau, on peut alors reconstituer une fondation de bonnes caractéristiques mécaniques et géotechniques.

À l'inverse, si la fosse d'érosion est fortement développée côté eau, ce qui est généralement le cas des digues proches de la mer ou du lit mineur d'un cours d'eau, la présence permanente d'eau dans la fosse pose un problème qui conduit à une des alternatives suivantes :

- créer un batardeau côté eau (par exemple avec un rideau de palplanches) pour pouvoir pomper et travailler à sec et reconstituer en place de la digue originelle une fondation de bonnes caractéristiques mécaniques et géotechniques ;
- construire la digue plus loin dans la zone protégée sur le terrain naturel non érodé (création d'un "fer à cheval" en vue en plan de la digue – voir Figure 10.3 et Figure 10.4) ;
- remblayer la fondation sous l'eau avec des matériaux ayant de bonnes caractéristiques mécaniques en l'absence de compactage mais qui, en général, auront des mauvaises caractéristiques hydrauliques (blocs d'enrochements par exemple). Cela permettra la construction par-dessus d'une digue, bien que ces travaux ne seront probablement pas définitifs, du fait de risques liés aux écoulements dans la fondation et de possibles sous-pressions sous ou dans la digue elle-même.

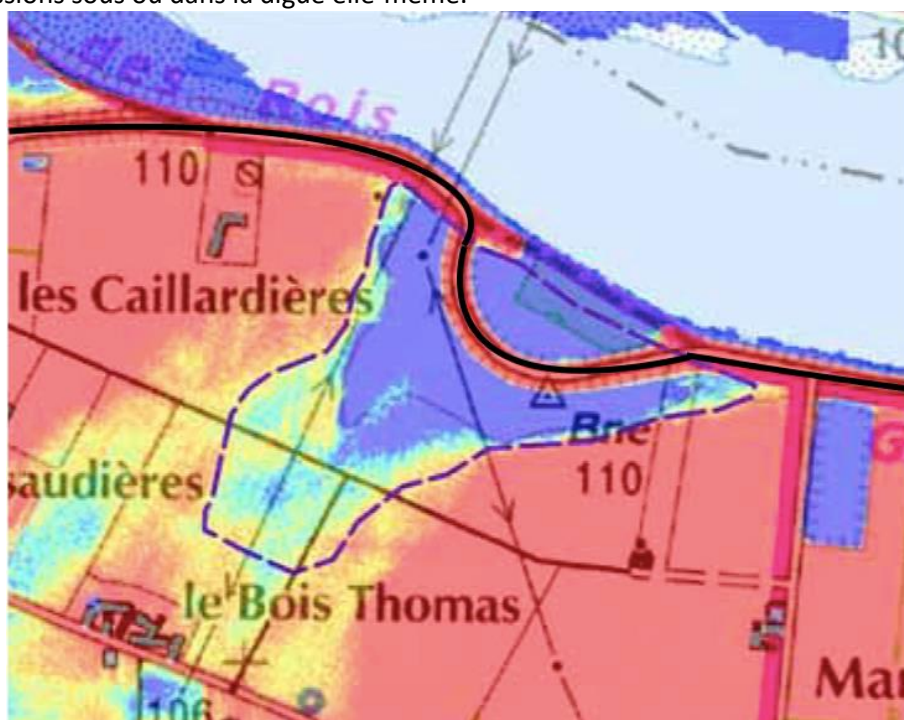


Figure 10.3 : "Fer à cheval" sur une réparation de brèche du XIXe siècle sur une digue de Loire. Les couleurs sont celles du MNT, qui fait bien ressortir l'importance de la fosse d'érosion malgré le remblaiement qui a pu avoir lieu depuis (source : DREAL Centre Val de Loire)

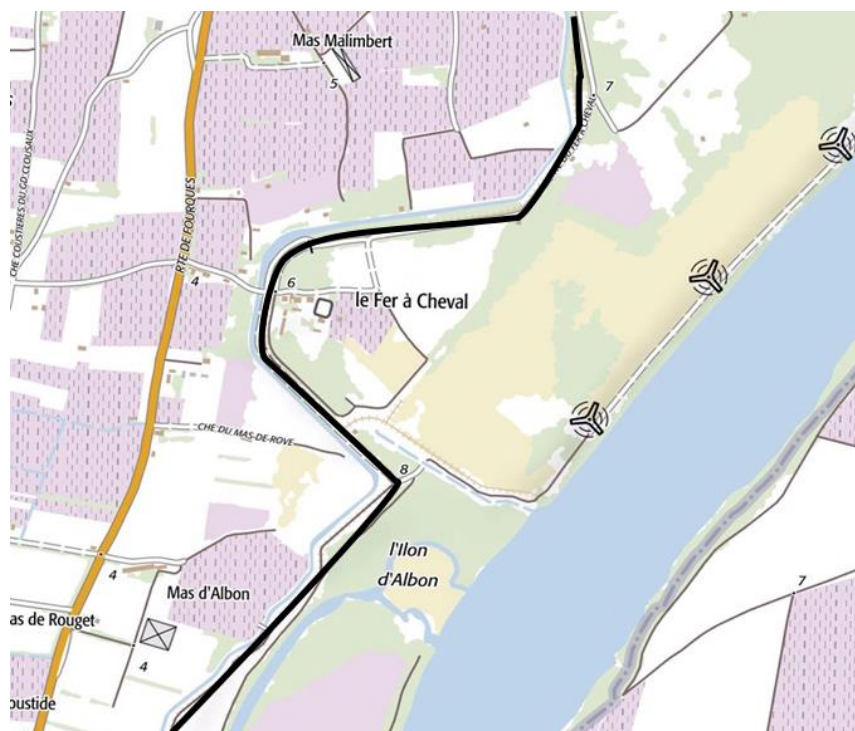


Figure 10.4 : "Fer à cheval" sur une réparation de brèche sur une digue du Rhône, qui a d'ailleurs donné son nom au lieu-dit (fond de plan IGN Géoportail)

10.5 Problématique des transitions avec la digue existante aux extrémités de la brèche

Il est important de minimiser les risques liés aux transitions (voir Figure 8.1) au niveau des raccordements de la réparation de la brèche avec la digue existante. Pour cela, il est important pour les réparations de grande longueur de :

- s'assurer impérativement de la continuité des organes d'étanchéité s'ils existent de part et d'autre ;
- s'assurer éventuellement de la continuité du drainage ;
- vérifier les règles de filtre à chaque interface afin d'éviter les problèmes d'érosion interne ;
- éviter les changements brusques de géométrie et de rugosité du matériau de couverture côté eau (par exemple, passage brusque de gros enrochements à de l'enherbement) afin d'éviter les problèmes d'érosion externe ;
- éviter les dénivelées sur la crête qui risquent de concentrer les écoulements en cas de surverse et d'accélérer l'érosion externe.

Pour toutes les tailles de réparation, afin d'assurer un contact soigné entre les anciennes et nouvelles parties du remblai, il convient de tailler les extrémités de la digue existante en trapèze (pente uniforme ou redans), de manière à ce que le compactage de la réparation crée une accroche entre les matériaux.

10.6 Perspectives

Dans cette version du document, il a plutôt été question d'une brève analyse des problématiques liées aux brèches. La prochaine version permettra de proposer plus de solutions, sous la forme de fiches techniques notamment, mais également une révision de ce chapitre.

11 Références

Certains passages du document se basent sur des références que le lecteur trouvera ci-dessous. Afin de faciliter la lecture du document et des références qui lui sont liées, les références ont été distinguées chapitres par chapitres, sous la notation [Chapitre – numéro de référence] (par exemple [2-6] est la référence 6 du chapitre 2). Ce choix permet également une lecture fragmentée du document (chapitre par chapitre) plutôt que complète (et linéaire).

De ce fait, certains documents majeurs peuvent être cités plusieurs fois dans différents chapitres. Il est donc possible qu'ils apparaissent sous des numéros de référence différents. Par exemple le bulletin 164 de l'ICOLD sur l'érosion interne « *Internal erosion processes and Engineering assessment* » est cité aux chapitres 4 et 8 et apparaît donc sous les numéros de référence suivants [4-4] et [8-3].

11.1 Références majeures

The International Levee Handbook. CIRIA. (2013).

Référentiel technique digues maritimes et fluviales. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. (2015).

Recommandations éditées par le CFBR :

Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages poids. CFBR. (2012).

Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages. CFBR. (2013).

Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai. CFBR. (2015)

Bulletins ICOLD :

Bulletin 21: General considerations applicable to instrumentation for earth and rockfill dams. ICOLD. (1969).

Bulletin 54: Soil-cement for embankment dams. ICOLD. (1986).

Bulletin 60: Dam monitoring - General considerations. ICOLD. (1988).

Bulletin 87: Improvement of existing dam monitoring - Recommendations and case histories. ICOLD. (1992).

Bulletin 95: Embankment dams - Granular filters and drains. ICOLD. (1994).

Bulletin 118: Automated dam monitoring systems. ICOLD. (2000).

Bulletin 138: General approach to dam surveillance. ICOLD. (2008).

Bulletin 158: Dam surveillance guide. ICOLD. (2012).

Bulletin 164: Internal erosion processes and Engineering assessment. ICOLD. (2017).

Bulletin 180: Lessons learnt from case histories. ICOLD. (2018).

Livres :

Mériaux P., Royet P., Folton C. *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations – Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires*. Cemagref Éditions. (2004).

Degoutte G. *Les déversoirs sur digues fluviales*. Éditions Quae. (2012).

CEREMA. *Interventions d'urgence sur les dispositifs de protection contre les submersions marines*. (2018).

Tourment R., Beullac B. *Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection – Application aux études de dangers*. (2019).

11.2 Références par chapitre

11.2.1 Chapitre 2

[2-1] Mériaux P., Royet P., Lino M. (1999). *Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne*. Cemagref Éditions.

[2-2] Mériaux P., Royet P., Folton C. (2004). *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations – Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires*. Cemagref Éditions.

[2-3] Fauchard C., Mériaux P. (2004). *Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues – Guide pour la mise en œuvre et l'interprétation*. Cemagref Éditions.

[2-4] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 5 « Levee inspection, assessment and risk attribution ». CIRIA.

[2-5] (2015). *Référentiel technique digues maritimes et fluviales*. Chapitre 3 « Les diagnostics ». Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.

[2-6] Tourment R., Beullac B. (2019). *Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection – Application aux études de dangers*. Chapitre 10 « Diagnostic des digues et des systèmes de protection ». Lavoisier Tec&Doc.

[2-7] Tourment R., Peyras L., Bambara G., Beullac B., Casteigts C., Delaunay C., Vuillet M., De Massiac J.C., Allouche A., Nicolas L. (2013). *Digsure : une méthode et un outil SIG d'aide au diagnostic et à la gestion des digues fluviales*. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2^{ème} colloque national, Dignes2013, Aix-en-Provence. Pages 122-128.

[2-8] Soulat P., Bonnafe A., Moulin J.G., Montarros F., Mallet T., Martin A.L., Tourment R. (2013). *Diagnostic continu et analyse géo-localisée du risque appliqué aux digues du petit Rhône*. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2^{ème} colloque national, Dignes2013, Aix-en-Provence. Pages 202-208.

[2-9] Maurin J., Boulay A., Durand E., Piney S., Bridoux B., Tourment R. (2013). *Études de dangers des digues de classe A de la Loire et de ses affluents – modèle d'aléas de rupture*. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2^{ème} colloque national, Dignes2013, Aix-en-Provence. Pages 209-216.

- [2-10] 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*. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2^{ème} colloque national, Dignes2013, Aix-en-Provence. Pages 288-297.
- [2-11] 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.
- [2-12] (2015). *Référentiel technique digues maritimes et fluviales*. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.
- [2-13] Tourment R., Beullac B., Degoutte G. (2015). *Etudes de dangers des systèmes de protection contre les inondations : une méthode d'analyse de la défaillance*. La Houille Blanche n°1, pages 41-55. DOI 10.1051/lhb/2015006.
- [2-14] Tourment R. (2018). *Rapport Général de la Question 103 "Petits barrages et digues"*. 26^{ème} Congrès de la Commission Internationale des grands barrages, juillet 2018, Vienne, Autriche. 96 p.
- [2-15] ICOLD. (2017). *Bulletin 164: Internal erosion processes and Engineering assessment*. ICOLD.
- [2-16] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 3 « Functions, Forms and Failure of Levees ». CIRIA.
- [2-17] Degoutte G. (2012). *Les déversoirs sur digues fluviales*. Éditions Quae.
- [2-18] (2007). *Eurocode 7 : Calcul géotechnique – Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais*. NF EN 1997-2.
- [2-19] CFBR. (2015). *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai*. Chapitre 2 « Données et modèles géologique, géomorphologique, géométrique et géotechnique ». CFBR.
- [2-20] CFBR. (2015). *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai*. CFBR.
- [2-21] CFBR. (2012). *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages poids*. CFBR.
- [2-22] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 8 « Physical process and tools for levee assessment and design ». CIRIA.
- [2-23] ICOLD. (1969). *Bulletin 21: General considerations applicable to instrumentation for earth and rockfill dams*. ICOLD.
- [2-24] ICOLD. (2000). *Bulletin 118: Automated dam monitoring systems*. ICOLD.
- [2-25] CEREMA. (2014). *Coût des protections contre les inondations fluviales*. CEREMA.
- [2-26] CETMEF. (2010). *Digues et berges des voies navigables – Retour d'expériences sur les désordres et les réparations*. CETMEF.
- [2-27] (2004). *Sécurité des digues fluviales et de navigation*. Colloque technique organisé par le CFBR et le MEDD en 2004, Orléans.
- [2-28] (2013). *Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2ème colloque Dignes 2013*, Aix-en-Provence
- [2-29] (2019). *Digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations - 3ème colloque Dignes 2019*, Aix-en-Provence.

- [2-30] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 10 « Construction ». CIRIA.
- [2-31] (2015). *Référentiel technique digues maritimes et fluviales*. Chapitre 4 « Conception, dimensionnement et réalisation des travaux ». Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.
- [2-32] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 6 « Emergency management and operations ». CIRIA.
- [2-33] CEREMA. (2018). *Interventions d'urgence sur les dispositifs de protection contre les submersions marines*

11.2.2 Chapitre 3

- [3-1] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 5 « Levee inspection, assessment and risk attribution ». CIRIA.
- [3-2] Mériaux P., Monier T., Tourment R., Mallet T., Palma Lopes S., Maurin J., Pinhas M. (2012). *L'auscultation des digues de protection contre les inondations : un concept encore à inventer*. Colloque 2012 du CFBR, "Auscultation des barrages et des digues : pratiques et perspectives", Chambéry. Pages 51-67.
- [3-3] ICOLD. (1969). *Bulletin 21: General considerations applicable to instrumentation for earth and rockfill dams*. ICOLD.
- [3-4] Courivaud J.-R., Lorrain N., Martinot F. Beguin R.. (2017). *Quantifying seepage flow velocities in embankment dams from optical fibre distributed temperature measurements*. Long-Term Behaviour and Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies of Dams.
- [3-5] Garandet A., Brothier C. Martinot F. (2018). *Techniques Nouvelles d'Auscultation et de Surveillance des Digues de Grand Linéaire*, ICOLD Vienne.
- [3-6] ICOLD. (1988). *Bulletin 60: Dam monitoring - General considerations*. ICOLD.
- [3-7] ICOLD. (1992). *Bulletin 87: Improvement of existing dam monitoring - Recommendations and case histories*. ICOLD.
- [3-8] ICOLD. (2000). *Bulletin 118: Automated dam monitoring systems*. ICOLD.
- [3-9] ICOLD. (2008). *Bulletin 138: General approach to dam surveillance*. ICOLD.
- [3-10] ICOLD. (2012). *Bulletin 158: Dam surveillance guide*. ICOLD.
- [3-11] ICOLD. (2018). *Bulletin 180: Lessons learnt from case histories*. ICOLD.

11.2.3 Chapitre 4

- [4-1] (1977). *Techniques des barrages en aménagement rural*. Section III.1.5 « Dispositifs de protection contre les effets de l'eau ».
- [4-2] ERINOH. (2017) ERINOH Volume 1 – méthodologie de caractérisation expérimentale. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées.
- [4-3] ERINOH. (2017) ERINOH Volume 2 – Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées.
- [4-4] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 3 « Functions, forms and failure of levees ». CIRIA.

- [4-5] ICOLD. (1994). *Bulletin 95: Embankment dams - Granular filters and drains*. ICOLD.
- [4-6] ICOLD. (2017). *Bulletin 164: Internal erosion processes and Engineering assessment*. ICOLD.
- [4-7] Terzaghi, K. (1939). *Soil mechanics: a new chapter in engineering science*. Journal of the Institution of Civil Engineers, 12(7), 106-141.
- [4-8] Nerinx N., Bonelli S., Herrier G., Tachkier P., Puiatti D., Cornacchioli F. Nicaise S., Lesueur D. (2019). *Digues résistantes en sol traité à la chaux : les apports du projet DigueELITE et les conséquences sur la conception*. Digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations – 3^{ème} colloque Digues 2019, Aix-en-Provence.
- [4-9] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 5 « Levee inspection, assessment and risk attribution ». CIRIA.
- [4-10] Mériaux P., Monier, T., Tourment R., Mallet T., Palma Lopes S., Maurin J., Pinhas M. (2012). *L'auscultation des digues de protection contre les inondations : un concept encore à inventer*. Colloque 2012 du CFBR, "Auscultation des barrages et des digues : pratiques et perspectives", Chambéry. Pages 51-67.
- [4-11] ICOLD. (1969). *Bulletin 21: General considerations applicable to instrumentation for earth and rockfill dams*. ICOLD.
- [4-12] ICOLD. (2000). *Bulletin 118: Automated dam monitoring systems*. ICOLD.
- [4-13] François D. Meriaux P. Monnet J. (2013). *Recommandations ERINOH (volume 2): méthodologie de diagnostic de l'érosion interne dans les digues en remblai*. Digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations – 2^{ème} colloque Digues 2013, Aix-en-Provence.
- [4-14] CFBR. (2015). *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai*. CFBR.
- [4-15] CFG. (2014). *Recommandations pour l'emploi des Géosynthétiques dans les systèmes de Drainage et de Filtration*. CFG.
- [4-16] AFNOR. (2017). Norme NFG 38061. *Articles à usages industriels - Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés - Détermination des caractéristiques hydrauliques et mise en œuvre des géotextiles et produits apparentés utilisés dans les systèmes de drainage et de filtration*. AFNOR.
- [4-17] ICOLD. (2017). *Bulletin 164: Internal erosion processes and Engineering assessment*. ICOLD.
- [4-18] Fry J.J. et al. (2015). *Analyse et traitement de l'érosion interne – procédés classiques et nouveaux* – ICOLD 2015 Congress on Fill Dams, EM 1110-2-2300, 130 p.
- [4-19] Fry J.J. Degoutte G. et Poulain D. (2016). *Lessons from Geotextile Use in Embankment Dams* – ICOLD International Symposium on "Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries", Johannesburg
- [4-20] CEREMA. (2006). *Guide technique – Drainage routier*.
- [4-21] AFNOR. (2011). Norme NF EN 1097-1. *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval)*. AFNOR.
- [4-22] AFNOR. (2020). Norme NF EN 1097-2. *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la*

fragmentation - Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation. AFNOR.

[4-23] Sétra. (2011). *Guide acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale.*

[4-24] Schneebeli G. (1987). *Hydraulique souterraine.* Chapitre 6 « Digues et barrages ». Eyrolles.

[4-25] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook.* Chapitre 8 « Physical processes and tools for levee assessment and design ». CIRIA.

[4-26] CEREMA. (2000). *Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR).*

[4-27] CEREMA. (1994). *Remblayage des tranchées et réfection des chaussées.*

[4-28] CEREMA. (2000). *Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassements.*

[4-29] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook.* Chapitre 10 « Construction ». CIRIA.

[4-30] AFNOR. (2013). *Norme NFG 38060. Textiles - Articles à usages industriel - Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés - Mise en œuvre - Contrôle des géotextiles et produits apparentés.* AFNOR.

11.2.4 Chapitre 5

[5-1] CFTR. (2000). *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.*

[5-2] (2018). *Valorisation des matériaux par traitement à la chaux sur les installations de recyclage.*

[5-3] (2015). *Propositions de compléments au guide traitement des sols.*

[5-4] Faisant T., Peyras L., Jeanniot C., Tekatlian A., Gendrey S., Chevalier C., De Baecque M., Schleyer-Lindenmann A., Bertoldo R., De Paris C., Mallet T. (2019). *Projet de R&D DIGUE 2020 : réalisation d'une plateforme de recherche en site maritime pour l'étude des actions de la mer sur les digues, la durabilité, et la perception du risque de submersion.* Digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations – 3^{ème} colloque Digues 2019, Aix-en-Provence.

[5-5] De Baecque M., Chevalier C., Le Feuvre M., Palma Lopes S., Reiffsteck P. (2019). *Durabilité d'un sol traité à la chaux en environnement maritime : méthodologie de l'étude et premiers résultats.* Digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations – 3^{ème} colloque Digues 2019, Aix-en-Provence.

[5-6] Gendrey S., Garnier V., Azemard P., Payan C. (2019). *Apport du contrôle non destructif et de la fusion des données au diagnostic d'ouvrages hydrauliques en terre en environnement côtier.* Digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations – 3^{ème} colloque Digues 2019, Aix-en-Provence.

[5-7] De Baecque M. (2019). *Caractérisation multi-physique de la durabilité d'un sol traité à la chaux pour une application aux digues maritimes.* Thèse de doctorat, Université Paris Est

[5-8] CFBR. (2015). *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai.* CFBR.

[5-9] B. Simons, Y. H. Chen, L. J. Swenson. (1984). *Hydraulic Test to develop design criteria for the use of Reno mattresses.* Rapport technique. Civil Engineering Research Center, Colorado State University, Fort Collins Colorado.

11.2.5 Chapitre 6

- [6-1] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 6 « Emergency management and operations ». CIRIA.
- [6-2] Degoutte G. (2012). *Les déversoirs sur digues fluviales*. Éditions Quae.
- [6-3] (2015). *Référentiel technique digues maritimes et fluviales*. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.
- [6-5] Tourment, R., Royet, P., Morris, M. (2012). *Reliability of Urban Flood Defences Structure Transitions*. FloodProBE report number WP03-01-12-10.
http://www.floodprobe.eu/partner/assets/documents/RTStructuretransitionsComprehensivereport_v4_0_Final.pdf

11.2.6 Chapitre 7

- [7-1] Mériaux P., Royet P., Folton C. (2004). *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations – Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires*. Cemagref Éditions.
- [7-2] Guide Enrochement – Utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques – version française du Rock Manual (2^{ème} édition), CETMEF, Année : 2009.
- [7-3] ICOLD. (1986). *Bulletin 54: Soil-cement for embankment dams*. ICOLD.
- [7-4] Nerincx N., Bonelli S., Herrier G., Tachkler P., Puiatti D., Cornacchioli F. Nicaise S., Lesueur D. (2019). *Digues résistantes en sol traité à la chaux : les apports du projet DigueELITE et les conséquences sur la conception*. Digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations – 3^{ème} colloque Digues 2019, Aix-en-Provence.
- [7-5] Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages, CFBR, juin 2013.
- [7-6] Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai, CFBR, octobre 2015.
- [7-7] EurOtop Manual on Wave overtopping of sea defences and related structures - An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application,. Second Edition December 2018. Completed by an Errata of November 2019. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com
- [7-8]. Coastal Engineering Manual, US Army Corps of Engineers, Référence : EM 1110-2-1100, Année : 2009, <http://chl.erdc.usace.army.mil>

11.2.7 Chapitre 8

- [8-1] Tourment, R., Royet, P., Morris, M. (2012). *Reliability of Urban Flood Defences Structure Transitions*. FloodProBE report number WP03-01-12-10.
http://www.floodprobe.eu/partner/assets/documents/RTStructuretransitionsComprehensivereport_v4_0_Final.pdf
- [8-2] Tourment, R., Morris, M., Royet, P. (2012). *Levee failures related to structure transitions: Typology, levee performance evaluation and improvements*. 2nd European conference on Flood Risk Management - FLOODrisk2012, Rotterdam.

- [8-3] ICOLD. (2017). *Bulletin 164: Internal erosion processes and Engineering assessment*. ICOLD.
- [8-4] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 9 « Design ». CIRIA.

11.2.8 Chapitre 9

- [9-1] Zanetti C. (2010). *Caractérisation du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues*. Thèse de Doctorat - ED Espaces, Cultures et Société – Université d'Aix-Marseille.
- [9-2] FEMA. (2005). *Dam owner's guide to plant impact on earthen dams*. FEMA.
- [9-3] Bambara G. (2015). *Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de la végétation arborescente : proposition d'une approche modulaire*. Université d'Aix-Marseille.
- [9-4] Venetier M., Mériaux P., Zanetti C. (2015). *Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai*. Cardère éditeur. Disponible sur <https://hal.inrae.fr/hal-02601733> (consulté le 07/09/2020).
- [9-5] Fauchard C., Mériaux P. (2004). *Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues – Guide pour la mise en œuvre et l'interprétation*. Cemagref Éditions.
- [9-6] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 4 « Operations and maintenance ». CIRIA.
- [9-7] Mériaux P., Royet P., Folton C. (2004). *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations – Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires*. Cemagref Éditions.
- [9-8] FEMA. (2005). *Dam owner's guide to animal impact on earthen dams*. FEMA.
- [9-9] Zanetti C., Liency N., Formento J., Macia J., MMorris C., Venetier M., Mériaux P. (2019). *Solutions de traitement des essences ligneuses générant des risques sur les ouvrages hydrauliques*. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les inondations – 3^{ème} colloque Dignes 2019, Aix-en-Provence.
- [9-10] LPO Alsace Pôle médiation faune sauvage. (2015). *Terriers de blaireaux dans les ouvrages de protection contre les crues de l'III*.

11.2.9 Chapitre 10

- [10-1] CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. Chapitre 6 « Emergency management and operations ». CIRIA.
- [10-2] CEREMA. (2018). *Interventions d'urgence sur les dispositifs de protection contre les submersions marines*

ANNEXES

Annexe A : Glossaire

Ce glossaire vise principalement à définir les termes employés dans le présent guide. Pour des glossaires plus complets ou détaillés, le lecteur est invité à consulter le glossaire de l'ILH ou le glossaire du livre « *Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection – Application aux études de dangers* ».

Affaissement	Déformation verticale tout ou partie de la digue, liée à des karsts, des phénomènes d'érosion interne, la présence de terriers de fousseurs, etc.
Affouillement	1/ Le mécanisme d'affouillement est un phénomène d'érosion externe dû aux actions des écoulements au contact des ouvrages ou des berges. Il se manifeste à proximité de la ligne d'eau habituelle ou des niveaux d'eau fréquents. 2/ Terme utilisé par abus de langage pour caractériser le résultat du mécanisme d'affouillement.
Amont	Partie du cours d'eau situé dans la direction de la source dans le référentiel de l'observateur.
Arasement	Mise à niveau du corps de digue (ou du terrain naturel ou de tout massif de sol) par retrait de matériau.
Aval	Partie du cours d'eau situé dans la direction de l'embouchure dans le référentiel de l'observateur.
Banquette	1/ Ouvrage de rehausse étroit construit au-dessus du corps de la digue, constitué d'un merlon de terre ou parfois d'un muret en maçonnerie. Cette terminologie est en usage dans la région de la Loire. Les banquettes sont souvent situées en limite de crête, côté du cours d'eau, parfois aussi du côté de la zone protégée, ou parfois encore des deux côtés. 2/ Peut être utilisé en synonyme de <i>franc-bord</i> .
Batardeau	Protection temporaire destinée à retenir l'eau pendant la durée d'un chantier, ou pendant la durée d'une crue : 1/ (<i>chantier</i>) Ouvrage provisoire destiné à protéger un chantier (de digue, de barrage, de pont, ...) des venues d'eau. À distinguer des pièces amovibles (voir 2/). 2/ (<i>composant d'un système d'endiguement</i>) Ensemble de poutres généralement en bois ou en métal, disposées horizontalement dans une ouverture d'une digue (l'ouverture peut être totale ou partielle dans la hauteur de la digue). Il permet d'obturer des accès au fleuve ou à la mer (portes, escaliers, cales, etc.) qui peuvent être des zones plus basses en crête de digue. On trouve également des batardeaux comme composant de barrages.

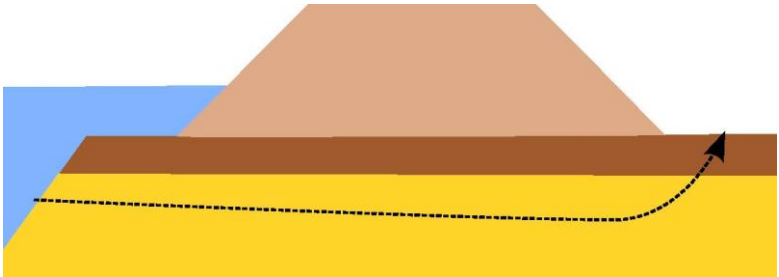
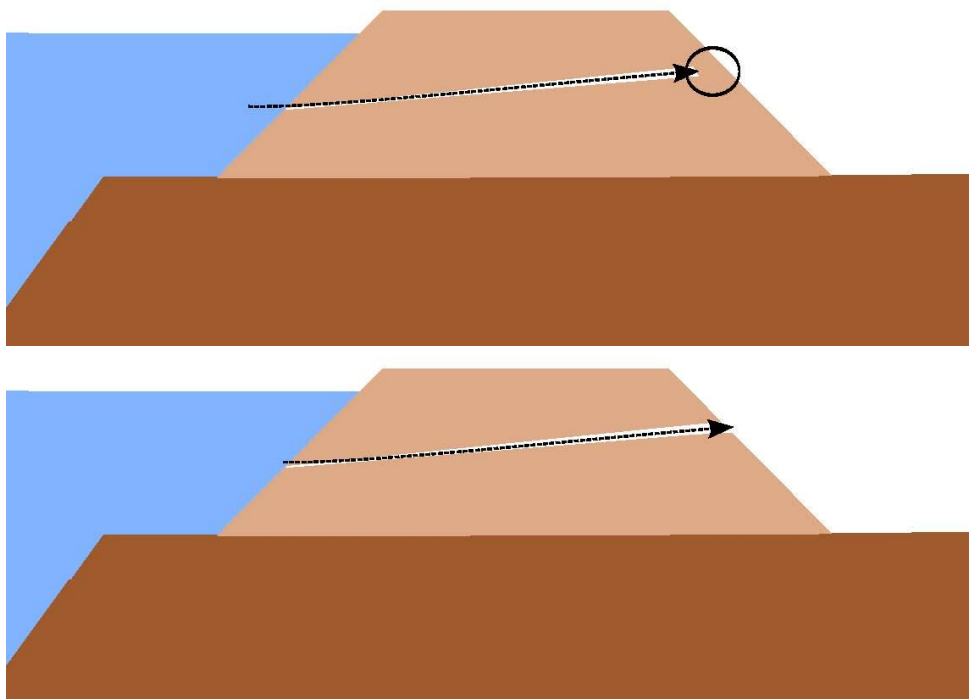
Berge	Talus incliné qui sépare le lit mineur et le reste du lit majeur.
Brèche	Une brèche est une échancrure dans la digue. C'est l'aboutissement d'une rupture de l'ouvrage. La rupture est une réponse de la structure - ici la digue - à une sollicitation qui dépasse une valeur maximale admissible. Cela se traduit par un départ de matériaux - l'érosion - ou par de grandes déformations qui entraînent des grands lâchers d'eau. On retiendra que dans la pratique les termes brèche et rupture de digue sont utilisés comme des synonymes, bien que la brèche soit le résultat et la rupture de la digue le phénomène qui aboutit à ce résultat.
Brise-lames	Ouvrages construits sur le littoral comme élément d'une défense côtière, ou pour protéger les plages et/ou ports des effets des vagues, de l'érosion côtière ou dérive de la côte. Ils peuvent être édifiés à une certaine distance de la côte, ou relié à l'extrémité de ladite côte. Ils peuvent être fixes ou flottants. Un brise-lames est conçu pour absorber l'énergie des vagues qui le heurtent.
Carapace	Revêtement en matériaux rigides (béton, enrochement liés, maçonnerie) mis en place en tant que parement sur la digue (talus et/ou crête) afin de protéger cette dernière des différents mécanismes de dégradation liés à l'érosion externe (par surverse, par le courant, par impact des vagues, ...).
Claquage hydraulique	Mécanisme de dégradation ou de rupture, observable au droit des digues en remblai lors de leur mise en charge. À l'échelle microscopique de la particule de grain, il y a claquage hydraulique dès lors que la contrainte effective s'annule ($\sigma' = 0$). En d'autres termes dès que la pression interstitielle de l'eau est suffisamment élevée pour contrebalancer la contrainte totale de la particule de sol. À l'échelle macroscopique de l'ouvrage, le claquage hydraulique peut avoir lieu seulement si les pressions interstitielles ne peuvent être dissipées. Deux cas se rencontrent, schématisés sur les figures ci-dessous. <u>Cas 1 :</u> La digue est construite sur une fondation perméable surmontée d'une couche imperméable. La pression interstitielle dans la couche perméable de fondation augmente avec la mise en charge, entraînant à terme un soulèvement du pied aval de la digue ou de la couche supérieure de fondation à proximité du pied de digue. 

Schéma illustrant le soulèvement en pied aval de la digue ou de la couche supérieure de la fondation à proximité du pied de digue par claquage hydraulique (Source : Adrien Rullière)

Cas 2 :

Il existe une zone d'écoulement préférentielle dans la digue (conduit, etc.) dont



l'exutoire est obstrué. Lors de la mise en charge de la digue, de l'eau s'infiltre par cette zone d'écoulement préférentiel. Comme l'exutoire est bouché, les pressions interstitielles augmentent avec la charge et peuvent, à terme, déboucher le conduit.

Schéma illustrant le déboufrage d'un conduit par claquage hydraulique (Source : Adrien Rullière)

Confortement	Type de travaux mis en œuvre sur une digue pour remédier à une défaillance constatée ou redoutée. Ce sont des travaux préventifs mis en œuvre pour l'une des raisons suivantes : – la digue se trouve dans un état médiocre en raison d'un vieillissement, d'une gestion ou d'un entretien plus ou moins défaillants au cours d'un long historique, afin d'améliorer ses performances et revenir à des niveaux de sûreté et de protection souhaités ; – les niveaux de sûreté attendus ont évolué ; – l'environnement de l'ouvrage a évolué de manière défavorable pour l'ouvrage ou la protection qu'il offre. Voir aussi <i>renforcement</i>. À distinguer de <i>reconstruction</i> et de <i>réparation</i>.
--------------	---

Côté cours d'eau	Voir <i>côté eau</i> .
Côté eau	Désigne le côté de la digue (pied, talus, risberme...) situé vers le cours d'eau. Le terme "<i>côté amont</i>" est à proscrire pour désigner le côté cours d'eau d'une digue (à l'inverse d'un barrage pour lequel ce terme est tout désigné).

Côté val	Désigne le côté de la digue (pied, talus, risberme...) situé du côté opposé au cours d'eau, généralement le côté où se trouve la Zone Protégée. Le terme " <i>côté aval</i> " est à proscrire pour désigner le côté Zone Protégée d'une digue (à l'inverse d'un barrage pour lequel ce terme est tout désigné).
Côté Protégée	Zone Voir <i>côté val</i> .
Crête	Partie subhorizontale la plus élevée de la digue. Par extension on désigne ainsi la couche de couverture, qui peut être, ou non, carrossable.
Défaillance	Inaptitude d'un système ou d'un composant à accomplir sa (ou ses) fonction(s) requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques (d'après NF X60-010). Voir <i>fonction</i>
Défense amovible	Voir <i>défense temporaire</i>
Défense temporaire	Composant d'une digue de protection construit au-dessus du sol et supportées par des fondations structurelles in situ. Ce composant n'est pas en place de manière permanente, mais installé en anticipation d'une inondation.
Dégradation	Déclin des caractéristiques de certains ou de tous les composants d'une digue, ayant pour effet de diminuer la capacité de la digue à assurer ses fonctions.
Désordre	Signe observable ou quantifiable d'une détérioration de la digue ou d'un de ses composants par rapport à un état antérieur. Généralement cet état antérieur est l'état initial de l'ouvrage, c'est-à-dire son état constaté lors du diagnostic initial de l'ouvrage. Cela peut être aussi par rapport à un constat précédent (par exemple entre deux visites techniques).
Détérioration	Mécanisme ou processus par lequel un ouvrage ou un composant est endommagé. Il est entendu qu'un ouvrage / composant détérioré est moins à même à assurer sa fonction essentielle, sans pour autant qu'il puisse être considéré comme ruiné. La détérioration conduit au <i>désordre</i> . À distinguer de <i>ruine</i> .
Diagnostic	Identification de la (ou des) cause(s) probable(s) de la (ou des) défaillance(s) d'une fonction à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test (AFNOR, CEI). Lors de la prise en charge par un gestionnaire d'un ouvrage ancien et précédemment mal suivi, un diagnostic initial doit être réalisé, permettant de mettre en évidence d'éventuelles faiblesses de l'ouvrage et qui servira d'état 0 pour la surveillance de l'ouvrage et/ou d'élément de décision pour sa remise à niveau.
Digue charge	en Désigne des digues qui sont confrontées en permanence aux sollicitations hydrauliques : digues de rivière canalisée, digue de protection littorale, etc. À distinguer de <i>digue sèche</i> .

Digue sèche	Désigne des digues qui sont confrontées de façon occasionnelle aux sollicitations hydrauliques (crues, submersion marines). À distinguer de <i>digue en charge</i>.
Drain	Organe dont la fonction principale est de drainer les eaux de l'ouvrage (digue et/ou fondation). L'organe de drainage est en général composé de plusieurs parties ; dans le cas le plus complexe il peut par exemple comprendre : – le drain lui-même, granulaire ou géosynthétique, – une canalisation de collecte, perforée et habituellement située à la base du précédent, parfois abusivement dénommée "drain" par extension d'autres domaine (agriculture, routes, ...), – une canalisation de transit (dans le cas où l'eau drainée doit traverser un massif de l'ouvrage ou de terrain naturel avant de déboucher à l'air libre), – un exutoire débouchant dans un fossé à créer ou directement dans le milieu naturel (cours d'eau ou thalweg).
Drainage	Cette fonction permet de capter et d'acheminer puis d'évacuer les eaux qui circulent dans le corps de digue ou dans sa fondation vers un exutoire. La fonction de drainage permet notamment de diminuer les sous-pressions dans ou sous l'ouvrage.
Effondrement	Mouvement d'une masse de terrain qui s'effondre brutalement sous son propre poids. Il peut se produire suite suite à l'existence d'une cavité, liée par exemple à un <i>affouillement</i> du pied de digue, de <i>l'érosion interne</i> (conduit) ou en présence de cavités dans la digue ou la fondation (dans ce dernier cas c'est alors un <i>fontis</i>). Voir <i>affouillement</i> et <i>fontis</i>.
Entretien	Désigne les activités destinées à maintenir ou rétablir un système dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise (NF X60-010). Les travaux d'entretien doivent être définis dans les consignes d'un ouvrage, à la différence des confortements, réparations qui doivent être définis sur la base d'un diagnostic. Voir <i>maintenance</i>.
Épi	En cours d'eau fluvial ou torrentiel, un épi est un ouvrage sécant avec la direction du courant permettant d'orienter ce dernier (à des fins de protection contre l'érosion externe, ou de navigation). En contexte maritime, les épis transversaux protègent les côtes par arrêt d'une partie du transit littoral, lorsque les mouvements de sable s'effectuent préférentiellement parallèlement au rivage. Ils permettent de cloisonner le littoral en secteurs, dans le but d'y stabiliser la côte.

Érosion	Action d'arrachement et de transport de particules de sol ou de roche du fait de l'action d'écoulements superficiels ou internes, du vent, des vagues, de la pluie, de la fonte des neiges, des cycles gel dégel, d'activités anthropiques, ou par des mécanismes de glissements de terrain, d'éboulements, d'avalanches, de laves torrentielles, etc. Dans le cas d'une digue en remblai, l'érosion peut être : - <i>Externe</i> : cette dénomination regroupe tous les mécanismes qui provoquent un départ de matériaux sous l'effet de sollicitations s'appliquant sur la surface <u>extérieure</u> de la digue. Ces mécanismes sont : ▪ surverse de la crête ; ▪ effets du courant sur la digue tels que l'<i>affouillement</i> (érosion de la fondation et/ou du pied de digue) ou l'érosion du talus, ▪ impact des vagues soit direct (côté eau), soit par franchissement (crête, côté zone protégée), ▪ passages répétés (humains, animaux, d'engins ...), ▪ impacts accidentels (glace, arbres, navigation, ...), ▪ ruissellement des eaux météoriques ; - <i>Interne</i> : cette dénomination regroupe les mécanismes qui provoquent un départ de matériaux sous l'effet de la circulation de l'eau <u>à l'intérieur</u> de la digue. En l'état actuel des connaissances, quatre mécanismes peuvent être distingués : ○ érosion de contact ; ○ érosion régressive ; ○ érosion de conduit ; ○ suffusion.
Étanchéité	Fonction des composants « d'étanchéité » d'une digue. Cette fonction permet de limiter les écoulements d'eau dans le corps de la digue et/ou sa fondation.
Filtration	Fonction du composant « filtre » d'une digue. Cette fonction consiste à limiter le départ de matériaux à l'interface entre deux couches, tout en laissant passer l'eau.
Fonction	Actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimés exclusivement en termes de finalité (AFNOR, NF X50-150). Cette notion s'intègre dans une démarche d'analyse fonctionnelle qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un système (AFNOR, 1996) et de ses composants. Pour qu'une digue puisse assurer ses fonctions essentielles (retenir l'eau et être pérenne), différentes fonctions principales des composants ont été identifiées dans ce guide : - étanchéité ; - drainage ; - filtration ; - stabilité au glissement ; - protection contre l'érosion externe.

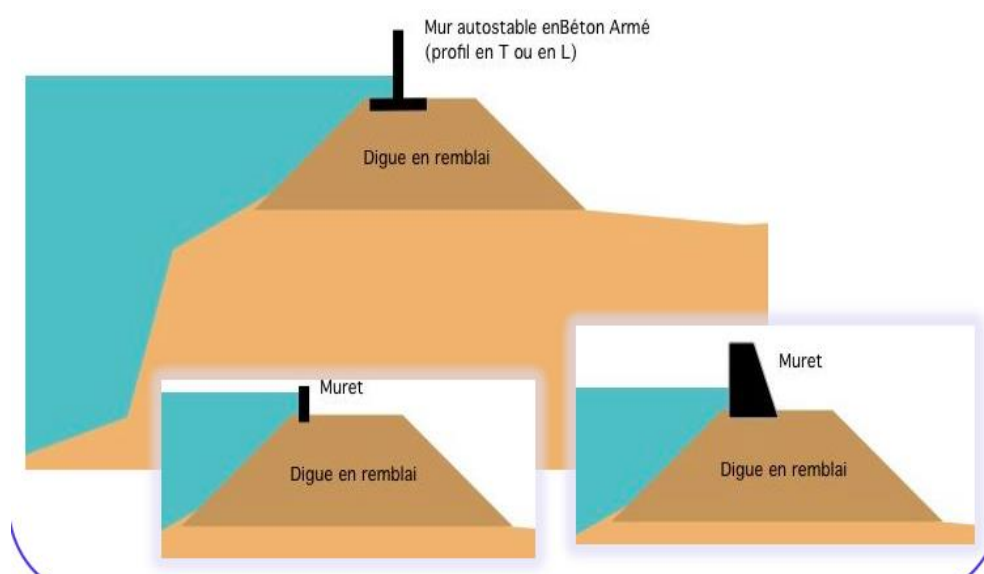
Fondation	Terrain d'assise du corps de la digue. La fondation d'une digue participe à la stabilité et à l'étanchéité de l'ouvrage. La fondation peut faire l'objet de traitement ou de travaux spécifiques.
Fontis	<i>Effondrement</i> local du sol provoqué par l'éboulement progressif des terrains surmontant un vide souterrain.
Franc-bord	Portion du lit majeur située entre le cours d'eau et une digue. Synonymes : fangasse, franc-bord, <i>ségonnal</i>, <i>banquette</i>.
Génie-écologique	1/ (cas général) « <i>Conduite de projets qui, dans sa mise en œuvre et son suivi, applique les principes de l'ingénierie écologique ¹⁶ et favorise la résilience des écosystèmes</i> ». 2/ (cadre de ce guide) terme qui regroupe les différentes techniques qui font appel aux propriétés des végétaux et qui permettent d'améliorer la stabilité et la protection contre l'érosion externe d'une digue.
Glissement	Terme utilisé (abusivement) pour caractériser le résultat du mécanisme de glissement, qui se définit par un mouvement d'un volume de terrain le long d'une surface de rupture plane ou circulaire.
Grillage anti-fouisseur	Grillage mis en place sur les talus de digue pour éviter le creusement de terriers dans le corps de digue par des animaux fouisseurs.
Levé	Se dit d'une digue construite en terre par élévations successives.
Lit majeur	Le lit majeur est la plaine inondable d'un cours d'eau, délimité par les plus hautes eaux. Le lit majeur est limité par des terrasses anciennes ou les versants de la vallée.
Lit mineur	Espace occupé par l'écoulement d'un cours d'eau pour des débits courants et des crues courantes et séparé du reste du lit majeur par les berges.
Maintenance	Ensemble d'activités visant à conserver ou à rétablir l'état, les fonctions ou la sécurité d'un ouvrage. La maintenance peut être préventive ou curative. Voir <i>entretien</i>.
Masque	Couche mince pouvant être mis en place aussi bien côté val que côté eau, en général pour assurer l'étanchéité et/ou la protection contre l'érosion externe
Mur anti-inondations ou mur anti-crues	Digue ou partie supérieure d'une digue de type mur auto-stable ou ouvrage poids. Voir exemples sur les figures ci-dessous :

¹⁶ À savoir pour l'ingénierie écologique : « ensemble des connaissances scientifiques, des techniques et des pratiques qui prend en compte les mécanismes écologiques, appliqué à la gestion de ressources, à la conception et à la réalisation d'aménagements ou d'équipements, et qui est propre à assurer la protection de l'environnement »

Voir génie écologique et ingénierie écologique sur <http://www.genieecologique.fr/definitions> (consulté le 05 mai 2021)



Mur anti-inondations à gauche (et passerelle de franchissement pour les véhicules) à la Nouvelle Orléans – États-Unis (crédit photo : Rémy Tourment)



Autres exemples de murs anti-inondations (Source : Rémy Tourment)

Parafouille	Composant dont la fonction est l'étanchéité. Un parafouille est généralement de nature imperméable afin de s'opposer au passage de l'eau dans la digue ou la fondation et ainsi augmenter la longueur du chemin hydraulique
Parement	Face extérieure visible de l'ouvrage.
Perré	Revêtement situé sur les digues ou les berges d'un cours d'eau / canal, constitué de pierres jointoyées ou non ou de béton. Si ce revêtement est vertical ou subvertical, on parle d'un "Mur".
Protection	Ensemble des moyens visant à maintenir un ouvrage et/ou ses fonctions dans un état équivalent à son état initial.

Recharge Apport de matériau permettant une fonction de stabilisation vis-à-vis du glissement d'un talus.

À distinguer de *butée de pied*.

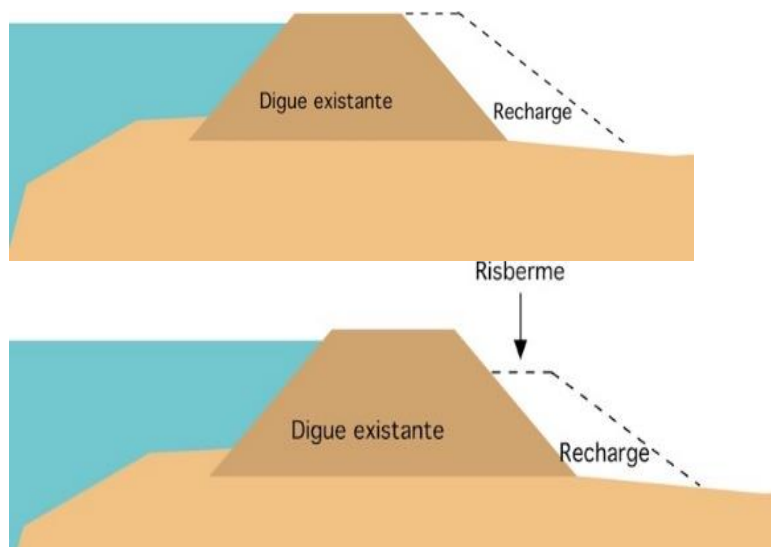


Schéma illustrant les types de recharge (Source : Rémy Tourment)

Reconstruction Remise en état de l'ouvrage, à l'identique ou non, généralement suite à une rupture ou suite à une dégradation avancée ne permettant plus son confortement.

Voir *réparations*.

À distinguer de *confortement* et de *renforcement*.

Rehausse Fonction du composant « rehausse ».

La fonction principale d'une rehausse est d'éviter la surverse, en augmentant le niveau de la crête d'une digue, de manière localisée ou généralisée. La rehausse peut être définitive, temporaire ou provisoire.

Remblai Ouvrage créé par le dépôt, le compactage et la mise en forme de quantités de terres ou de roches.

Renforcement Travaux permettant d'améliorer la performance d'une digue ou d'un de ses composants en prévention d'un événement ou d'un mécanisme de dégradation.

Voir *confortement*.

À distinguer de *reconstruction* et de *réparation*.

Réparation Travaux curatifs de nature à remettre, à la suite de désordres ou d'endommagements plus ou moins importants, une digue dans un état (au moins) équivalant à l'original avant l'apparition des désordres.

Voir *reconstruction*.

À distinguer de *confortement* et de *renforcement*.

Reprofilage Remaniement du profil transversal de la digue.

Risberme Partie plate horizontale ménagée dans le talus d'un ouvrage (côté val ou côté eau).

Rive	Zone géographique qui sépare le milieu aquatique du milieu terrestre. La rive démarre en sommet de berge et s'étend dans le lit majeur sur une zone plus ou moins étendue qui est sous l'influence du milieu aquatique. Ce terme est aussi utilisé lorsqu'on souhaite préciser de quel côté de la rivière on se situe (en regardant vers l'aval) : rive droite ou rive gauche.
Ruine	Processus aboutissant à la destruction d'un composant ou d'un ouvrage. À distinguer de <i>détérioration</i>.
Rupture	Fait pour quelque chose de se rompre sous l'effet d'une sollicitation excessive. Dans le contexte de ce guide, une rupture peut se voir à plusieurs échelles : – à l'échelle d'un composant : ruine de tout ou partie de ce composant de telle sorte qu'il n'est plus en mesure d'assurer sa fonction ; – à l'échelle de l'ouvrage : ruine de tout ou partie de l'ouvrage, généralement liée à une rupture d'un de ses composants résultant en une destruction partielle ou totale de la digue et un lâcher d'eau (voir : <i>brèche</i>)
Seuil	En rivière, un seuil est un ouvrage fixe ou mobile, généralement de faible hauteur de chute et qui barre une partie du lit mineur.
Stabilité	État d'équilibre mécanique d'un ouvrage (la digue ou sa fondation) vis-à-vis de(s) différents mode(s) de rupture (par glissement, érosion, liquéfaction, etc.) sous l'action des efforts résultants de l'action de l'eau (pression hydrostatique, sous-pressions, écoulements internes ou externes), du poids propre de la digue et des sollicitations exceptionnelles (séisme...).
Talus	Face inclinée d'un remblai, d'une berge ou d'une digue.
Tassement	Déplacement vertical plus ou moins prononcé d'un terrain, d'un remblai, d'une fondation ou d'un ouvrage. Les tassements dits <i>différentiels</i>, c'est-à-dire des tassements qui seraient répartis de manière inégale, sont à surveiller avec la plus grande attention.
Travaux d'extrême urgence	Travaux entrepris en situation de crue et/ou de crise et dont l'objectif est d'éviter la formation d'une brèche, ou de tenter de contrôler une brèche (ralentir ou empêcher son développement).
Travaux d'urgence	Travaux généralement entrepris après une crue ou un événement ayant endommagé la digue (accident, séisme, ...), l'objectif étant une intervention rapide (dans les quelques semaines voire les quelques mois suivant le constat du désordre) dans l'idée de rétablir à court terme la fonctionnalité de la digue (protection contre les futures crues ou marées dans le cas des digues de protection fluviales ou contre les submersions maritimes).
Travaux en condition normales	Travaux hors période de crise, faisant suite au constat ou à la crainte d'un désordre, les travaux sont à réaliser dans un délai pouvant dépasser plusieurs mois. Ce type de travaux doit être précédé d'un diagnostic.
Vieillessement	Regroupe les effets de l'ensemble des sollicitations à long terme sur un ouvrage (exposition aux UVs, température, pH, etc.).

Annexe B : Liste des Fiches techniques

Ci-dessous la liste des fiches techniques écrites par les différents sous-groupes.

Sous-groupe n°1 « Étanchéité interne » et sous-groupe n°2 « Étanchéité externe » :

- FT G1. Généralités sur les palplanches
- FT 3.1. Rideau de palplanches à fonction d'étanchéité
- FT 3.2. Paroi mince
- FT 3.3. Paroi moulée à fonction d'étanchéité
- FT 3.4. Sol mixé/mélangé en place
- FT 3.5. Écran d'étanchéité réalisé au moyen de la technique du jet grouting
- FT 3.6. Masque en matériaux naturels faiblement perméables

Sous-groupe n°3 « Filtration-Drainage » :

- FT 4.1. Dimensionnement d'un géotextile de filtration
- FT 4.2. Dimensionnement d'un sol de filtration
- FT 4.3. Ouvrage de drainage en talus sous recharge peu perméable
- FT 4.4. Ouvrage de drainage sans recharge

Sous-groupe n°4 « Stabilité et rehausse » :

- FT G1. Généralités sur les palplanches
- FT 5.1. Remblai stabilisateur avec géoconteneur
- FT 5.2. Remblai renforcé
- FT 5.3. Stabilité au glissement apporté par un mur poids, un mur cantilever ou une paroi béton
- FT 5.4. Rideau de palplanches de soutènement
- FT 5.5. Soutènement en gabions pour conforter la stabilité au glissement de la digue
- FT 6.1. Rehausse de digue par mur, muret et murette
- FT 6.2. Rehausse temporaire à fondation permanente sur un linéaire de digue
- FT 6.3. Recharge/épaississement et/ou rehausse en remblai

Sous-groupe n°5 « Protection externe » :

- FT G1. Généralités sur les palplanches
- FT 7.1. Protection externe par enrochements libres
- FT 7.2. Protection externe par enrochements liés au béton
- FT 7.3. Protection en gabions contre l'érosion externe
- FT 7.4. Protections minces contre l'érosion externe
- FT 7.5. Réparation de perré maçonné
- FT 7.6. Perrés bétonnés
- FT 7.7. Protection externe par blocs artificiels
- FT 7.8. Protection externe de la digue par mise en place d'épis de protection
- FT 7.9. Protection externe par la reprise d'un mur par béton projeté
- FT 7.10. Recharge ou réserve de pied en enrochements
- FT 7.11. Palplanches de protection contre l'érosion externe en pied de talus côté eau
- FT 7.12. Protection externe de talus par technique d'enherbement
- FT 7.13. Protection externe de talus par association Génie Civil – Génie Écologique

Annexe C : Liste des Fiches de cas

Quelques fiches de cas (FC) sont également jointes à la partie 2. Ci-dessous les titres et sujets de ces fiches.

- FC.1. Confortement de la digue de protection contre les inondations d'Albaron (13) – Petit Rhône RG
- FC.2. Confortement des digues du Lez à Lattes et Montpellier (34)
- FC.3. Travaux de la digue de l'Yzeron à Oullins (69)
- FC.4. Renforcement et filtration/drainage de la digue de « Bou – La Binette » sur la Loire à Bou (45)
- FC.5. Confortement de la digue en amont de la colline du Wawel à Cracovie (Pologne)
- FC.6. Renforcement de corps de digue des zones de non-recouvrement du val d'Orléans par technique de mélange en place sur les communes de Guilly et Sigloy (45) – Plan Loire Grandeur Nature
- FC.7. Réalisation d'un écran étanche dans la digue de Loire par mise en œuvre d'un rideau de palplanches sur la commune de Saint-Père-sur-Loire (45) – Plan Loire Grandeur Nature
- FC.8. Paroi mince au coulis de Ciment – Digue de la Polka – Jouy-aux-Arches (57)
- FC.9. Reconstitution en eau du talus et du pied de digue côté rivière par banquettes de pied en tout-venant de carrière
- FC.10. Confortement des digues des Amidonniers/Sept-Deniers (Digues D12, D13 et D14) – Raccordement entre le nouveau parement béton des digues en remblai et une digue type mur béton – Toulouse (31)
- FC.11. Travaux spécifiques au droit d'une zone de transition pour raccorder un écran étanche sur la digue de la Blanchisserie et l'ouvrage hydraulique de l'ancienne écluse de la Jonction – NEVERS (58)
- FC.12. Reconstruction après démontage d'un tronçon de digue du val d'Orléans – Commune de Saint-Pryvé - St-Mesmin (45)
- FC.13. Confortement des digues des Amidonniers/Sept-Deniers (Digues D12, D13 et D14) – Traitement du talus aval par grillage anti-fouisseurs – Toulouse (31)
- FC.14. Confortement et protection des digues de l'Aude en RD et RG sur les communes de Sallèles d'Aude, Narbonne, Cuxac d'Aude et Coursan (11)
- FC.15. Traitement des terriers de lapins présents dans le corps de la digue du val d'Orléans – Commune de Sandillon (45)
- FC.16. Déboisement avec enlèvement des souches et reconstitution du talus de digue côté Loire – Commune de Mareau-aux-Prés (45) – Plan Loire Grandeur Nature

Annexe D : Interventions d'urgence

Cet Annexe D, qui traite des travaux d'urgence en période de crue, a été rédigé par Thibault MALLET (SYMADREM).

Les travaux d'urgence ne doivent pas être comparés avec des travaux d'entretien ou des travaux de renforcement. Les interventions sont opérées le plus souvent en période de pluie peu propices au compactage des matériaux fins. Ces travaux ne sont pas destinés à être permanents et doivent faire l'objet d'un diagnostic post-crue.

Les principes généraux d'intervention d'urgence sont :

- L'utilisation des techniques classiques de terrassement. Car elles sont en général maîtrisées par les gestionnaires de digue ;
- L'utilisation de matériaux pulvérulents pour les interventions côté aval et l'utilisation de matériaux très plastiques en cas d'utilisation d'argile côté amont ;
- Les interventions du côté zone protégée (aval) sont préférées aux interventions côté fleuve (amont) ;
- L'utilisation de matériaux d'apport (laitier, ballast, enrochements) entreposés sur des aires de stockage localisées à proximité des digues ;

Ces travaux ne sont pas destinés à être permanents et doivent faire l'objet d'un diagnostic post crue.

D.1. Intervention en cas de fuites ou de suintements d'eaux boueuses traduisant l'érosion interne du remblai

La technique d'intervention consiste à limiter le débit de fuite par la mise en œuvre d'argile très plastique côté amont (fleuve) et la mise en œuvre côté aval d'un géotextile filtrant (si possible) destiné à empêcher le départ des matériaux fins et d'une recharge filtrante/drainante constituée de laitier ou de ballast. La hauteur de la recharge aval doit être suffisante pour éviter, le temps de la crue, le claquage de la recharge.



Figure D.1 : Fuites importantes d'eau légèrement boueuse (à gauche) et boueuse (à droite) (© SYMADREM à gauche et PNRC à droite)

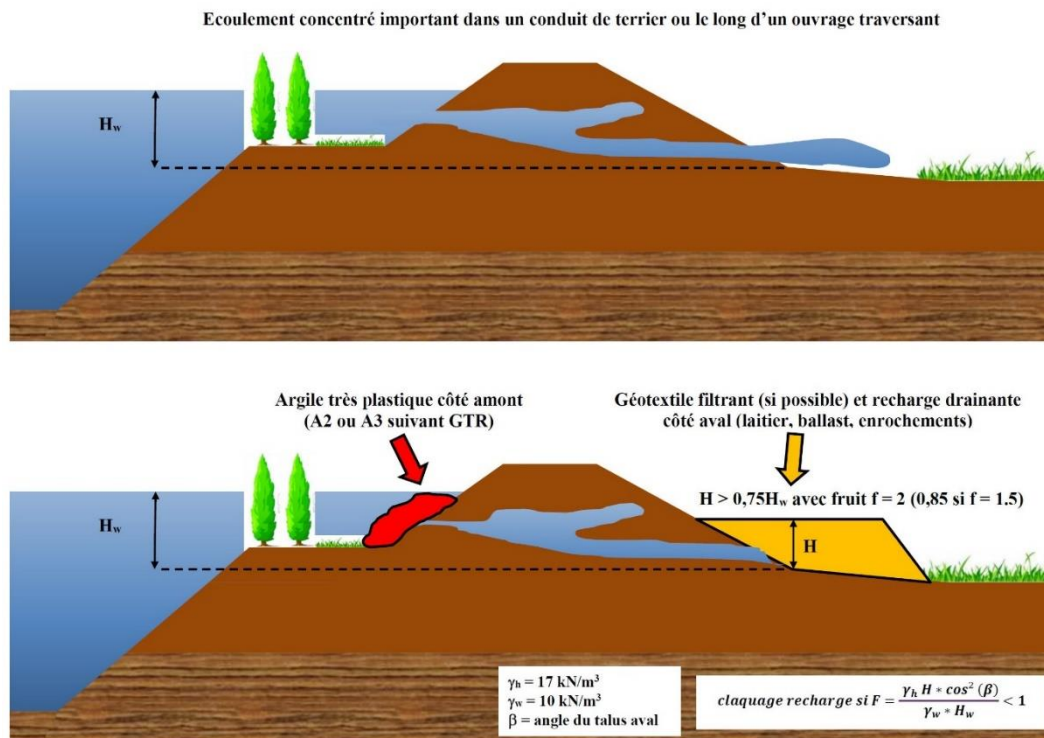


Figure D.2 : principe d'intervention en cas d'infiltrations d'eaux boueuses
 (Source : SYMADREM)



Figure D.3 : Intervention d'urgence en 2002 (crédit photo : SYMADREM)

D.2. Intervention en cas de suintements d'eaux claires

Les suintements d'eaux claires assez courants en crue font l'objet la plupart du temps d'une surveillance régulière. L'intervention est nécessaire qu'en cas de débit de fuite excessif attestant d'un démarrage imminent d'érosion de conduit. Dans ce dernier cas, l'intervention peut être similaire à celle liée aux eaux boueuses ou être limitée à la mise en œuvre d'un filtre sur le talus aval et d'une recharge drainante en matériaux pulvérulents.



Figure D.4 : Infiltrations d'eaux claires (Crédit photo : SYMADREM)

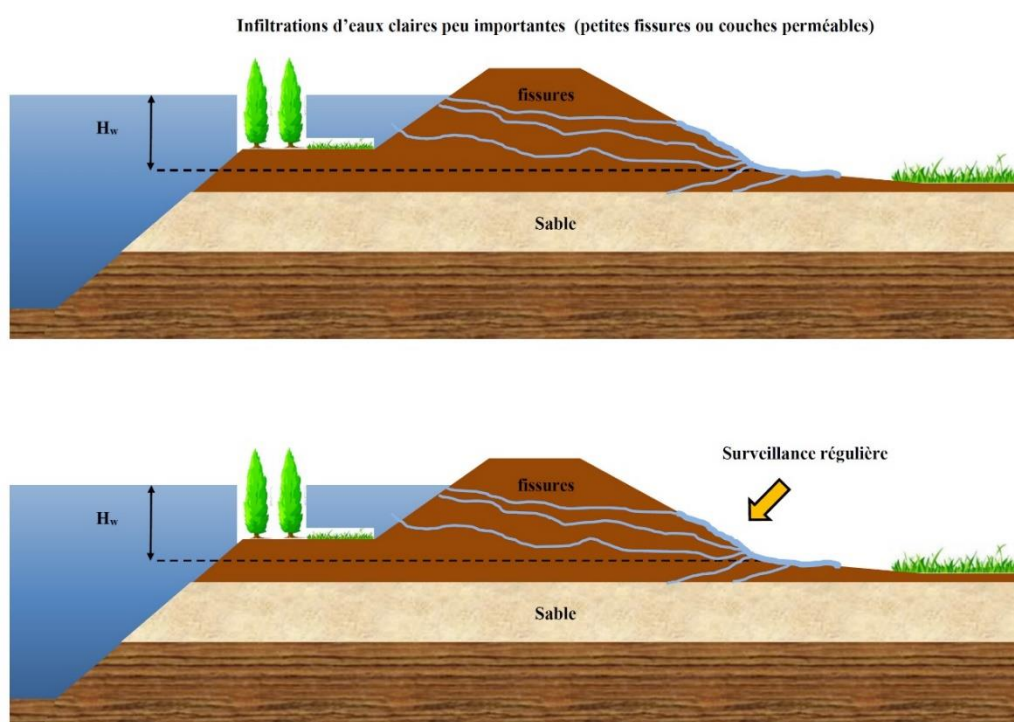


Figure D.5 : principe d'intervention en cas de suintements d'eaux claires peu importants (Source : SYMADREM)

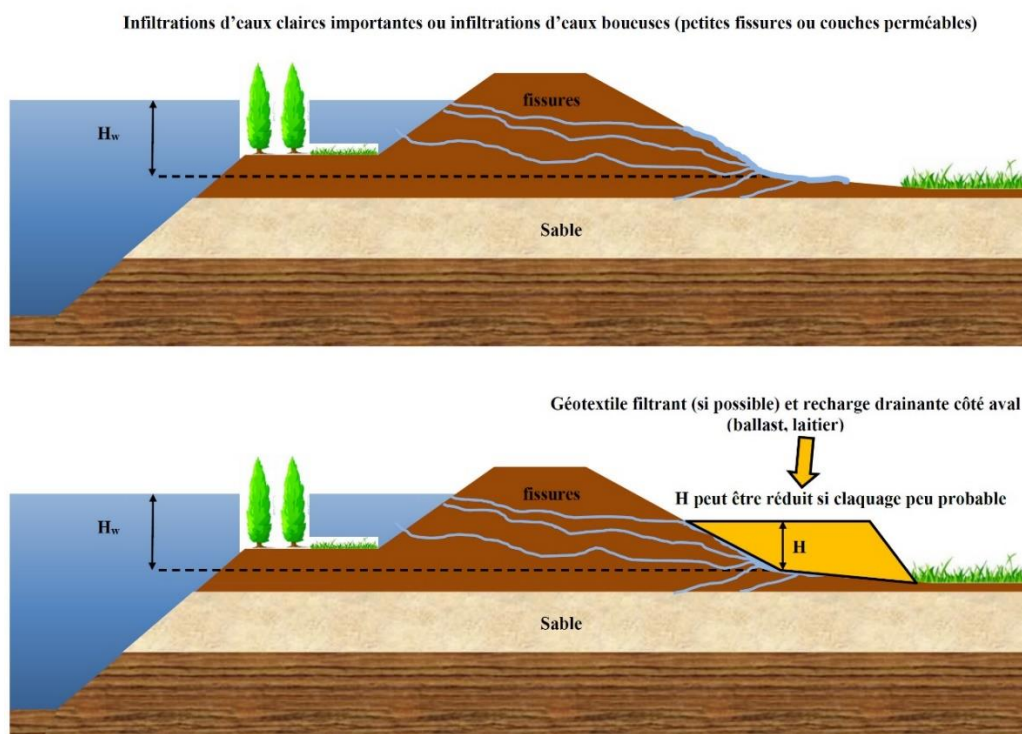


Figure D.6 : Principe d'intervention en cas de suintements d'eaux claires importants (Source : SYMADREM)

D.3. Intervention en cas de glissement de talus côté zone protégée

La technique d'intervention est identique. Un massif drainant posé sur un géotextile filtrant permet de stabiliser le talus aval.

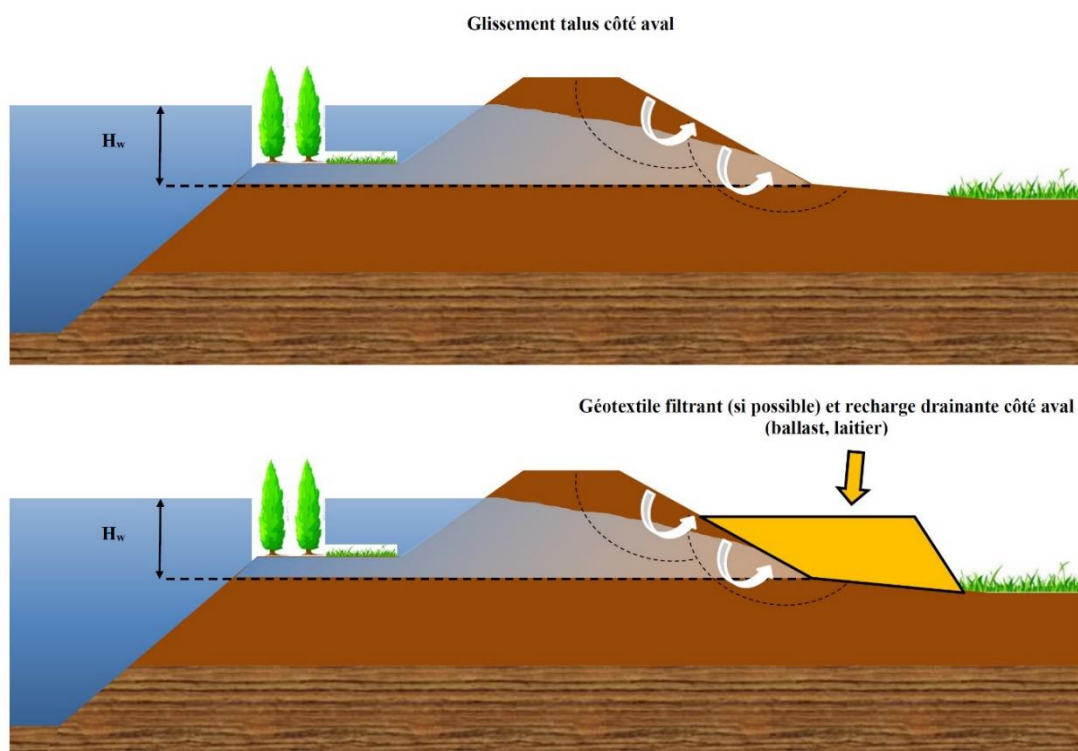


Figure D.7 : Principe d'intervention en cas de glissement côté aval (Source : SYMADREM)

D.4. Intervention en cas d'érosion du talus côté fleuve ou affouillement présumé en pied de talus

Un engraissement de la digue côté aval (zone protégée) est opéré avec de l'argile plastique prélevée localement, qui permet de résister à l'érosion externe du courant. Cette intervention peut être complétée par la mise en œuvre de blocs d'enrochements côté amont (fleuve).



Figure D.8 : Pose d'enrochements côté amont (gauche) ou engraissement côté aval (droite) suite à affouillement (Crédit photo : SYMADREM)

Affouillement externe visible ou pressenti

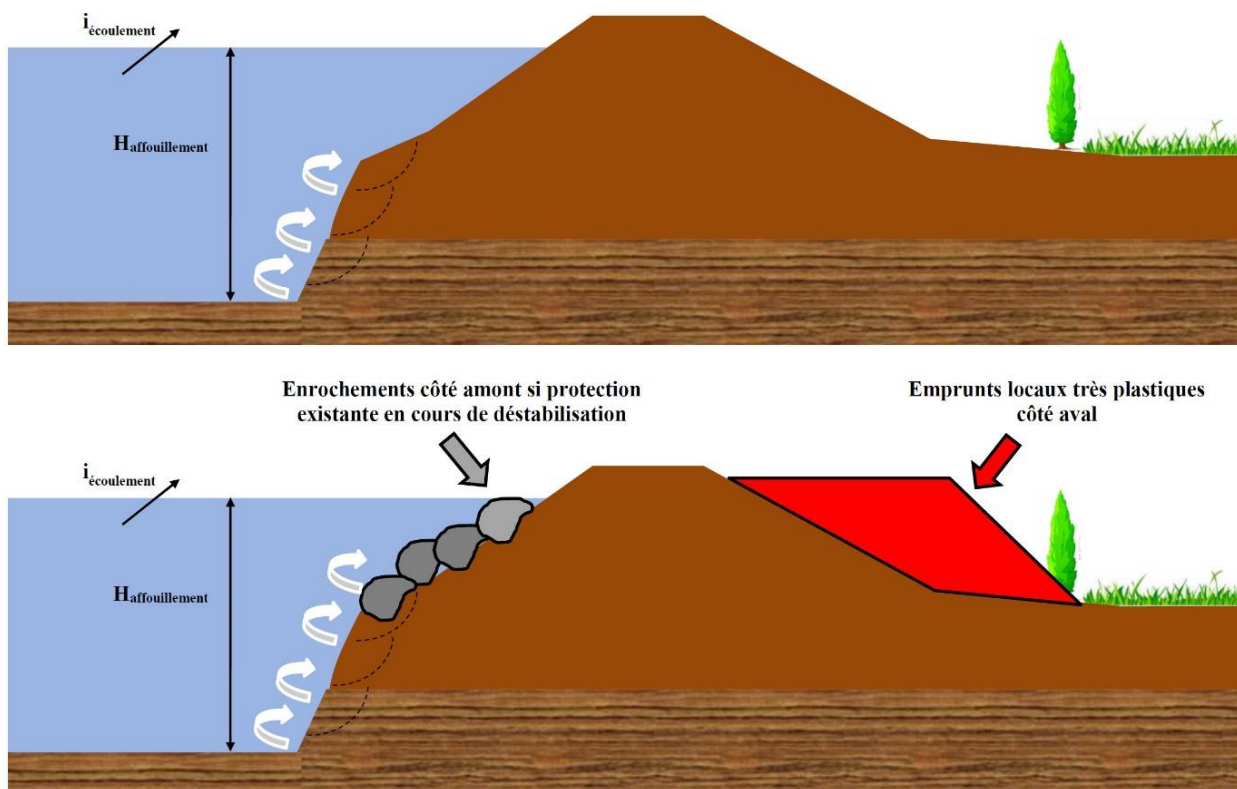


Figure D.9 : Principe d'intervention en cas d'affouillement du pied de talus (Source : SYMADREM)

D.5. Intervention en cas de surverses localisées

Un remblai est réalisé en crête de digue pour contenir les déversements. Les surverses générales ne sont pas traitées, compte tenu de leur impact éventuel en rive opposée ou en aval.



Figure D.10 : Intervention sur encoule suite à début de surverse (Crédit photo : SYMADREM)

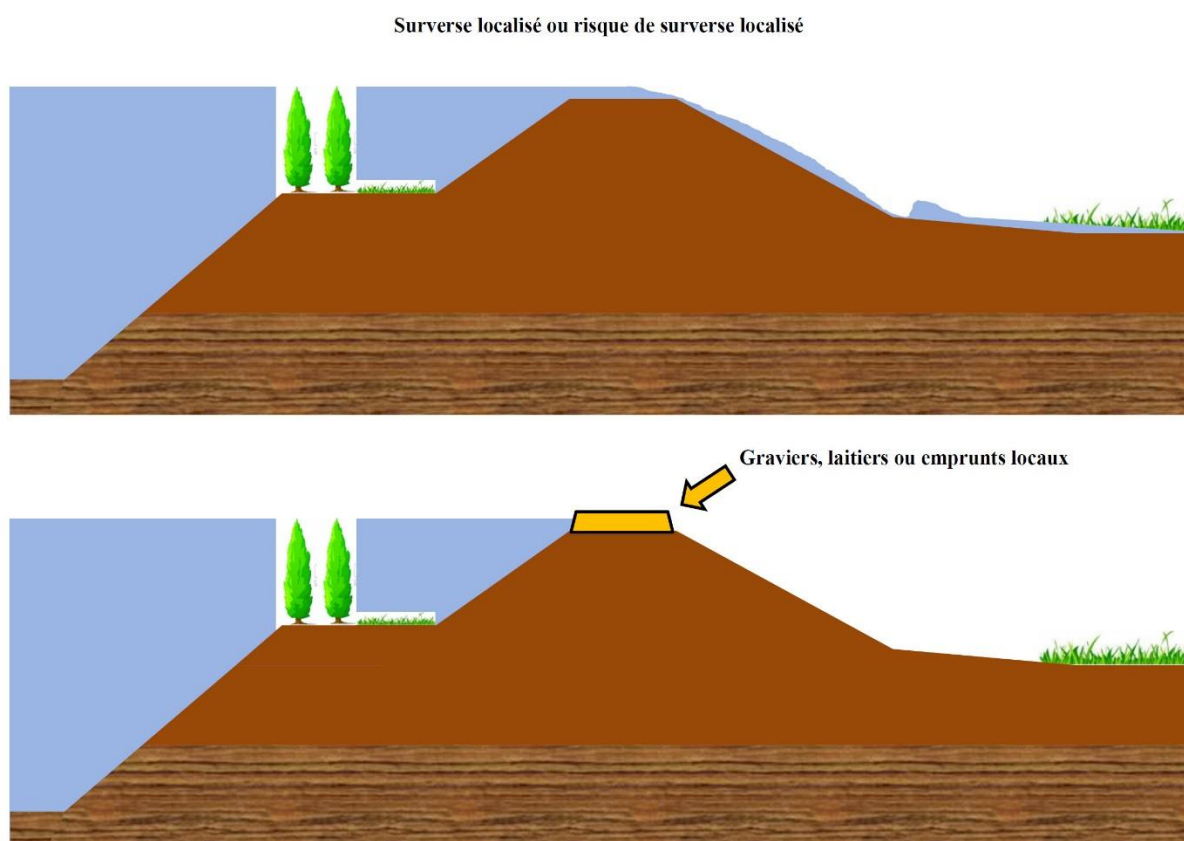


Figure D.11 : Principe d'intervention en cas de surverse localisé (Source : SYMADREM)

D.6. Intervention en cas de non fermeture ou de rupture d'un organe de fermeture

Il est procédé à la mise en œuvre préférentiellement côté amont de blocs de 3 à 6 tonnes (compte tenu des vitesses pouvant atteindre 7 m/s en cas de rupture) ou de big-bags équivalents. La blocométrie est réduite en cas de non fermeture et de vitesse plus faible.

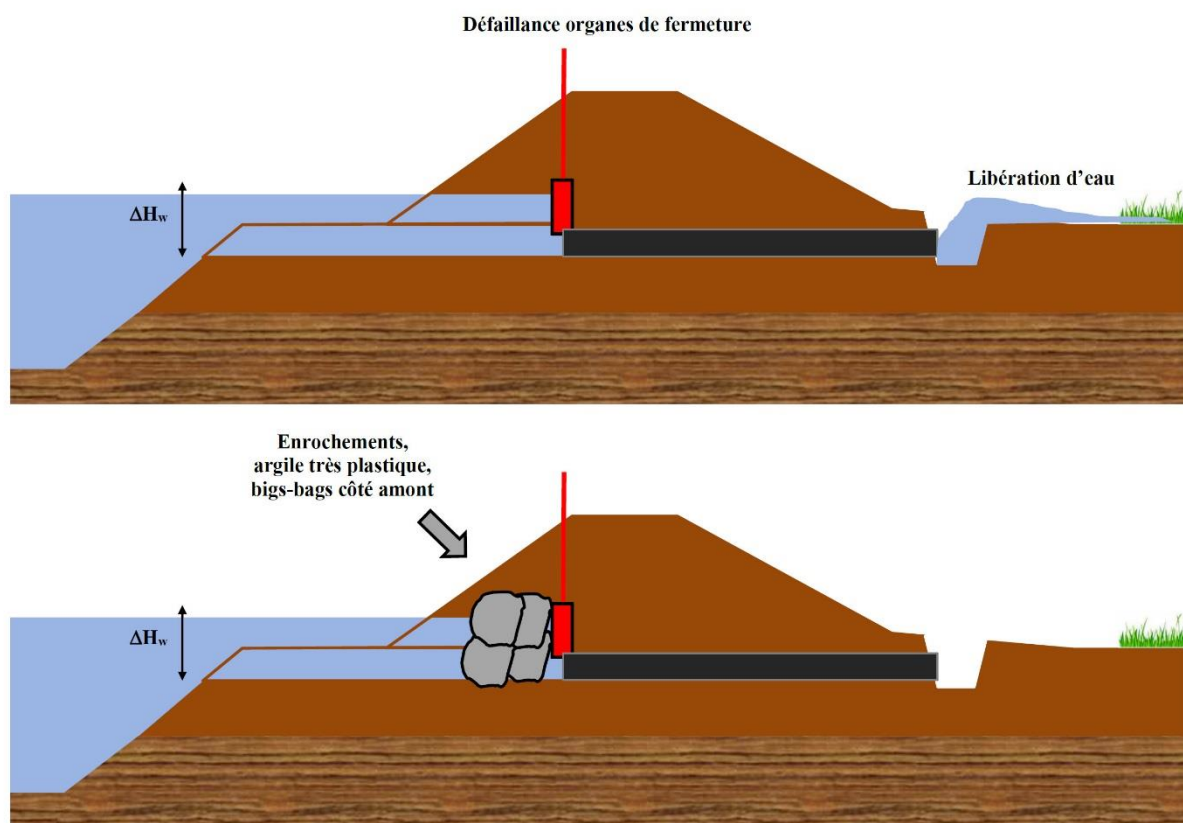


Figure D.12 : Principe d'intervention en cas de non fermeture ou rupture d'un organe de fermeture (Source : SYMADREM)



Figure D.13 : Intervention au droit d'un ouvrage traversant (Crédit photo : SYMADREM)

D.7. Intervention en cas de départ de brèches au droit d'une digue comportant un franc-bord

Il est procédé si possible à la mise en œuvre en becs de canard d'enrochements côté amont pour stabiliser l'ouvrage et commencer à limiter le débit et dans un second temps à la mise en œuvre d'argile entre le cordon rocheux et la digue pour stopper progressivement le débit.

Ces techniques ont été couronnées de succès en Camargue en 1994 pour la brèche de Beaumont (charge d'eau 1,6 m) et pour la brèche de Ventabren en 2016 (charge d'eau 0,7 m). Il est à noter qu'aucune intervention héliportée avec largage de bigs-bags n'a permis le colmatage de brèche en Camargue de 1993 à nos jours.

Comité Français des Barrages et Réservoirs

Le comité français des **barrages** et **réservoirs** (CFBR), anciennement comité français des grands barrages (CFGB), est une association scientifique et technique créée en 1926. Il constitue la branche française de la commission internationale des grands barrages (CIGB).

L'association a pour objet de provoquer des progrès dans la **conception**, la **construction**, l'**entretien** et les **méthodes d'exploitation** des barrages, des réservoirs et des digues, en rassemblant la documentation, en étudiant les questions qui s'y rapportent, notamment d'ordre technique, économique, sociétal et écologique, et en contribuant à la diffusion des connaissances.

A ce jour, le CFBR comprend 520 membres, représentants des **administrations**, des **maîtres d'ouvrages**, des **ingénieurs-conseils**, des **entrepreneurs**, des **experts individuels**, des **chercheurs** et des **enseignants**, tous désignés en raison de leurs compétences.

Au niveau national, le CFBR organise principalement des colloques techniques réguliers, anime plusieurs groupes de travail nationaux et propose une journée de visite annuelle pour les étudiants d'écoles d'ingénieurs.

Au niveau international, le CFBR participe activement aux travaux de la CIGB et notamment à la rédaction des **bulletins des comités techniques** qui constituent la référence internationale dans la profession. Le CFBR présente également des **rapports et communications** lors des Assemblées Générales et des Congrès.

Comité Français des Barrages et Réservoirs

Savoie Technolac

4, allée du Lac de Tignes

73290 La Motte-Servolex

Tél. : 04.79.60.64.45 - <http://www.barrages-cfbr.eu>

ISBN : N° 979-10-96371-17-4

