



Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires
SURVEILLANCE, ENTRETIEN ET DIAGNOSTIC
**DES DIGUES DE PROTECTION CONTRE
LES INONDATIONS**

Patrice Mériaux, Paul Royet et Cyril Folton



Cemagref
EDITIONS

SURVEILLANCE, ENTRETIEN ET DIAGNOSTIC DES DIGUES DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

Guide pratique à l'usage des propriétaires et des
gestionnaires

*Patrice Mériaux, Paul Royet
et Cyril Folton*

Crédits photos et dessins

Les photos dont les légendes comportent un nom de personne ou de service ne sont pas des auteurs du présent guide :

- Cemagref (Rémy Tourment)
- DDE 66 (Éric Josse et al.)
- DDE 13

– ONF Alpes Maritimes

– Service Navigation Rhône-Saône

– Nous remercions Monsieur Frédéric Hédelin, photographe professionnel, qui nous a autorisés gracieusement à reproduire dans cet ouvrage les photos 1-3, page 30, et 2-1, page 34.

Toutes les autres photos sont des auteurs (Patrice Mériaux, Paul Royet ou Cyril Folton).

Les dessins ont été conçus par Cyril Folton.

Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations. *Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires.* Patrice Mériaux, Paul Royet et Cyril Folton. © Cemagref Éditions 2004. ISBN 2-85362-636-9. Dépôt légal 3^e trimestre 2004. Édition Maurice Merlin, infographie et traitement des photos Françoise Peyriguer. Impression JOUVE. Vente par correspondance PUBLI-TRANS, ZI Marinière 2, rue Désir Prévost, 91080 BONDOUFLE ; tél. : 01 69 10 85 85. Diffusion aux libraires TEC et DOC, 14, rue de Provigny, 94236 Cachan, cedex ; tél. : 01 47 40 67 00. Prix : 29,73€ (195 FTTC).

Sommaire

<i>AVANT-PROPOS</i>	9
Objectifs et contenu du présent guide	9
Composition du groupe de travail	9
Organisation du guide	10
Responsabilités et rôles des intervenants	10
 <i>CHAPITRE 1 - NATURE, FONCTIONS ET CONSTITUTION DES DIGUES</i>	 17
1.1 Aperçu sur le parc d'ouvrages concerné en France	19
1.2 Fonctionnement d'un système d'endiguements (digues, déversoirs)	20
1.3 Constitution des digues	22
1.3.1 Digues en remblai	22
1.3.2 Digues ou murs de quai en maçonnerie ou en béton	23
1.3.3 Déversoirs	25
1.3.4 Ouvrages singuliers	27
 <i>PLANCHES HORS TEXTE</i>	 29
 <i>CHAPITRE 2 - TYPOLOGIE DES DÉSORDRES ET MÉCANISMES DE RUPTURE</i>	 53
2.1 La surverse	55
2.2 Les érosions externes et les affouillements	58
2.3 L'érosion interne (ou renard hydraulique)	59
2.4 La rupture d'ensemble	64
2.4.1 Digues en remblai	64
2.4.2 Digues ou éléments de digues en maçonnerie	67
 <i>CHAPITRE 3 - L'INSPECTION VISUELLE DES DIGUES : RECONNAISSANCE INITIALE, SURVEILLANCE DE ROUTINE</i>	 69
3.1 Justification, principe et périodicité de l'inspection visuelle	71
3.2 Conditions et moyens de mise en œuvre	72
3.3 Digues en remblai	72
3.3.1 Les points à observer et informations à répertorier	72
3.3.2 Modalités de report et de restitution des informations	73
3.3.3 Rendement et limites de l'inspection visuelle	76
3.4 Murs en maçonnerie ou en béton	77
3.4.1 Désordres structuraux	77
3.4.2 Les affouillements	78
3.4.3 Les dégradations locales	78
3.5 Déversoirs	80
3.6 Ouvrages singuliers	80

<i>CHAPITRE 4 - SURVEILLANCE EN CRUE</i>	81
4.1 Importance de l'organisation préalable (plan de vigilance et/ou plan d'intervention)	83
4.2 Surveillance visuelle en crue	84
4.2.1 Justification et principe de la méthode	84
4.2.2 Conditions et moyens de mise en œuvre	85
4.2.3 Les points à observer et informations à répertorier	86
4.2.4 Modalités de report et de restitution des informations	88
4.2.5 En résumé	88
4.3 Surveillance visuelle post-crue	89
4.3.1 Justification et principe de la méthode	89
4.3.2 Conditions et moyens de mise en œuvre	89
4.3.3 Les points à observer et informations à répertorier	90
4.3.4 Modalités de report et de restitution des informations	92
4.3.5 Rendement prévisible	92
4.3.6 En résumé	93
 <i>CHAPITRE 5 - L'ENTRETIEN DES DIGUES</i>	95
5.1 Principes et moyens généraux	97
5.1.1 Principes de l'entretien	97
5.1.2 Piste de service	97
5.1.3 Bornage	98
5.2 La végétation	98
5.2.1 Les objectifs	98
5.2.2 Les principes généraux	99
5.2.3 Que faire des arbres existants ?	99
5.2.4 Entretien des talus enherbés	99
5.2.5 Élimination de la végétation ligneuse	101
5.3 Les animaux fouisseurs	101
5.3.1 Les désordres imputables aux fouisseurs	101
5.3.2 Les principaux protagonistes et leur statut.	102
5.3.3 Les moyens de lutte dissuasifs	103
5.3.4 Élimination - limitation des populations	103
5.3.5 Dispositions curatives	107
5.4 Les protections de talus et les murs	108
5.4.1 Entretien des perrés en maçonnerie	108
5.4.2 Les protections de talus en enrochements	109
5.4.3 Entretien des murs en maçonnerie	110
5.5 Les ouvrages parafeuilles	111
5.5.1 Pieux en bois	111
5.5.2 Les palplanches	112
5.5.3 Les gabions	112
5.5.4 Les enrochements	113

<i>CHAPITRE 6 - ÉLÉMENTS DE DIAGNOSTIC DES DIGUES</i>	115
Préambule : du diagnostic rapide au diagnostic approfondi	117
6.1 Identification des aléas de rupture et adaptation du diagnostic	117
6.2 Étude historique	119
6.3 Topographie	119
6.3.1 Objectif	119
6.3.2 Profil en long des digues par rapport aux plus hautes eaux en crue	120
6.3.3 Profils en travers	120
6.3.4 Plan topographique	120
6.4 Inspection visuelle	121
6.5 Étude hydrologique et hydraulique	121
6.6 Érosion externe et affouillements : approche géomorphologique	122
6.7 Le diagnostic géotechnique	123
6.7.1 Quelques notions de niveau de sécurité en fonction de la constitution de la digue	123
6.7.2 Les conditions pour la définition d'un programme de reconnaissance	124
6.7.3 Éléments pour l'établissement d'un programme de reconnaissance	125
6.7.4 Coût récapitulatif	127
6.8 Modélisation	127
6.9 Évaluation des enjeux	128
6.10 Hiérarchisation des risques	129
6.11 Solutions de confortement	129
6.11.1 Principales options de confortement selon les situations	130
6.11.2 Objectif à assigner au titre de la phase de conception des confortements	131
6.11.3 Éléments de justification et contraintes techniques à faire prendre en compte	132
6.12 La mission d'assistance au propriétaire / maître d'ouvrage	134
<i>LEXIQUE</i>	137
<i>ANNEXES</i>	139
<i>Annexe 1 - Quelques notions de mécanique des sols</i>	141
1 – Caractéristiques des sols	141
2 – Propriétés des sols fins	142
3 – Matières organiques	143
4 – Compactage des sols	143
5 – Identification des sols	145
6 – Classification des sols	146
<i>Annexe 2 - Quelques notions d'hydraulique des sols</i>	149
1 – Définitions préliminaires	149
1.1 - Vitesse de l'eau dans le sol	149
1.2 - Charge hydraulique en un point	149
1.3 - Gradient hydraulique	149

2 – Propriétés hydrauliques des sols	150
2.1 - Loi de Darcy	150
2.2 - Équipotentiellles et lignes de courant	150
2.3 - Forces d'écoulement et forces de pesanteur dans un sol saturé	151
2.4 - Gradient critique ; renard	152
2.5 - Mesure de la perméabilité	152
3 – Règles de filtres	153
 <i>Annexe 3 - Dossier de surveillance des digues à sec – Mode opératoire pour l'inspection visuelle d'une digue en remblai : reconnaissance initiale, surveillance de routine</i>	 157
1 – Principe et objectif de l'inspection	157
1.1 - Caractéristiques morphologiques de la digue	157
1.2 - Indices de désordre	158
2 – Conditions générales de mise en œuvre	158
2.1 - Préparation de la visite	158
2.2 - Déroulement de la visite	159
2.3 - Travail de restitution au bureau	161
3 – Exemple d'utilisation d'une fiche-type de relevé des désordres	161
3.1 - Préambule	161
3.2 - Notice d'utilisation de la fiche	162
3.3 - Tables des codes de désordre et glossaire	166
 <i>Annexe 4 - Note de présentation d'un exemple d'inspection post-crue et de premiers travaux d'urgence</i>	 171
1 – Présentation rapide du contexte de l'inspection	171
1.1 - Les endiguements de la basse plaine de l'Agly	171
1.2 - La crue des 12 et 13 novembre 1999	171
1.3 - Objectifs de l'inspection	172
2 – Inspection visuelle post-crue des digues	172
2.1 - Méthode adoptée	172
2.1.1 - Repérage	172
2.1.2 - Répartition des tâches	173
2.1.3 - Fiches descriptives	173
2.1.4 - Photographies	174
2.1.5 - Cartographie	175
2.2 - Extraits de tableaux de relevé des informations	176
3 – Compte rendu de visite-diagnostic et propositions de travaux (synthèse)	179
3.1 - Secteurs de surverse au dessus des digues	180
3.2 - Zone de fuite et de corps de digue perméable	180
3.3 - Érosion du sabot para fouille en pied de berges	181
3.4 - Remontées dues aux pressions de la nappe	181
3.5 - Zones de fissuration longitudinale en crête de digue	182
3.6 - Divers désordres	183
3.7 - Vers un traitement de l'aléa de surverse	183

<i>Annexe 5 - Extraits du Code rural</i>	185
<i>Arrêté du 23 mai 1984 - Relatif au piégeage des populations animales</i>	185
<i>Arrêté du 1er août 1986 - Relatif à divers procédés de chasse, de destruction des animaux nuisibles et à la reprise du gibier vivant dans un but de repeuplement</i>	189
<i>Arrêté du 26 juin 1987- Fixant la liste des espèces de gibier dont la chasse est autorisée</i>	191
<i>Arrêté du 30 septembre 1988 - Fixant la liste des animaux susceptibles d'être classés nuisibles</i>	193
<i>Arrêté du 18 mars 1982 - Relatif à l'exercice de la vénerie</i>	195
 <i>Annexe 6 - Recueil commenté des principaux textes réglementaires relatifs aux digues de protection contre les inondations.</i>	 197

Avant-propos

OBJECTIFS ET CONTENU DU PRÉSENT GUIDE

Ce guide technique est destiné aux personnels des services ou structures impliqués dans l'exploitation des digues de protection contre les inondations dues aux crues de rivières. Il s'adresse à un public de techniciens et vise à vulgariser :

- les principes de fonctionnement d'un système d'endiguements ;
- les risques encourus ;
- les actions de surveillance ;
- les actions d'entretien.

L'ambition de ce guide est de justifier et décrire l'ensemble des actions à entreprendre pour assurer sur le long terme la pérennité et la sécurité des ouvrages, dans l'esprit des dispositions de la loi sur l'eau.

Réalisé à l'initiative du ministère chargé de l'Environnement (Direction de l'eau), ce guide a été rédigé par le Cemagref sous le pilotage d'un groupe de travail qui a contribué à en enrichir le contenu.

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL :

- Sébastien de BOUARD	conseil général des Ponts et Chaussées
- Gérard COUZY	conseil général des Ponts et Chaussées
- Jean VARRET	conseil général du Génie Rural des Eaux et des Forêts
- Jean-Jacques VIDAL	DIREN Midi-Pyrénées
- Jean-Noël GAUTHIER	équipe pluridisciplinaire plan Loire grandeur nature
- Zbysniew GAZOWSKI & Didier REINBOLD	DIREN Centre
- Michel LESCURE & Jean-Michel COLIN	DDE du Gard
- Pierre LE FLOCH	DDE d'Indre-et-Loire
- Yannick FAGON	CETMEF
- Jean KLOOS	DDE du Lot-et-Garonne
- René FEUNTEUN	ministère de l'Intérieur (DDSC)
- Philippe PIPRAUD	ministère de l'Agriculture et de la Pêche (DERF)
- Jean-Michel TANGUY	CETE Méditerranée
- Jean-Luc ROY & Marie-Pierre NERARD	ministère chargé de l'Environnement (DE)

Ce guide accompagne la démarche instituée au plan national qui vise à renforcer la sécurité du parc d'ouvrages dont la rupture éventuelle aurait des répercussions graves sur les personnes et les biens (digues intéressant la sécurité publique).

A cette fin, il a été mis en place par l'État un dispositif de contrôle (voir annexe 6) :

- des actions entreprises par le gestionnaire ;
- du niveau de sécurité des ouvrages.

C'est pourquoi le dernier chapitre de ce guide pratique expose à l'ensemble des acteurs une méthodologie de diagnostic des digues.

ORGANISATION DU GUIDE

Après avoir décrit, dans un premier chapitre, les digues et leurs fonctions, on aborde ensuite, au second chapitre, les différents désordres et mécanismes de rupture qui sont susceptibles d'affecter ces ouvrages.

L'inspection visuelle, qui est le fondement du diagnostic et du suivi, fait l'objet du troisième chapitre, accompagné en annexe 3 du mode opératoire et de fiches pratiques pour la saisie des informations.

Les particularités de la surveillance des digues lors des crues constituent le quatrième chapitre.

Le chapitre suivant est consacré à l'entretien des digues et de leurs ouvrages annexes. Il fournit une série de conseils pratiques pour les réparations les plus courantes.

Enfin, le sixième chapitre décrit sommairement les étapes du diagnostic des digues. En complément sur ce sujet, on se référera utilement à la publication suivante : *«Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de Loire moyenne»* (mars 2000, Cemagref Éditions).

Le présent guide contient également un court lexique des termes techniques spécifiques aux digues (se reporter aussi à la figure 1) ainsi que deux annexes de rappels en mécanique des sols (annexe 1) et en hydraulique des sols (annexe 2). Enfin, les éléments de prix sont fournis en francs et en euros (hors TVA).

Par ailleurs, la présente réédition 2004 a été enrichie de l'annexe 6 qui récapitule les textes réglementaires de la dernière décennie relatifs aux digues de protection contre les crues.

RESPONSABILITÉS ET RÔLES DES INTERVENANTS

Plusieurs catégories d'intervenants ou d'acteurs sont concernés de plus ou moins près par la gestion des digues. La première difficulté consiste à les identifier. Nous proposons, en ce sens, la liste suivante (voir aussi la figure 2) :

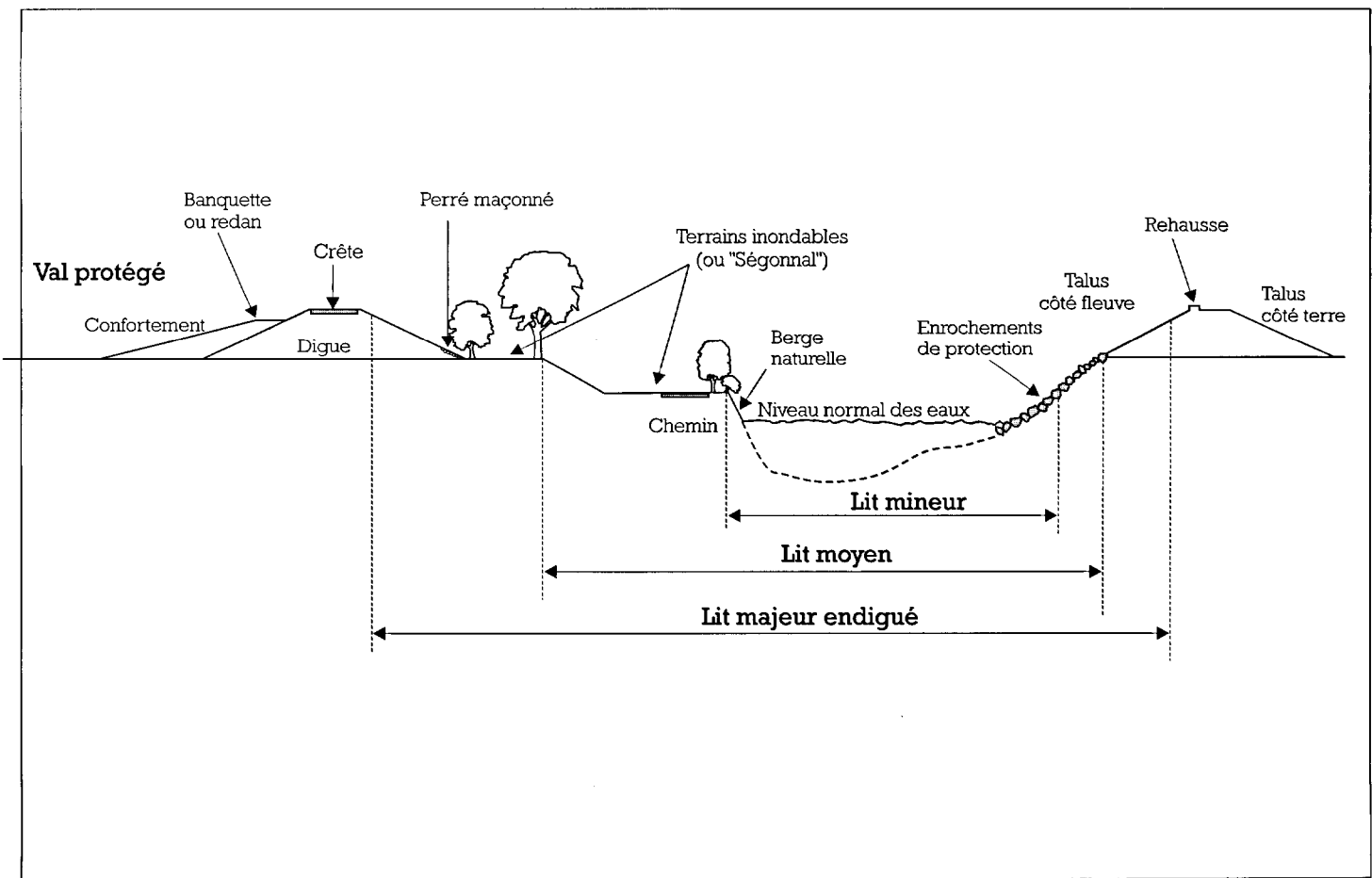


Figure 1 : Coupe-type d'une vallée endiguée.

- *Propriétaire de la digue* (ouvrage stricto sensu) : il s'agit en général de celui qui a construit la digue. Sa forme juridique est variable : État, collectivité locale ou groupement de collectivités, association syndicale autorisée (ASA), association syndicale forcée (ASF), personnes privées, etc...
- *Propriétaire de l'emprise de la digue*, c'est à dire du fonds sur lequel l'ouvrage a été construit. Le plus souvent, le propriétaire de l'emprise et le propriétaire de la digue sont confondus (c'est d'ailleurs ce qui est souhaitable), mais on rencontre des situations où il s'agit de deux entités différentes, dont les liens ne sont pas toujours clairement établis.
- *Propriétaire ou gestionnaire de constructions ou de réseaux* installés sur ou dans le corps de digue : bâtiments, locaux de service, lignes électriques ou téléphoniques, vannes et batardeaux, canalisations, voies de communication, etc. Il est hautement recommandé que les relations avec le propriétaire et/ou le gestionnaire de la digue soient fixées par contrat écrit précisant les responsabilités respectives.
- *Propriétaire ou gestionnaire des terrains et/ou bâtis (inondables)* situés entre la digue et le lit mineur du fleuve ou de la rivière.
- *Propriétaire ou gestionnaire des terrains et/ou bâtis protégés* (côté val, côté terre), situés à l'abri de la digue, mais exposés au risque de rupture ou d'inondation après rupture.
- *Gestionnaire de la digue* : si le gestionnaire est différent du propriétaire de la digue, il est chargé par ce dernier, en principe sous couvert d'un contrat formel, d'assurer l'entretien et le (bon) fonctionnement des ouvrages.
- *Maître d'ouvrage des travaux* de construction, de rehaussement ou de confortement de la digue : en toute logique, il devrait s'agir du propriétaire de la digue, mais il arrive qu'une collectivité assure la maîtrise d'ouvrage de travaux sur des ouvrages dont elle n'est pas propriétaire (cas d'un syndicat intercommunal de rivière intervenant sur des terrains ou des ouvrages communaux, voire privés).
- *Bureau(x) d'ingénierie* (privé ou public), en contrat avec le propriétaire, le maître d'ouvrage ou le gestionnaire pour des études préalables (diagnostic, conception, conseil ...) ou pour la maîtrise d'œuvre de travaux sur les digues.
- *Entreprise* chargée des travaux de construction, de rehaussement ou de confortement de la digue.
- *Service de Police des Eaux*, responsable du suivi des procédures d'autorisation des ouvrages et du contrôle des digues classées comme intéressant la sécurité publique.
- *Services responsables de la sécurité des biens et des personnes* : Préfet, Maires.

RESPONSABILITÉ DU PROPRIÉTAIRE

Quelle que soit sa forme juridique (Collectivité locale ou groupement de collectivités locales, ASA ou ASF, personnes privées, etc...), l'organisme qui est le *propriétaire* des digues est pleinement responsable, tant au civil qu'au pénal, des dommages qui peuvent être occasionnés par l'ouvrage et en particulier, le cas échéant, par sa rupture.

Cette responsabilité peut, a priori, être atténuée dans certaines situations (crues majeures, classées catastrophes naturelles ou réputées imprévisibles) mais, *a contrario*, le défaut manifeste de surveillance et d'entretien des ouvrages est de nature à aggraver les circonstances.

DE LA NÉCESSITÉ D'UNE SURVEILLANCE ET D'UN ENTRETIEN DES DIGUES

Au-delà des considérations de responsabilité, l'objectif de maintenir les ouvrages en bon état justifie à lui seul la surveillance et l'entretien réguliers au double argument que :

- la surveillance régulière permet de détecter à temps un grand nombre de désordres, de suivre des phénomènes évolutifs et de prendre à temps les mesures d'entretien et de réparation qui s'imposent ;
- l'entretien des ouvrages permet de freiner le vieillissement et donc d'augmenter la longévité : des petits travaux réguliers, par exemple sur la végétation ou vis-à-vis des animaux fouisseurs, peuvent éviter des interventions lourdes de réhabilitation. Enfin, le bon entretien des ouvrages (notamment, dégagement de la végétation, maintenance des voies de service) permet leur surveillance dans de bonnes conditions.

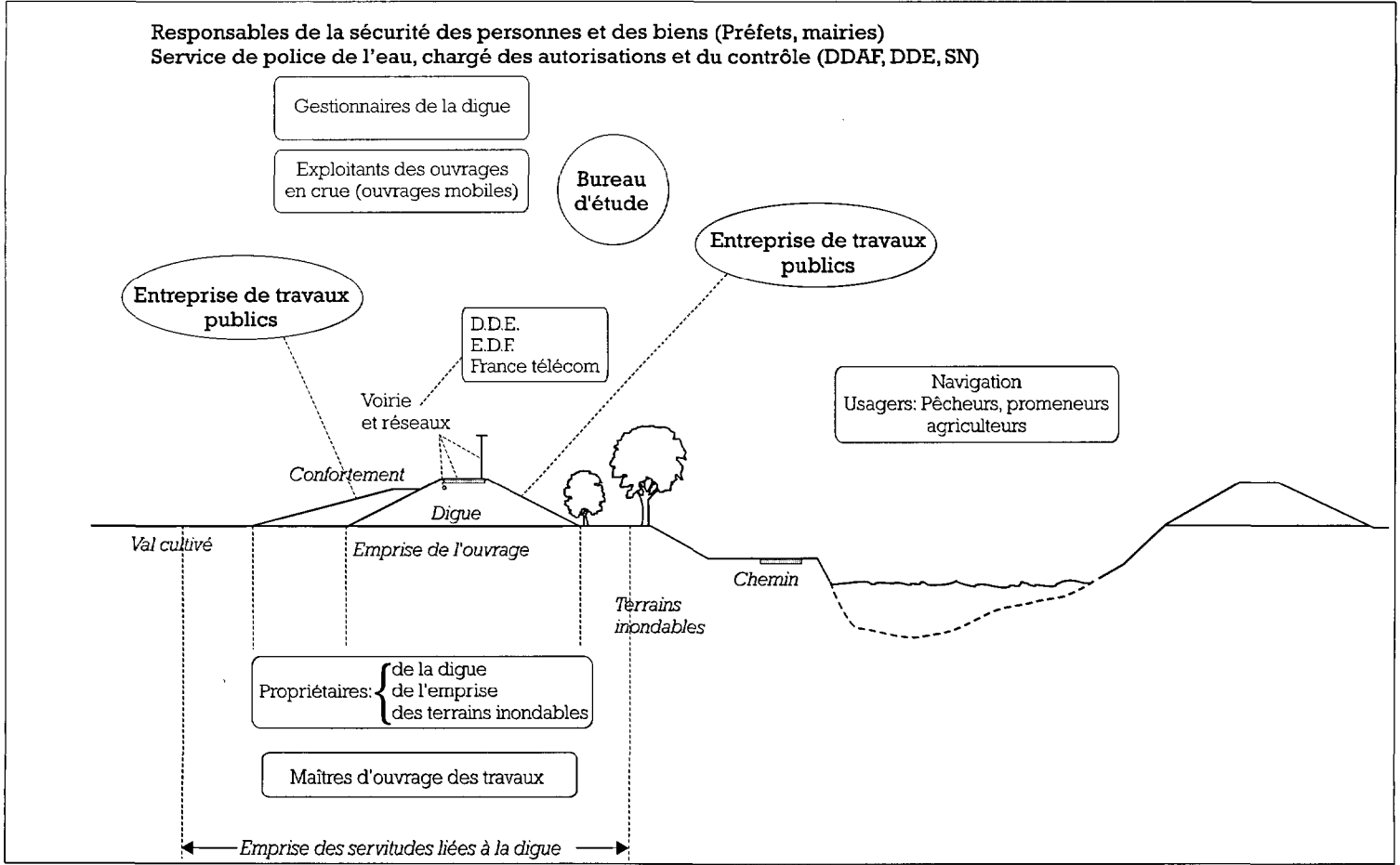
COMPÉTENCES TECHNIQUES NÉCESSAIRES POUR LA GESTION DES OUVRAGES

Pour assumer pleinement son rôle, le *propriétaire* d'un système de digues doit disposer d'agents techniques formés pour les diverses tâches de surveillance et d'entretien à accomplir ; si ces agents relèvent directement du propriétaire, celui-ci est aussi *gestionnaire* des ouvrages. Le personnel d'encadrement de ces agents d'entretien et de gestion doit, en outre, posséder des compétences en géotechnique, génie civil, hydraulique et génie de l'environnement. Tout cela plaide pour que la gestion des digues soit, si nécessaire, confiée par le propriétaire et par contrat formel, à des organismes de taille suffisante dotés de personnels ou de services techniques compétents dans ce domaine et organisés pour gérer des astreintes. Dans une telle organisation, le propriétaire est distinct du gestionnaire, mais leurs liens contractuels doivent être clairement établis.

Il est donc recommandé que les petits organismes propriétaires de digues en concèdent la gestion (voire en transfèrent la propriété) à des structures de taille adaptée possédant les moyens nécessaires à une bonne gestion technique.

STATUT DES DIGUES : ÉVOLUTION RÉGLEMENTAIRE RÉCENTE

Selon leurs dimensions, les digues de protection contre les crues relèvent, depuis 2002, du régime de l'autorisation ou de la déclaration (cf. décret du 13/02/2002 mentionné en annexe 6). En outre, elles peuvent être classées comme «intéressant la sécurité publique» dès lors que leur rupture entraînerait un danger grave pour les personnes (cf. circulaire du 06/08/2003 citée dans l'annexe 6).



Chapitre 1

NATURE, FONCTIONS ET CONSTITUTION DES DIGUES

DIGUE ¹ : ouvrage de protection contre les inondations dont au moins une partie est construite en élévation au dessus du niveau du terrain naturel et destiné à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones naturellement inondables.

Ne sont donc pas considérés comme digues les simples ouvrages de protection des talus de berge (murs maçonnés, revêtements en enrochements ou par dalles) ne dépassant pas le sommet de la berge naturelle. Les murs de quai ne sont également pas considérés comme des digues, sauf s'ils sont incorporés à une digue au sens indiqué plus haut. Enfin, les protections contre l'érosion du littoral (épis, protections de talus, ...) ou les jetées portuaires ne sont pas non plus des digues.

Sont exclus du présent guide :

- les digues de canaux (voies navigables, canaux d'amenée hydroélectrique, ...) ;
- les remblais routiers et ferroviaires implantés en lit majeur ;
- les protections de berge non surmontées d'une digue.

Enfin, il ne faut pas oublier les ouvrages de protection appelés " digues à la mer " et qui ont pour objet de protéger des estuaires et des zones littorales contre les marées hautes ou les surcotes marines engendrées par des phénomènes dépressionnaires. C'est par exemple le cas en Camargue aux Salins de Giraud. Un guide spécifique sera consacré à ces ouvrages.

1.1 APERÇU SUR LE PARC D'OUVRAGES CONCERNÉ EN FRANCE

Les digues de protection contre les inondations représentent en France un parc d'ouvrages très important et largement méconnu. En effet, ce n'est en général qu'à l'occasion de crues majeures que ces ouvrages sont sur le devant de l'actualité, lorsque des ruptures conduisent à l'inondation des zones théoriquement protégées. L'enquête nationale initiée en 1999 par le ministère chargé de l'Environnement en vue de faire un recensement et un état des lieux complet de ce patrimoine (constitution de la base de données DIGUES des ouvrages, gestionnaires et enjeux) conduit à la première synthèse suivante : quelque 10000 kilomètres de digues répartis entre un millier de gestionnaires. Par ailleurs, on peut citer quelques chiffres particuliers :

- Sur les 450 km de la Loire moyenne (entre le Bec d'Allier et le Bec de Maine), 600 km de digues (appelées levées) de statut essentiellement domanial, protègent quelque 1 000 km² de vals inondables. Il faut y ajouter les levées érigées le long des

1 Localement, et en particulier le long de la Loire, on emploie le terme " levée ".

affluents tels que le Cher, l'Indre, la Vienne. Plusieurs villes importantes sont protégées par les levées : Tours avec 90 000 habitants concernés, Orléans et son agglomération avec 40 000 habitants, Blois avec 10 000 habitants, le Val d'Authion avec 45 000 habitants. Le système des levées de la Loire n'a plus été soumis à des crues majeures depuis les trois crues du milieu du XIX^{ème} siècle, dont les conséquences avaient été considérables.

– Le cours de la Garonne a été largement endigué à la suite de la crue de 1875 qui a provoqué 500 morts dont 200 à Toulouse. Les digues n'ont pas empêché que la crue de 1930 se traduise à nouveau par 200 victimes. Si les zones inondables protégées par les endiguements de la Garonne sont à plus de 90 % des terres agricoles, il n'en demeure pas moins que des agglomérations importantes s'avèrent directement exposées, telles Toulouse avec 40 000 personnes concernées et Agen avec 25 000 personnes. Les statuts des ouvrages le long de la Garonne sont très variés.

– Le long des deux bras du défluent du Rhône, la Camargue est protégée des inondations par environ 200 km de digues qui ont été le siège de 16 brèches lors des crues d'octobre 1993 et de janvier 1994 (crues estimées d'occurrence centennale) ; ces brèches sont largement imputables au défaut d'entretien et de surveillance des digues dont le mode de gestion (Associations Syndicales Forcées) a été reconnu inadéquat au contexte actuel et a largement évolué depuis lors.

1.2 FONCTIONNEMENT D'UN SYSTÈME D'ENDIGUEMENTS (DIGUES, DÉVERSOIRS)

On peut décrire le fonctionnement hydraulique d'une vallée endiguée de la façon schématique suivante :

– Lors d'une crue, la rivière déborde de son lit mineur et inonde progressivement le lit majeur endigué (figure 3a).

– L'endiguement limite l'emprise de l'inondation pour les crues faibles et moyennes, mais il surélève la ligne d'eau là où la présence des digues conduit à rétrécir sensiblement la largeur du lit naturel (c'est très souvent le cas dans la traversée des villes).

– L'écrêtement (phénomène qui amortit les débits maximaux par inondation d'espaces en lit majeur) est, de ce fait, limité lors des crues courantes.

– Les zones protégées par des digues peuvent, dans certains cas, être inondées par le remous du fleuve à sa jonction avec un affluent, ou par les ruissellements issus de bassins versants latéraux dont les exutoires au fleuve se trouvent saturés, ou encore par remontée de la nappe phréatique (figure 3b).

– Pour éviter la surverse au dessus des digues (et leur rupture quasi certaine) lors des fortes crues, on aménage parfois des déversoirs qui permettent, à partir d'un

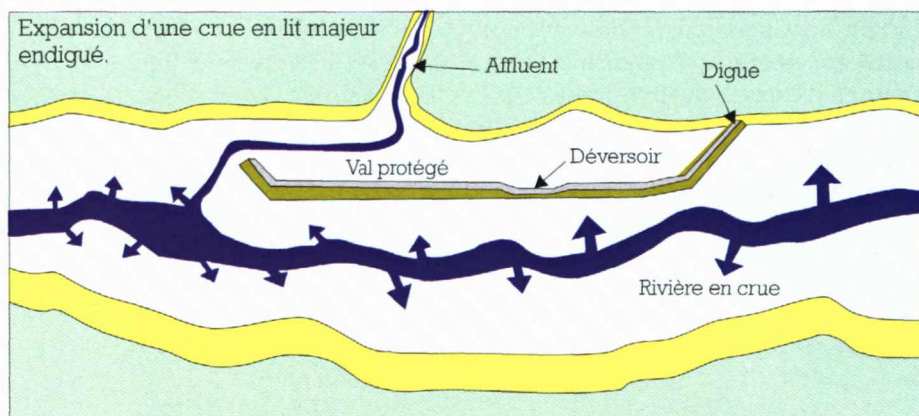


Figure 3.a : Expansion d'une crue en lit majeur endigué.

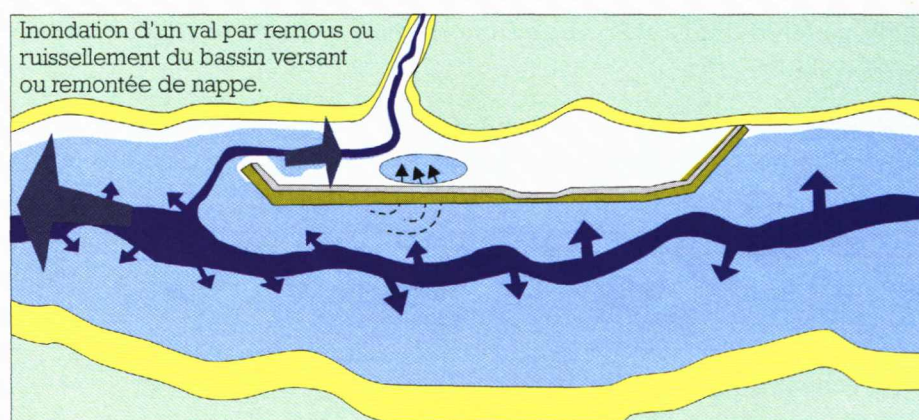


Figure 3.b : Inondation d'un val par remous ou par ruissellement du bassin versant ou remontée de nappe.

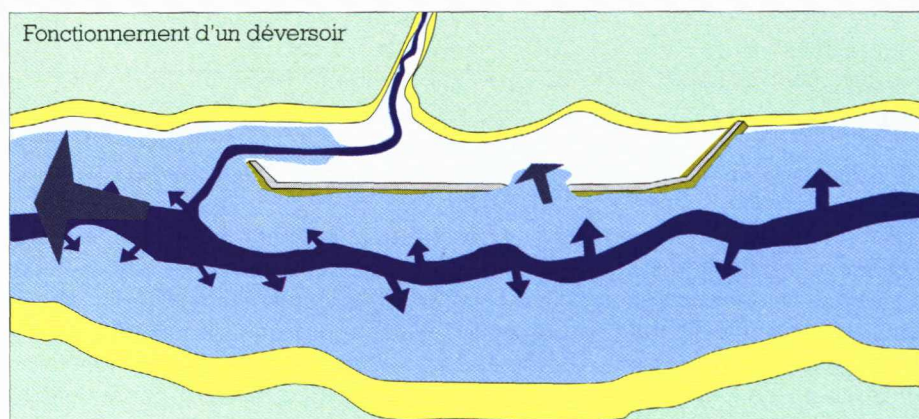


Figure 3.c : Fonctionnement d'un déversoir.

certain niveau, d'inonder des vals a priori peu vulnérables et d'offrir à la crue de nouveaux champs d'expansion pour en favoriser l'écrêtement (figure 3c) ; ces champs d'expansion sont parfois eux-mêmes subdivisés en plusieurs casiers par des digues et sont donc progressivement inondés.

– Pour les crues extrêmes, l'ensemble de la vallée est inondée, soit à la suite du fonctionnement des déversoirs, soit par des brèches causées par la surverse sur les digues ; le fleuve ou la rivière recouvrent ainsi l'ensemble de leur lit majeur, comme en l'absence de protections.

1.3 CONSTITUTION DES DIGUES

1.3.1 DIGUES EN REMBLAI

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

– Ce sont souvent des ouvrages construits par étapes à plusieurs périodes, en fonction de l'évolution des usages du fleuve ou des besoins de protection (figure 4) ;

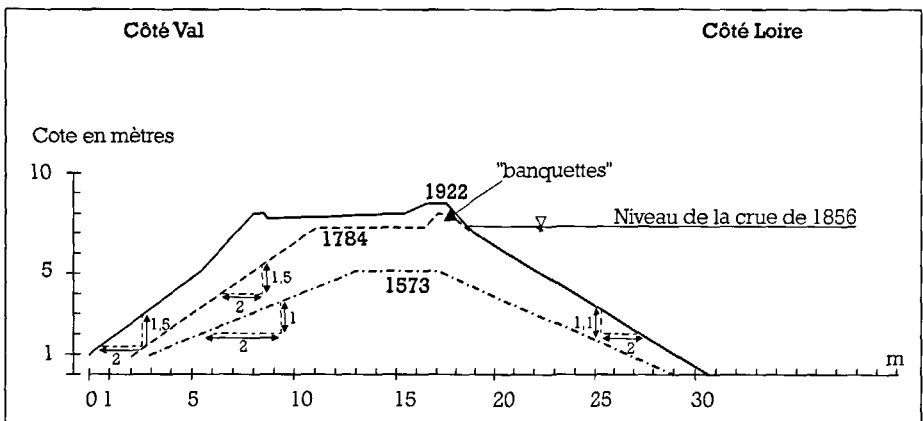


Figure 4 : Coupes caractéristiques des levées de Loire avant confortements récents.

– L'absence de moyens lourds de terrassement au moment de leur construction fait que les remblais sont, en général, édifiés avec des matériaux pris sur place, des traces d'anciennes ballastières étant encore visibles en pied immédiat des digues. Ainsi, la variabilité des matériaux pourra être grande, y compris le long d'un même cours d'eau (matériau sableux le long du bassin moyen et matériau limoneux en approchant de l'embouchure) ; mais dans une section, il s'agit généralement de remblais homogènes sans zonage et sans dispositifs particuliers de drainage interne (figure 5) ;

– Dans le même ordre d’idée, l’absence de moyens lourds de compactage et de moyens d’excavation lors de l’édification des digues anciennes conduit à des remblais de relativement faible compacité sans ancrage particulier dans la fondation, laquelle n’a pas fait l’objet de traitement particulier pour assurer son étanchéité ;

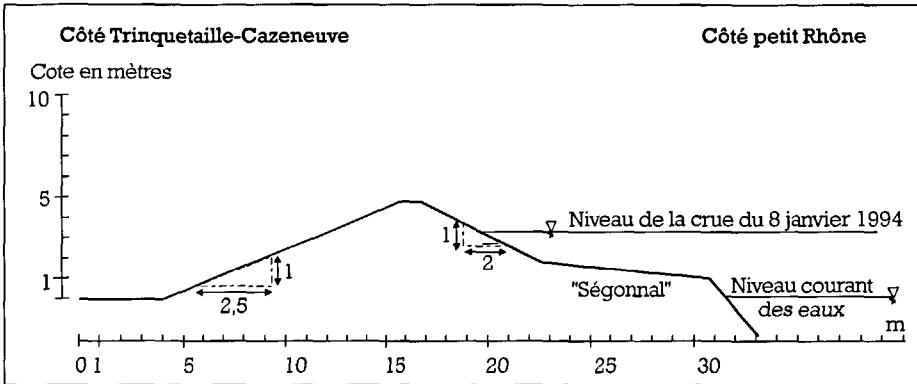


Figure 5 : Coupe type des digues du Petit Rhône en Camargue.

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

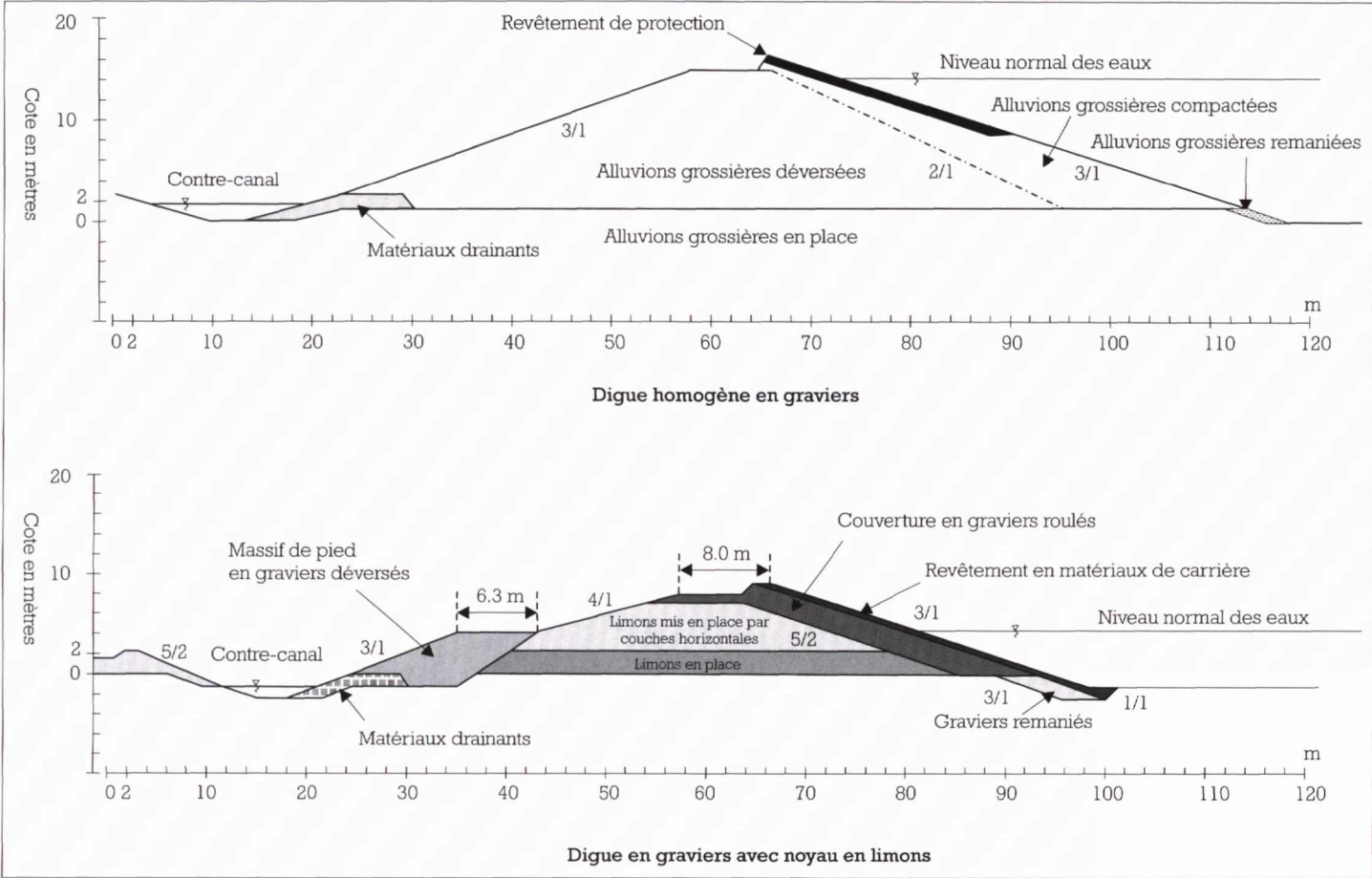
– Dans les zones les plus exposées aux affouillements, des protections parafeuilles ont parfois été réalisées, constituées le plus souvent de pieux jointifs en bois ;

– L’objectif d’augmenter la revanche (ou la sécurité vis à vis de la surverse) a parfois conduit à surélever la crête des digues par des rehausses étroites (dénommées “banquettes” le long de la Loire) constituées d’un merlon de terre ou d’une murette en maçonnerie, implantées sur le couronnement, en général côté fleuve.

Les digues les plus récentes font appel à des conceptions se rapprochant de celles des barrages. On y retrouve un zonage des matériaux avec séparation des fonctions d’étanchéité et de drainage (figures 6).

1.3.2 DIGUES OU MURS DE QUAI EN MAÇONNERIE OU EN BÉTON

Dans les secteurs où l’emprise disponible au sol était réduite (zones urbaines en général), on a édifié des murs poids épais, en maçonnerie de pierres appareillées. C’est le cas de la Loire dans la plupart des traversées de villes, de la Garonne à Toulouse et Bordeaux, du Rhône en Arles et dans bien d’autres secteurs.



Figures 6 : Coupes types des digues du Rhône dans le secteur aménagé par CNR.

Souvent, ces murs, au parement fortement pentu coté fleuve, sont épaulés côté val par un remblai en terre ou en matériau grossier qui, par exemple, supporte une voie de circulation (figure 7). Dans la technique moderne, le béton a remplacé la maçonnerie en laissant parfois encore une place à cette dernière comme traitement esthétique des parements vus.

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

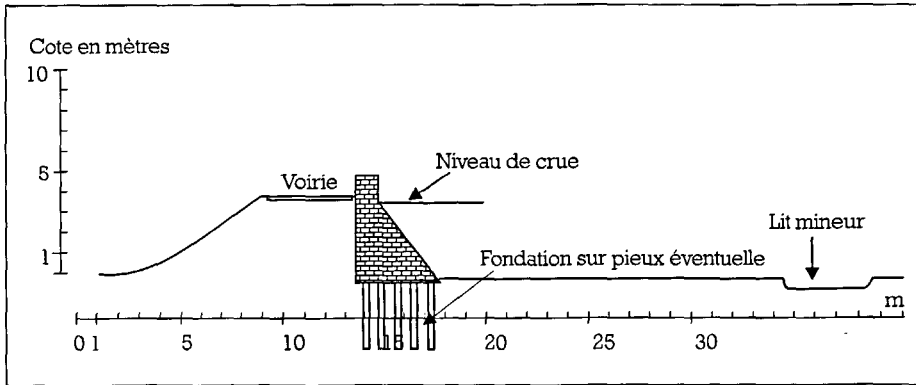


Figure 7 : Coupe type d'une digue en maçonnerie.

1.3.3 DÉVERSOIRS

Les digues ne sont pas conçues pour contenir les crues exceptionnelles (typiquement, de période de retour égale ou supérieure à 100 ans). Pour se prémunir contre le risque de surverse, qui entraînerait de façon quasi certaine leur rupture brutale, on aménage, dans certains cas, des déversoirs dont la cote est calée quelques décimètres (classiquement de l'ordre du mètre pour les déversoirs de Loire) en dessous de la crête de digue. Leur fonction est de permettre l'épandage de la pointe de crue dans un champ d'inondation, a priori peu vulnérable. Ainsi, on espère éviter la surverse au-dessus (et par voie de conséquence la destruction) des digues.

Ces déversoirs peuvent être constitués de simples zones basses aménagées dans le terrain naturel, mais il s'agit le plus souvent de seuils déversants avec une carapace en maçonnerie de pierres appareillées recouvrant la partie en remblai. Le profil du seuil se poursuit par un radier aval, faisant office de zone de dissipation de l'énergie de l'eau.

Parfois, le seuil en maçonnerie est surmonté d'un merlon en terre (localement dénommé banquette), calé à une cote légèrement inférieure à la crête de digue ; ce dispositif fusible est censé être rapidement érodé dès le début de la

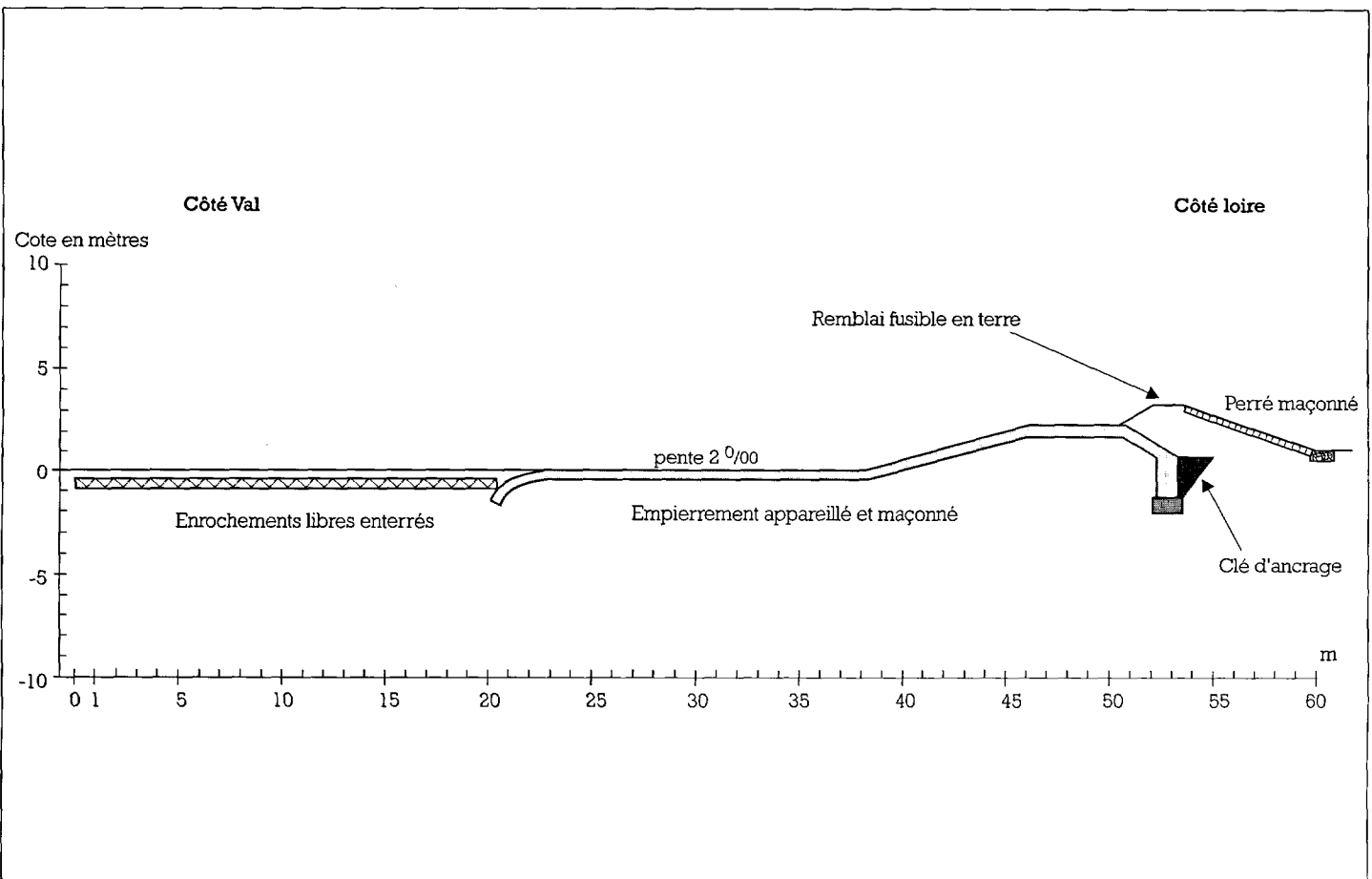


Figure 8 : Coupe type d'un dépenseur Conroy sur la Loire (Ouzouer).

surverse, libérant ainsi une section plus grande pour l'écrêtement de la crue (figure 8). L'intérêt d'un dispositif fusible est de retarder, autant que faire se peut, l'entrée en fonction du déversoir ; l'inondation du val se produit donc moins fréquemment.

Les déversoirs les plus récents sont des ouvrages totalement en béton.

1.3.4 OUVRAGES SINGULIERS

Les digues sont des ouvrages linéaires. Cependant leur homogénéité longitudinale est loin d'être la réalité. En effet, de nombreux ouvrages singuliers y sont implantés, soit qu'ils concourent à l'aménagement, soit qu'ils relèvent de mesures compensatoires. Il en est ainsi des passages batardables et rampes d'accès au fleuve, des traversées par aqueducs, galeries et conduites, équipées ou non de clapets.

Enfin, dans certains cas, des constructions ont été implantées dans la digue, dès l'origine ou lors de confortements successifs, à l'image des habitations érigées dans les levées du Val d'Authion (fleuve Loire) sous l'impulsion d'Henri II Plantagenêt, qui comptait ainsi s'assurer du bon entretien des digues par ceux qui étaient, du coup, les principaux concernés par leur tenue.

Planches hors texte

CHAPITRE 1 – NATURE, FONCTIONS ET CONSTITUTION DES DIGUES

1.3.1 – DIGUES EN REMBLAI



Photo 1.1 – Allure typique d'une levée de la Loire Moyenne : digue en remblai, profil large, talus enherbés et voie de circulation en crête.



Photo 1.2 – Digue en remblai du Petit Rhône en Camargue (Bouches-du-Rhône). Profil avant travaux de confortement de 1994 : crête étroite ne permettant pas la circulation d'engins mécaniques.



Photo 1.3 (auteur : Frédéric Hédelin) – Vue aérienne du cours aval endigué du fleuve côtier Agly (Pyrénées Orientales), juste après la crue des 12-13/11/1999.

1.3.2 – DIGUES OU MURS DE QUAI EN MAÇONNERIE



Photo 1.4 – Mur de quai en maçonnerie en rive gauche de la Loire à Gien (Loiret). Échelle limnimétrique avec repère de crue.



Photo 1.5 – Anciennes protections bétonnées de la berge et du talus côté fleuve de la digue rive droite de l'Agly (Pyrénées Orientales). Réparation récente en enrochements.



Photo 1.6 – Aménagement de 1958 du Gardon d'Alès dans sa traversée de la ville d'Alès (Gard) : protection de la berge par dalles bétonnées n'ayant que localement la fonction de digue.

1.3.3 – DÉVERSOIRS



Photo 1.7 – Déversoir en maçonnerie de pierres d'Ouzouer-sur-Loire (Loiret), équipé d'une banquette fusible (cordon de terre enherbé, à droite sur la photo).



Photo 1.8 – Déversoir en béton sur la digue rive gauche de l'Aude à Cuxac-d'Aude.

1.3.4 – OUVRAGES SINGULIERS

Photo 1.9 – Bâtiment encastré dans le talus côté val de la levée du Cher à Savonnières (Indre-et-Loire).



Photo 1.10 – Ouvrage de traversée batardable dans la levée de la Loire au Val de Bou (Loiret), vu côté val.



Photo 1.11 – Passage de chemin rural batardable dans la digue rive droite du Grand Rhône à Salins-de-Giraud (Bouches-du-Rhône).



CHAPITRE 2 - TYPOLOGIE DES DÉSORDRES ET MÉCANISMES DE RUPTURE

2.1 – LA SURVERSE



Photo 2.1 (auteur : Frédéric Hédelin) - Vue aérienne de la brèche par surverse de St-Laurent-de-la-Salanque sur la digue rive gauche de l'Agly, suite à la crue des 12-13/11/1999. La malchance a voulu que la brèche se produise juste au droit de la station d'épuration. Les quartiers menacés de la localité avaient fort heureusement été évacués.



Photo 2.2 – en panoramique (auteur : Éric JOSSE, DDE 66) - Vue en coupe de la brèche par surverse de St-Laurent-de-la-Salanque sur la digue rive gauche de l'Agly et dégâts à la station d'épuration.

Photo 2.3 - Zone localisée de surverse réparée côté val sur la digue rive gauche de l'Agly à St-Laurent-de-la-Salanque, suite aux dégâts de la crue des 12-13/11/1999.



2.2 – LES ÉROSIONS EXTERNES ET LES AFFOUILLEMENTS

Photo 2.4 – Pied de digue en contact avec le lit mineur de la Loire, dans une courbe concave, sur la levée d'Espagne à la Charité-sur-Loire (Nièvre).



Photo 2.5 – Pied de berge affouillé en contrebas de la levée d'Espagne à la Charité-sur-Loire.





Photo 2.6 (source : ONF Alpes Maritimes) – Anse d'érosion consécutive à la crue du Var du 5/11/1994. Digue de Guillaumes (Alpes Maritimes), supportant la route départementale 2202, emportée sur plus de 150 m.



Photo 2.7 – Dignes de l'Agly : bêche parafouille de pied de berge partiellement emportée suite à la crue des 12-13/11/1999.

2.3 - L'ÉROSION INTERNE

Photo 2.8 – Renard déploré dans la nouvelle digue de Cuxac-d'Aude lors de la crue des 12-13/11/1999. Une traversée de conduite mal aménagée a été à l'origine du phénomène.

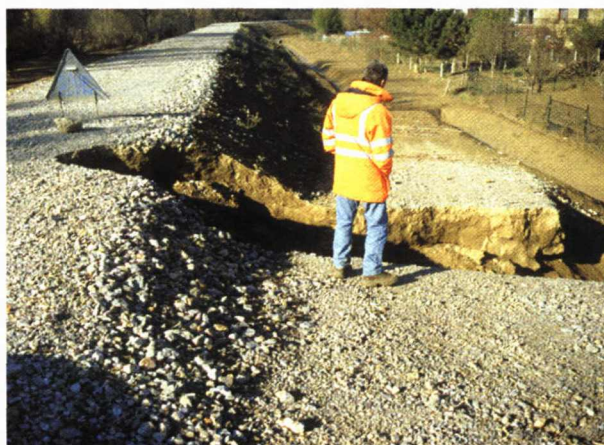


Photo 2.9 – Débouché aval (côté val) du renard.



Photo 2.10 – Débouché amont (côté fleuve) du renard. Un débit de plusieurs centaines de litres/seconde a pu ainsi transiter au travers de la digue. La brèche a été évitée de justesse.





Photo 2.11 (source : Service Navigation Rhône-Saône) - Les phénomènes d'érosion interne (terriers traversants, passages de conduite) ont été reconnus comme à l'origine de la totalité des 16 brèches déplorées sur les digues de Camargue lors des deux crues du Rhône de l'hiver 1993-1994.



Photo 2.12 (source : Service Navigation Rhône-Saône) - Vue aérienne d'une brèche de digue de Camargue au droit d'un passage de canalisation.



Photo 2.13 (source : Service Navigation Rhône-Saône) - Fuite sur le parement aval d'une digue de Camargue due à un terrier traversant.

2.4 – LA RUPTURE D'ENSEMBLE

Photo 2.14 - Pied de berge glissé sur une digue du Vidourle (Hérault) comme en témoignent les arbres inclinés.



Photo 2.15 (source DDE 13) – Glissement à la décrue du talus côté fleuve de la digue rive gauche du Grand Rhône au lieu-dit Mas de la Ville.



Photo 2.16 (source DDE 13) – Glissement d'un talus de digue interceptant la crête de l'ouvrage (digue de Camargue).





Photo 2.17 (Cemagref, Rémy Tourment) – Banquette de rehausse en maçonnerie de pierres, côté fleuve du couronnement de la levée du Val de Cisse (Indre-et-Loire). Au second plan, rampe d'accès au fleuve.

CHAPITRE 3 – INSPECTION VISUELLE DES DIGUES ET CHAPITRE 4 – SURVEILLANCE EN CRUE

3.3 – DIGUES EN REMBLAI

SURVERSE



Photo 3.1a (source DDE 66) – Dégâts dus aux surverses sur les digues de l'Agly, suite à la crue des 12-13/11/1999 : importante loupe d'érosion dans le talus, laisses de crue sur le couronnement.



Photo 3.1b (source DDE 66) – Détail de la loupe d'érosion de la photo précédente : couches de constitution du corps de digue.

Photo 3.2 – Alignement de laisses de crue sur le talus côté fleuve de la digue de Cuxac-d'Aude, après la crue des 12-13/11/1999.

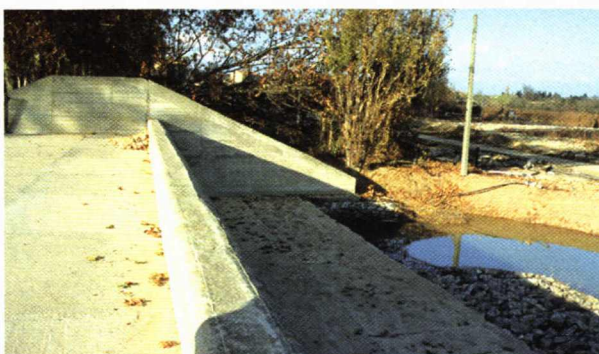


Photo 3.3 – Inspection post-crue de la digue de Cuxac-d'Aude : points bas en crête (passage de chemin) ayant surversé.



Photo 3.4 – Les déversoirs sont à inspecter minutieusement après les crues. Ici l'empreinte boueuse sur le bajoyer droit permet d'estimer la hauteur maximale de déversement.

Photo 3.5 – Déversoir de Sallèdles d'Aude après la crue des 12-13/11/1999 : dégradations sur le radier parafouille en gabions.



AFFOUILLEMENTS



Photo 3.6 – L’affleurement d’un ancien perré de protection en pied de talus côté fleuve peut être révélateur d’une activité d’incision du cours d’eau.



Photo 3.7 – Inspection des digues de l’Agly après la crue des 12-13/11/1999 : bêche parafouille en pied de berge mise à nue.



Photo 3.8 – Affouillement du pied de berge protégée sur le Gardon d’Alès – parafouille en gabions dans un état précaire.

ÉROSION INTERNE



Photo 3.9 – Fontis et affaissement en côté val du couronnement de la digue de Cuxac d'Aude après la crue des 12-13/11/1999. Un passage de conduite est à l'origine du désordre.



Photo 3.10 – Inspection de la digue du Petit Rhône en Arles après la crue du 8 janvier 1994 : indices de fuite à travers le remblai en pied de talus côté val.



Photo 3.11 – Les fontis en crête de digue sont souvent les manifestations d'une érosion interne. Ici, deux fontis apparus en crête de digue de l'Agly à quelques semaines d'intervalle, après la crue des 12-13/11/1999.



Photo 3.12 – Affaissement du couronnement perreyé de la digue de l'Allier à Moulins (Allier) : indice d'érosion interne et/ou de tassement du remblai.



Photo 3.13 – Les passages de canalisation (ici conduite de pompage dans le Grand-Rhône) sont des points à examiner particulièrement lors des inspections.



Photo 3.14 – Conduite de rejet, à clapet anti-retour, débouchant en pied du talus côté fleuve de la digue de l'Allier à Moulins.



Photo 3.15 – Secteur d'étroitesse du profil de la levée du Bal de Bou en rive droite de la Loire, dû à la présence d'une habitation côté val : un point de faiblesse potentielle à surveiller en crue.

INSTABILITÉ D'ENSEMBLE



Photo 3.16 – Escarpement et arbres inclinés en berge ou sur le talus côté fleuve de la digue sont le signe d'une instabilité d'ensemble à la décrue.



Photo 3.17 – Les pentes de talus trop raides (ici côté fleuve) exposent la digue à un risque d'instabilité.



Photo 3.18 – Fissure apparue en crête de digue à la décrue de l'Agly en novembre 1999 – signe d'une instabilité du talus côté fleuve à la vidange rapide.



Photo 3.19 – Banquette de rehausse instable sur la levée du Val d'Authion (Maine-et-Loire)

DIVERS

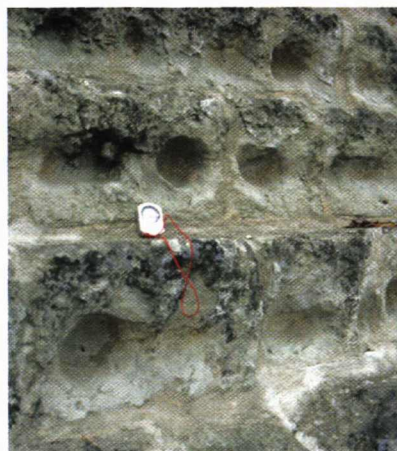


Photo 3.20 – Les pierres de maçonnerie de tuffeau (matériau souvent utilisé en vals de Loire) sont sensibles au phénomène de dissolution.

CHAPITRE 5 – L'ENTRETIEN DES DIGUES



Photo 5.1 – La présence de végétation (ici cannes de Provence) rend très difficile l'inspection visuelle de cette digue du Petit-Rhône.



Photo 5.2 – La piste de service en crête – ici localement doublée d'une piste en pied de digue côté val – facilite les opérations de surveillance des digues de l'Agly.

Photo 5.3 – Les racines des arbres déforment, et parfois même démantèlent, les maçonneries situées à proximité (quai de la Loire à Tours).



Photo 5.4 – Le développement des racines d'arbres dans le corps de digue n'est pas un leurre. Les brèches de Sallèles-d'Aude ont permis de constater que les racines de platane traversaient de part en part le remblai de la digue.



Photo 5.5 – Les terriers peuvent être à l'origine de graves désordres s'ils sont de grandes dimensions et/ou nombreux et si la digue possède un profil étroit.



CHAPITRE 6 – ÉLÉMENTS DE DIAGNOSTIC DES DIGUES

MOYENS DE DIAGNOSTIC



Photo 6.1 – Prospection géophysique par la méthode radio-magnétotellurique (RMT) en crête de la digue de l'Agly.

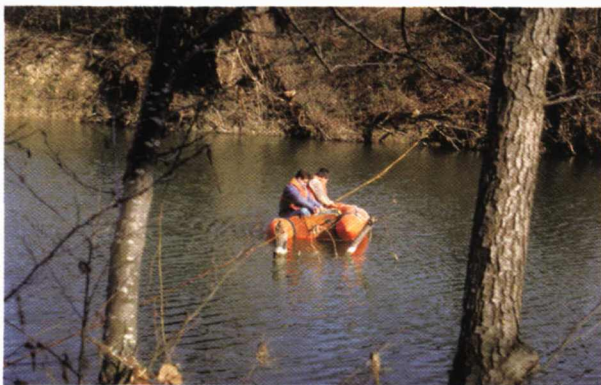


Photo 6.2 – Relevé bathymétrique au décimètre plombé sur un profil en travers du Vidourle dans sa partie endiguée.



Photo 6.3 – Sondages au pénétromètre dynamique léger PANDA sur les digues du Vidourle.



Photo 6.4 – Pénétrromètre dynamique PDG 1000 mis en station pour un sondage.



Photo 6.5 – Sondage à la tarière manuelle dans un corps de digue limono-sableux de Camargue.

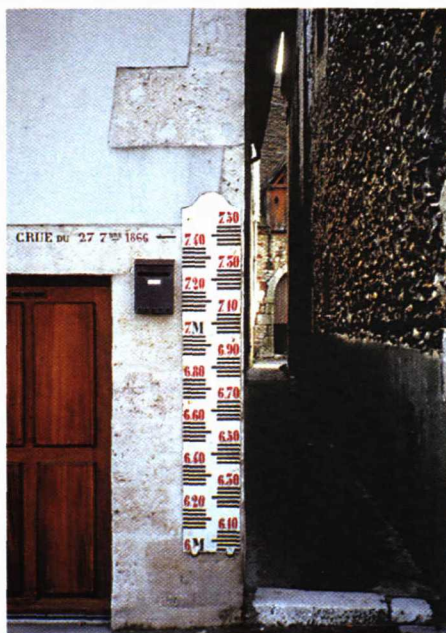


Photo 6.6 – Repères de crue sur la façade d'une maison du quai de la Loire à Gien – une première approche de l'aléa !

TRAVAUX DE CONFORTEMENT



Photo 6.7 – Engraissement du talus côté val sur tapis drainant : levée du Val de Bou.



Photo 6.8 – Construction en urgence d'une recharge aval drainante en pied du talus côté val de la digue du Petit Rhône après la crue du 8 janvier 1994.

Photo 6.9 – Recharge drainante aval construite après la crue du 8 janvier 1994 sur la digue du Petit Rhône en Arles. Piste de service aménagée au sommet de la recharge – la crête de digue demeurant non carrossable.



Photo 6.10 – Protection en construction du pied de talus côté fleuve sur la levée du Val de Bou.



Photo 6.11 – Protection du pied de la levée rive gauche de St-Benoît (Loiret) par rideau de palplanches.





Photo 6.12 – Construction d'une paroi moulée étroite pour étancher le corps d'une digue (levée de l'Oder en Pologne).



Photo 6.13 – Banquette de rehausse côté fleuve et corps de digue confortés par rideau de palplanches sur la levée de Jargeau (Loiret).



Photo 6.14 – Perré côté fleuve réparé avec des éléments préfabriqués, sur la levée du Val d'Authion.

Chapitre 2

TYPOLOGIE DES DÉSORDRES ET MÉCANISMES DE RUPTURE

Parmi l'ensemble des mécanismes pouvant mener à la rupture des digues, il convient de faire une place particulière à la surverse qui est due à un phénomène typiquement externe : la crue d'un niveau supérieur à l'événement de référence qui a servi au dimensionnement de la hauteur de la digue. Il est, de ce point de vue, fondamental de connaître cet événement de référence, ce qui renseigne sur le niveau de protection assuré par l'aménagement. Cela relève d'études hydrologiques et hydrauliques. Tous les autres mécanismes décrits ci-après mettent, par contre, en jeu directement la solidité de la digue et sont donc liés fortement à son implantation, à sa conception géotechnique, à sa surveillance et à son bon entretien.

2.1 LA SURVERSE

La surverse, c'est à dire le débordement de l'eau au-dessus de la digue, conduit généralement et rapidement² (s'il s'agit d'un ouvrage en remblai) à la brèche, par érosion régressive du talus côté terre puis de la crête (figures 9). Ce mécanisme constitue l'une des principales (sinon la principale) causes identifiées des ruptures de digues en remblai, tout au moins lors des grands accidents ayant affecté nos endiguements fluviaux dans les deux siècles passés, à l'occasion de très fortes crues.

Ainsi, pour les levées de Loire, la surverse a été à l'origine de près de la moitié des brèches lors des trois crues du milieu du XIX^e siècle, sans compter les surverses en retour des vals vers le fleuve. Dans plus des deux tiers des cas de surverse, on a pu identifier un point bas sur le profil en long de la digue qui a induit la concentration des débits. Des surélévations de la ligne d'eau sur la rive concave des courbes du fleuve, ou encore en amont de ponts ou seuils obstrués par des embâcles, peuvent également être mises en avant.

En général, on ne dispose pas de données suffisamment précises pour évaluer la hauteur et la durée des lames d'eau ayant déclenché l'érosion régressive et l'ouverture des brèches. A la question : *Que sont capables de supporter les digues en matière de surverse ?*, notre actuelle ignorance et le principe de précaution nous conduisent à apporter une réponse conservative : *les digues en terre ne supportent pas la surverse*. On peut cependant avancer quelques éléments qualitatifs permettant de nuancer cette réponse :

- le caractère localement plus ou moins sableux des matériaux constitutifs des remblais et l'hétérogénéité dans la compacité sont des facteurs qui aggravent la sensibilité des digues à la surverse ;
- un profil en long irrégulier de la crête de digue, avec présence de points bas dus à des défauts de nivellement, des tassements différentiels ou des terrassements sauvages, va induire une concentration locale des débits de surverse ;

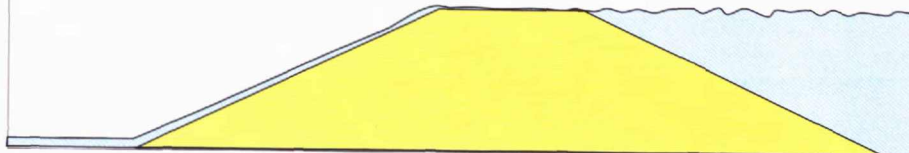
² On connaît cependant des exemples de digues, protégées par un enherbement régulier, ayant supporté une surverse par une lame d'eau de quelques centimètres pendant quelques dizaines de minutes.

– *a contrario*, une digue bien compactée, présentant un profil en long très régulier, avec des talus bien enherbés et une crête revêtue est probablement susceptible de supporter des surverses de quelques centimètres (voire plus), limitées dans le temps.

La présence (éventuelle) de rehausses en terre ne constitue pas un facteur de sécurité vis-à-vis du risque de surverse, dans la mesure où ces rehausses sont étroites et, en général, mal compactées (à l'image des «banquettes» des levées de la Loire) ; tout au plus, ces rehausses constituent-elles la revanche permettant une protection contre les vagues.

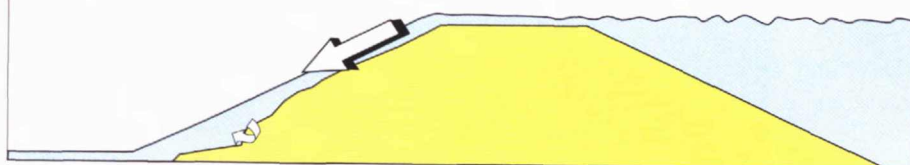
Début de la surverse :

Le niveau du fleuve atteint la crête de l'ouvrage, l'eau déborde sur la digue et inonde le val.

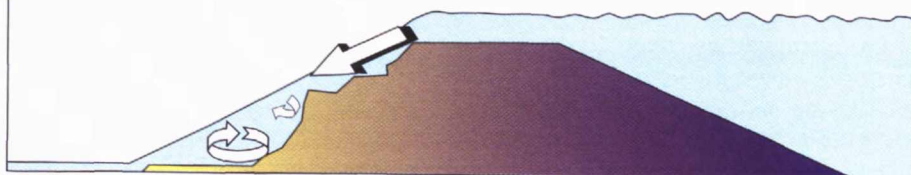


Quelques minutes après :

Le parement aval commence à s'éroder, les matériaux sont arrachés par la force du courant en pied de digue.

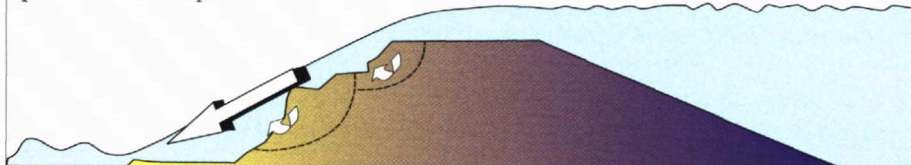


Le parement de la digue est fortement dégradé,
une fouille importante s'est créée en pied,
l'ouvrage est imbibé d'eau.

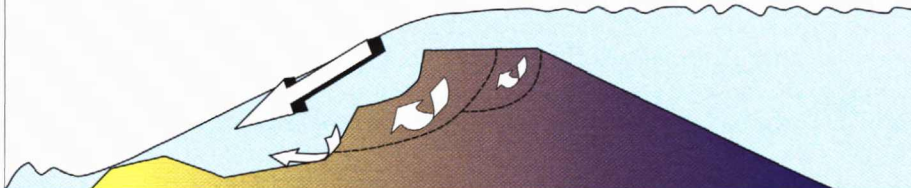


Figures 9 : Mécanisme de la rupture par surverse.

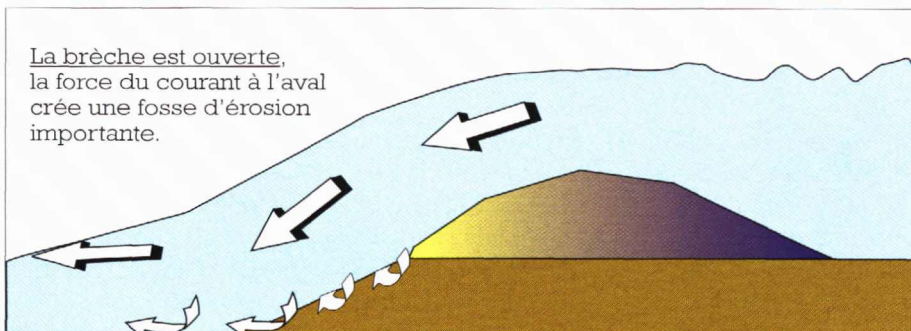
Le parement aval saturé n'est plus stable,
 il glisse par pans entiers.
 Les matériaux sont rapidement emportés
 par le courant qui s'accélère



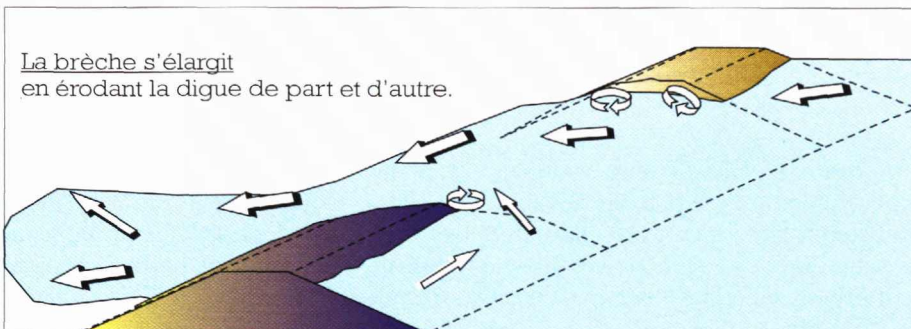
Le processus de dégradation s'accélère,
 les matériaux sont arrachés par la force du courant
 entraînant la ruine complète.



La brèche est ouverte,
 la force du courant à l'aval
 crée une fosse d'érosion
 importante.



La brèche s'élargit
 en érodant la digue de part et d'autre.



RUPTURES EN RETOUR

Un cas particulier de surverse peut se produire lorsque l'eau débordée revient vers le fleuve plus en aval en franchissant à nouveau une digue. C'est également le cas lorsque le débit provenant d'un bassin versant latéral sature ses exutoires vers le fleuve et remplit le val. L'érosion régressive qui suit cette surverse est d'autant plus rapide que le flot se déverse sur un talus saturé par plusieurs heures, voire plusieurs jours d'imbibition par la crue du fleuve. Cela conduit à des ruptures qui se produisent au plus fort du remplissage des vals : la brèche réintroduit dans le fleuve d'importants débits qui en avaient été détournés plus en amont, ce qui augmente d'autant la crue en aval.

2.2 LES ÉROSIONS EXTERNES ET LES AFFOUILLEMENTS

Les talus des digues côté fleuve, ainsi que ceux des berges qui parfois jouxtent directement la levée, subissent, en crue, les effets des courants hydrauliques qui peuvent provoquer des érosions à leur base. Il en résulte un raidissement de la pente locale qui, associé à l'affaiblissement des caractéristiques mécaniques (du fait de la saturation des matériaux), entraîne alors des glissements favorisant à leur tour les perturbations hydrauliques (tourbillons) et les érosions. Par ruptures successives du talus côté fleuve de la levée et/ou de la berge, on peut ainsi aboutir à l'ouverture d'une brèche dans la digue proprement dite – le mécanisme de surverse accélérant le processus dès qu'elle se produit.

Cf. figures 10 pages 60 et 61

Les facteurs de sensibilité à ce type de dégradation sont de trois ordres :

- *vitesse moyenne de l'eau* le long du talus de levée, qui est liée à la distance de la digue par rapport au lit mineur, et/ou à la berge. De ce point de vue, les digues en bordure immédiate du lit mineur (et surplombant directement la berge) sont particulièrement exposées, ainsi que les digues situées dans des zones de rétrécissement du lit majeur ;

- *perturbations hydrauliques locales* pouvant entraîner des courants et tourbillons avec des vitesses locales plus élevées que la vitesse moyenne du tronçon. Ainsi des arbres, des piles ou toute construction sur le parement côté fleuve des digues sont la source de telles discontinuités hydrauliques. Il en va de même pour des courbes prononcées dans l'axe de la digue ;

- *nature et état de la protection* du talus de la digue côté fleuve. Ainsi, un perré en bon état est réputé pouvoir résister à une vitesse moyenne de 4 m/s, alors qu'un talus simplement enherbé supportera des vitesses ne dépassant pas 1,5 m/s. Le changement de nature de la protection (passage d'une zone de perré à une zone enherbée) constitue aussi un fort facteur de vulnérabilité.

Les phénomènes de dégradation par érosion externe peuvent également se produire côté val, mais, si l'on met à part le cas des érosions se déroulant dans le cadre du mécanisme de surverse (cf § 2.1), ils sont localisés, *a priori*, uniquement à proximité des déversoirs (vitesses élevées en début de déversement, avant inondation du val).

2.3 L'ÉROSION INTERNE (OU RENARD HYDRAULIQUE)

Les hétérogénéités de perméabilité dans le corps de la digue (si elle est en remblai) et de sa fondation (quelle que soit la constitution de la digue) peuvent être à l'origine de zones de circulation préférentielle de l'eau lorsque l'ouvrage est exposé à la crue. Selon la charge hydraulique et la nature des matériaux, on peut obtenir localement le gradient hydraulique critique qui provoque l'érosion interne du sol, créant progressivement un conduit le long duquel gradient et vitesse augmentent rapidement avec le temps. L'amplification du phénomène peut aller jusqu'à la création d'une galerie à travers la digue ou sa fondation (renard), puis d'une brèche par effondrement.

Cf. figures 11 pages 62 et 63

Ce phénomène a été identifié comme étant à l'origine de seize brèches (soit 4,7 %) lors des crues de la Loire du siècle dernier. Dans plus de la moitié des cas, ces brèches se sont produites au niveau d'une jonction remblai / ouvrage maçonné.

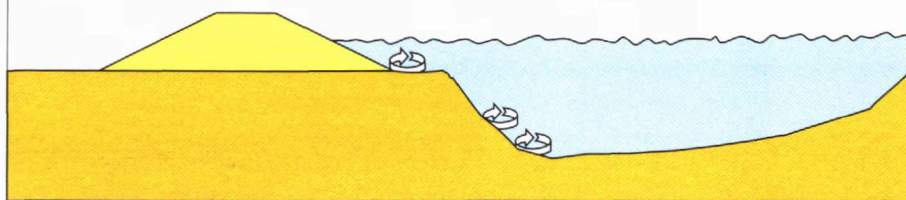
Pour les crues du Rhône de 1993 et 1994, des phénomènes de ce type sont à l'origine de la totalité des seize brèches constatées sur les digues de Camargue :

- treize cas de terriers d'animaux
- trois cas de traversées de canalisations.

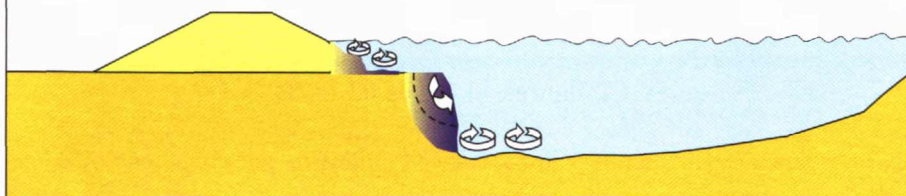
Les principaux facteurs de sensibilité vis-à-vis de ce mécanisme de dégradation sont les suivants :

- excavations ou galeries dans la levée réduisant ainsi la longueur du chemin hydraulique entre l'amont (côté fleuve) et l'aval (côté terre). Dans cette catégorie, il faut bien sûr ranger les terriers d'animaux fouisseurs et les conduits racinaires d'arbres morts, mais aussi les constructions dans l'emprise des digues ;
- mauvaise étanchéité à la jonction entre remblais et ouvrages transversaux. Les constructions réalisées dans les digues sont incontestablement, là encore, les principaux facteurs de risque, ainsi que les canalisations et galeries traversant de part en part le corps de la levée ou sa fondation ;
- hétérogénéité dans les couches de matériaux constitutifs du remblai ou de la fondation. Ce risque existe d'ailleurs probablement plus au niveau de la fondation, constituée souvent de dépôts alluviaux à granulométrie variable et qui n'a, sauf exception, pas fait l'objet d'un traitement particulier. A cette catégorie, on peut rattacher les phénomènes de fontis observables dans le cas de fondation karstique.

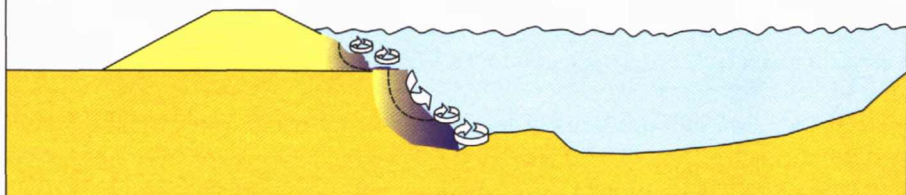
La vitesse importante de l'eau et la vulnérabilité des berges sont la source d'érosion en pied.



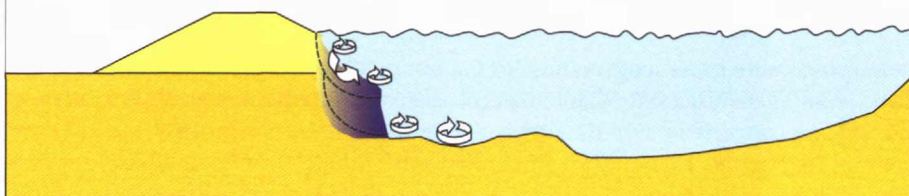
Le pied de berge se dégrade, des glissements de masse se produisent dans les matériaux saturés.

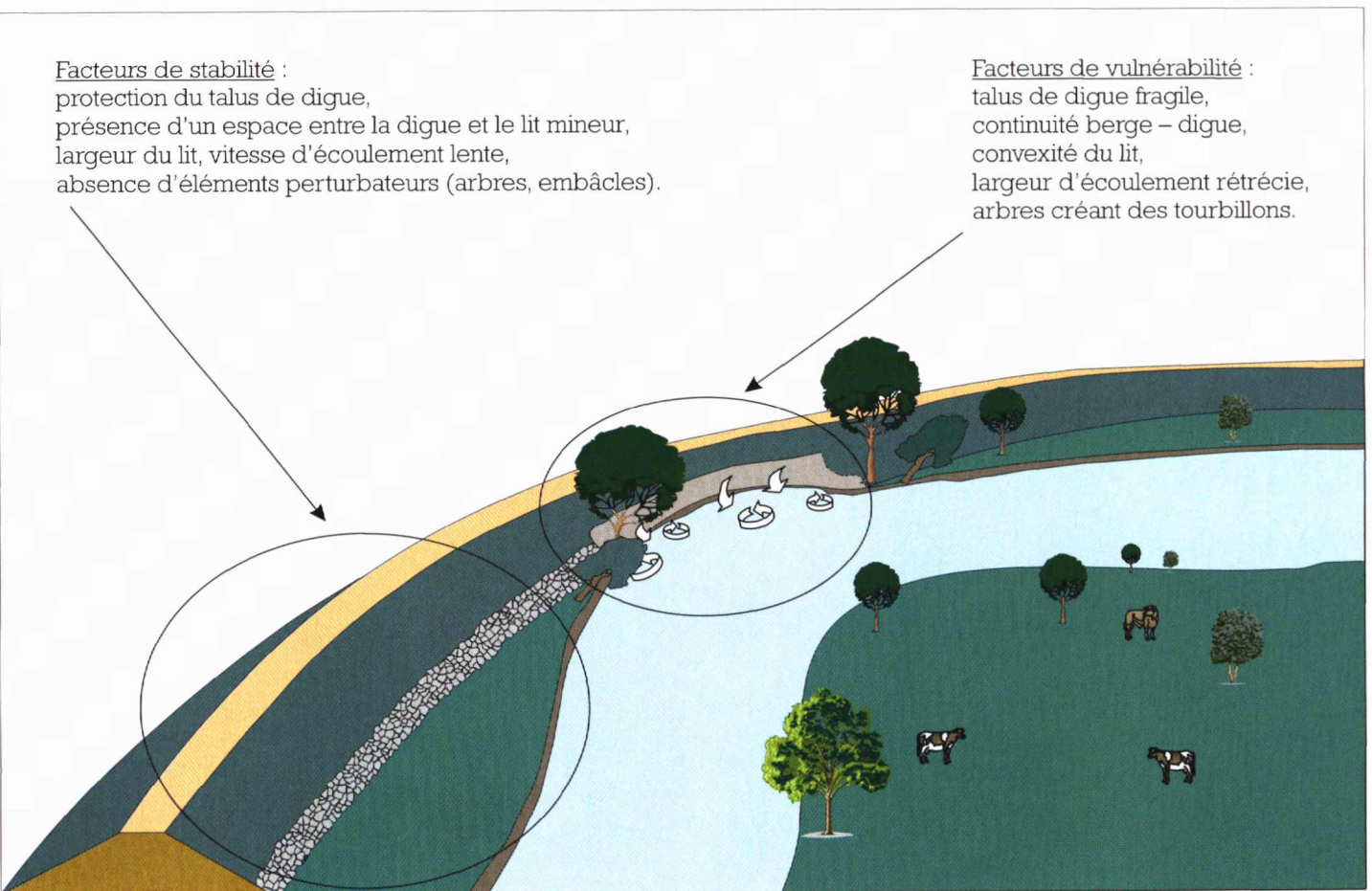


Les crues successives aggravent le phénomène.
Le pied de digue se dégrade.



La berge, verticalisée, est très instable.
Les matériaux saturés glissent par pans entraînant la digue.



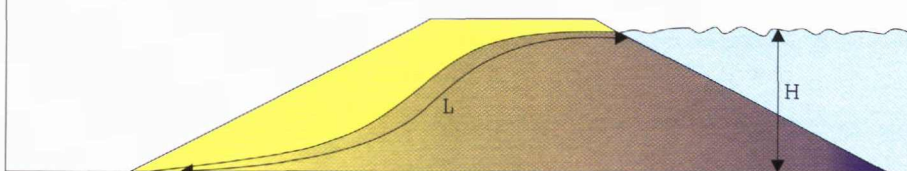


Figures 10 : Mécanisme de l'affouillement en pied de digue.

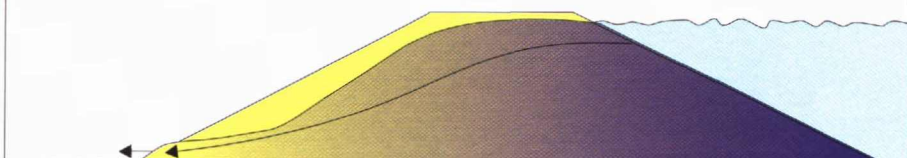
Mécanisme du renard hydraulique (ou érosion interne régressive) :

Avec l'augmentation du niveau d'eau amont (H),
le remblai se sature progressivement.

Le gradient hydraulique (H/L) augmente.

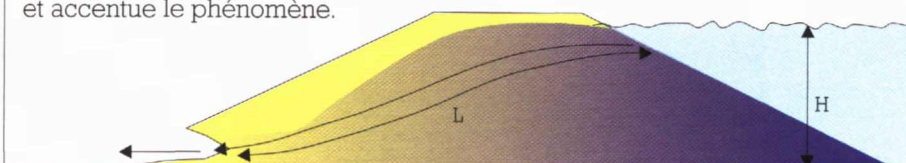
Quelques minutes après :

Le long des lignes de courant préférentiel, un écoulement se crée,
générant une petite fuite à l'aval de l'ouvrage.

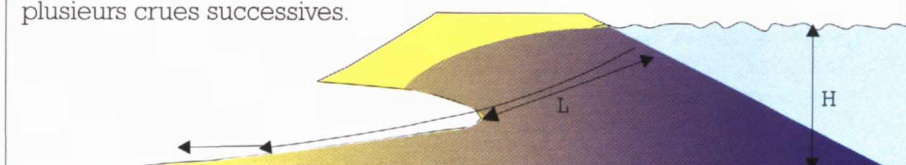
La fuite est établie

et des matériaux peu cohésifs du remblai sont entraînés
par l'écoulement au débouché de la fuite.

Progressivement, le chemin hydraulique se raccourcit,
le gradient hydraulique (H/L) augmente
et accentue le phénomène.

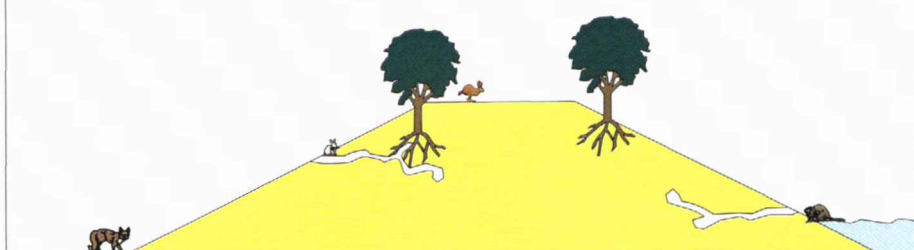
La fuite s'agrandit.

les matériaux entraînés par l'eau de fuite laissent un vide,
développant une cavité qui se propage vers l'amont et s'élargit à l'aval.
La galerie ainsi formée peut traverser entièrement l'ouvrage
et conduire à sa ruine en une ou
plusieurs crues successives.



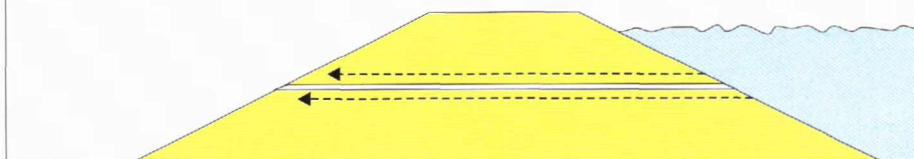
Facteurs aggravants :

Les terriers d'animaux fouisseurs et les racines des arbres constituent des lignes de fuite génératrices de renards.



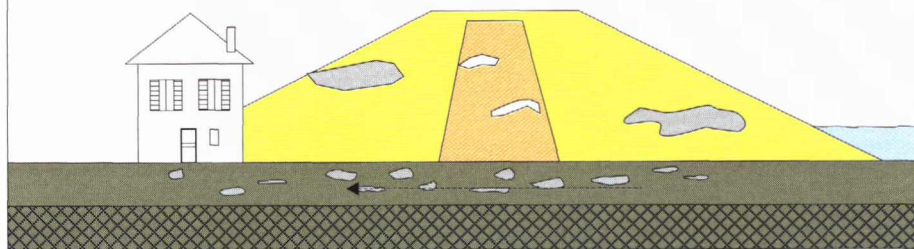
Facteurs aggravants :

Les ouvrages transversaux comme les conduites de prises, câbles enterrés, ou ouvrages d'évacuation peuvent être la source d'érosion régressive en favorisant les circulations internes et les fuites.



Facteurs aggravants :

Les hétérogénéités du remblai, les poches de matériaux sableux et les constructions encastrées, qui facilitent les écoulements internes en réduisant le chemin hydraulique, peuvent être la cause de la formation de renards. De même des fondations perméables peuvent en être le siège.



Figures 11 : Mécanisme du renard hydraulique.

2.4 LA RUPTURE D'ENSEMBLE

2.4.1 DIGUES EN REMBLAI

Le profil en travers courant des digues en remblai leur confère en général une stabilité d'ensemble qui est assez largement assurée dans tous les cas de charge. D'ailleurs, aussi bien en Camargue lors des crues de 1993 et 1994 que sur les levées de Loire au XIX^{ème} siècle, aucune brèche n'a été formellement reliée à une rupture brutale de la levée en charge, si ce n'est peut-être la rupture de la levée des Acacias, près de Blois.

Cependant, on peut penser que le risque d'instabilité d'ensemble sous la charge hydraulique (s'exprimant sous la forme d'une instabilité du talus côté terre comme illustré sur la figure 12.1) existe, en particulier lorsque trois facteurs sont réunis :

- profil de digue étroit avec pentes de talus fortes (pentes supérieures à 0,65 ou fruits inférieurs à 3 H / 2 V) ;
- piézométrie élevée dans la digue liée à l'absence de drainage et à la présence de couches hétérogènes ;
- faible compacité, donc faibles caractéristiques mécaniques des matériaux du remblai, ou présence d'une couche argileuse sous-consolidée au niveau de la fondation.

Ces trois facteurs sont potentiellement réunis dans les zones d'anciennes brèches dont la réparation n'a pas toujours été menée dans les meilleures conditions.

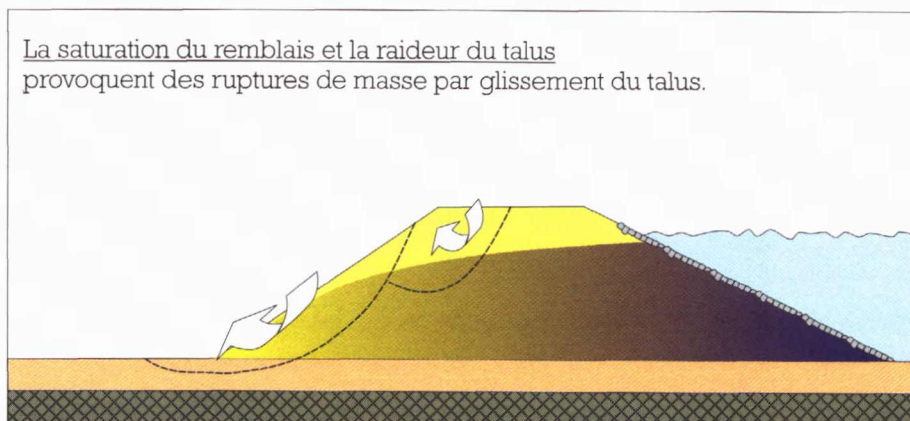


Figure 12 - 1 Mécanisme de rupture du talus aval (côté terre) en situation de crue.

Un autre type d'instabilité est envisageable : il s'agit de la rupture du talus côté rivière et/ou de son revêtement de protection lors d'une décrue rapide (figures 12.2). Ce phénomène, lié aux sous-pressions qui se développent pendant la période des hautes eaux, concerne surtout des talus de digues constitués de matériaux argileux et dont les pentes sont raides ou des perrés trop étanches³. Le risque est réel à proximité de déversoirs équipés de remblais fusibles. En effet, la mise en service du déversoir s'accompagne de l'érosion rapide du remblai fusible ; le débit dérivé croît aussi vite, ce qui provoque une décrue dans le fleuve.

Cf. figures 12 - 2 pages 66 et 67

Cas particulier des digues surmontées de dispositif de revanche (banquette)

Ce cas se présente sur la majeure partie des levées de Loire où, après la crue de 1846, on a surélevé artificiellement les digues en construisant une " banquette " sur le bord du couronnement côté fleuve. Il s'agit en général d'une levée de terre étroite et à pentes raides (largeur en crête d'environ 0,50 m et pentes d'environ 0,7) ou bien d'un muret en maçonnerie de 0,3 à 0,5 m d'épaisseur. La hauteur de cette banquette peut atteindre, voire dépasser 1,0 m.

La liaison entre la banquette et la digue préexistante constitue un point de faiblesse, en particulier sur le plan hydraulique avec risque d'écoulements privilégiés entraînant érosion, renard et effondrement de la banquette.

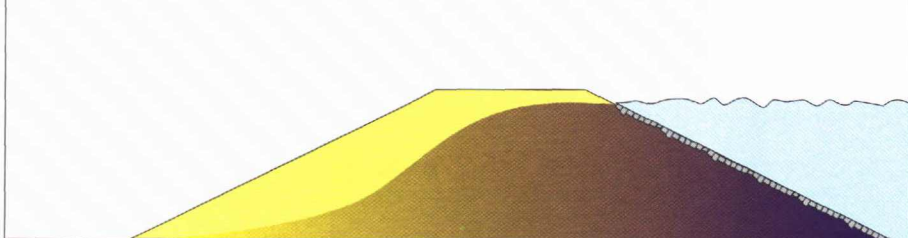
Mais c'est également la stabilité mécanique de ces banquettes qui apparaît très précaire, que ce soit du fait du profil insuffisant et des faibles caractéristiques mécaniques des banquettes souvent mal compactées, ou que ce soit du fait des fondations insuffisantes des murets en maçonnerie qui peuvent présenter des signes de désordres (fissures, inclinaison vers le fleuve...), phénomènes souvent aggravés, voire déclenchés, par les surcharges routières lorsque la digue supporte une route.

Sans distinction précise du mécanisme en cause (renard ou instabilité d'ensemble), la rupture des banquettes a été à l'origine de 24 % des brèches des digues de Loire lors de la crue de 1866. Il s'agit donc d'un point majeur de la vulnérabilité des digues équipées de tels dispositifs, en tous cas dans les tronçons où la banquette n'a pas fait l'objet de confortements récents.

³ De ce point de vue, les perrés n'ont pas à assurer la fonction d'étanchéité de la levée et les joints de maçonnerie ne doivent donc pas être continus.

Mécanisme de la rupture.

Avec l'augmentation du niveau d'eau amont, et son maintien à une cote élevée lors d'une longue crue, le remblai se sature progressivement.

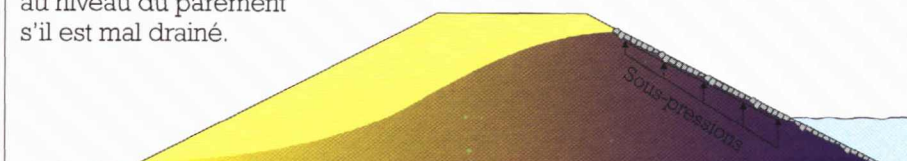
Au cours de la décrue :

L'abaissement du niveau d'eau est relativement rapide.

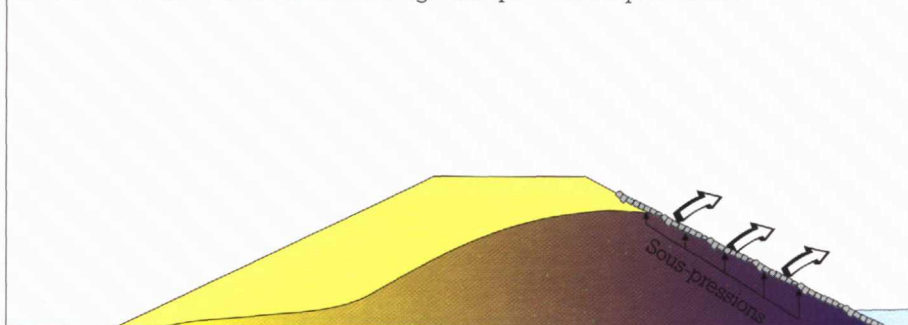
Le remblai se draine plus ou moins vite selon ses caractéristiques de perméabilité.

Le parement n'est plus stabilisé par la pression de l'eau.

L'eau qui sature le remblai altère les caractéristiques mécaniques du massif et engendre des sous-pressions au niveau du parement s'il est mal drainé.

**12 - 2.a** Cas du talus perreyé.Les sous-pressions entraînent

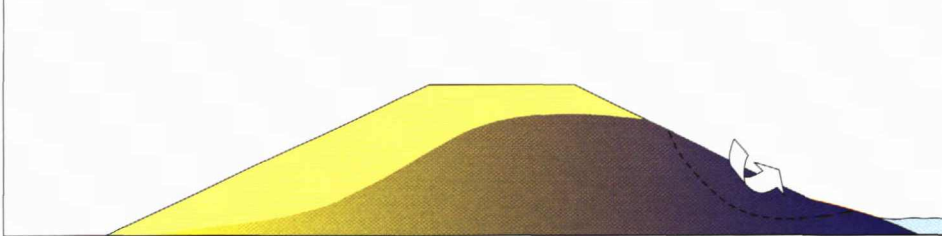
le décollement et même l'arrachage des pierres de parement.



12 - 2.b Cas du talus amont naturel.

La saturation du remblai

amoindrit les caractéristiques mécaniques du massif
et peut provoquer une rupture de masse par glissement circulaire.



Facteurs aggravants :

- La nature des matériaux constitutifs (forte perméabilité) et leur trop faible compacité concourent à la saturation du remblai.
- La raideur des parements.
- L'absence de drainage, notamment des perrés de protection.
- Une couche de fondation instable et non consolidée favorise le risque de glissement.

Figures 12 - 2 Mécanisme de rupture du talus amont (côté rivière) en situation de décrue rapide.

2.4.2 DIGUES OU ÉLÉMENTS DE DIGUES EN MAÇONNERIE

De tels ouvrages se rencontrent surtout dans les zones urbaines (murs d'élévation de quai, protection de voies sur berge, etc.) parce qu'ils répondent bien aux contraintes d'emprise qui les caractérisent. Les plus anciens (en général de faible hauteur) sont en maçonnerie de pierres ou en béton non armé. De plus récents ont été construits (ou se construisent encore de nos jours) en béton armé (ex : éléments préfabriqués autostables). La rupture sous charge de ce type d'ouvrage à profil étroit (en particulier, pour les ouvrages en béton armé dont l'élancement peut être important) est nécessairement brutale et peut résulter d'une erreur de conception (ex : insuffisance du dimensionnement) ou d'un défaut d'exécution (ex : malfaçon dans le ferrailage). La difficulté du diagnostic préalable réside dans le fait que ces défauts ne s'avèrent pas forcément détectables à l'inspection visuelle.

Chapitre 3

L'INSPECTION VISUELLE DES DIGUES :

RECONNAISSANCE INITIALE,
SURVEILLANCE DE ROUTINE

3.1 JUSTIFICATION, PRINCIPE ET PÉRIODICITÉ DE L'INSPECTION VISUELLE

Bon nombre de désordres pouvant affecter une digue et ses ouvrages annexes se révèlent par des indices de surface : mouvements ou accidents de terrain (au sens le plus large), érosions et ravinements, zones de végétation singulière, suintements, terriers de fousseurs, sorties de canalisation, fissures, déplacements, etc. L'inspection visuelle constitue le meilleur moyen de repérer de tels indices et s'avère incontournable pour établir un état initial (reconnaissance initiale) de la digue puis en permettre le suivi ultérieur (surveillance de routine).

Le principe général de la surveillance par le gestionnaire consiste à parcourir intégralement à pied le linéaire de la digue, en répertoriant toutes les informations visuelles sur les désordres ou les présomptions de désordre affectant l'une ou l'autre de ses composantes. Le dossier type de surveillance, joint en annexe 3, propose une méthode pour la conduite de cette opération ainsi que des documents type (fiches) pouvant en servir de support.

Pour les digues bordées par le fleuve, et si nécessaire, la surveillance doit être complétée périodiquement par :

- une inspection par barque (cas d'un pied de talus raide, inaccessible et/ou boisé) ;
- une visite subaquatique (cas d'un perré ou d'une protection de pied se prolongeant sous le niveau d'étiage).

En ce qui concerne la périodicité des visites de surveillance, il convient qu'elle soit adaptée, d'une part à l'importance des enjeux protégés, et d'autre part au niveau des sollicitations auxquelles la digue est exposée. On peut ainsi émettre les recommandations suivantes :

- au minimum une visite annuelle d'inspection à pied pour les digues non sollicitées par les crues courantes ;
- deux visites annuelles pour les digues régulièrement sollicitées par les petites crues et pour les digues protégeant des enjeux forts ;
- une inspection annuelle par barque lorsque celle-ci se justifie ;
- une inspection après chaque forte crue.

Les périodicités ainsi recommandées peuvent paraître faibles⁴, mais il s'agit de minima qui doivent être adaptés à chaque situation particulière. Cependant, il nous semble préférable de faire des visites plus espacées, mais menées de façon très rigoureuse. Il faut en effet veiller à ne pas tomber dans une routine qui serait synonyme de perte d'efficacité.

⁴ Dans de nombreux cas, la pratique est cependant loin d'être à la hauteur de ces recommandations.

3.2 CONDITIONS ET MOYENS DE MISE EN ŒUVRE

Les tournées de surveillance doivent se dérouler après un dégagement soigné de la végétation herbacée et arbustive et, si possible, hors période de végétation (automne et hiver) afin de bénéficier de conditions de visibilité optimales.

L'équipe de terrain est formée d'une brigade de deux (ou trois) agents ayant une bonne connaissance des ouvrages (typiquement les gardes digues lorsqu'ils existent ou les agents techniques de la collectivité gestionnaire). L'intervention au minimum en binôme doit être exigée pour garantir l'exhaustivité et la pertinence de l'inventaire et pour la sécurité des opérations.

En préalable à la visite de surveillance, il est indispensable de se munir :

- des plans et des profils de la digue qui permettront le repérage et le report des observations ; l'idéal en la matière est de pouvoir disposer d'un plan au 1/500 ;
- des plans de détail des ouvrages mobiles (vannes, clapets, déversoirs) ;
- des documents contenant les observations de la (des) précédente(s) visite(s), pour comparer les évolutions de tel ou tel désordre.

Les agents devront être équipés d'une tenue adaptée (bottes voire cuissardes le cas échéant, gilets de sauvetage pour les inspections en barques ou sur des talus raides bordant le fleuve,...). Il est recommandé d'avoir un appareil photographique pour des prises de vue de désordres afin de comparer objectivement des observations à des dates successives. Enfin il faut prévoir le nécessaire pour la prise de note, le magnétophone de poche étant, de ce point de vue, un outil bien pratique.

Le report des informations pourra se faire sur une fiche type (modèle en annexe 3) adaptée aux particularités de l'ouvrage.

Enfin, lorsque les conditions le permettent (absence de frondaison dense), l'utilisation d'un récepteur GPS peut s'avérer d'une grande utilité pour le repérage sur le terrain.

3.3 DIGUES EN REMBLAI

3.3.1 LES POINTS À OBSERVER ET INFORMATIONS À RÉPERTORIER

Si, comme cela est souhaitable, on dispose d'un plan topographique détaillé, il convient d'abord de vérifier et compléter les informations qui y sont portées : ce qui nécessite de se repérer sur le plan existant au fur et à mesure de la progression. Des profils en travers sont levés aux sections où apparaissent des singularités non

visibles ou mal répertoriées sur le plan (ex : maison ou construction édifiée à proximité de, sur ou dans la levée). Penser également à indiquer les niveaux d'eau constatés le jour de la visite (cotes du fleuve et des plans d'eau).

Il est recommandé de conduire l'inspection des désordres par parcours méthodique de la digue : une pratique de terrain est proposée en ce sens dans le dossier type de surveillance des digues fourni en annexe 3. Les points à observer sont répertoriés dans les tableaux 1 et 2, à partir d'une double entrée des mécanismes de rupture redoutés et des trois différentes parties d'ouvrage à examiner pour le cas d'une digue en remblai. Le tableau 1 (page 70) s'applique à la reconnaissance initiale et le tableau 2 (page 71) à la surveillance de routine. Ces deux tableaux ont de nombreux points communs puisque, dans ces deux opérations (effectuées digue à sec), ce sont les mêmes indices qui sont recherchés. Bien sûr, la surveillance de routine s'attache en outre à suivre les évolutions des désordres, ce qui nécessite de la mener en possession des documents de restitution des inspections précédentes.

Parmi les ouvrages singuliers, une attention particulière mérite d'être portée aux maisons, constructions, débouchés ou regards de galerie ou canalisation situées à proximité de, ou encastrées dans, le corps de digue. Les points bas en crête, souvent batardables et liés à des circulations en travers de la digue, sont également à examiner. Il convient de décrire en détail ces singularités et de les cartographier avec précision (repérage en plan et en profil), si le plan topographique disponible ne les a pas – ou incomplètement – pris en compte.

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient absolument de procéder au relevé des mesures (éventuellement en deux temps si un entretien ou une remise à niveau préalable s'avère nécessaire). Le relevé des piézomètres pourra justifier d'une périodicité plus serrée que les visites de routine : ainsi, le suivi des fluctuations saisonnières de la nappe phréatique, qui peut s'avérer nécessaire pour un diagnostic approfondi de la digue, exigera au moins une mesure par trimestre.

Enfin, les riverains, rencontrés au hasard de la visite, sont interrogés sur le fonctionnement de la digue et les éventuels récents travaux d'entretien réalisés. La teneur des témoignages ainsi recueillis est reportée dans les zones de commentaires des fiches de visite.

3.3.2 MODALITÉS DE REPORT ET DE RESTITUTION DES INFORMATIONS

Les désordres et informations répertoriées sont consignées sur la fiche de visite (annexe 3).

Il est, en outre, établi un dossier photographique complet, parfaitement légendé, géographiquement repéré, et daté :

- photos de désordre, référencées et légendées ;
- photos d'ensemble.

Tableau 1 : Reconnaissance visuelle initiale des digues en remblai - présentation synoptique des points à observer.

Mécanismes de rupture	Points d'observation	Reconnaissance visuelle initiale		
		Talus côté rivière (fleuve)	Crête	Talus côté terre (val)
Surverse	Profil en long de la crête		Irrégularités sur le profil, présence de points bas, affaissements, ornières - présence et état de batardeaux, portes...	
	Cote du cours d'eau, laisses de crue	Repères de crue historique, relevé de la cote le jour de la visite, existence de laisses		
	Déversement		Existence, nature et état du revêtement et d'un dispositif fusible (déversoir)	Existence, nature et état du revêtement et du dissipateur aval (déversoir)
	Dispositif de revanche		Existence, nature et état du dispositif de revanche : aspect du contact avec le corps de digue, stabilité	
Érosions de surface/ affouillements	Effets sur talus des sollicitations hydrauliques fluviales	Verticalité du talus, déchaussement de la végétation rivulaire, présence d'anse d'érosion	Fissuration longitudinale sur la crête au droit d'anse d'érosion	
	Protection de surface (revêtement)	Existence, nature et état du revêtement de protection (perré, masque béton, enrochement,...)		Existence, nature et état du revêtement de protection (écoulements fluviaux dans le Val)
	Protection de pied de talus	Existence, nature et état de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches, enrochement,...)		
	Proximité et tracé du lit mineur / caractéristique de l'écoulement	A observer. La digue est-elle en contact direct du lit mineur ? Méandres - courbe concave. Direction et vitesse du courant.		
	Effets sur talus des sollicitations externes diverses	Existence et stade de développement de ravines, impacts de terrassement, ...		Existence et stade de développement de ravines, impacts de terrassement, ...
Érosion interne	Végétation	Nature, développement et stabilité, racines et souches, sur ou en pied de talus	Nature et développement, racines et souches	Nature et développement, racines et souches, sur ou en pied de talus
	Terriers	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente
	Canalisations / traversées	Débouchés de canalisation ou de traversées (existence, caractéristiques), aspect du contact avec le remblai, dispositif anti-retour	Regards de canalisation, passages en cavalier	Débouchés de canalisation ou de traversées (existence, caractéristiques), aspect du contact avec le remblai, vanne
	Confortement	Existence, nature et état d'un confortement (recharge étanche, géomembrane)	Existence, nature et état d'un rideau d'étanchéité (palplanches, paroi moulée ...)	Existence, nature et état d'un confortement (recharge drainante)
	Ouvrages singuliers	Repérage et caractérisation : échelle, cale, rampe, bâtiment encastré, ...	Repérage et caractérisation : porte, batardeau, bâtiment encastré, ...	Repérage et caractérisation : puisard, mur de soutènement, bâtiment encastré, ...
	Fuite	Fontis	Fontis	Indices de fuite
Instabilité d'ensemble	Saturation, piézométrie	Zones humides, source - existence de piézomètre et mesure si possible	Existence de piézomètre et mesure si possible	Existence de piézomètre ou, en pied de talus, de puits ou fossé, et mesure si possible
	Profil en travers de la digue	Raideur du talus, présence, nature et état d'une recharge, risberme, ...	Largeur de la crête	Raideur du talus, présence, nature et état d'une recharge drainante
	Mouvements de terrain	Fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés	Fissures longitudinales, affaissements - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides tels que chaussées, parapets, murets	Fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés
Brèche	Indice de brèche historique	Modification localisée du profil en travers ou de la nature de la digue	Modification localisée du profil en travers ou de la nature de la digue. Stèle ! (à la mémoire d'un défenseur de la digue, comme pour la brèche de Conneuil sur la levée rive gauche de la Loire en amont de Tours)	Dépression, mare ou marécage au delà du pied de talus. Modification localisée du profil en travers ou de la nature de la digue
	Accessibilité aux engins de terrassement (et d'entretien)	Pas d'intérêt vis-à-vis du risque de brèche (site inaccessible pour une intervention en crue), mais uniquement pour l'entretien courant de la partie inférieure et du pied de talus	Existence, caractéristiques et viabilité de la voirie	Existence, caractéristiques et viabilité de la voirie en pied ou à proximité du pied de talus

Tableau 2 : Surveillance visuelle de routine des digues en remblai - présentation synoptique des points à observer.

Mécanismes de rupture	Points d'observation	Surveillance visuelle de routine (*)		
		Talus côté rivière (fleuve)	Crête	Talus côté terre (val)
Surverse	Profil en long de la crête	Apparition / évolution d'irrégularités sur le profil : points bas, affaissements, ornières - état des batardeaux, portes , ...		
	Cote du cours d'eau, laisses de crue	Relevé de la cote le jour de la visite, existence de laisses récentes		
	Déversement		État du revêtement et de l'éventuel dispositif fusible (déversoir)	État du revêtement et du dissipateur aval (déversoir)
	Dispositif de revanche		État du dispositif de revanche : aspect du contact avec le corps de digue, stabilité	
Érosions de surface / affouillements	Effets sur talus des sollicitations hydrauliques fluviales	Verticalité du talus, déchaussement de la végétation rivulaire, apparition / évolution d'anse d'érosion	Fissuration longitudinale sur la crête au droit d'anse d'érosion	
	Protection de surface (revêtement)	État du revêtement de protection (permé, masque béton, enrochement,...)		État du revêtement de protection (écoulements fluviaux dans le val)
	Protection de pied de talus	État de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches, enrochement,...)		
	Proximité et tracé du lit mineur / caractéristique de l'écoulement	À observer, si la levée est proche du lit mineur. État du contact avec le lit mineur. Direction et vitesse du courant.		
	Effets sur talus des sollicitations externes diverses	Apparition et/ou stade de développement de ravines, impacts de terrassement, ...		Apparition et/ou stade de développement de ravines, impacts de terrassement, ...
Érosion interne	Végétation	Nature, développement et stabilité, racines et souches, sur ou en pied de talus	Nature et développement, racines et souches	Nature et développement, racines et souches, sur ou en pied de talus
	Terriers	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente
	Canalisations / traversées	Débouchés de canalisation ou de traversées, aspect du contact avec le remblai, état du dispositif anti-retour éventuel	Regards de canalisation, passages en cavalier	Débouchés de canalisation ou de traversées, aspect du contact avec le remblai, état du vannage éventuel
	Confortement	État du confortement éventuel (recharge étanche, géomembrane)	État du rideau d'étanchéité éventuel (palplanches, paroi moulée, ...)	État du confortement éventuel (recharge drainante)
	Ouvrages singuliers	État, configuration : échelle, cale, rampe, bâtiment encastré, ...	État, configuration : porte, batardeau, bâtiment encastré, ...	État, configuration : puisard, mur de soutènement, bâtiment encastré, ...
	Fuite	Fontis	Fontis	Indices de fuite
Instabilité d'ensemble	Saturation, piézométrie	Apparition / évolution de zones humides, sources - État des piézomètres et mesure si possible	État des piézomètres et mesure si possible	État des piézomètres ou, en pied de talus, de puits ou fossé, et mesure si possible
	Mouvements de terrain	Apparition / évolution de fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés	Apparition / évolution de fissures longitudinales, affaissements - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides tels que chaussées, parapets, murets	Apparition / évolution de fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés
Conditions d'accès pour l'entretien	Accessibilité aux engins de terrassement (et d'entretien)	État de la voirie de pied de talus	État de la voirie de crête	État de la voirie en pied ou à proximité du pied de talus

(*) Se munir des éléments de compte rendu de la précédente visite

3.3.3 RENDEMENT ET LIMITES DE L'INSPECTION VISUELLE

Le rendement de l'inspection visuelle dépend étroitement des conditions de réalisation : possession, ou non, d'éléments cartographiques de précision et, surtout, état d'entretien de la végétation. On imagine aisément la différence de vitesse de progression et de qualité d'observation qui peut exister, pour les intervenants, entre une digue bien entretenue, aux talus enherbés de végétation rase, et une digue à l'abandon, couverte d'une forêt de broussailles (souvent épineuses ...) où l'on avance à la machette avec pour seul guide une carte au 1/25000 !

Par ailleurs, la première inspection (reconnaissance initiale) est nécessairement plus longue que celles qui suivent (surveillance de routine) où l'on se « contente » de mettre à jour les informations.

Risquons quelques chiffres, pour le cas de la digue bien entretenue, pour laquelle on dispose de plans précis, et non compté le temps de mise au propre des informations au bureau :

- inspection initiale : 1 à 2 km / jour de brigade ;
- inspection de routine : 3 à 5 km / jour de brigade.

Lorsque la digue est mal entretenue, les fourchettes ci-dessus peuvent être à diviser par 2, voire plus dans les cas extrêmes.

La limite de l'inspection visuelle réside dans le fait qu'elle ne fournit aucun élément sur les désordres – *a priori* liés à des caractéristiques du sol en profondeur et/ou au comportement du cours d'eau en crue au droit de la digue – qui ne produisent pas (ou qui n'ont pas encore produit) d'indices de surface, en particulier pour les cas de digue à sec (ex : zones de plus grande perméabilité dans le corps de digue ou en fondation, renard hydraulique n'ayant pas débouché, sollicitations par les courants de rive ...) ou dont les indices ont été effacés (ex : constructions ou ouvrages enfouis, accident ou mouvement de terrain remodelés, ancienne zone de surverse, ...).

Le risque de ne pas être exhaustif est, à ce titre, d'autant plus fort que la dernière mise en charge (grande crue) est ancienne : d'où l'intérêt de compléter les inspections à sec, dès que l'occasion s'en présente, par des inspections en crue (§ 4.2) et/ou post-crue (§ 4.3).

En dépit de cela, une inspection visuelle initiale constitue l'étape incontournable d'une étude-diagnostic de digue : elle doit être réalisée avant toute prospection géotechnique dont elle permettra d'éclairer les modalités de mise en œuvre. Par la suite, des inspections de routine, plus rapides, permettent de réactualiser l'état des lieux.

3.4 MURS EN MAÇONNERIE OU EN BÉTON

Les principaux désordres que l'on cherche à identifier sur les ouvrages en maçonnerie ou en béton de masse peuvent être regroupés en trois familles : les désordres structuraux, les affouillements et les dégradations locales. Les observations à faire lors de l'inspection visuelle sont synthétisées dans le tableau 3 (page 75).

3.4.1 DÉSORDRES STRUCTURAUX

Les désordres structuraux se traduisent par des fissures qui intéressent en général l'ensemble de l'ouvrage et sont traversantes. Ces fissures sont dues à des tassements différentiels de la fondation ou à des poussées excessives des terres que retient le mur. Elles peuvent être caractérisées de façon plus précise (figure 13) par leur ouverture, par leur rejet (déplacement relatif avant - arrière) et par leur glissement (déplacement relatif vertical).

Une fissure présentant un rejet sera, a priori, le signe d'une poussée excessive des terres, tandis qu'une fissure présentant un glissement ou une ouverture sera plutôt liée à des tassements différentiels de la fondation.

Les murs en béton sont, en général, équipés de joints de construction disposés à intervalles réguliers et qui permettent d'absorber le retrait thermique consécutif à la prise du béton ainsi que les déformations saisonnières dues aux variations de température. En l'absence de tels joints de construction, on observe souvent des fissures de retrait, régulièrement espacées et sans mouvement différentiel dans le sens perpendiculaire à l'axe du mur. De telles fissures ne présentent pas un caractère particulier de gravité. Par contre, les joints de construction, ou les fissures de retrait qui se sont créées en l'absence de joints, peuvent être le siège de mouvements autres qu'une simple ouverture, traduisant alors des problèmes structuraux.

Si l'on observe de telles fissures et de tels mouvements sur un mur en maçonnerie ou en béton, il convient de faire appel à un spécialiste en génie civil pour en faire un diagnostic plus précis permettant d'en identifier les causes, d'en apprécier la gravité et de préconiser, le cas échéant des mesures correctives. Dans ce cadre, le spécialiste pourra proposer de suivre l'évolution de la fissure grâce à un simple fissuromètre (qui ne permet que la mesure dans une direction) ou mieux, grâce à un vinchon qui permet une mesure dans les trois axes (figure 13).

Le vinchon triaxial est constitué de deux pièces métalliques scellées de part et d'autre de la fissure qu'il ausculte. La section des pièces métalliques doit être au minimum de 2 cm x 2 cm. La mesure se fait au pied à coulisse avec une résolution de 1/100^e de mm. La qualité globale de la mesure dépend largement du soin apporté au scellement de l'appareil et de la rigidité des pièces métalliques. Attention à bien ancrer les deux pièces métalliques sur des pierres de maçonnerie qui soient solidaires de chacune des parties du mur situées de part et d'autre de la fissure (éviter les pierres descellées).

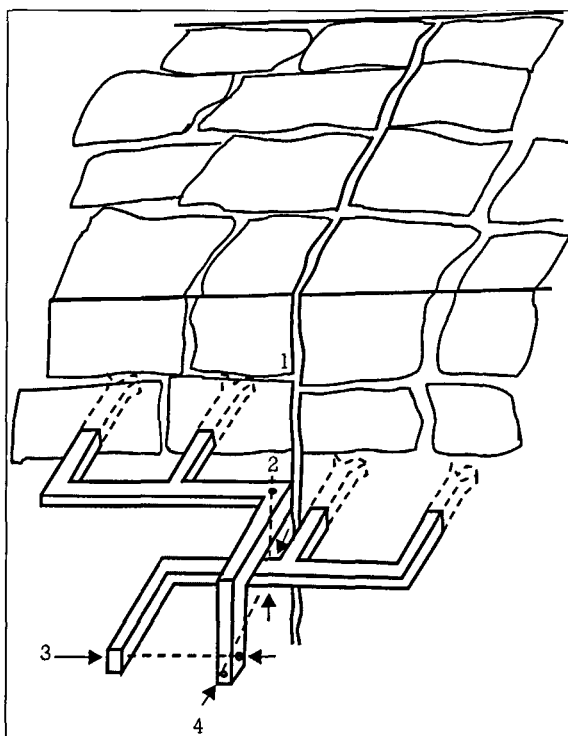


Figure 13 : Déplacements au droit d'une fissure et équipement par un vinchon.

- 1 . Fissure à surveiller.
- 2 . Déplacement vertical (glissement).
- 3 . Déplacement latéral (ouverture).
- 4 . Déplacement avant-arrière (rejet).

3.4.2 LES AFFOUILLEMENTS

La construction des digues en maçonnerie est souvent justifiée par des considérations d'emprise et il est logique qu'on les rencontre surtout dans les zones où le lit endigué est le plus étroit. Ces ouvrages sont donc, le plus souvent, en contact direct avec le lit mineur, ce qui les expose particulièrement aux phénomènes d'affouillement.

L'inspection devra alors s'attacher à observer le pied du mur côté fleuve. Elle sera donc menée à l'étiage, si nécessaire par bateau et complétée au besoin par une inspection subaquatique. Il est recommandé de réaliser périodiquement des levés du fond du lit au pied du mur, par exemple à l'aide de perches, de sondes (fil lesté et gradué) ou de mires graduées. L'utilisation du sonar sera intéressante si l'on peut accéder en bateau tout le long du mur, ce qui peut être plus facile en période de niveau moyen dans le fleuve. Dans les secteurs identifiés à risque élevé, de tels levés du fond du lit (à la perche ou par sonar) sont à réaliser après chaque grande crue.

3.4.3 LES DÉGRADATIONS LOCALES

Il s'agit de dégradations liées au vieillissement des pierres ou du liant de la maçonnerie. Les pierres peuvent être sensibles aux cycles gel – dégel et, plus rarement, à l'érosion mécanique ou à la dissolution (cas du tuffeau en vals de Loire).

Le mortier, quant à lui, peut être l'objet de dégradations physico-chimiques : le ciment, selon sa qualité initiale, subit des altérations chimiques qui fragilisent le mortier et le rendent poreux et donc plus sensible aux cycles gel – dégel, au développement de végétation ou à l'érosion hydraulique. Des particules de terre peuvent aussi se déposer sur les joints de maçonnerie et constituent des milieux propices à la germination des graines et au développement des végétaux, dont les racines peuvent avoir un effet déstructurant sur les joints de maçonnerie, voire à terme sur les structures elles-mêmes quand les racines occupent toute l'épaisseur du joint.

Tableau 3 : Surveillance visuelle des digues en maçonnerie et en béton, des déversoirs et des ouvrages singuliers - présentation synoptique des points à observer.

Mécanismes de dégradation	Points d'observation	Surveillance visuelle		
		Parement côté rivière (fleuve)	Crête	Parement côté terre (val)
Mouvements structuraux	Tassements		Fissures avec ouverture ou glissement, irrégularités sur le profil, présence de points bas, affaissements	
	Poussée des terres	Fissures traversantes avec rejet	Fissures traversantes avec rejet	Fissures traversantes avec rejet
	Retrait du béton	Fissures traversantes sans rejet ni glissement	Fissures traversantes sans rejet ni glissement	Fissures traversantes sans rejet ni glissement
Affouillements / érosions	Effets des sollicitations hydrauliques fluviales	Déchaussement du pied du mur, sous-cavage, présence d'anse d'érosion	Fissures avec ouverture ou glissement, irrégularités sur le profil, présence de points bas, affaissements	
	Effets de la surverse sur les déversoirs		Pierres emportées sur le seuil déversant	Pierres emportées sur le coursier ou sur le radier, creusement de fosses d'érosion en aval du radier, sous-cavage du radier
	Protection de pied de talus	Existence, nature et état de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches, enrochement,...)		
	Proximité et tracé du lit mineur / caractéristiques de l'écoulement	À observer. Le mur est-il en contact direct du lit mineur ? Méandres - courbe concave. Direction et vitesse du courant.		
Dégradations locales	Vieillessement des pierres	Pierres fissurées, défilées, éclatées par le gel ; pierres manquantes	Pierres fissurées, défilées, éclatées par le gel ; pierres manquantes	Pierres fissurées, défilées, éclatées par le gel ; pierres manquantes
	Vieillessement des joints de maçonnerie	Joints dégradés, mortier fissuré, poreux, s'effritant facilement	Joints dégradés, mortier fissuré, poreux, s'effritant facilement	Joints dégradés, mortier fissuré, poreux, s'effritant facilement
	Végétation	Nature et développement de la végétation dans les joints de maçonnerie	Nature et développement de la végétation dans les joints de maçonnerie	Nature et développement de la végétation dans les joints de maçonnerie
	Ouvrages singuliers, canalisations, traversées, bâtiments encastrés	Repérage et caractérisation. Débouchés de canalisation ou de traversées (existence, caractéristiques), aspect du contact avec le béton ou la maçonnerie, dispositif anti-retour	Repérage et caractérisation. Regards de canalisation, passages en cavalier, état des rainures à batardeaux	Repérage et caractérisation. Débouchés de canalisation ou de traversées (existence, caractéristiques), aspect du contact avec le béton ou la maçonnerie, vanne
	Réparations	Existence, nature des réparations (rejointoiement de maçonneries, remplacement de pierres, ...)	Existence, nature des réparations (rejointoiement de maçonneries, remplacement de pierres, ...)	Existence, nature des réparations (rejointoiement de maçonneries, remplacement de pierres, ...)
Dégradation des banquettes fusibles de déversoirs	Tassements et érosions		Régularité du profil en long, points bas sur le profil, ravines d'érosion dues à la pluie, dégradations liées au passage d'animaux ou de véhicules.	

3.5 DÉVERSOIRS

Les dégradations sur les déversoirs massifs en béton ou en maçonnerie sont de même nature que celles décrites ci-dessus pour les murs en béton : fissures structurales, phénomènes de vieillissement du béton ou de la maçonnerie.

Les dégradations sur les déversoirs revêtus d'un perré en maçonnerie sont celles décrites au paragraphe 3.4.3.

En outre, les déversoirs peuvent subir des dégradations par érosion hydraulique. Ces dégradations concernent le déversoir lui-même, où des pierres peuvent être emportées par le flot sur le seuil, le coursier ou le radier aval ; elles concernent aussi la zone en aval du radier sous la forme d'affouillements et de creusement de fosses d'érosions pouvant aller jusqu'à des sous - cavage du radier.

Ces phénomènes n'ont bien sûr lieu qu'à l'occasion des crues, lorsque ces dernières sont suffisamment fortes pour provoquer la mise en service du déversoir. Une attention particulière doit donc être exercée dans l'inspection post-crue des déversoirs. Tous ces désordres lors des crues sont des désordres graves, qui doivent faire l'objet de réparations rapides, en tous cas avant l'arrivée d'une autre crue, faute de quoi les dégradations seraient nettement amplifiées, pouvant conduire à la rupture complète du déversoir.

Les observations à faire lors de l'inspection visuelle sont synthétisées dans le tableau 3.

3.6 OUVRAGES SINGULIERS

Comme indiqué au § 1.3.4, ces ouvrages peuvent être très divers : passages batardables, rampes d'accès au fleuve, aqueducs, galeries, conduites, constructions dans la digue, etc. Nous ne donnerons donc pas une liste des désordres pouvant survenir sur ces ouvrages.

En fait, la première tâche à réaliser dans le cadre de la surveillance de ces ouvrages, consiste à en assurer l'inventaire le plus exhaustif possible et à les repérer précisément sur les plans. Les visites d'inspections seront l'occasion de relever les désordres éventuels (voir tableau 3) ainsi que de repérer des ouvrages singuliers non encore répertoriés. Pour cette catégorie, la prise de vue photographique sera un moyen privilégié de suivi des dégradations.

Chapitre 4

SURVEILLANCE EN CRUE

4.1 IMPORTANCE DE L'ORGANISATION PRÉALABLE (PLAN DE VIGILANCE ET/OU PLAN D'INTERVENTION)

La situation de crue présentant par nature un caractère prévisible uniquement à (très) court terme, il convient de s'y préparer à froid en définissant, le plus précisément possible, les aspects suivants :

- organisation de l'annonce de crue ;
- mise en place des batardeaux, manœuvre de portes, vérification de clapets ;
- surveillance des ouvrages pendant le passage de la crue ;
- le cas échéant, modalités d'évacuation des populations menacées par une montée des eaux ou une rupture de digue.

L'objet du présent guide n'est pas de couvrir tous les aspects du plan de vigilance qui est un document très spécifique à chaque situation locale. On peut cependant en dresser quelques recommandations générales, sachant que le paragraphe 4.2 décrit de façon détaillée les modalités de la surveillance en crue.

L'annonce de crue n'est pas formellement organisée sur toutes les rivières. Lorsqu'une telle organisation existe, le plan de vigilance doit indiquer les moyens de transmission de l'information, du service d'annonce de crues aux services gestionnaires des digues. Des indications sur les temps d'arrivée des crues sont aussi très précieuses.

Si la rivière ne dispose pas d'un service de prévision des crues, il convient d'identifier la chaîne minimum d'information, depuis les communiqués de Météo-France, les postes limnigraphiques, jusqu'aux gestionnaires d'ouvrages intéressant la sécurité publique.

Les interventions sur les ouvrages de bouchure doivent être soigneusement préparées. Cela commence par l'établissement d'une liste exhaustive de ces ouvrages avec leurs caractéristiques, leur localisation sur une carte, les lieux de stockage des batardeaux, etc. Des exercices périodiques de mise en place ou de manœuvre de ces organes sont à programmer régulièrement hors situation de crise et une vérification spécifique est à prévoir à l'annonce de la crue. Enfin, l'entretien régulier des ces organes est une des conditions de leur efficacité lorsqu'on en aura besoin.

Pour l'organisation de la surveillance en crue, il convient d'abord d'identifier les secteurs ou les points de digue qui feront prioritairement l'objet d'inspection(s) et ce, en fonction de la connaissance que le service gestionnaire a de l'état des digues (grâce à la reconnaissance initiale et aux inspections de routine) et des enjeux qu'elles protègent. Pour chacun d'entre eux, sera dressée une fiche récapitulative sur le déroulement des opérations (repérage PK du secteur ou du point à inspecter,

mention et coordonnées PK des points particuliers à contrôler pour une inspection linéaire, aide-mémoire général sur les désordres à observer, fréquence de l'opération si on estime qu'elle doit être renouvelée plusieurs fois en cours de crue).

La fiche récapitulative mentionnera également les documents et les matériels à emporter par les opérateurs (en s'assurant que le service en dispose d'un nombre d'exemplaires suffisant).

Différents niveaux de vigilance pourront, le cas échéant, être définis, en fonction de l'importance de la crue prévue. Cela s'applique en particulier sur les grands fleuves où les systèmes d'annonce et les temps de propagation des crues permettent cette gradation dans l'organisation du plan de vigilance.

La sécurité des intervenants devra être une préoccupation constante dans l'élaboration du plan de vigilance. Des équipements particuliers de sécurité et de communication sont à prévoir, notamment gilets de sauvetage et talkie-walkies⁵.

4.2 SURVEILLANCE VISUELLE EN CRUE

4.2.1 JUSTIFICATION ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'objectif général de l'inspection en crue est de répertorier, repérer et évaluer les désordres ou présomptions de désordre liés plus ou moins directement à l'état «en charge» de la digue, révélant les zones de faiblesse de l'ouvrage (en complément de celles décelées lors des inspections à sec) et/ou susceptibles d'en annoncer la rupture prochaine. Ces désordres peuvent résulter des contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par la digue (charge hydraulique, surverse, courant de rive, vagues, ressauts et turbulences) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers ou sous le corps de digue, état de saturation, courants hydrauliques, pressions interstitielles).

Le principe de la méthode consiste à parcourir un linéaire de digue en charge, au cours d'une crue du fleuve. Il se peut donc que cette inspection se déroule en situation de crise (alerte de crue, plan ORSEC). Par rapport à l'inspection à sec, l'inspection en crue présente l'avantage de pouvoir fournir d'intéressants éléments sur les désordres ou leurs évolutions liés à des caractéristiques du sol en profondeur (ex : zones de plus grande perméabilité dans le corps de digue, indices d'érosion interne, ...) et/ou au comportement du fleuve en crue au droit de la levée (ex : surverse, érosion de berges, etc.). Le problème réside dans le fait que le constat de l'un ou l'autre de ces indices peut précéder de très peu une rupture plus ou moins soudaine de l'ouvrage.

5 L'utilisation de téléphones mobiles n'est pas forcément appropriée dans des situations de crise où les réseaux risquent d'être saturés.

Outre la nature des indices de désordre à plus particulièrement observer, l'inspection visuelle en crue se distingue des inspections à sec par plusieurs aspects importants :

- elle se pratique sous deux formes, d'ailleurs non exclusives l'une de l'autre :
 - inspection *linéaire* (et éventuellement renouvelée au cours de la crue) d'un plus ou moins large *secteur prédéfini* dans le but de vérifier le fonctionnement critique de la digue et de parfaire la connaissance de l'ouvrage et de ses défauts d'étanchéité ;
 - inspection *ponctuelle* (et éventuellement répétée) d'une zone restreinte et circonscrite de levée où ont été signalés par des témoins – ou sur laquelle on redoute *a priori* (ex : ouvrage singulier) – des désordres (fuites, surverse, ...) et leurs conséquences ;
- le moment (et la saison) de la visite est imposé par les événements et le délai de préparation est plus ou moins court. En conséquence, si les talus et/ou les abords de la digue sont mal entretenus (végétation), on ne disposera guère de temps pour faire effectuer un débroussaillage préalable (d'où l'intérêt d'assurer un entretien régulier des ouvrages afin de maintenir en toutes circonstances des conditions de visibilité optimales) ;
- les observations effectuées au titre de la visite en crue peuvent entrer dans un processus de gestion de crise et conditionner des procédures d'évacuation de zones de population exposées ou la mise en œuvre de travaux conservatoires avec des moyens manuels ou mécaniques (ex : obstruction de passage busé, confortements divers, colmatage de brèche). Il est donc nécessaire de couvrir un maximum de linéaire de digue en un minimum de temps, en s'attachant aux points essentiels de la visite, et de disposer, en outre, de moyens de communication rapides ;
- les évolutions à suivre peuvent être rapides et les informations recueillies doivent être rattachées à une échelle de temps fine (de l'ordre de la minute ou à tout le moins du quart d'heure) ;
- les opérateurs de terrain sont potentiellement exposés à des risques corporels et des mesures doivent être prises pour assurer leur sécurité.

Tous ces éléments imposent de définir, hors période de crise, les modalités pratiques de mise en œuvre de l'inspection en crue (plan de vigilance : cf § 4.1 ci-dessus) et, si possible, de les tester par des exercices de simulation.

4.2.2 CONDITIONS ET MOYENS DE MISE EN ŒUVRE

L'inspection en crue peut être effectuée, par principe, dans tous les terrains quelles que soient les difficultés d'accès mais *son efficacité, tout comme son rendement, s'avèrent étroitement dépendants de l'état d'entretien de la végétation de la digue*, au moment (imposé) de l'inspection. Comme ce moment n'est pas connu à l'avance, le seul moyen de garantir de bonnes conditions de visibilité consiste à assurer un entretien soigné et permanent de la digue et de ses abords.

La préparation et l'organisation de l'inspection visuelle en crue de la digue relèvent, en principe, du service gestionnaire des ouvrages. Mais s'agissant d'une opération susceptible de s'inscrire dans un processus de crise, la conduite effective des inspections peut faire intervenir des agents extérieurs à ce service, tant au niveau décisionnel qu'opérationnel, et induit des problèmes de communication et de coordination. L'essentiel de la préparation de cette mission doit s'effectuer hors de la période de crise et être consignée dans le *plan de vigilance*.

Le plan de vigilance est élaboré dans un souci de sécurité des intervenants et d'efficacité des communications et prises de décision. Il identifie explicitement les équipes à mettre en œuvre et, pour chaque équipe, le tronçon de digue à surveiller. Ce plan prévoit, si nécessaire, les modalités d'appui héloporté pour l'inspection visuelle en crue : évacuation/secours des opérateurs, apports de matériel ou matériau pour travaux conservatoires.

L'équipe de terrain est formée de deux agents dont un au moins initié en génie civil / mécanique des sols : l'intervention en binôme s'avère souhaitable, voire indispensable, pour le transport du petit matériel, pour la réalisation, dans de bonnes conditions, des levés rapides et, enfin, pour la sécurité des opérations. La compétence de l'un des agents en mécanique des sols apporte une garantie de la pertinence des observations, mais aussi de l'appréciation des risques à court terme pour la sécurité de l'ouvrage et donc des intervenants eux-mêmes (sécurité de l'inspection). Il est, enfin, recommandable que l'un des opérateurs soit également le gestionnaire courant (responsable des inspections de routine et du contrôle des travaux d'entretien) du secteur de digue concerné.

La longueur du tronçon affecté à une équipe dépendra de trois facteurs :

- niveau de sécurité du tronçon déterminé par les études de diagnostic réalisées " à sec ". Un tronçon présentant des désordres ou des faiblesses préalablement identifiés devra faire l'objet d'une surveillance plus soutenue ;

- conditions de l'observation : moyens de circulation sur la levée, état de la végétation ;

- degré de vulnérabilité des zones protégées par les digues, compte tenu du risque hydraulique et de l'importance des enjeux (habitat, infrastructures, services publics, cultures à haute valeur ajoutée, ...).

On peut considérer en première approche que la longueur d'un tronçon affecté à une équipe donnée ne devrait pas dépasser une vingtaine de kilomètres.

4.2.3 LES POINTS À OBSERVER ET INFORMATIONS À RÉPERTORIER

Les points à observer sont indiqués dans le tableau 4, à partir d'une double entrée des mécanismes de rupture redoutés et des trois différentes parties d'ouvrage à examiner pour le cas d'une digue en remblai.

Tableau 4 : Surveillance visuelle en crue des digues en remblai - présentation synoptique des points à observer

Mécanismes de rupture	Points d'observation	Surveillance visuelle en crue		
		Talus côté rivière (fleuve)	Crête	Talus côté terre (val)
Surverse	Profil en long de la crête	Vérification de la mise en place des batardeaux - comportement à la charge des batardeaux (stabilité, étanchéité, ...)		
	Cote du cours d'eau, laisses de crue	Relevé de la cote du cours d'eau (au moins par rapport à la crête). Repérage de la laisse de pointe de crue.	Indices et localisation d'une surverse récente : laisses, herbe couchée, ...	Indices et localisation d'une surverse récente : laisses, herbe couchée, ...
	Déversement	Surverse constatée : alerte ! Dimensions de la lame d'eau, tenue au ravinement de la crête. Déversoir : en service ou non ? État du dispositif fusible, comportement du déversoir.		Surverse constatée : alerte ! Dimensions de la lame d'eau, tenue au ravinement du talus. Déversoir : en service ou non ? Comportement du coursier et du dissipateur d'énergie. Extension de l'inondation côté val (à vue).
	Dispositif de revanche	Comportement à la charge du dispositif de revanche : aspect du contact avec le corps de digue, étanchéité, stabilité		
Érosions de surface / affouillements	Effets sur talus des sollicitations hydrauliques fluviales	Amorces ou développement d'anse d'érosion. Déstabilisation d'arbres, fissuration en sommet de talus.	Fissuration longitudinale, affaissements sur la crête, désordres sur ouvrages rigides, au droit de zones d'attaque côté rivière. Érosion de la crête : alerte !	Existence d'écoulements fluviaux côté val et impacts éventuels en pied ou sur talus de digue
	Protection de surface (revêtement)	Tenue à l'érosion du revêtement de protection, indices de mouvement.		Tenue du revêtement de protection côté val s'il existe
	Protection de pied de talus	En principe, non observable		
	Proximité et tracé du lit mineur / caractéristique de l'écoulement	Direction et vitesse du courant de rive. Existence et taille des vagues, remous, ressauts, turbulences, tourbillons, vortex.		
Érosion interne	Végétation			Vérification d'indice de fuites
	Terriers	Repérage et examen des gros terriers	Repérage et examen des gros terriers	Repérage des gros terriers - Vérification d'indice de fuites
	Canalisations / traversées			Vérification d'indice de fuites
	Confortement			Vérification d'indice de fuites
	Ouvrages singuliers			Vérification d'indice de fuites
	Fuite			Fuites, suintements, rigoles, zones humides ou saturées sur le talus ou son revêtement, au pied des souches, au débouché des terriers, canalisations, drains du confortement aval, sur les bâtiments encastrés ou autres ouvrages singuliers. Résurgences au delà du pied de talus, dans les fossés, canaux, dépressions, puisards, puits, etc.
Ins:tabilité d'ensemble	Amorce de renard	Fontis, cavitations singulières Tourbillons, vortex	Fontis, cavitations singulières	Turbidité des eaux de tous les écoulements constatés
	Saturation, piézométrie		Vérification de la portance du sol Relevé des piézomètres	Vérification de la portance du sol Relevé des piézomètres, de la cote d'eau dans les puisards, puits, etc.
	Mouvements de terrain	Indices de mouvement de terrain (fissurations, bombements, loupes) en phase de décuve.	Fissures longitudinales, affaissements - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides tels que chaussées, parapets, murets	Fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés
Brèche	Accessibilité aux engins de terrassement		Vérification du caractère praticable de la voie de circulation en crête	Vérification du caractère praticable de la voie de circulation en pied de talus

■ = indices à observer plus particulièrement

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient, si possible, de procéder au relevé des mesures, tout au moins pour les instruments qui sont accessibles sans danger.

Enfin, la prise de vue photographique des désordres les plus importants est intéressante si elle peut être effectuée avec un appareil de type instantané (Polaroid ou appareil numérique) dans le but de disposer de clichés rapidement exploitables.

4.2.4 MODALITÉS DE REPORT ET DE RESTITUTION DES INFORMATIONS

Il semble difficile d'imposer une saisie en fiche directement sur le terrain, tout au moins lorsque l'intervention a lieu en situation de crise (forte crue). Dans un souci de rapidité, il convient de saisir les informations dans un carnet de notes sous la forme la plus simple, avec au minimum pour chaque observation : une référence PK, un élément de repérage transversal même sommaire (ex : bas – milieu – haut du talus côté val), une description succincte assortie d'un croquis éventuel, la référence des photos prises et la mention de l'heure (en plus de la date du jour). On recommande l'utilisation d'un magnétophone de poche qui permet d'enregistrer rapidement toutes les données listées ci-dessus.

Si l'on dispose d'un plan topographique détaillé de la digue (1/500 ou 1/1000), le repérage consiste à positionner l'observation à l'échelle sur un tirage du document cartographique avec un numéro ou un code renvoyant à une description dans le carnet de notes ou sur la bande magnétique. Il est recommandé également de signaler sur le plan les directions des prises de vue réalisées.

Dans tous les cas, une fois la situation de crise passée, les notes de terrain et/ou les enregistrements, issus de l'inspection en crue, devront être exploités par le service gestionnaire afin de compléter la connaissance de la levée : il est recommandé, à ce titre, de conduire une inspection post-crue (cf § 4.3) destinée à valider les observations en crue (vérification/amélioration du repérage) et à apprécier les dernières évolutions des désordres. Une saisie, à ce moment-là et dans des conditions plus sereines, des informations (post-crue et en crue) sous forme de fiches permettra leur exploitation ultérieure, y compris par les moyens informatiques (statistique, suivi des désordres).

4.2.5 EN RÉSUMÉ

L'inspection en crue présente un double intérêt pour la connaissance des digues :

- elle permet de recueillir des informations sur le comportement en charge des digues habituellement à sec : *d'où l'intérêt de faire une inspection visuelle en crue même si la mise en charge n'est que partielle (crue moyenne) ;*
- dans les secteurs à haut risque (aléa et vulnérabilité forts), elle permet d'évaluer, puis de suivre, la sécurité de la digue en situation de crise (crue majeure).

Toutefois, les interventions à prévoir pour conduire le diagnostic en crue doivent avoir été définies au préalable dans un plan de vigilance circonstancié où sont précisées toutes les modalités pratiques d'exécution :

- personnel mobilisable par secteur de digue ;
- répartition des tâches entre les exécutants, formation préalable ;
- liste des points à surveiller particulièrement ;
- consignes et matériels de sécurité vis-à-vis des risques encourus par les opérateurs ;
- si nécessaire, moyens hélicoptés mobilisables ;

Enfin, l'inspection n'a d'intérêt que si elle est restituée sous forme d'un compte rendu écrit (avec fiches, si possible), complété par des photos, croquis, ...

4.3 SURVEILLANCE VISUELLE POST-CRUE

4.3.1 JUSTIFICATION ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'objectif général de l'inspection post-crue est de répertorier, repérer et évaluer les désordres ou présomptions de désordre liés plus ou moins directement à l'état «de charge» que vient de connaître la levée. *Il s'agit en quelque sorte d'une inspection de routine particulière, réalisée juste après la crue*, permettant de révéler les zones de faiblesse de l'ouvrage (en complément de celles décelées lors des inspections à sec) et/ou, si on intervient après une (ou des) inspection(s) en crue, de valider, vérifier et compléter les informations recueillies lors de celle(s)-ci. Par ailleurs, elle peut servir de base à l'établissement d'un programme de travaux d'urgence destinés à réparer les dégradations les plus graves que la digue ou les déversoirs ont pu subir lors de la crue.

Le principe de la méthode consiste à parcourir un linéaire de digue ayant été récemment en charge, suite à une crue du fleuve. Il se peut donc que cette inspection succède à une (ou plusieurs) inspection(s) en cours de crue effectuée(s) sur tout ou partie du linéaire concerné : dans ce cas, elle va permettre de vérifier et compléter les informations recueillies alors. Par rapport à l'inspection à sec, l'inspection post-crue présente l'avantage de pouvoir fournir d'intéressants éléments sur les désordres ou leurs évolutions liés à des caractéristiques du sol en profondeur (ex : zones de plus grande perméabilité dans le corps de digue, indices d'érosion interne, ...) et/ou au comportement du fleuve lors de sa crue récente au droit de la levée (ex : surverse, érosion de berges, etc...).

4.3.2 CONDITIONS ET MOYENS DE MISE EN ŒUVRE

L'inspection post-crue peut être mise en œuvre, par principe, dans tous les terrains quelles que soient les difficultés d'accès mais *son efficacité, tout comme son rendement, s'avèrent étroitement dépendants de l'état d'entretien de la végétation de la digue*, au moment (imposé) de l'inspection. Comme ce moment n'est pas connu à

l'avance et comme on ne dispose que d'un délai court pour réaliser l'opération, le seul moyen de garantir de bonnes conditions de visibilité consiste à assurer un entretien soigné et permanent de la digue et de ses abords.

La préparation, l'organisation et la conduite de l'inspection visuelle post-crue de la digue relèvent, en principe, du service gestionnaire des ouvrages. Néanmoins, dans la mesure où il est primordial d'effectuer cette visite dans les meilleurs délais après la crue, le gestionnaire peut recourir, pour des questions d'efficacité, à des personnels relevant d'autres services, voire à un prestataire de services. Dans le cas où la visite proprement dite n'est pas réalisée par le personnel du gestionnaire, il convient au minimum d'associer celui-ci à la phase de préparation et de restitution des travaux.

En guise de préparation de la visite d'inspection, on réunit les documents topographiques à jour (à la date de la dernière visite de routine) – ou éventuellement dressés depuis – qui en serviront de support. On analyse, après les avoir collectées, l'ensemble des fiches et pièces de compte-rendu des précédentes visites – y compris de la (ou des) inspection(s) en crue s'il y en a eu – et ce, afin de pointer les éléments particuliers dont il faudra contrôler l'évolution lors de la visite prochaine.

L'équipe de terrain est formée de deux ou trois agents dont un au moins compétent en génie civil / mécanique des sols : l'intervention au minimum en binôme s'avère souhaitable, voire indispensable, pour le transport du petit matériel, pour la réalisation, dans de bonnes conditions, des levés rapides et, enfin, pour la sécurité des opérations.

4.3.3 LES POINTS À OBSERVER ET INFORMATIONS À RÉPERTORIER

Les désordres, dont on recherche plus particulièrement les indices, peuvent résulter des contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par la digue (charge hydraulique, surverse, courant de rive, vagues) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers ou sous le corps de digue, état de saturation, courants hydrauliques, pressions interstitielles).

Les points à observer sont répertoriés dans le tableau 5, à partir d'une double entrée des mécanismes de rupture redoutés et des trois différentes parties d'ouvrage à examiner pour le cas d'une digue en remblai.

Comme indiqué au § 3.6, les déversoirs doivent faire l'objet d'une inspection particulièrement attentive, surtout s'ils ont fonctionné pendant la pointe de crue. L'objectif premier est de repérer toutes les traces d'érosion et d'affouillement.

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient absolument de procéder au relevé des mesures (éventuellement en deux temps si une intervention préalable s'avère nécessaire : par exemple, nettoyage des piézomètres dont la tête a été submergée lors de la crue).

Tableau 5 : Surveillance visuelle post-crue des digues en remblai - présentation synoptique des points à observer

Mécanismes de rupture	Points d'observation	Surveillance visuelle post-crue		
		Talus côté rivière (fleuve)	Crête	Talus côté terre (val)
Surverse	Profil en long de la crête	(Dys)fonctionnement des passages balardés.		
	Cote du cours d'eau, laisses de crue	Relevé de la cote du cours d'eau. Repérage de la laisse de pointe de crue.	Indices et localisation de surverses s'étant produites lors de la crue : laisses, herbe couchée, ...	Indices et localisation de surverses s'étant produites lors de la crue : laisses, herbe couchée, ... Examen des laisses de crue / inondation côté val
	Déversement		Surverse constatée : dimensions de la (des) zone(s) ayant surversé, état de la crête, de la chaussée et de ses bas-côtés. Déversoir : a-t-il fonctionné ou non ? État du dispositif fusible (fondu ou non ?) État du radier et des murs latéraux (bajoyers).	Surverse constatée : dimensions de la (des) zone(s) ayant surversé, état du talus et de son pied, ampleur des affouillements. Déversoir : a-t-il fonctionné ou non ? État du coursier et du dissipateur d'énergie.
	Dispositif de revanche	A-t-il été en charge ou non ? Aspect du contact avec le corps de digue, stabilité		
Érosions de surface / affouillements	Effets sur talus des sollicitations hydrauliques fluviales	Diagnostic minutieux de l'état du talus et des berges (si proches de la digue), localisation et dimensions des anses d'érosion et/ou des loupes de glissement, aspect de la végétation (berge et talus), présence d'embâcles	Fissuration longitudinale, affaissements sur la crête, désordres sur ouvrages rigides, au droit de zones d'attaque côté rivière. Érosion de la crête : dimensions de la zone érodée.	État du talus et de son pied vis-à-vis de l'impact éventuel d'écoulements ou d'une inondation côté val
	Protection de surface (revêtement)	État du revêtement de protection : sous-cavage, fissuration, indices de mouvement, fonctionnement au ressuyage (écoulements par les barbacanes ou les joints).		État du revêtement de protection côté val s'il existe
	Protection de pied de talus	État de la protection de pied de talus : sous-cavage, fissuration, indices de mouvement, fonctionnement au ressuyage.		
	Proximité et tracé du lit mineur / caractéristique de l'écoulement	Modification du tracé du lit mineur, dépôts alluvionnaires, méandrement, nouvelles caractéristiques de l'écoulement		
Érosion interne	Végétation	Recherche de cavitations autour des souches		Vérification d'indice de fuites autour des souches
	Terriers	Repérage et examen des gros terriers	Repérage et examen des gros terriers	Repérage des gros terriers - Vérification d'indice de fuites
	Canalisations / traversée	Recherche de cavitations autour des entonnoirs		Vérification d'indice de fuites
	Confortement	État, comportement au ressuyage		Vérification d'indice de fuites au débouché des drains
	Ouvrages singuliers	Recherche de cavitations sur les surfaces de contact avec le remblai		Vérification d'indice de fuites
	Fuite			Rigoles, fuites résiduelles, suintements, zones humides ou saturées sur le talus ou son revêtement, au pied des souches, au débouché des terriers, canalisations, drains du confortement aval, sur les bâtiments encastrés ou autres ouvrages singuliers. Résurgences persistantes, au delà du pied de talus, dans les fossés, canaux, dépressions, puisards, puits, etc
	(Amorce de) renard	Fontis, cavitations singulières	Fontis	Turbidité des eaux des écoulements résiduels constatés. Si renard constaté : localisation et dimensions de l'orifice aval.
Instabilité d'ensemble	Saturation, piézométrie	Vérification de la portance du sol. Relevé des piézomètres s'ils sont en état de fonctionnement	Vérification de la portance du sol. Relevé des piézomètres	Vérification de la portance du sol. Relevé des piézomètres, de la cote d'eau dans les puisards, puits, etc.
	Mouvements de terrain	Recherche minutieuse d'indices frais de mouvement de terrain : fissures, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés	Fissures longitudinales, affaissements - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides tels que chaussées, parapets, murets..., notamment vers les deux bords de la crête	Fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés
Brèche	En cas de brèche constatée	Diagnostic minutieux de terrain : localisation, relevé des dimensions, coupes géologiques, enquête auprès des riverains, recherche des causes, dossier photographique, ...	Diagnostic minutieux de terrain : localisation, relevé des dimensions, coupes géologiques, enquête auprès des riverains, recherche des causes, dossier photographique, ...	Diagnostic minutieux de terrain : localisation, relevé des dimensions, coupes géologiques, enquête auprès des riverains, recherche des causes, dossier photographique, ...
	Accessibilité aux engins de terrassement	Possibilités d'accès côté fleuve (en vue de travaux d'urgence pour protéger le talus et/ou la berge)	Caractère praticable de la voie de circulation en crête ?	Caractère praticable de la voie de circulation en pied de talus ?

■ = indices à observer plus particulièrement

Enfin, les riverains, rencontrés au hasard de la visite, doivent être interrogés sur le fonctionnement de la digue lors de la crue. La teneur des témoignages ainsi recueillis est reportée dans les zones de commentaires des fiches de désordres.

4.3.4 MODALITÉS DE REPORT ET DE RESTITUTION DES INFORMATIONS

Les opérateurs de l'inspection post-crue utilisent des fiches standard de relevé des désordres, mises à leur disposition par le gestionnaire des digues. Il peut s'agir du même modèle de fiche que celui utilisé pour les inspections à sec (annexe 3). On peut aussi accélérer la prise d'informations en employant un magnétophone de poche. On trouvera également en annexe 4 un exemple de méthode et de restitution de l'inspection post-crue sur les digues de l'Agly à la suite des événements de novembre 1999.

Les désordres inventoriés sont repérés et numérotés, partie par partie d'ouvrage, directement sur un tirage du plan topographique au 1/500 (s'il existe), en respectant une légende normalisée. Les numéros renvoient à des lignes successives des fiches de relevé des désordres où sont portées les annotations de détail et où l'on code les principales informations. Dans le cas où l'on ne dispose pas de plan topographique précis, le travail s'effectue uniquement sur la base de profils en travers repérés en PK.

Des nouveaux profils en travers sont levés aux sections où sont apparues des fortes évolutions suite à la crue (ex : érosion ou glissement d'un talus de la digue, rapprochement du lit mineur du fleuve). Ces profils sont dessinés au verso des fiches et sont repérés suivant le PK de référence qui a été retenu.

Il est, en outre, établi un dossier photographique complet, parfaitement légendé et daté :

- photos de désordre, référencées par le numéro de désordre ;
- photos d'ensemble.

Au bureau, ces informations sont, par la suite, mises au propre (ou reportées en cas d'enregistrement sur magnétophone) et archivées.

4.3.5 RENDEMENT PRÉVISIBLE

Le rendement global est sans doute inférieur à celui d'une inspection de routine dans la mesure où la visite post-crue est susceptible de se dérouler à un moment défavorable (période de végétation) et où le nombre d'indices à noter risque d'être beaucoup plus élevé.

Sur le terrain, une équipe de trois agents entraînés devrait pouvoir parcourir 3 à 5 km par jour. Il faut cependant rajouter, à ce temps d'inspection in situ, celui

– probablement équivalent – de la mise au propre des informations au bureau. Ce travail de mise en forme peut d'ailleurs être différé (mais non abandonné !) dans le souci d'inspecter, dans les meilleurs délais après la crue, la totalité du linéaire de digue.

En tout état de cause, le rendement dépend de l'état de la digue et de la qualité du support cartographique disponible pour son suivi : le meilleur rendement étant obtenu avec une digue propre (talus débroussaillés et fauchés) et grâce à la possession d'un plan à l'échelle du 1/500 ou 1/1000.

4.3.6 EN RÉSUMÉ

L'inspection visuelle post-crue constitue une méthode de reconnaissance très efficace pour repérer les désordres visuels pouvant résulter de la charge récente supportée par la levée et, donc, relever des indices de dysfonctionnement invisibles avant toute crue. En outre, elle permet un inventaire « à chaud » des éventuelles dégradations provoquées par la crue, en vue de travaux d'urgence sur la digue.

Elle doit être réalisée dans les meilleurs délais après la crue, afin de bénéficier de toute la fraîcheur des indices (zones humides, laisses de crue, érosions, mouvements de terrain, etc.) et avant que ceux-ci ne s'estompent ou ne s'effacent. Son efficacité tout comme son rendement dépendent de l'état d'entretien de la digue.

Le compte rendu de l'inspection doit donner lieu à l'établissement de fiches, complétées par des photos et croquis.

Chapitre 5

L'ENTRETIEN DES DIGUES

5.1 PRINCIPES GÉNÉRAUX ET MOYENS

5.1.1 PRINCIPES DE L'ENTRETIEN

Comme indiqué dans l'avant-propos, le propriétaire est pleinement responsable de la sécurité de son ouvrage et doit, à ce titre, en assurer la maintenance. S'il confie un tel entretien à un gestionnaire, il est nécessaire que cette disposition fasse l'objet d'un contrat ou d'une convention qui précise la durée, l'étendue exacte et le contenu détaillé de la mission correspondante.

La régularité et la qualité de l'entretien sont les garants :

- du maintien des ouvrages à un niveau satisfaisant de sécurité ;
- de la détection précoce des amorces de désordre dont une réparation immédiate, et généralement peu coûteuse, prévient l'apparition de désordres plus importants, aux conséquences graves et dommageables.

L'entretien des digues repose sur les axes suivants :

- la pratique de l'inspection visuelle des ouvrages, de routine et postérieure aux crues (cf chapitre 4), cette dernière étant indispensable à l'inventaire des dégradations subies par la digue, notamment sur le talus côté fleuve, au cours de la crue ;
- le contrôle de la végétation sur la digue elle-même, et si nécessaire sur ses abords ;
- la lutte contre les dégâts des animaux fouisseurs ;
- l'entretien des parties d'ouvrage et parafeuilles en maçonneries, gabions, éléments métalliques, etc.

5.1.2 PISTE DE SERVICE

Lorsqu'il n'y a pas de route en crête de digue, il est expressément recommandé de disposer d'une piste de service et, si elle n'existe pas, d'en aménager une. Cette piste a plusieurs fonctions :

- elle permet une circulation aisée, ce qui améliore l'efficacité de la surveillance ;
- elle facilite l'entretien des talus qui peut alors se faire par des moyens mécaniques ;
- en cas de brèche survenant lors d'une crue, elle permet l'approvisionnement de matériaux (enrochements) pour faire un comblement de fortune de la brèche et éviter son agrandissement⁶.

⁶ Lors des crues de Camargue de 1994, la plupart des brèches accessibles par des camions ont pu être comblées pendant la crue avec des enrochements. Il est vrai qu'il s'agissait de brèches dues à des renards et non à des surverses, et que le niveau de l'eau était encore assez loin de la crête des digues.

La chaussée de cette piste doit bien sûr être dimensionnée pour supporter le trafic qu'elle aura à subir, y compris donc un trafic de camions sur un corps de digue partiellement saturé.

La localisation idéale de cette piste est sur la crête de digue. Cependant, si le couronnement de la digue est trop étroit, la piste de service peut être localisée sur une risberme, voire en pied de talus côté val. La localisation de la piste de service côté fleuve n'est pas intéressante pour la surveillance en crue ou pour acheminer des matériaux en vue de travaux d'urgence, puisqu'elle devient dangereuse, voire impraticable, dès que la crue est forte.

La piste de service doit être régulièrement entretenue de façon à garantir sa viabilité. Cet entretien consiste essentiellement à combler les ornières et à maintenir un profil présentant un dévers vers l'extérieur pour faciliter l'évacuation des eaux de pluies.

5.1.3 BORNAGE

Pour faciliter le repérage de toutes les observations lors des visites de surveillance et de tous les travaux d'entretien et de réparation, il est indispensable de disposer d'un repérage par des bornes implantées en bordure de la crête de digue : bornes kilométriques et, si possible, hectométriques. Dans la plupart des cas, ces bornes ont été implantées lors de la construction des digues ou des voiries qui les surmontent. Sinon, il convient d'en installer. Elles doivent être bien visibles pour éviter leur détérioration lors de travaux sur la digue.

L'entretien de ces bornes consiste à rafraîchir le cas échéant leur repérage et à les remplacer ou les remettre en place lorsqu'elles ont été endommagées ou bousculées.

5.2 LA VÉGÉTATION

5.2.1 LES OBJECTIFS

Le contrôle régulier de la végétation répond à un triple objectif :

- maintenir des conditions de parfaite visibilité des talus et des pieds de digue (afin de faciliter les inspections visuelles et d'en garantir la qualité) ;
- éviter le développement de racines (d'arbres ou d'arbustes) dans les corps de digue qui, d'une part, aggrave le risque de renard hydraulique (par le biais des conduits créés par les racines déperissantes) et, d'autre part, déforme ou démantèle (par action mécanique) les maçonneries de pierres éventuellement présentes en surface, telles que les revêtements perreyés ;
- dissuader les animaux fouisseurs d'élire domicile dans la digue, en troublant leur quiétude (animaux généralement farouches) par le passage régulier des engins et par la suppression des zones de couvert, donc d'abri potentiel.

5.2.2 LES PRINCIPES GÉNÉRAUX

Sur la crête, les talus de la digue ainsi que sur une bande de 5 à 10 m de part et d'autre des pieds de talus, le principe est double :

- le maintien d'un couvert herbacé le plus ras possible ;
- l'éradication de toute végétation ligneuse.

5.2.3 QUE FAIRE DES ARBRES EXISTANTS ?

Lorsqu'une digue est boisée ou présente des arbres isolés de haute tige, nous recommandons d'enlever ces arbres et arbustes. En effet, ces arbres un jour mourront et leur réseau de racines, en pourrissant, créera autant de conduits qui seront des voies potentielles d'amorces de renards hydrauliques pendant les périodes de hautes eaux. Il faut cependant être conscient que ce phénomène de pourrissement des racines va se produire aussi après l'abatage des arbres.

Ceci implique, parallèlement, de renforcer l'étanchéité de la digue ; ce qui peut se faire par l'une des solutions suivantes :

- des remblaiements ponctuels côté amont (arbres isolés) soigneusement compactés, après abatage, dessouchage et purge ;
- une recharge étanche sur l'ensemble du talus côté fleuve, réalisée immédiatement après l'abatage (à faire suivre de l'enlèvement des souches et d'un réglage du talus) ;
- une coupure étanche dans la digue (palplanches ou paroi au coulis) réalisée au maximum une dizaine d'années après cet abatage (le temps que les racines soient pourries).

L'espace boisé plus ou moins large entre berge de lit mineur et pied de digue côté fleuve (localement appelé ségonnal) peut, quant à lui, être préservé, sous réserve des éventuelles servitudes de passage. Il concourt, en effet, à limiter la vitesse du courant le long de la digue et diminue donc le risque d'érosion externe du talus. Cette végétation doit cependant faire l'objet d'un entretien régulier consistant, en particulier, à abattre les arbres qui menacent de tomber dans le cours d'eau, pouvant entraîner un arrachement de la berge et des risques d'embâcles.

5.2.4 ENTRETIEN DES TALUS ENHERBÉS

Un enherbement vigoureux et bien entretenu améliore la résistance des talus à la surverse. Le premier objet de l'entretien est, donc, d'assurer le maintien d'une couverture herbacée homogène sur les talus de la digue. Si nécessaire, des techniques appropriées d'engazonnement complémentaire doivent être mises en œuvre dans les zones mal enherbées ou dégradées.

Les enherbements installés doivent faire l'objet d'un fauchage régulier, afin de préserver leur vigueur et de maintenir des bonnes conditions d'observation de la digue. La périodicité souhaitable est d'un fauchage annuel.

On recommande d'intervenir de préférence à l'automne ou en début d'hiver pour les raisons suivantes :

- la végétation n'est plus en période de croissance : la coupe n'entraînera pas son exacerbation et, de plus, les talus resteront propres tout l'hiver ;
- la nidification des oiseaux est terminée.

Le coût s'avère variable selon les conditions de réalisation (elles-mêmes dépendantes des conditions de desserte) : 0,50 F / m² (0,08 euro / m²) pour un fauchage mécanique à l'épaveuse, 1,50 F / m² (0,22 euro / m²) avec une débroussaileuse portative.

On relève ainsi tout l'intérêt d'avoir des pistes de service à la fois en crête et en pied de digue qui mettent l'ensemble de la surface du talus à la portée des épaveuses.

En appoint au fauchage, des traitements phytocides peuvent permettre, selon les produits :

- la limitation de la croissance des herbacées afin d'espacer les fauchages : méfluidide (coût : 0,50 F / m², soit 0,08 euro / m²), avec des produits comme le Green Limit (120 g/l), l'Embark 120 (120 g/l), l'Embark SS (240 g/l), commercialisés par CFPPI ;
- le désherbage total, pour les maçonneries ou les remblais drainants : glyphosate (coût : 0,50 F / m², soit 0,08 euro / m²), avec des produits tels que le Roundup Biovert Aqua, le Roundup 360, le Hockey GS2, commercialisés par MONSANTO.

Il existe maintenant de nombreux produits qui, s'ils sont bien utilisés, ont un impact très limité, voire nul, sur le milieu aquatique. La Direction départementale de l'agriculture et de la forêt (DDAF) ou l'Association de coordination technique agricole (ACTA) peuvent s'avérer de bon conseil pour le choix des produits.

Le pâturage des talus est recommandé car les traces des sabots des ruminants et la fumure naturellement apportée sont propices à la régénération de la couverture herbacée. On choisira des ovins de préférence à des bovins, ces derniers étant susceptibles par leur poids de creuser de profondes traces avec leurs sabots. Cependant, il convient d'éviter la charge excessive, par une conduite appropriée du troupeau, et de bien choisir la période de pâturage (dégradation des talus par les sentes, piétinement en période très humide). Pour cela, nous recommandons que le pâturage des digues se fasse dans le cadre d'une relation contractuelle entre le gestionnaire des ouvrages et l'éleveur. Enfin, le pâturage ne dispensera probablement pas de tout entretien mécanique, ne serait-ce qu'à cause des végétaux délaissés par les animaux.

5.2.5 ÉLIMINATION DE LA VÉGÉTATION LIGNEUSE

Le fauchage régulier intégral prévient le développement d'arbres ou d'arbustes.

Pour se débarrasser des arbres ou arbustes existants, on procède classiquement à leur abattage suivi de la dévitalisation des souches (à faire à l'automne, en sève descendante). Coût : 2 à 10 F/m² (soit 0,3 à 1,5 euro / m²). Pour le reste, se reporter au 5.2.3 ci-dessus.

Des produits phytocides existent aujourd'hui pour tuer les arbustes sur pied en une seule pulvérisation, effectuée :

– soit avant la chute des feuilles : fosamine ammonium (coût : 0,25 F/m², soit 0,04 euro / m²) qui entre dans la composition du Krenite, du Krenite Forêt, commercialisés par AgrEvo ou par AROLE ;

– soit pendant la saison de végétation : triclopyr (coût : 0,15 F / m², soit 0,02 euro / m²) qui entre dans la composition du Timber, du Timbrel (commercialisés par AgrEvo ou par AROLE) et du Garlon Inov (commercialisé par DAO Agrosociences). Le Garlon Inov est formulé sous forme de «sel d'amine», plus coûteux mais plus sûr vis-à-vis de la faune aquatique que les formulations «esters» (Timber, Timbrel ou les anciens Garlon 2, 3 ou 4 E).

L'inconvénient de ces procédés réside dans le fait que les tiges, et donc potentiellement le couvert, persistent le temps de leur biodégradation, à moins de les recéper quelques semaines après le traitement (cette pratique évite, en outre, de voir rejeter les ligneux).

5.3 LES ANIMAUX FOUSSEURS⁷

5.3.1 LES DÉSORDRES IMPUTABLES AUX FOUSSEURS

Les risques et dégradations engendrés par l'activité des fousseurs dans les digues, ou à leur proximité immédiate, sont multiples :

- développement de l'érosion interne pouvant conduire à des phénomènes de renard (raccourcissement des lignes de fuite) ;
- fuites directes (terriers traversants) ;
- affaissements / irrégularités en crête ;
- fragilisation au plan mécanique (berges, talus côté fleuve) ;
- déstabilisation des maçonneries, perrés, chaussées.

⁷ Un certain nombre des textes réglementaires cités dans cette section sont reportés en annexe 5

5.3.2 LES PRINCIPAUX PROTAGONISTES ET LEUR STATUT

Sur toutes digues, quelle que soit la distance du lit :

- *le blaireau* : animal farouche, terriers de diamètre 40 cm, creusant un réseau de 5-10 galeries de 8-10 m chacune, avec cheminées d'aération ;
- *le lapin de garenne* : terriers de diamètre 10-20 cm, appréciant les terrains sablo-limoneux, facilement identifiable par ses déjections ;
- *le renard* : activité de fouisseur plus réduite (il occupe souvent des terriers préalablement creusés par le blaireau ou parfois cohabite avec lui).

Sur les digues et berges à proximité du lit mineur, deux gros rongeurs d'origine exogène et qui se sont acclimatés à la France :

- *le ragondin* : originaire d'Amérique Centrale, au comportement très fouisseur sous nos latitudes (par crainte du froid), terriers de diamètre 25 à 40-60 cm au débouché, de plusieurs mètres de longueur ; on peut compter jusqu'à un terrier de 0,3-1,5 m³ tous les 50-60 m de berge dans les secteurs à forte densité ;
- *le rat musqué* : originaire d'Amérique du Nord, réseau de galeries (un peu plus petites que celles du ragondin) avec débouché nécessairement sous-marin.

Il arrive que le ragondin et le rat musqué cohabitent. Récemment, des cas de cohabitation entre le ragondin et le blaireau ont été signalés en Camargue sur des digues à sec. Par ailleurs, le *castor* n'est pas cité comme animal causant des dégradations significatives sur les digues.

Les divers statuts des fouisseurs vis-à-vis de la législation sur la protection de la nature :

GIBIER CHASSABLE OU NON ?

Les espèces de gibier *chassables* (sur le territoire français métropolitain) sont fixées par l'Arrêté du 26 juin 1987.

NUISIBLE OU NON ? :

- liste nationale des espèces *susceptibles* d'être classées nuisibles (art. R227-5 du Code Rural, Arrêté du 30 septembre 1988) ; cette liste ne comprend que des gibiers chassables ;
- liste départementale des espèces nuisibles (art. R227-6 du Code Rural) : cette liste est fixée chaque année par arrêté préfectoral pris avant le 1^{er} décembre (pour entrée en vigueur le 1^{er} janvier suivant) et peut varier d'une partie du département à l'autre.

Pour les espèces nuisibles, il existe des périodes et des moyens de destruction particuliers (ex : déterrage, piégeage, tir) dont la mise en œuvre est soumise à des dispositions réglementaires strictes (art. R227-8 et suivants du Code Rural et divers arrêtés pris pour leur application).

Le tableau ci-dessous récapitule le statut actuel des cinq espèces qui nous préoccupent :

ESPÈCE DE GIBIER	CHASSABLE	SUSCEPTIBLE D'ÊTRE CLASSÉE NUISIBLE
BLAIREAU	OUI	NON
LAPIN	OUI	OUI
RENARD	OUI	OUI
RAGONDIN	OUI	OUI
RAT MUSQUÉ	OUI	OUI

Le blaireau se distingue, donc, de ses quatre «compères» par le fait qu'il ne peut être classé nuisible.

5.3.3 LES MOYENS DE LUTTE DISSUASIFS

Le fauchage ou le débroussaillage régulier, troublant la quiétude des lieux et empêchant le développement de zones de couvert, limite les risques d'installation de populations de certains fouisseurs (ex : blaireau).

La mise en place préventive, sur les talus, de dispositifs de protection mécanique a été testée ici ou là :

– couverture grillagée (grillage galvanisé à gabions, maille hexagonale 60x80, 80x100 ou 100x120, double torsion), revêtue de terre végétale : coût 20-30 F / m² (soit 3 à 4,5 euro / m²) sur les digues du Petit Rhône en Camargue ;

– couche de revêtement à base de matériau lourd ou résistant : les carapaces en enrochements jointifs semblent très efficaces à ce titre sachant toutefois que leur construction – d'un coût assez élevé – est généralement dictée par d'autres impératifs (protection contre l'érosion par le courant).

Enfin, dans les (parties de) digues en matériau non cohésif (gravier, sable grossier), les animaux ne peuvent pas creuser de galeries.

5.3.4 ÉLIMINATION - LIMITATION DES POPULATIONS

Quels que soient les moyens envisagés, les interventions doivent être négociées et préparées avec le concours des services compétents de la D.D.A.F. dont relève la zone d'intervention.

5.3.4.1 LE PIÉGEAGE

La réglementation concernant les pièges est stricte et repose, pour l'essentiel, sur l'arrêté ministériel du 23 mai 1984.

Les pièges sont classés en six catégories. A l'exception du piège-cage (catégorie 1), les pièges doivent être homologués et marqués (sauf pièges rustiques assommoirs de catégorie 5) et mis en œuvre par des piégeurs agréés⁸. Les pièges à mâchoire (catégorie 2) sont interdits depuis 1995.

Les piégeurs sont tenus, en outre, de respecter les dispositions suivantes :

- déclaration obligatoire en mairie ;
- signalisation pour les pièges tuants (catégories 2 et 5) ;
- visite quotidienne obligatoire (le matin) des pièges ;
- tenue du registre des prises.

L'utilisation de pièges-cage (catégorie 1) est à recommander pour les raisons suivantes :

- peu de contraintes réglementaires (simple déclaration en mairie) ;
- grande sélectivité (les espèces non cibles sont relâchées) ;
- bonne efficacité en lutte ponctuelle (ex : ragondin).

Certaines espèces méfiantes, comme le blaireau⁹, finissent par déjouer les pièges-cage. On peut alors se rabattre sur les collets à arrêtoirs (catégorie 3) qui, à l'instar des pièges-cage, ne tuent pas l'animal et sont donc sélectifs. Ceux-ci ne peuvent cependant être employés que par un piégeur agréé.

5.3.4.2 LA DESTRUCTION À TIR

La destruction à tir par armes à feu est régie par des dispositions nationales et des dispositions propres à chaque département.

⁸ L'agrément est accordé par le Préfet après participation du candidat à une session de formation au piégeage.

⁹ Le piégeage du blaireau vivant est possible en vertu des articles 9 et 11 de l'arrêté du 1er août 1986 qui permet aux propriétaires – sous couvert d'une autorisation individuelle délivrée par le Préfet – de capturer, avec les engins et dans les conditions déterminées par la dite autorisation, certaines espèces de gibier pour les conserver provisoirement et les relâcher ensuite dans un but de repeuplement.

Le permis de chasser est exigible (Code Rural article R. 227-16).

En plus des prescriptions du code rural, les conditions générales de destruction sont fixées par des arrêtés ministériels qui précisent notamment les armes, munitions et auxiliaires prohibés (code rural articles R. 227-6, 18 et 21; arrêté du 1^{er} août 1986).

Les périodes (R. 227-16, 17, 19 et 20), formalités (R. 227-17, 18, 20 et 22), et lieux (R.227-17) de destruction sont précisés par des arrêtés préfectoraux qui s'inscrivent dans le cadre fixé par le code rural. Ces arrêtés sont valables pour l'année civile.

5.3.4.3 LA CHASSE

La chasse à tir est pratiquée au cours de la période d'ouverture de la chasse (art. R224-3 et suivants du Code Rural) fixée par le préfet. Le chasseur doit posséder un permis et les moyens de tir sont soumis à la réglementation sur les armes (notamment, arrêté du 1^{er} août 1986 et du décret du 6 mai 1995).

La chasse à courre, à cor et à cri est ouverte du 15 septembre au 31 mars. Elle concerne le renard (article R. 224-1).

La clôture de la vénerie sous terre intervient le 15 janvier ; le préfet peut autoriser l'exercice de la vénerie du blaireau pour une période complémentaire à partir du 15 mai (article R. 224-2).

La chasse sous terre – ou déterrage – est régie par un arrêté du 18 mars 1982. Par exemple, en Maine-et-Loire, elle est pratiquée au chien pour le blaireau et au furet pour le lapin. La pratique du déterrage pour la chasse des ragondins est également possible.

5.3.4.4 LA LUTTE CHIMIQUE

Pour mémoire. L'emploi de toxiques n'est pas autorisé pour la destruction des animaux fouisseurs.

5.3.4.5 SYNTHÈSE

Les moyens *dissuasifs* sont, dans tous les cas, à préférer aux moyens *de destruction ou de capture* des animaux fouisseurs. Le recours à ces derniers – dont l'effet s'avère temporaire – est à réserver aux situations graves ou urgentes, en sollicitant l'avis et les conseils du service compétent de la D.D.A.F. concernée, des services départementaux de l'Office national de la chasse (O.N.C.), de la fédération départementale des chasseurs, des lieutenants de louveterie ou de l'association départementale des piégeurs agréés.

Avant d'entamer une campagne d'élimination des fouisseurs, il convient d'identifier la (ou les) espèce(s) en cause, d'apprécier la densité des populations et leur niveau d'implication dans les dégâts déplorés sur les digues et/ou les berges.

Si une opération de limitation d'une (ou plusieurs) espèce(s) donnée(s) s'impose et dans la mesure où aucune méthode n'est satisfaisante à elle seule, on privilégiera une stratégie de lutte :

– *sélective et non destructrice*, afin de s'assurer que la lutte portera bien sur l'espèce-cible et de préserver, autant que faire se peut, la vie des animaux. Ainsi, en cas de recours au piégeage, les procédés non tuants sont absolument recommandés ;

– *intégrée*, faisant intervenir des moyens complémentaires et dans le souci de limiter les impacts sur l'environnement (privilégier et associer les procédés les moins traumatisants) ;

– *concertée*, en favorisant une lutte collective qui limitera les risques de recolonisation à partir des zones non traitées mais aussi en instaurant un dialogue avec les associations locales de protection des animaux (pour étudier, par exemple, les possibilités de relâcher les individus capturés vivants dans des secteurs où ils ne risquent pas de provoquer des nuisances) ;

– *programmée* dans l'espace et le temps (plan de gestion).

En conclusion, le tableau ci-dessous reprend, pour chacune des cinq espèces mises en cause dans la dégradation des digues, les procédés de régulation autorisés¹⁰ et ceux que nous recommandons a priori :

	PIÉGEAGE	DESTRUCTION À TIR	CHASSE DONT DÉTERRAGE	PROCÉDÉS RECOMMANDÉS
BLAIREAU	OUI (SUR AUTORISATION INDIVIDUELLE PRÉFECTORALE)	NON	OUI	1 DISSUASION : ENTRETIEN DES TALUS (ANIMAL FAROUCHE), COUVERTURE GRILLAGÉE 2 PIÉGEAGE (COLLET À ARRÊTOIR)
LAPIN	OUI	OUI	OUI	1 DISSUASION : COUVERTURE GRILLAGÉE DES TALUS 2 TIR, DÉTERRAGE OU PIÉGEAGE
RENARD	OUI	OUI	OUI	1 DISSUASION : COUVERTURE GRILLAGÉE DES TALUS 2 PIÉGEAGE (PIÈGE-CAGE)
RAGONDIN	OUI	OUI	OUI	1 TIR OU PIÉGEAGE 2 DÉTERRAGE
RAT MUSQUÉ	OUI	OUI	OUI	1 PIÉGEAGE

¹⁰ On rappelle que, pour toutes ces espèces, l'emploi de toxiques n'est pas autorisé.

5.3.5 DISPOSITIONS CURATIVES

5.3.5.1 INJECTION DE TERRIERS

Les techniques d'injection de coulis durcissables sont potentiellement utilisables, en action curative, pour colmater les galeries, sources de fuites et de fragilisation de la digue.

A notre connaissance, cette technique a été mise en oeuvre en 1996 pour traiter une digue CNR du Rhône au Péage-de-Roussillon, fragilisée par de nombreux terriers de lapins.

La composition du coulis ciment-bentonite était la suivante, pour 1 m³ (densité de 1,56) :

- 125 kg de ciment CPJ 32,5 R ;

- 735 kg de sable 0,1-0,3 mm ;

- 44 kg de bentonite ;

- 660 l d'eau.

Avant les injections, les lapins avaient été capturés (mais pas tous, en dépit des efforts de la société de chasse locale). Le coulis a été injecté depuis un camion-pompe (où s'opérait également le mélange), à l'aide d'un tuyau d'amenée de diamètre 80 mm.

Au final, de l'ordre de 2 km de digue ont été traités (110 terriers) pour un volume total injecté de 16 m³, soit 150 litres par terrier. La consommation a été 6 fois plus importante que prévue...

Le coût de l'opération fut d'environ 40 000 F / km (6 100 euro / km). Elle n'a pas empêché les dégradations de reprendre à côté des terriers injectés (creusement de nouveaux terriers) : d'où la nécessité évidente de prolonger une telle intervention curative par une action dissuasive.

Sur les digues de Camargue, il est également procédé au colmatage des débouchés de terrier par petits terrassements mécaniques (mini-pelles, sacs de terre, remblai argileux, compactage à la dame). Il est indispensable de capturer l'animal au préalable car, s'il se retrouve prisonnier, il creusera inmanquablement d'autres débouchés ailleurs pour s'évader. L'efficacité - c'est à dire l'étanchéité sous charge hydraulique - de telles interventions de surface n'est pas connue.

A contrario, les expériences tentées ici ou là d'injection de mousses gonflantes ne se sont, à notre connaissance, pas révélées concluantes car on observe un léger retrait au cours du durcissement de la mousse, ce qui ne garantit pas l'étanchéité de ce type de réparation.

Plus simplement, on peut procéder au déblaiement par moyens mécaniques du volume de digue miné par le réseau de galeries, et à la reconstitution du profil avec le matériau extrait recomposé, si sa nature et sa teneur en eau conviennent à cet usage.

5.3.5.2 DISPOSITIFS D'ÉTANCHÉITÉ

Pour rétablir l'étanchéité interne d'une digue minée par des galeries de fousseurs, les techniques suivantes sont envisageables :

- paroi moulée ou rideau de palplanches dans l'axe de la digue ;
- recharge étanche côté fleuve.

La paroi moulée ou le rideau de palplanches offrent l'avantage de régler définitivement le problème de l'étanchéité interne de la digue et ce, même si la détérioration par les terriers se poursuit après les travaux. En effet, les animaux ne pourront plus creuser des terriers, à travers les palplanches de façon évidente, mais aussi à travers la paroi moulée après prise du coulis. Par contre, de tels procédés ne contribuent pas à renforcer le talus de digue côté fleuve : ce qui peut être gênant si le développement des terriers (qui va continuer) concerne et fragilise plus spécialement cette zone (ex : terriers de rongeurs aquatiques tel le ragondin). Ces techniques sont coûteuses :

- 600 à 900 F/m² (90 à 140 euro / m²) pour les palplanches ;
- 300 à 700 F/m² (45 à 105 euro / m²) pour une paroi moulée exécutée à la pelle mécanique ;
- 200 à 350 F/m² (30 à 55 euro / m²) pour une paroi mince vibrée.

On notera, en conclusion, que la mise en œuvre de moyens dissuasifs adaptés est souvent nécessaire en complément des méthodes curatives, afin d'éviter la réapparition des «attaques» sur les remblais reconstitués ou les secteurs non traités.

5.4 LES PROTECTIONS DE TALUS ET LES MURS

5.4.1 ENTRETIEN DES PERRÉS EN MAÇONNERIE

Trois mécanismes principaux peuvent être à l'origine de la dégradation d'un perré de protection du talus côté fleuve :

- l'altération des moellons de qualité insuffisante à l'origine ;
- l'altération des joints de mortier assurant la liaison entre les moellons ;
- le déchaussement du pied du perré.

La première cause, pour autant qu'elle ne concerne qu'un nombre limité de moellons, est facilement réparable par simple remplacement des moellons concernés. Les nouveaux moellons doivent être de pierre dure, propre, dense et insensible à l'immersion. Leur forme doit s'adapter au mieux à celle des vides à combler. Le cas échéant, il faut les bloquer à la masse avec des éclats de pierre.

Si la dégradation des moellons affecte l'ensemble du talus ou de grandes parties de celui-ci, cela résulte d'un mauvais choix dans la provenance de ces moellons et une réparation lourde doit être envisagée.

L'altération des joints de mortier est inéluctable avec le temps, surtout dans des ouvrages anciens. Le scénario habituel est le suivant : les mortiers se dégradent par des mécanismes physico-chimiques, la végétation s'installe alors d'autant plus facilement dans les interstices, y trouve des conditions favorables et, si l'on n'intervient pas, les moellons sont déchaussés par les racines (les arbres poussant à travers les perrés ne sont malheureusement pas rares).

Outre l'entretien de la végétation déjà évoqué plus haut, il est donc nécessaire de prévoir une réfection périodique des joints de perrés (tous les 30 à 50 ans si le perré a été correctement réalisé et entretenu).

L'intervention consiste à enlever tous les joints anciens jusqu'à une profondeur de 5 à 6 cm, puis à nettoyer le fond de joint à l'air ou à l'eau sous pression, et enfin à refaire le joint, lissé en creux par rapport aux moellons.

Le perré n'ayant pas, en général, une fonction d'étanchéité, il faut, pour préserver sa stabilité à la décrue, réaliser des joints non continus, laissant des interstices pour la dissipation d'éventuelles sous-pressions.

Le déchaussement du pied de perrés est fréquemment constaté, car de nombreuses rivières présentent une tendance à l'abaissement de leur fond.

Ainsi, le pied de perré, initialement enterré ou protégé par des pieux constamment immergés, se retrouve exposé dans une zone de marnage et ne tarde guère à présenter des déchaussements locaux.

La technique de réparation consiste à refaire un ouvrage para fouille (souvent en palplanches) et à reconstituer, en maçonnerie, la butée de pied du perré sur l'ouvrage para fouille.

5.4.2 LES PROTECTIONS DE TALUS EN ENROCHEMENTS

Les talus au fleuve sont parfois protégés de l'érosion par une couche d'enrochements. La couche de transition entre le remblai de digue et l'enrochement est en général un géotextile, plus rarement une couche de transition granulaire. Mais souvent, la couche de transition est absente.

Les dégradations, causes et réparations envisageables sont les suivantes (liste non limitative) :

Dégradation	Causes probables	Réparation envisageable
Déchirure du géotextile	- Résistance insuffisante du géotextile - Aspérités de la couche sous-jacente - Blessures du géotextile lors de la pose des enrochements - Trous d'animaux	- Dégager l'enrochement et le géotextile sur la partie dégradée, enlever les aspérités de la couche sous-jacente, mettre un nouveau géotextile plus résistant (géotextile anti-poinçonnant), avec recouvrement de 0,5 m minimum sur le géotextile laissé en place, et reposer les enrochements. - Idem ci-dessus et ajouter un grillage
Dégradation physico-chimique du géotextile	- Géotextile exposé directement au rayonnement solaire	- Idem ci-dessus. Veiller à bien assurer la " fermeture " de la couche d'enrochements pour éviter le rayonnement solaire direct sur le géotextile
Dégradation des enrochements	- Pierres friables, nature géologique inadaptée - Sabot de pied sous-dimensionné	- Réparation ponctuelle ou réfection complète de la couche d'enrochement selon l'ampleur du problème - Engraisser le sabot de pied. Compléter la couche d'enrochements en tête du talus à protéger
Enrochements glissés	- Pente trop forte	- Engraisser la couche d'enrochements (en élargissant également le sabot) de façon à adoucir la pente. - Augmenter la stabilité des enrochements en les liant avec de la maçonnerie (enrochements maçonnés)
Enrochements emportés	- Taille insuffisante des enrochements, épaisseur insuffisante de la couche	- Diagnostic approfondi et redimensionnement de la protection.

5.4.3 ENTRETIEN DES MURS EN MAÇONNERIE

Il est assez courant de voir la végétation s'installer sur les parements des ouvrages en maçonnerie. Les anfractuosités des joints constituent des endroits propices au dépôt des graines qui y trouvent des conditions hygrométriques favorables à leur développement.

L'action des racines est un facteur prépondérant de dégradation des joints et des enduits, voire dans les cas extrêmes, de désorganisation des pierres des parements.

Il faut donc, là aussi, mener une lutte sans merci contre tout développement de végétation sur les maçonneries, en arrachant les plantes dès qu'elles apparaissent. De même que pour les perrés, la dégradation des joints avec le temps impose de les refaire périodiquement (voir paragraphe précédent). Un arrachage annuel est recommandé.

Les autres désordres susceptibles de dégrader les maçonneries de masse ont des causes mécaniques (tassements différentiels, instabilités d'ensemble) et se manifestent par des fissures intéressant l'ensemble de la structure. Même si certains travaux de réparation peuvent être faits par le gestionnaire, ces désordres nécessitent, en premier lieu, une évaluation de leur importance, un diagnostic de leurs causes et un choix judicieux des techniques de réparation¹¹, toutes choses qui relèvent d'un service technique compétent.

5.5 LES OUVRAGES PARAFOUILLES

Remarque préliminaire : dans presque tous les cas, les désordres constatés sur les ouvrages parafoUILLES sont des désordres graves qui ne relèvent pas à proprement parler de l'entretien mais plutôt des réparations et qui nécessitent un diagnostic préalable par un spécialiste.

5.5.1 PIEUX EN BOIS

Le plus souvent, les ouvrages parafoUILLES, lorsqu'ils existent, sont constitués de pieux en bois. Tant que ces pieux restent constamment immergés, ils ont une excellente durabilité. Mais suite au phénomène, assez courant sur les rivières françaises, d'approfondissement du lit mineur, ces pieux peuvent se retrouver au-dessus du niveau d'étiage. Leur vieillissement est alors fortement accéléré. Le bois pourrit, se casse ou se délite.

L'intervention, qui ne ressort plus du simple entretien, consiste à refaire le parafoUILLE, le plus souvent en palplanches métalliques. Une réfection par des pieux en bois est également envisageable, à condition d'abaisser la tête des pieux (pour qu'ils soient toujours immergés), de choisir de bonnes espèces (châtaignier, chêne, azobé, ...).

Dans tous les cas, cette intervention doit être précédée d'une phase d'études avec diagnostic des dégradations et de leurs causes, choix des techniques de réparation et projet détaillé.

¹¹ Pour l'exécution des travaux, on peut faire référence à la norme NFP 95-107, intitulée : " Réparation et renforcement des maçonneries ; spécifications relatives aux techniques et matériaux utilisés ".

5.5.2 LES PALPLANCHES

Les parafeuilles en palplanches sont des ouvrages récents. Le principal phénomène de vieillissement est la rouille. En cas de constat d'une corrosion marquée, il convient de faire des mesures d'épaisseur résiduelle (mesure par ultrasons, non destructive, à préférer à la mesure par percement). Si une réparation s'impose, cela relève de travaux lourds qui doivent être précédés d'une étude approfondie.

Si le rideau de palplanches présente des déformations importantes, il s'agit de désordres graves qui nécessitent également une étude approfondie par un spécialiste en géotechnique.

5.5.3 LES GABIONS

On peut rencontrer, plus rarement, des parafeuilles en gabions.

Deux phénomènes peuvent être en cause dans la rupture des fils de ces gabions :

– une rupture localisée a souvent pour origine un choc ou un pliage du fil ayant fait s'écailler la galvanisation. Si elle est faite sans retard, la réparation d'une telle rupture est simple. Elle se fait par l'adjonction d'un fil galvanisé selon le procédé décrit à la figure 14 ;

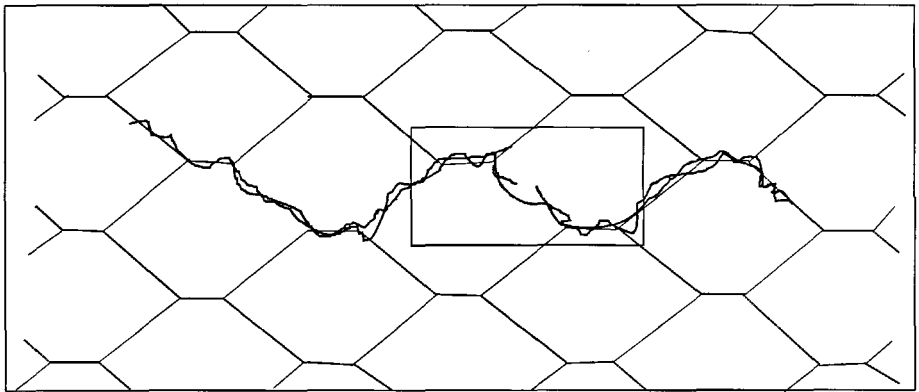


Figure 14 : Principe de réparation d'un fil coupé sur une cage de gabion.

– une corrosion généralisée peut se manifester par exemple au niveau des zones de marnage, entraînant alors des lignes entières de ruptures pouvant causer la vidange de la cage. La réparation doit être faite dès que l'on constate une corrosion généralisée et, en tout cas, avant qu'il n'y ait de multiples ruptures. Il faut doubler la nappe corrodée par une nouvelle nappe de grillage galvanisé qui lui est fixée sur tout le pourtour et prévoir, le cas échéant, un revêtement au mortier des zones particulièrement exposées à la corrosion.

5.5.4 LES ENROCHEMENTS

Enfin, le para fouille peut être constitué d'une butée de pied en enrochements (sabot ou bêche). Si cette butée de pied est le siège de désordres (enrochements emportés, enfoncement généralisé), il s'agit de phénomènes nécessitant un diagnostic préalable (importance des phénomènes, causes, remèdes) avant toute intervention de réparation.

Chapitre 6

ÉLÉMENTS DE DIAGNOSTIC DES DIGUES

PRÉAMBULE : DU DIAGNOSTIC RAPIDE AU DIAGNOSTIC APPROFONDI

L'objectif de tout diagnostic d'un ouvrage de génie civil est d'en apprécier le niveau de sécurité, de relever ses points de faiblesse, défauts et dysfonctionnements et de définir les travaux de nature à remédier aux insuffisances constatées.

La particularité des digues est de constituer des ouvrages à long linéaire, mal connus (pour lesquels on ne dispose pas, en général, de plans de construction) et parfois mal entretenus, soumis à des contraintes hydrauliques et mécaniques peu fréquentes mais intenses : autant de facteurs qui en rendent le diagnostic *a priori* difficile, donc coûteux.

Aussi, convient-il, à notre sens, de distinguer deux niveaux (ou étapes) dans le diagnostic d'un système de digues :

- le niveau du *diagnostic rapide* qui pourra se baser sur la réalisation chronologique d'un débroussaillage soigné de la digue (cf § 5.2), d'un levé topographique de l'ouvrage et de ses abords (au minimum profils en long et profils en travers régulièrement espacés, si possible plan détaillé au 1/500 : cf § 6.3) et de l'inspection visuelle initiale (cf chapitre 3) ;

- le niveau du diagnostic approfondi qui reprend toutes les phases d'investigation exposées dans la suite du présent chapitre 6.

L'intérêt d'une telle distinction est d'encourager, pour le plus grand nombre de digues du parc français, la mise en œuvre immédiate et minimale de la première étape - dite du *diagnostic rapide* - afin de dégager, au moindre coût, une appréciation de l'état de l'ouvrage et de réunir les conditions pour sa surveillance et son entretien réguliers ultérieurs. Pour les digues ayant fait l'objet d'un diagnostic rapide, le *diagnostic approfondi* pourra intervenir en deuxième étape, en se limitant éventuellement aux secteurs critiques décelés lors du premier diagnostic.

6.1 IDENTIFICATION DES ALÉAS DE RUPTURE ET ADAPTATION DU DIAGNOSTIC

Les divers mécanismes à l'origine de la formation des brèches identifiés précédemment au chapitre 2 vont nous guider pour établir le contenu du diagnostic d'un tronçon de digue. L'idée majeure est d'adapter le contenu des études de diagnostic à la hiérarchisation des aléas auxquels le tronçon de digue semble, de prime abord, le plus exposé. Par exemple, pour une digue en bordure immédiate du lit mineur, le diagnostic mettra un accent particulier sur les risques d'affouillement. *A contrario*, l'étude de l'aléa géotechnique ne sera, en général, pas le point majeur du diagnostic d'une digue large supportant une chaussée routière.

a) Le mécanisme le plus courant de rupture est la *surverse*.

Le risque dépend essentiellement de l'importance de la crue et il convient de disposer d'études hydrologiques et hydrauliques actualisées, donnant les lignes d'eau pour différentes périodes de retour de crues. Le complément indispensable pour évaluer le risque de surverse est un levé topographique précis du profil en long des digues. On pourra ainsi définir l'événement de référence, qui est l'événement extrême pour lequel les digues sont sensées protéger le val de l'inondation.

b) Le second mécanisme concerne les *érosions et affouillements* sur le rampant ou en pied de talus côté fleuve des digues en bordure du lit mineur.

Sur beaucoup de rivières, ce risque s'est probablement accru depuis le siècle dernier du fait de l'approfondissement du lit mineur (conséquence des extractions de matériaux) et du vieillissement des protections de talus (perrés et leur fondation sur pieux). Une observation visuelle attentive, y compris le cas échéant subaquatique et une analyse morphologique et hydraulique constitueront les éléments de l'étude diagnostic vis-à-vis de ce risque.

c) *L'érosion interne* (ou *renard hydraulique*) est un risque accru en fonction de la durée de la crue et du vieillissement des digues (terriers d'animaux, racines d'arbres morts, ouvrages transversaux, tassements différentiels).

C'est d'abord l'observation visuelle très détaillée, le repérage de toutes les conduites et galeries traversant la digue ainsi que le recueil de témoignages de riverains (localisation des fuites lors des crues) qui seront les principaux éléments du diagnostic. L'observation en crue en sera le précieux complément, le jour où l'occasion s'en présentera. Les reconnaissances géotechniques visant à identifier les hétérogénéités de matériaux et de perméabilité dans la digue et en proche fondation permettront d'évaluer le risque de renard interne en s'appuyant le cas échéant sur une modélisation hydraulique de la levée.

d) Le risque d'*instabilité d'ensemble*, bien qu'étant, semble-t-il, un facteur marginal des brèches observées, ne doit pas être négligé, en particulier pour les levées présentant une faible largeur en crête et de fortes pentes, ainsi que dans l'emprise des anciennes brèches, et pour les digues en maçonnerie.

L'hétérogénéité avérée de nombreuses levées rend difficile un diagnostic précis de la stabilité. Il semble plus raisonnable de se livrer à des études paramétriques, basées sur des reconnaissances qualitatives des matériaux et sur les données issues d'éventuelles reconnaissances récentes menées dans des secteurs semblables, afin d'obtenir des fourchettes de coefficients de sécurité et surtout d'étudier l'amélioration de la stabilité apportée par telle ou telle solution de confortement. L'étude détaillée des archives doit permettre de localiser la plupart des anciennes brèches. C'est sur ces zones que l'on concentrera les investigations géotechniques spécifiques. Pour les ouvrages récents (murs en béton armé, par exemple), la

première démarche consistera à retrouver les dossiers des ouvrages exécutés et les éléments de dimensionnement définitif (notes de calcul, plans) ou, à défaut, les avant-projets.

e) Enfin, toutes les singularités et ouvrages annexes (banquettes, déversoirs, passages batardables, conduites, ...) représentent autant de particularités qui peuvent constituer des points de fragilité. L'inspection visuelle sera l'élément principal, et le plus souvent unique, pour les identifier et apprécier leur état. Des reconnaissances spécifiques pourront, le cas échéant, compléter cette inspection.

6.2 ÉTUDE HISTORIQUE

L'approche historique fait partie intégrante de la méthodologie de diagnostic des digues et elle en constitue même la première étape. On cherche à acquérir des informations sur :

- l'histoire de la construction, des confortements et de la gestion des digues ;
- la constitution des remblais et des ouvrages singuliers ;
- la localisation des anciennes brèches, qui, loin d'être aléatoire, est largement déterminée par la géométrie du lit endigué et l'exposition de la levée aux assauts de la rivière en crue ;
- les crues historiques du cours d'eau ;
- l'évolution de l'occupation de l'espace dans le lit endigué, mais aussi dans le val protégé (enjeux protégés).

On mesure ainsi tout l'apport que représente l'analyse historique dans le diagnostic. Il convient dans ces conditions :

- de rechercher et de prendre connaissance des documents disponibles : archives départementales et communales, dossiers et plans du gestionnaire, photos aériennes, études antérieures, dossiers des travaux de confortement ;
- de localiser les brèches historiques : ce point nous paraît être de toute première importance ;
- de recenser et de localiser les repères de crues historiques ;
- d'effectuer un recensement et une synthèse sur les extractions de matériaux dans la zone.

6.3 TOPOGRAPHIE

6.3.1 OBJECTIF

L'objectif des reconnaissances topographiques à exécuter est triple :

- établir le lien avec les lignes d'eau en crue ;
- préciser les profils en travers pour les études géotechniques ;
- fournir un instrument de report et de suivi des digues.

Les paragraphes suivants précisent ces objectifs et les moyens à mettre en œuvre pour les atteindre.

6.3.2 PROFIL EN LONG DES DIGUES PAR RAPPORT AUX PLUS HAUTES EAUX EN CRUE

La surverse est une cause majeure, nous l'avons vu, à l'origine de la formation des brèches, tout au moins pour les digues en remblai. Le rapprochement entre les lignes d'eau en crue et le profil de la crête de digue permet d'évaluer un tel risque.

Il est recommandé d'établir un profil en long au pas de 20 à 25 m de la crête de digue sur la plate-forme de couronnement, et, le cas échéant, un second profil sur le sommet de la rehausse, afin de déterminer la revanche disponible par rapport à la crue vis à vis de laquelle on souhaite se protéger et de mettre en évidence les tronçons où cette revanche serait insuffisante.

Le rapprochement entre les hauteurs d'eau de référence et la géométrie de la digue nécessite que les profils puissent être rattachés avec précision aux mêmes référentiels de cote (NGF) et PK.

6.3.3 PROFILS EN TRAVERS

En crue, la digue a pour fonction de maintenir la différence de niveau hydraulique entre le lit endigué et le val. L'ordre de grandeur de la charge hydraulique sur la digue peut parfois atteindre 5 ou 6 m pour les crues exceptionnelles contenues par les grandes levées des fleuves (Rhône, Loire, Garonne), 2 à 4 m plus couramment sur les endiguements des rivières.

Les mécanismes de rupture à redouter sont alors le renard (érosion interne régressive de la digue ou de sa fondation) et l'instabilité du talus côté val pendant la crue et côté fleuve pendant la décrue. Dans les deux cas, l'analyse de ce risque nécessite une bonne connaissance des profils en travers de la digue.

Ces profils en travers fournissent également la donnée de base pour l'étude du confortement si celui-ci est nécessaire.

Il est recommandé de lever des profils en travers espacés de 100 à 200 m en zone homogène et de 50 à 100 m dans les zones complexes, incluant une bande côté fleuve et côté terre de largeur suffisante (une dizaine de mètres de part et d'autre) ; chaque profil comportera au minimum 8 à 12 points suivant la taille et la complexité de l'ouvrage. Selon la configuration (présence d'ouvrages singuliers en particulier), des points supplémentaires peuvent s'avérer nécessaires.

6.3.4 PLAN TOPOGRAPHIQUE

L'établissement d'un plan topographique au 1/500 ou 1/1000 s'avère particulièrement utile lorsque la digue comporte de nombreux points singuliers. Un tel plan est également un outil précieux pour le suivi et la maintenance des levées.

Le plan constitue alors le support des observations visuelles, qui est à la base du suivi des ouvrages. Le coût d'un tel levé, tel qu'il ressort d'expériences récentes, s'établit dans une fourchette de 10 000 à 20 000 F (1 500 à 3 000 euro) par kilomètre dès lors que la commande porte sur des tronçons de plusieurs kilomètres.

Il est intéressant de faire rattacher le plan à un système de références (ex : Lambert) permettant son intégration à un futur système d'informations géographiques (S.I.G.) et de le restituer à un format de fichier (RIVICAD, par exemple) exploitable par un éventuel modèle hydraulique.

6.4 INSPECTION VISUELLE

Cet aspect, primordial de tout diagnostic et suivi des digues, fait l'objet d'un chapitre spécifique : chapitre 3

6.5 ÉTUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

L'étude hydrologique consiste à définir les caractéristiques des crues de différentes périodes de retour (débits, durées, fréquences). Elle est basée sur la connaissance des chroniques de débit sur la rivière, relevées aux stations hydrométriques et enrichies des informations sur les crues historiques. Des changements significatifs dans l'occupation de l'espace sur le bassin versant (forte urbanisation, reboisement important, ...) ou des aménagements lourds en amont (barrages écrêteurs de crues) sont susceptibles de modifier le régime des crues (en particulier les crues moyennes) et peuvent nécessiter une actualisation d'études hydrologiques antérieures.

L'étude hydraulique a pour objet de traduire en lignes d'eau les résultats de l'étude hydrologique. On cherche ainsi à définir les lignes d'eau pour les crues décennale, trentennale, centennale (voire plus). Une telle étude nécessite la connaissance de la topographie du lit de la rivière (coût élevé) et la mise en œuvre d'un modèle hydraulique. Dans la plupart des cas, un modèle monodimensionnel en régime permanent fournit des résultats suffisants.

Les lignes d'eau de crues historiques peuvent constituer une information suffisante, qui permet de se dispenser des études hydrologiques et hydrauliques mentionnées ci-dessus, sous réserve que :

- ces crues historiques n'aient pas donné lieu à des ruptures de digues ;
- que les modifications du lit (profil en long, nouveaux endiguements, évolutions dans l'occupation du lit majeur) ne conduisent pas à des modifications sensibles des lignes d'eau à débits équivalents ;
- que l'hydrologie du bassin versant n'ait pas connu d'évolutions sensibles.

La comparaison des lignes d'eau pour différentes périodes de retour de crues avec le profil en long des digues permettra de définir **l'événement de référence**, qui est l'événement extrême pour lequel les digues sont sensées protéger le val de l'inondation.

Cette étude doit être complétée par une analyse des scénarios de crue exceptionnelle et de décrue associée (débordements, temps de remplissage puis de vidange du casier, fonctionnement des déversoirs et des ouvrages de vidanges, clapets, vannes, etc.).

6.6 ÉROSION EXTERNE ET AFFOUILLEMENTS ; APPROCHE GÉOMORPHOLOGIQUE

La recherche sur les causes de ruptures de digues lors des grandes crues historiques montre que les brèches ont tendance à se produire à l'endroit ou à proximité d'anciennes brèches. Cette inégale répartition s'explique par le fait que, dans certains tronçons, la digue tente de s'opposer à une évolution morphodynamique puissante du cours d'eau d'où il résulte une faiblesse chronique.

L'objectif de l'approche morphodynamique est d'identifier les zones à risque historique et les évolutions actuelles défavorables.

En ce qui concerne les cas les plus courants liés au rétrécissement local du lit, le processus en jeu est davantage hydraulique (surverse au niveau du verrou) que morphodynamique. L'approche morphodynamique permettra cependant d'appréhender d'autres causes de rupture :

- les ruptures se localisant au niveau des modifications de pente du chenal ;
- des ruptures plus fréquentes lorsque la digue est immédiatement au contact du chenal principal ;
- des points faibles aux extrados de méandres ;
- des brèches situées dans des portions de cours d'eau à chenaux multiples avec présence d'îles végétalisées.

De manière générale, le diagnostic devra permettre d'identifier les évolutions passées et à venir du chenal : glissement des méandres, progression latérale des îlots, enfoncement du lit, points durs et ruptures de pente.

L'échelle spatiale pertinente d'analyse est ici le secteur fluvial de plusieurs kilomètres encadrant la digue étudiée, incluant le lit endigué et les vals de part et d'autre des digues. La connaissance des anciens bras ou chenaux d'expansion des crues renseigne sur les secteurs les plus sollicités.

L'analyse théorique de la morphodynamique de la rivière repose sur les connaissances de l'hydrologie, de la sédimentologie et des caractéristiques morphométriques du fleuve. Un découpage est réalisé à partir de la connaissance des pentes

longitudinales, du tracé, des actions anthropiques (en particulier, les extractions entre digues ou derrière les digues). L'étude comparative des profils en long et en travers du cours d'eau est réalisée à différentes échelles de temps sur les documents existants. Les modifications du tracé sont évaluées en terme de coefficient de sinuosité des méandres et de rayon de courbure et en terme de densité de réseau hydrographique. On note l'évolution dans le temps de l'importance et de la végétalisation des îles.

Les sources qui permettent de réaliser ce travail sont les suivantes :

- cartes anciennes et lignes d'eau d'étiages et de crues historiques ;
- cartes IGN au 1/25000 ou au 1/50000 à différentes dates ;
- bathymétrie à diverses dates ;
- photos aériennes à différentes époques.

L'analyse de terrain permet d'affiner et nuancer les résultats de l'analyse théorique. La reconnaissance du réseau sera effectuée par tronçon préalablement défini. Cette visite permet d'appréhender la composante sédimentologique et renseigne sur les processus d'évolution. On définit les types d'érosions (par pans, par effritement, par encoches) et de dépôts (convexités, élargissements - pertes de charges, raisons exogènes, embâcles). On repère les profils apparemment stables ou instables et on analyse les évolutions possibles : avancée de train de méandres (érosion vive à l'extrados, banc de convexité en cours de végétalisation), enfoncement du lit (ripisylve perchée, traces évidentes aux ouvrages, ruptures de pente). L'évolution longitudinale de la granulométrie est en rapport avec les pentes et tracés : aussi, est-il intéressant de prévoir quelques prélèvements de matériaux pour analyse afin de préciser la dynamique en mettant particulièrement en évidence le phénomène de tri granulométrique. Enfin, un suivi bathymétrique régulier peut être mis en place pour les zones se révélant exposées à l'affouillement.

6.7 LE DIAGNOSTIC GÉOTECHNIQUE

6.7.1 QUELQUES NOTIONS DE NIVEAU DE SÉCURITÉ EN FONCTION DE LA CONSTITUTION DE LA DIGUE

Les digues sont en général des ouvrages de hauteur limitée et leur stabilité est donc *a priori* moins critique que celle d'ouvrages de taille plus importante comme les barrages. Cependant, contrairement à ces derniers, les digues ne sont pas sollicitées en temps normal et on ne peut donc pas se fier à l'observation de leur comportement courant pour en déduire leur niveau de sécurité en situation extrême. Ceci nous amène tout naturellement à recommander de prendre des marges de sécurité plus importantes avec ce type d'ouvrage.

On peut *a priori* donner quelques indications permettant, en préalable à une étude plus approfondie, de porter une première appréciation sur le niveau de sécurité d'une digue sur le plan géotechnique.

La pente des talus de la digue constitue un premier élément à prendre en compte.

Ainsi, des pentes de talus côté fleuve supérieures à 1(vertical) / 3(horizontal) présentent des risques d'instabilité à la décrue du fait de la saturation du remblai amont. Idem côté val pour la stabilité en crue lorsque la saturation se développe dans cette zone.

La largeur en crête, conjuguée avec la pente des talus, va nous renseigner sur la largeur en pied qui conditionne le gradient hydraulique moyen dans le remblai. Ainsi sur les levées de Loire, les études menées dans les années 60 avaient amené à proposer des solutions de renforcement des digues basées sur le critère suivant :

$$L > 8 H$$

L : largeur à la base
H : hauteur de la digue.

Ce critère nous paraît encore largement valable pour porter une première appréciation sur la sécurité géotechnique d'une digue en remblai.

La nature des matériaux constitutifs est également à prendre en compte. Ainsi, une digue en matériau sableux présente plus de risques qu'une digue compactée en matériau limoneux, du fait de la perméabilité et de la rapidité avec laquelle une piézométrie élevée est susceptible de s'établir dans le corps de l'ouvrage.

Enfin, la présence d'un dispositif de drainage (tapis en pied aval) ou un simple zonage des matériaux (matériaux plus grossiers côté val) est un facteur important de sécurité.

6.7.2 LES CONDITIONS POUR LA DÉFINITION D'UN PROGRAMME DE RECONNAISSANCE

Un programme pertinent de reconnaissances géotechniques et géophysiques ne peut être défini – et a fortiori réalisé – qu'après avoir franchi un certain nombre d'étapes dans l'étude de diagnostic, soit au minimum :

- l'approche historique (cf § 6.2) ;
- le levé topographique à échelle détaillée, 1/500 ou 1/1000 ou au moins le levé de profils en long et en travers avec une précision suffisante (cf § 6.3) ;
- si possible, l'inspection visuelle (cf § 6.4).

L'approche historique, englobant l'analyse des études existantes, fournit des informations préalables sur l'environnement géologique ainsi que sur la constitution de la levée et les accidents – sources de discontinuité – qu'elle a connus (brèches et/ou confortements). Le levé topographique est utile au repérage des sondages et des lignes de prospection à réaliser et, associé à l'inspection visuelle, contribue à une première identification des points ou tronçons singuliers.

L'exploitation rationnelle des résultats de ces trois étapes va alors permettre :

- de choisir les moyens de reconnaissance géotechnique *a priori* les plus adaptés au contexte ;
- de guider l'implantation physique des dites reconnaissances.

On rappelle, à ce titre, que la part d'une campagne géotechnique devient vite lourde dans un budget d'étude, sachant que le prix unitaire de certains sondages ou essais est élevé (ex : forages carottés) ou que des dispositifs de prospection géophysique, de prime abord moins onéreux, peuvent produire des résultats sans intérêt ou inexploitable si l'appareil utilisé ne se révèle pas adapté à l'objectif recherché. Ceci justifie toute l'attention qu'il convient de porter à la préparation du programme de reconnaissance.

Enfin, les solutions envisagées pour le *confortement* peuvent aussi orienter les choix sur la consistance des reconnaissances géotechniques. On peut citer, à ce titre, quelques exemples :

- un confortement par recharge aval drainante nécessite une connaissance de la granulométrie des matériaux du talus et de la fondation de la recharge afin de vérifier les règles de filtre (cf. annexe 2) assurant le non entraînement des fines du corps de digue vers le drain ;
- un confortement par recharge amont étanche nécessite de même une connaissance de la granulométrie des matériaux du talus afin de vérifier les règles de filtre, mais demande aussi une connaissance des caractéristiques mécaniques de la recharge afin de vérifier la stabilité à la décru ;
- un confortement par paroi moulée exige une bonne connaissance des matériaux de fondation (perméabilité en particulier) afin de caler correctement le niveau d'ancrage de la paroi.

6.7.3 ÉLÉMENTS POUR L'ÉTABLISSEMENT D'UN PROGRAMME DE RECONNAISSANCE

Il n'est pas dans l'objet du présent guide de fournir des recommandations précises pour le diagnostic géotechnique des digues, qui relève de la compétence de bureaux d'études spécialisés, et qui doit être parfaitement adapté à chaque cas particulier (nature et configuration des ouvrages). Pour plus d'informations, on pourra utilement se reporter à :

Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne (Cemagref Éditions, mars 2000).

Cependant, et à titre indicatif, on peut mentionner ici quelques éléments pour définir un programme de reconnaissances géotechniques d'un tronçon de *digue en remblai* :

A) RECONNAISSANCES GÉOPHYSIQUES EN CONTINU

A priori, deux objectifs peuvent être assignés à la reconnaissance en continu :

- sous réserve d'un étalonnage préalable du (ou des) dispositif(s) utilisé(s) et d'une analyse croisée avec les résultats des sondages systématiques (cf. B), fournir une vision spatiale de la constitution de la digue et apprécier son degré d'hétérogénéité ;

- mettre en évidence des points ou des tronçons singuliers, susceptibles d'échapper à la campagne de sondages ponctuels systématiques.

Parmi la panoplie d'outils géophysiques disponibles, le choix n'est pas forcément évident. Pour guider le choix de la méthode géophysique, nous recommandons d'appliquer les deux principes suivants :

- mettre en oeuvre en parallèle, dans le sens longitudinal de la digue, deux méthodes au principe complémentaire et/ou ne mesurant pas le même paramètre ;

- privilégier les méthodes qui, en un seul passage (profil en long), ont une profondeur d'investigation *a priori* suffisante pour recouper la fondation de la digue.

Le coût de la prospection géophysique en continu ne devrait pas dépasser 15 000 F (2 300 euro) du kilomètre, compte tenu du volume et de la qualité des informations attendues en retour.

B) RECONNAISSANCES PONCTUELLES À CARACTÈRE SYSTÉMATIQUE

Ces reconnaissances à caractère systématique – en ce sens qu'elles sont répétées le long de la levée à diagnostiquer – ont pour objet de caractériser certes ponctuellement, mais de façon précise, la constitution et une (ou plusieurs) propriété(s) importante(s) de la digue. En outre, les informations recueillies contribueront à l'indispensable calage des méthodes géophysiques mises en oeuvre précédemment en continu.

Les reconnaissances ponctuelles comprennent, essentiellement, des sondages (pénétromètre, forage carotté ou destructif avec piézomètre, Perméafor) et des essais géotechniques (essais de perméabilité Lefranc, phicomètre, identification des sols).

Le prix de revient global des reconnaissances systématiques ne devrait pas dépasser 25 à 30 000 F (3 800 à 4 600 euros) du kilomètre, pour des espacements de sondage de l'ordre de 200 mètres.

C) RECONNAISSANCES APPROFONDIES SUR POINTS OU TRONÇONS SINGULIERS

Elles sont à réaliser aux points ou tronçons de digue où les investigations en continu ou à caractère systématique, ou encore l'inspection visuelle, ont mis en évidence des anomalies ou des singularités, susceptibles de révéler l'existence d'une zone de faiblesse dans la digue. Par essence, il est impossible d'établir un programme-type pour ces reconnaissances qui devront s'adapter, au cas par cas, à la situation rencontrée.

La rémunération de telles prestations particulières ne peut se faire que sur bordereau des prix unitaires, avec quantités indicatives portées dans un détail estimatif ; ceci nécessite de prévoir au marché un bordereau de prix couvrant une large gamme de prestations.

6.7.4 COÛT RÉCAPITULATIF

Si on exclut les reconnaissances particulières sur tronçons singuliers, le coût récapitulatif de la méthode de prospection géophysique et géotechnique préconisée ci-dessus s'établit aux environs de 40.000 à 50.000 F (6 100 à 7 600 euros) du kilomètre.

Dans le budget global, ce poste demeure donc d'un poids important : ce qui confirme l'intérêt qu'il y a à préparer de façon minutieuse et réfléchie le programme d'intervention.

6.8 MODÉLISATION

La modélisation numérique est désormais une approche très courante en géotechnique. L'accroissement de la puissance de calcul des micro-ordinateurs et le développement de logiciels spécialisés de plus en plus conviviaux permettent de tester rapidement une gamme de cas de charge sur un ouvrage, sous un large faisceau d'hypothèses.

L'intérêt évident de ces outils ne doit cependant pas faire oublier deux limitations importantes :

- tout modèle est une simplification intellectuelle de la réalité qui repose sur la représentation plus ou moins complète de quelques phénomènes physiques et de leurs interactions (parmi lesquelles les conditions aux limites) ;
- la qualité du résultat d'une modélisation est d'autre part directement dépendante de la qualité et de la représentativité des données servant à fixer les paramètres du modèle.

Sur le premier point, on peut a priori considérer que, s'agissant d'ouvrages relativement simples, l'analyse des digues ne nécessite pas des modèles très sophistiqués et de nombreux outils largement répandus dans l'ingénierie peuvent être considérés comme adaptés. Par contre, la modélisation trouve essentiellement ses limites sur le second point : les digues sont hétérogènes et certains paramètres des modèles sont difficiles à obtenir de façon représentative et fiable (en particulier, les caractéristiques mécaniques).

La modélisation des digues nous semble donc devoir être menée dans l'esprit suivant :

- se référer si possible aux résultats d'études antérieures avant d'entreprendre de nouveaux calculs ;
- privilégier des modèles simples dont les paramètres et les conditions aux limites puissent être assez faciles à caler ;

- pour le diagnostic des digues, vérifier systématiquement la sensibilité des résultats en faisant varier les données dans des plages issues des résultats des reconnaissances ou issues d'autres études ;
- utiliser les modèles pour comparer entre elles diverses solutions de confortement et/ou optimiser leur dimensionnement.

La modélisation hydraulique interne, réalisée en régime permanent avec une étude paramétrique sur les valeurs de perméabilité a pour but de déterminer la piézométrie interne à prendre en compte dans la modélisation mécanique et les gradients hydrauliques pour évaluer les risques de renard (cf §6.1.c).

La modélisation géomécanique sera menée avec des modèles bidimensionnels simples basés sur les mécanismes de rupture plane ou circulaire, dans le cadre de l'étude de la stabilité d'ensemble de la digue (cf §6.1.d). Une approche paramétrique sera privilégiée, sachant qu'un des intérêts majeurs de la modélisation mécanique est d'évaluer l'amélioration apportée par un confortement et de comparer entre elles différentes solutions.

6.9 ÉVALUATION DES ENJEUX

Il convient généralement d'intégrer à l'étude de diagnostic de la digue une évaluation sommaire des enjeux liés à sa rupture ou à son dysfonctionnement.

En effet, les conséquences de la rupture d'une digue doivent être sommairement appréciées, de façon à hiérarchiser les tronçons d'étude et à adapter, le cas échéant, les moyens de diagnostic ou de confortement à la vulnérabilité du val protégé.

La vulnérabilité sera appréciée¹², à partir des critères suivants :

- occupation des sols (zone urbaine, périurbaine, industrielle, agricole...) ;
- importance de la population protégée ;
- voies de communication et infrastructures menacées (routes, voies ferrées, canaux, réseaux enterrés...).

et sera caractérisée par une classe de vulnérabilité :

- (1) - vulnérabilité faible à moyenne ;
- (2) - vulnérabilité forte ;
- (3) - vulnérabilité très forte.

¹² Pour l'évaluation de la vulnérabilité, on associera les services de l'État, en particulier ceux en charge de l'établissement des plans de prévention des risques (PPR) et des plans d'occupation des sols (POS).

6.10 HIÉRARCHISATION DES RISQUES

Le risque résulte de la conjonction entre aléa (tout imprévisible que peuvent prendre les événements) et vulnérabilité (importance des enjeux susceptibles de subir les conséquences dommageables de ces événements). Ce risque s'apprécie pour un niveau de crue donné, que l'on relie en général à une période de retour de l'événement, ou à un événement historique pris comme référence.

Les aléas de rupture seront appréciés en se fondant sur les conclusions du diagnostic, qui visera à affecter à chaque tronçon de digue une classe d'aléa de rupture, suivant la classification suivante :

- (1) - digue fiable vis-à-vis de l'événement (la crue) de projet ;
- (2) - digue présentant un aléa de rupture faible ;
- (3) - digue présentant un aléa de rupture élevé.

L'aléa global d'un tronçon résulte de l'aléa le plus élevé parmi les aléas partiels liés aux différents mécanismes de rupture ou de dégradation (surverse, affouillements, érosion interne, rupture, ...).

L'évaluation du *risque* associé à un tronçon est le croisement de l'*aléa de rupture* du tronçon et de la *vulnérabilité* du val protégé. On peut, en première approche, le caractériser par une note qui est, par exemple, le produit des notes d'aléas et de vulnérabilité.

Une approche cartographique, à une échelle adaptée (1/10 000), est recommandée pour la synthèse de l'étude de risque. Elle fera ressortir :

- le découpage en tronçons homogènes ;
- la caractérisation par tronçon de l'aléa de dysfonctionnement et de rupture ;
- la vulnérabilité par zone des vals protégés ;
- la classe de risque associée à chaque tronçon.

6.11 SOLUTIONS DE CONFORTEMENT

L'étude des solutions de confortement constitue l'étape ultime de tout diagnostic d'ouvrage : le souci est bien de remédier, de manière appropriée, aux désordres et insuffisances constatés ou suspectés. Elle peut utilement être complétée par une réflexion sur le phasage des travaux en prenant en compte les résultats de l'analyse de risques présentée aux § 6.9 et 6.10 précédents.

6.11.1 PRINCIPALES OPTIONS DE CONFORTEMENT SELON LES SITUATIONS

Un rapide inventaire des principales options de confortement, de nature à répondre aux diverses situations d'insécurité des digues, permet d'identifier un certain nombre de contraintes à répercuter dans le libellé des prestations que le bureau d'études, chargé du diagnostic, devra assurer au titre de sa mission de conception. En effet, comme nous l'avons déjà signalé au paragraphe § 6.7.2, les solutions envisagées pour le confortement peuvent orienter la consistance d'une partie des reconnaissances géotechniques.

A partir de l'exemple (le plus courant) des *digues en remblai*, nous pouvons dresser le tableau suivant en nous appuyant sur les mécanismes potentiels de dégradation et de rupture tels que répertoriés au § 6.1 du présent guide :

MÉCANISMES DE RUPTURE	OPTIONS DE CONFORTEMENT	COMMENTAIRES : OBJECTIFS DU CONFORTEMENT, DOMAINE/CONSTRAINTES D'APPLICATION
Surverse	Suppression des points bas ou exhaussement de la digue	<i>Adaptation de la cote d'arase de la levée en veillant à l'étanchéité de la rehausse</i>
	Déversoir amont	<i>Limitation de la cote de crue au droit de la levée</i>
Érosion de talus et affouillements	Protection du pied de levée côté fleuve ou rivière	<i>Pour les zones en contact direct avec le cours d'eau (risque de remise en mouvement du fond d'alluvions)</i>
	Protection / revêtement du parement du talus côté fleuve	<i>En complément, ou non, d'une protection de pied</i>
Renard hydraulique	Recharge drainante côté Val	<i>Lorsque l'emprise disponible le permet ; nécessité de respecter les règles de filtre au contact recharge / talus de la digue</i>
	Masque étanche côté fleuve ou paroi moulée dans le corps de la digue	<i>Limitation des débits de fuite et/ou augmentation de la longueur des lignes de fuite</i>
	Lutte contre les fousseurs	<i>Capture des animaux, protections grillagées, etc</i>
	Traitement des points singuliers	<i>Lorsque ceux-ci sont à l'origine du risque de renard : traversées de conduite, constructions, caves</i>
Instabilité d'ensemble	Recharge du talus côté Val et/ou côté fleuve	<i>Selon le talus concerné (en général, du fait d'une pente trop forte)</i>
	Masque étanche côté fleuve ou paroi moulée dans corps	<i>Pour stabiliser le talus côté Val en rabattant la ligne de saturation dans la digue</i>

On remarque tout d'abord, à l'examen du tableau précédent, que quelques types de confortement peuvent efficacement éviter plusieurs mécanismes distincts de rupture : tel est le cas, par exemple, de la recharge drainante côté val ou encore de la paroi moulée étanche dans le corps de digue.

Par ailleurs, la faisabilité de certains travaux de confortement est soumise à conditions : par exemple, la création d'une recharge côté val nécessite de disposer d'une emprise suffisante en pied de digue (ce qui ne sera pas le cas lorsque des constructions sont implantées dans le talus concerné ou à sa proximité immédiate).

6.11.2 OBJECTIF À ASSIGNER AU TITRE DE LA PHASE DE CONCEPTION DES CONFORTEMENTS

L'objectif général à mentionner pour le volet d'étude «solution de confortement» est d'aboutir à la conception, au minimum au stade avant-projet, de l'ensemble des ouvrages nécessaires à la mise en sécurité de la digue face à une situation de crue d'occurrence choisie en rapport avec l'importance des enjeux protégés et le coût des protections (occurrence centennale habituellement pris en compte pour les ouvrages défendant des zones urbanisées). Le fait d'exiger une conception des confortements jusqu'au niveau avant-projet permet *a priori* de s'assurer que l'étude de diagnostic conduira à des conclusions opérationnelles, immédiatement exploitables par le propriétaire ou le service gestionnaire en vue de la programmation des travaux (dans le cas contraire, il est à peu près garanti qu'une seconde étude s'avérerait nécessaire avec l'inévitable surcoût en résultant ...).

Un tel objectif impose, par la définition contractuelle de la mission de conception avec établissement de l'avant-projet :

- de parfaitement identifier et évaluer tous les mécanismes de dégradation ou de rupture susceptibles d'affecter la digue dans sa configuration actuelle : d'où la nécessité d'un diagnostic approfondi et pertinent (se reporter aux étapes précédentes de la démarche) ;
- d'inventorier, au niveau du principe, et de comparer entre elles, sous couvert d'un prédimensionnement, l'ensemble des solutions de confortement ou d'aménagement possibles pour pallier les déficiences potentielles de la levée ;
- de choisir, justifier suivant le critère technico-économique et chiffrer la (ou les) solution(s) préconisée(s), non sans avoir intégré toutes les contraintes de réalisation, que celles-ci émanent de la maîtrise d'ouvrage (ex : restrictions d'emprise, phasage imposé par des contraintes budgétaires, etc.) ou d'éléments techniques relevés au préalable ou en cours d'étude.

En définitive, sous réserve de l'application de la totalité de la démarche d'étude préconisée dans le présent guide, l'objectif d'aboutir, par le diagnostic approfondi de la levée, à l'établissement de l'avant-projet des travaux de confortement nous paraît tout à fait réaliste, tout au moins dans la grande majorité des cas.

6.11.3 ÉLÉMENTS DE JUSTIFICATION ET CONTRAINTES TECHNIQUES À FAIRE PRENDRE EN COMPTE

Plusieurs éléments de justification et contraintes techniques méritent d'être pris en compte au titre de la phase de conception des ouvrages. Nous citons ci-après ceux qui nous paraissent les plus importants et dont nous recommandons la mention systématique dans les cahiers des charges de consultation des bureaux d'études.

A) DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES

L'utilisation de modèles simples, d'hydraulique interne ou de géomécanique, contribue à l'évaluation de la sécurité de la digue à l'état actuel (cf § 6.8). Les mêmes outils peuvent, dès lors, être mis en œuvre, pratiquement sans surcoût, pour évaluer l'état conforté : ceci permet efficacement, en dépit de l'imprécision des modèles, de comparer entre elles différentes options de confortement et d'optimiser leur prédimensionnement.

B) ÉTUDE DE MATÉRIAUX DE REMBLAIEMENT

Les prélèvements en lit mineur étant maintenant interdits, les sources d'approvisionnement en matériaux utilisables pour la construction de remblais sur les digues sont susceptibles de se diversifier. Dans ce contexte, il y a lieu de recommander de procéder, dès le stade de conception des ouvrages de confortement, à une première étude géotechnique des matériaux de remblai pouvant être approvisionnés sur un site donné, que ceux-ci proviennent de ballastière en lit majeur ou de carrière. En particulier, selon la fonction recherchée pour le confortement (étanchéité, renforcement mécanique, recharge de pied, etc.), on pourra étudier l'aptitude au compactage (voir annexe 1) des dits matériaux en gardant à l'esprit qu'un remblai compacté présente des propriétés intéressantes : meilleure étanchéité et résistance mécanique améliorée (remblai plus dense, plus résistant au cisaillement mais aussi à l'érosion).

C) TRAITEMENT DES POINTS SINGULIERS

Les points ou ouvrages singuliers (traversées de canalisations ou de galerie, constructions dans le talus côté val, etc.) nécessitent, en général, des travaux spéciaux de confortement dont, de plus, il faut assurer le raccordement avec les travaux « standard » réalisés de part et d'autre.

D) DIFFICULTÉS DE RÉALISATION ET TRAVAUX PROVISOIRES

Il est courant, au stade avant-projet, de sous-estimer les difficultés d'exécution. Cela peut être notamment le cas pour les travaux en conditions immergées, comme par exemple ceux de renforcement du pied de digue en zone de contact direct avec le fleuve, ou pour des interventions en secteur d'emprise limitée, comme par exemple sur le talus côté val avec des bâtiments à proximité. Il convient également – en particulier lorsqu'il est prévu des terrassements provisoires en déblai dans le corps

de digue – de s'assurer que la sécurité de la digue en cours de travaux pourra être maintenue au moins à son niveau initial (avant travaux) ou, à défaut, que l'on disposera sur le chantier des moyens permettant de rétablir ce niveau de sécurité avant l'arrivée éventuelle d'une crue.

Aussi faut-il attirer l'attention du bureau d'études sur de telles contraintes d'exécution et lui demander de tenir compte, dans l'évaluation des travaux de confortement, de tous les ouvrages provisoires et autres dispositions qui pourraient s'avérer nécessaires : batardeaux, soutènements ou remblaiements provisoires, phasage particulier d'exécution, etc.

E) PHASAGE DES TRAVAUX

En général, le coût au kilomètre linéaire des confortements s'avère élevé (plus de 5 MF (760 000 euros) par kilomètre pour les levées de Loire, 2 à 3 MF (300 à 450 000 euros) par kilomètre pour les digues de Camargue). Aussi, pour d'évidentes raisons budgétaires, le linéaire de digue pouvant être conforté annuellement est limité. Il convient, en conséquence, d'élaborer un plan de phasage des travaux en tranches opérationnelles. C'est en premier lieu au maître d'ouvrage (ou au gestionnaire) qu'il revient de définir un ordre de priorité d'intervention en croisant le degré d'insécurité de la digue (c'est-à-dire l'aléa de rupture) avec la vulnérabilité, c'est-à-dire la valeur des enjeux directement protégés par celle-ci (cf paragraphe § 6.9). Le bureau d'études peut éventuellement aider le maître d'ouvrage dans cette tâche.

F) PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

Le fait qu'une digue soit un ouvrage artificiel ne doit pas, bien évidemment, conduire à écarter les solutions de confortement respectueuses de l'environnement. Certes, il existe des interdits qu'il serait dangereux de transgresser comme celui de favoriser ou d'autoriser le développement de végétation arbustive ou arborescente sur les corps ou en pied de levée et/ou à proximité des ouvrages en maçonneries.

A défaut de pouvoir cacher la digue, on peut cependant en soigner l'esthétique en privilégiant le recours aux ouvrages en maçonnerie traditionnelle de pierres ou ceux construits avec des éléments préfabriqués modernes qui permettent la croissance de la végétation herbacée (ex : dalles perforées de protection de berges).

La mise en œuvre de techniques de protection végétale est également possible pour les travaux de stabilisation des berges du lit, sous réserve, cependant, de ne pas risquer le développement de la végétation ligneuse sur le corps de digue ou à proximité de son pied : cela condamne a priori leur usage dans les zones de contact direct de la levée avec le fleuve. En outre, il convient de vérifier, au cas par cas, l'adéquation de ces techniques végétales vis-à-vis des contraintes hydrauliques subies et de s'assurer qu'un entretien régulier des ouvrages pourra être effectué.

Dans le même esprit de préservation de l'environnement, on peut avantageusement, dès le stade de conception, chercher à minimiser l'emprise des zones à réaménager : à ce titre, la préférence pourra être donnée, si c'est possible, aux solutions de confortement (d'ailleurs a priori plus économiques) qui ne portent que sur un seul des côtés de la digue plutôt que sur les deux.

Enfin, les travaux devront être pensés dans le souci de limiter au maximum les impacts et nuisances en cours de chantier (mise en place de batardeaux, arrosage des pistes de chantier, etc.) et de prévoir les mesures compensatoires et/ou d'insertion nécessaires.

Veiller aussi à profiter de projets de travaux pour étudier les ouvrages de desserte qui pourront améliorer les conditions de surveillance et d'entretien des digues (ex. : pistes de service en crête et/ou devant les deux pieds de talus).

G) « MÉMOIRE » DES TRAVAUX DE CONFORTEMENT

Il est important d'établir un dossier de récolement circonstancié après l'exécution de tous travaux de confortement. En effet, les travaux effectivement réalisés diffèrent presque toujours des travaux prévus au projet, parfois dans la nature même des travaux réalisés, mais le plus souvent dans les caractéristiques géométriques de ces travaux.

Le dossier de récolement doit comporter des plans et coupes vérifiés, ainsi qu'un mémoire explicatif, décrivant les dits travaux, les difficultés du chantier et les raisons des éventuelles modifications par rapport au projet. Cet ensemble permettra de disposer d'un dossier à jour de l'ouvrage et de reconstituer ultérieurement l'historique précis des différentes interventions.

6.12 LA MISSION D'ASSISTANCE AU PROPRIÉTAIRE / MAÎTRE D'OUVRAGE

Nous venons de passer en revue l'ensemble des aspects qui seront à aborder dans une démarche de diagnostic approfondi d'une digue. Rappelons, comme nous l'avons indiqué en préambule, que cette phase doit être précédée d'un diagnostic rapide comportant le débroussaillage de la digue, un lever topographique et enfin, l'inspection visuelle initiale.

A l'issue de cette première étape et avant d'engager le diagnostic approfondi, nous recommandons vivement l'intervention d'un expert qui, dans le cadre d'une mission légère, sera chargé d'identifier les aléas majeurs auxquels est exposée la digue, de façon à orienter le plus judicieusement possible le contenu des études de diagnostic approfondi. Dans certains cas, cela aboutira à proposer des études très réduites.

Il est, par exemple, inutile de mener des reconnaissances géotechniques lourdes si la digue présente un profil large, des talus peu pentus et que l'on connaît les matériaux de construction. A contrario, on mettra l'accent sur l'étude géomorphologique dans le cas d'une digue implantée en bordure immédiate du lit mineur.

La mission de l'expert consistera donc essentiellement à établir le cahier des charges des études de diagnostic et à assister le maître d'ouvrage dans le choix du bureau d'études et des entreprises chargées des éventuelles reconnaissances. Le coût d'une telle mission sera largement rentabilisé par les économies qui seront ensuite générées grâce à une bonne définition du contenu et du calendrier des études de diagnostic approfondi.

Il pourra aussi être confié avantageusement à l'expert l'établissement du dossier «Loi sur l'eau» pour les travaux de modification des digues relevant du régime de l'autorisation.

Lexique

(se reporter également aux figures 1 et 2)

Banquette :

- ouvrage de rehausse au dessus du corps de la digue, constitué d'un merlon de terre (ou parfois d'un muret en maçonnerie) permettant une protection contre les vagues ;
- ouvrage de rehausse au dessus d'un déversoir, constitué d'un merlon de terre théoriquement fusible, dès qu'il est submergé.

Batardeau : pièce de bois (ou parfois métallique), que l'on glisse dans des rainures prévues à cet effet, permettant d'obturer des zones plus basses en crête de digue, zones où sont aménagés des traversées ou des accès au fleuve ou au lit majeur endigué (portes, escaliers, cales, ...).

Bêche (ou sabot) parafouille : butée en enrochements disposée en pied du revêtement de protection du talus côté rivière d'une digue.

Déversoir (ou déchargeoir) : ouvrage submersible, en général en maçonnerie, permettant l'inondation du val et l'écêtement de la crue, de façon à éviter la surverse sur les digues.

Digue : ouvrage de protection contre les inondations dont au moins une partie est construite en élévation au dessus du niveau du terrain naturel (localement, et en particulier le long de la Loire, on emploie le terme " levée ") et destiné à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones naturellement inondables.

Franc-bord : terme employé localement (vals de Loire) pour désigner l'espace situé entre le lit mineur et la digue (synonyme : *ségonnal* en Camargue).

Gabion : cage métallique en grillage torsadé, de forme parallépipédique, emplie de pierres.

Levée : synonyme de digue.

Perré : revêtement du talus de la digue coté fleuve, constitué de pierres maçonnées et destiné à protéger le talus contre l'érosion hydraulique.

PK (PM) : point kilométrique (point métrique) relatif à un système de repérage s'appliquant à une digue (parfois commun à une route de crête). Ex. : PK 1,750/ PM : 1750.

Risberme : plate-forme située à mi-hauteur du talus de la digue et permettant en général une circulation pour la surveillance et l'entretien.

Ségonnal : terme employé localement (Camargue) pour désigner l'espace situé entre le lit mineur et la digue (synonyme : franc-bord).

Talus côté rivière (ou côté fleuve) : talus de la digue regardant le cours d'eau endigué.

Talus côté terre (ou côté val) : talus de la digue regardant la zone inondable protégée par l'ouvrage (talus donc opposé au précédent).

Val : terme employé localement (Loire) pour désigner l'espace inondable protégé par la digue et situé entre la digue et le coteau (synonyme : zone protégée).

Zone protégée : espace inondable protégé par la digue et situé entre la digue et le coteau (limite du lit majeur naturel).

ANNEXES

Annexe 1

Quelques notions de mécanique des sols

(d'après : G. Degoutte, P. Royet *Aide-mémoire de mécanique des sols*,
ENGREF Paris 1999)

Une digue en remblai est réalisée par la mise en œuvre d'un ou plusieurs sols. La plupart des digues, quel que soit leur type, reposent sur une fondation meuble formée d'une ou plusieurs couches de sols. Les propriétés mécaniques des sols sont donc les garants de la stabilité de l'ouvrage et de sa fondation.

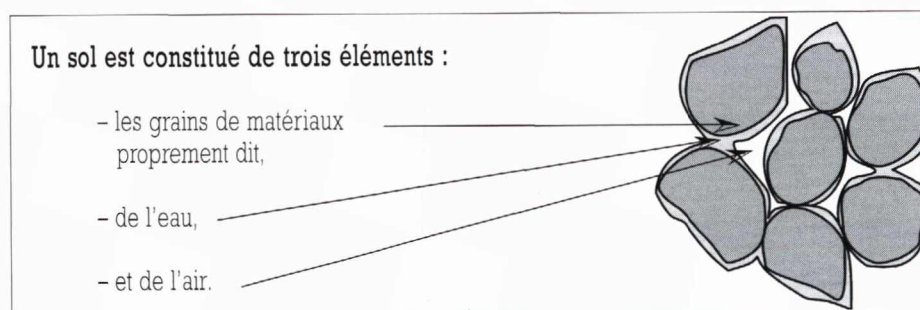


Figure 1 - Constitution d'un sol.

1 - CARACTÉRISTIQUES DES SOLS

La proportion de chacun des éléments peut varier selon le contexte et la nature des sols considérés. Une digue en charge contiendra proportionnellement plus d'eau et moins d'air que la même digue en période de basse eau (digue dite « à sec »).

De même, l'argile utilisée par le potier, ou comme élément d'étanchéité d'un ouvrage, retient plus d'eau que le sable ou le gravier.

Les grains de matériaux constitutifs du sol peuvent être de nature et d'origine différentes. Les propriétés du sol seront donc fortement liées à la nature de ces matériaux.

La nature des grains d'un sol peut être déterminée par leur taille : une analyse granulométrique de sols permet ainsi de distinguer plusieurs catégories de matériaux, des plus fins aux plus grossiers.

Argiles, limons ou silts, sables, graviers et cailloux constituent les différentes classes d'un sol.

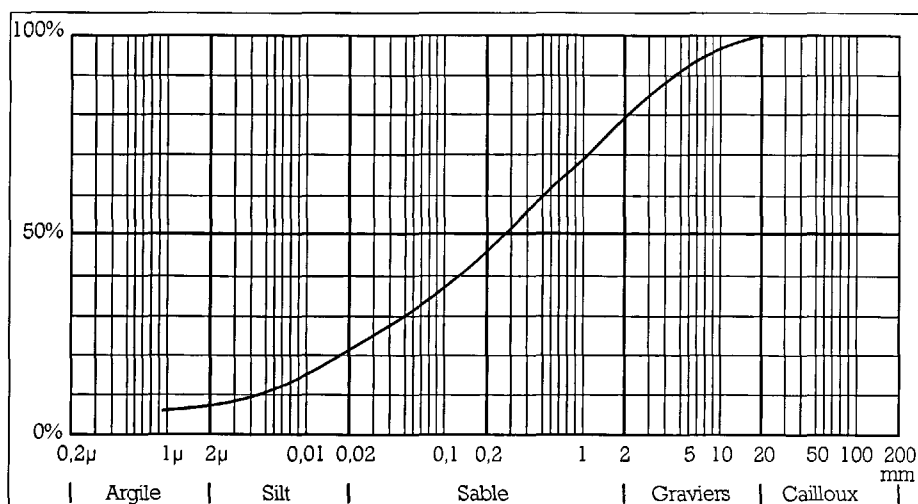


Figure 2 - Courbe granulométrique.

La courbe granulométrique représente le pourcentage en poids des grains de dimension inférieure au diamètre du tamis. On l'obtient par tamisage du sol pour les grains de diamètre supérieur à 80 μm . L'essai de sédimentométrie permet de mesurer la proportion des grains les plus fins par décantation d'une suspension de sol diluée dans de l'eau.

2 - PROPRIÉTÉS DES SOLS FINS

On appelle «sol fin» un sol tel que 50% en poids des grains soient inférieurs à 80 μm . Le comportement d'un sol fin est lié à sa teneur en eau mais aussi à sa structure cristalline et à sa composition minéralogique.

Rôle de l'eau : plus un sol est fin, plus la surface spécifique des grains est grande et plus l'eau, molécule polarisée, a un rôle important en étant à l'origine de forces d'attraction électrique entre les grains.

L'eau adsorbée est de l'eau attirée par polarité par les particules d'argile. Elle constitue une fine pellicule qui entoure le grain, et qui ne peut être éliminée totalement que par un chauffage très intense (200 à 300° C). Cette eau, très visqueuse, joue le rôle de lubrifiant des grains.

L'eau libre, qui circule librement entre les grains et que l'on peut éliminer à l'étuve à 100° C environ, crée des attractions dues au phénomène de capillarité.

En laboratoire, ce rôle de l'eau est couramment apprécié par des essais qui mesurent les teneurs en eau relatives aux changements d'états liquide, plastique, solide, aussi appelées limites d'Atterberg :

w_L = limite de liquidité w_p = limite de plasticité.
On appelle indice de plasticité la valeur $IP = w_L - w_p$.

Un essai, moins courant, mesure la limite de retrait (w_s) qui permet de distinguer l'état solide sans retrait où l'eau capillaire est présente et un état solide avec retrait où l'eau capillaire est en partie éliminée. L'élimination de l'eau capillaire entraîne une diminution de volume (fentes de retrait).

Ce phénomène de retrait, plus ou moins sensible selon les argiles, a une importance fondamentale dans les problèmes d'étanchéité : un ouvrage hydraulique étanché par un sol argileux peut voir son étanchéité compromise par les fentes de retrait s'il est maintenu hors d'eau pendant une certaine période, surtout sous climat chaud.

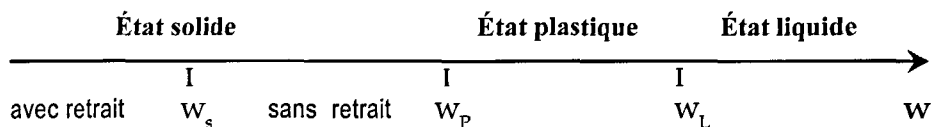


Figure 3 - Limites d'Atterberg

L'indice de plasticité $IP = w_L - w_p$ a un intérêt tout à fait fondamental pour les conditions de mise en œuvre des matériaux.

Ainsi, pour les chantiers de terrassement, des matériaux pour lesquels $IP > 30$ sont difficiles à mettre en place et à compacter.

3 - MATIÈRES ORGANIQUES

Certains sols, issus de dépôts géologiquement récents, peuvent contenir de la matière organique. On les identifie in situ à leur couleur grise à noire, à la présence de débris végétaux et à leur odeur.

Au laboratoire, la teneur globale en matière organique se mesure sur le résidu passant à 0,4 mm, préalablement séché à 65° C, que l'on fait réagir à l'eau oxygénée. Un deuxième étuvage permet, par différence, de connaître le poids et donc la teneur en matière organique.

Au-delà de 2 à 3 % de matière organique, l'utilisation des sols en remblais peut engendrer des problèmes de tassements à long terme. Les sols contenant plus de 5 % de matière organique sont à proscrire.

4 - COMPACTAGE DES SOLS

Le compactage des sols permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques et hydrauliques d'un remblai. L'énergie apportée par le compacteur permet le rapprochement des grains de sol entre eux, augmentant la densité et la résistance

du massif. Ainsi, c'est l'air contenu dans le sol qui est expulsé lors de cette opération. De même, le rapprochement des grains diminue la perméabilité du remblai, améliorant ainsi l'étanchéité.

Afin d'optimiser le compactage, les matériaux doivent être préparés. La couche à compacter ne doit pas être trop épaisse et la teneur en eau des matériaux doit être suffisante sans être excessive. L'eau a ici un rôle de lubrifiant et facilite la mise en place des grains entre eux. Un excès d'eau empêche cependant un bon compactage ; en effet dans ce cas, l'énergie apportée par le compacteur est reprise par un matelas d'eau qui se forme sous l'engin. C'est le phénomène de « matelassage » très spectaculaire dans les cas extrêmes.

L'essai Proctor effectué en laboratoire permet de déterminer la densité optimale d'un sol compacté à différentes teneurs en eau. L'énergie apportée est normalisée. On parle d'essais Proctor normal ou Proctor modifié.

En construction de remblais en grande masse (barrages, remblais routiers, digues...), on se réfère presque exclusivement à l'essai Proctor Normal. En technique routière, on se réfère à l'essai Proctor Modifié, réalisé avec une énergie double.

L'essai Proctor permet de tracer la courbe du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau, pour une énergie de compactage donnée. Cet essai permet ainsi de déterminer deux grandeurs fondamentales, pour le déroulement et le contrôle des chantiers de terrassement : la teneur en eau optimale (W_{OP}) pour laquelle on obtient la densité optimale ($\gamma_{d_{OP}}$).

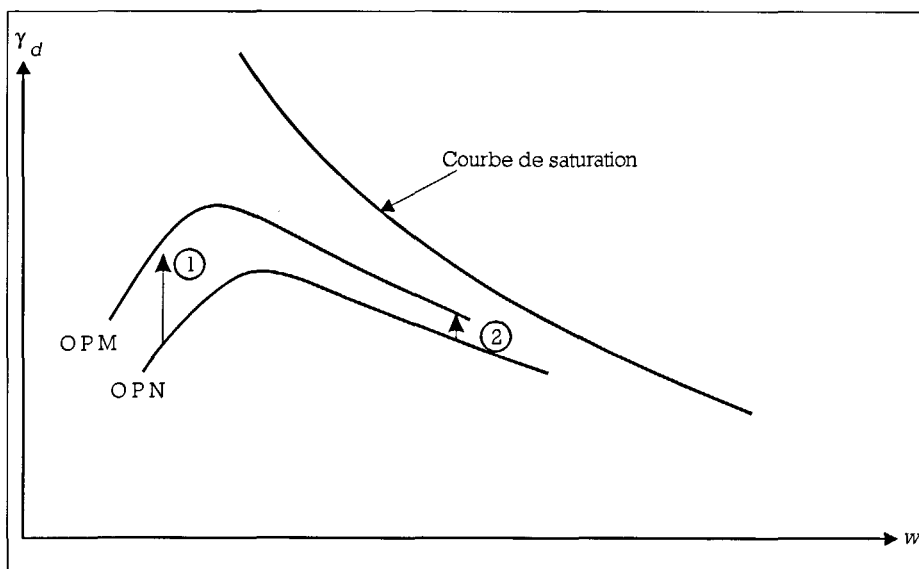


Figure 4 - Courbes Proctor.

Sur un chantier de compactage, on contrôle ces deux grandeurs : teneur en eau et densité afin de vérifier qu'elles se situent bien dans la fourchette acceptable. Pour les remblais en matériaux fins, on recommande généralement une valeur de densité supérieure à 98 % de l'optimum et une teneur en eau égale à la teneur en eau optimale + ou - 1 ou 2 points (selon la nature des matériaux).

La courbe Proctor est encadrée par la courbe dite de saturation. Elle représente la densité à partir de laquelle le matériau ne peut plus être compacté (c'est la courbe limite de l'état d'un sol).

On voit ici que lorsque la teneur en eau est faible, on peut augmenter la densité en apportant une énergie de compactage plus importante (1). Par contre, quand la teneur en eau est élevée (> à la teneur en eau optimale), il est peu efficace d'augmenter l'énergie (2). Pire encore, certains types de matériau n'acceptent pas le surcompactage dans ces conditions et voient leur densité diminuer, ou encore des zones saturées au cœur du remblai seront la source d'incidents ultérieurs .

5 - IDENTIFICATION DES SOLS

Les essais d'identification (granulométrie, teneur en eau Proctor, limites d'Atterberg etc....) renseignent sur la nature du matériau et ses caractéristiques. Ces essais sont effectués à l'aide d'échantillons remaniés ; ils ne renseignent donc pas sur les caractéristiques d'un sol en place. Pour cela, il existe divers essais *in situ* : pénétromètre statique et dynamique, pressiomètre, scissomètre, essai de perméabilité, essai de plaque etc....

Les essais d'identification permettent de qualifier le sol par un nom plus précis (argile, sable, limon argileux,...). Une telle appellation est très utile quand elle est un peu rigoureuse car le mécanicien des sols sait, pour chaque type de sol, quelles sont les propriétés à étudier, quels sont les risques possibles, quelles sont les aptitudes principales.

Ainsi :

- *une argile, un limon argileux conviennent a priori pour réaliser la zone étanche d'une digue ou d'un barrage en remblai ;*
- *un sable ne convient pas pour une fonction d'étanchéité ;*
- *sous réserve d'une certaine propreté, un sable grossier peut convenir pour construire le drain d'un remblai ;*
- *un sol fin est plus compressible qu'un sol grossier ;*
- *un sol fin est plus sensible à l'eau qu'un sol grossier du point de vue de la mise en œuvre.*

6 - CLASSIFICATION DES SOLS

Trois types de classification sont très couramment utilisées :

- le diagramme de Casagrande qui concerne les seuls sols fins et qui fait intervenir les limites d'Atterberg (figure 5) ;
- l'abaque triangulaire de Taylor, qui utilise seulement la granulométrie, et qui permet de baptiser un sol (argile, limon, sable, limon argilo-sableux...) (figure 6) ;
- la classification normalisée NFP 11.300 de septembre 1992 (tableau 1) qui remplace l'ancienne classification dite RTR (Recommandations pour les Terrassements Routiers) réalisée par le LCPC et le SETRA, très employée en géotechnique routière et qui donne des renseignements pratiques sur l'aptitude des sols à être utilisés en remblai.

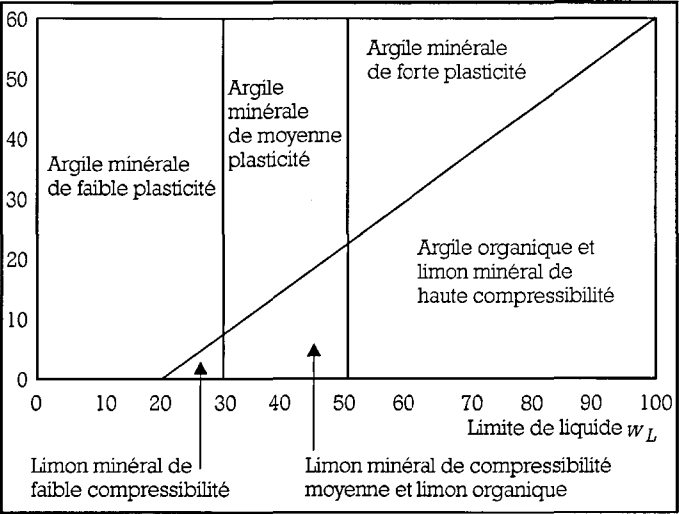


Figure 5 - Abaque de plasticité de Casagrande.

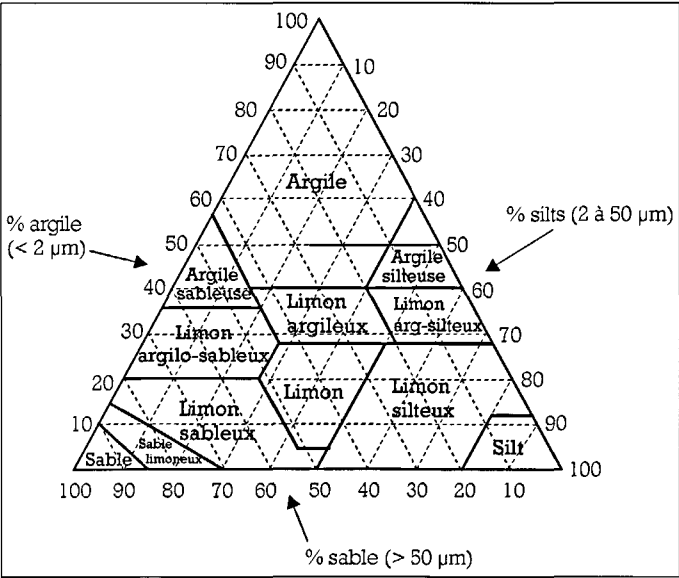


Figure 6 - Classification triangulaire des sols fins.

Tableau 1 - classification des sols (NFP 11-300) - Tableau simplifié

Sols Fins A $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et $d_{35} < 0,08 \text{ mm}$	$VBS^* \leq 2,5^{**}$ ou $IP \leq 12$	A₁ : limons peu plastiques, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...
	$12 < IP \leq 25^{**}$ ou $2,5 < VBS$	A₂ : sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...
	$25 < IP \leq 40^{**}$ ou $6 < VBS \leq 8$	A₃ : argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...
	$IP > 40^{**}$ ou $VBS > 8$	A₄ : argiles et argiles marneuses très plastiques
Sols sableux ou graveleux avec fines B $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et $d_{35} \geq 0,08 \text{ mm}$	$d_{12} \geq 0,08 \text{ mm}$ $d_{70} < 2 \text{ mm}$ $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	B₁ : sables silteux...
	$d_{12} \geq 0,08 \text{ mm}$ $d_{70} < 2 \text{ mm}$ $VBS > 0,2$	B₂ : sables argileux (peu argileux)...
	$d_{12} \geq 0,08 \text{ mm}$ $d_{70} \geq 2 \text{ mm}$ $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	B₃ : graves silteuses...
	$d_{12} \geq 0,08 \text{ mm}$ $d_{70} \geq 2 \text{ mm}$ $VBS > 0,2$	B₄ : graves argileuses (peu argileuses)...
	$d_{12} < 0,08 \text{ mm} \leq d_{35}$ $VBS \leq 1,5^{**}$ ou $IP \leq 12$	B₅ : sables et graves très silteux...
	$d_{12} < 0,08 \text{ mm} \leq d_{35}$ $VBS > 1,5^{**}$ ou $IP > 12$	B₆ : sables et graves argileux à très argileux.
Sols comportant des fines et des gros éléments C $d_{max} > 50 \text{ mm}$	$d_{12} < 0,08 \text{ mm}$ ou $d_{12} > 0,08 \text{ mm}$ et $VBS > 0,1$	C : Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières.
Sols insensibles à l'eau D $VBS \leq 0,1$ $d_{12} \geq 0,08 \text{ mm}$	$d_{max} \leq 50 \text{ mm}$ $d_{70} < 2 \text{ mm}$	D₁ : sables alluvionnaires propres, sables de dune...
	$d_{max} \leq 50 \text{ mm}$ $d_{70} \geq 2 \text{ mm}$	D₂ : graves alluvionnaires propres, sables...
	$d_{max} > 50 \text{ mm}$	D₃ : graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires...

* VBS = valeur de bleu de méthylène (en grammes de bleu adsorbé pour 100g de sol) caractéristique de l'argilosité du sol.

** paramètre dont le choix est à privilégier.

Annexe 2

Quelques notions d'hydraulique des sols

(d'après : G. Degoutte, P. Royet *Aide-mémoire de mécanique des sols*,
ENGREF Paris 1999)

Les propriétés hydrauliques des sols déterminent la capacité des ouvrages et de leurs fondations à être étanches, à résister au risque d'érosion interne (renard) et à maintenir l'intégrité de ses matériaux constitutifs (non colmatage des drains).

1 – DÉFINITIONS PRÉLIMINAIRES

1.1 - VITESSE DE L'EAU DANS LE SOL

Par définition, la vitesse apparente est la valeur $v = Q/S$, rapport du débit de l'eau écoulée (Q) à la section de l'échantillon de sol (S). En fait, la vitesse réelle (entre les grains) moyenne est v/n où n est la porosité, mais il est plus simple de raisonner sur la vitesse apparente. Dans ce qui suit, v représentera toujours la vitesse apparente.

1.2 - CHARGE HYDRAULIQUE EN UN POINT

Considérons un point situé dans un massif saturé siège d'un écoulement permanent. Soit u la pression de l'eau en ce point et z sa cote par rapport à un repère quelconque. La charge hydraulique en ce point est, par définition :

$$h = u/\gamma_w + z + v^2/2g$$

avec γ_w : poids volumique de l'eau.

Les vitesses dans les sols sont toujours faibles, et on néglige le terme en $v^2/2g$.

$$\text{D'où : } h \approx u/\gamma_w + z$$

1.3 - GRADIENT HYDRAULIQUE

Dans un écoulement uniforme et unidirectionnel, le gradient hydraulique i est, par définition, le rapport de la différence de charge Δh à la longueur L du trajet de l'eau dans le sol.

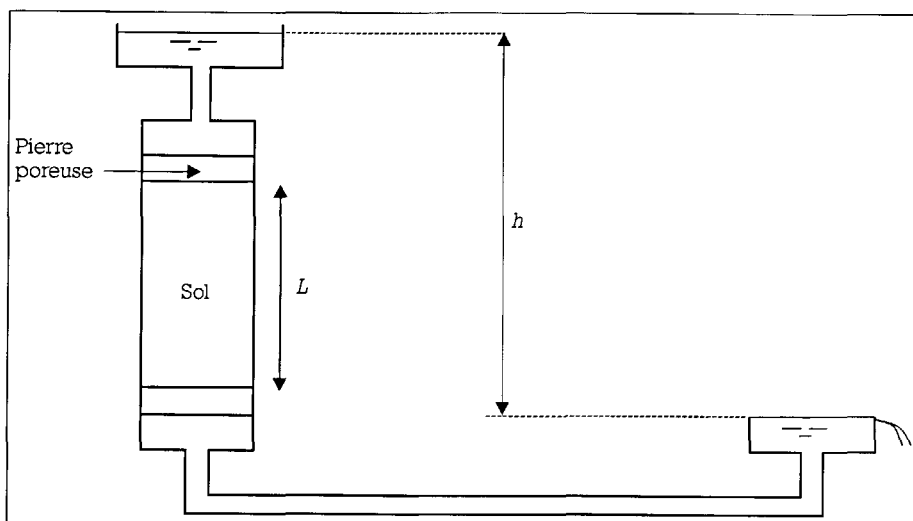


Figure 1 - Principe du perméamètre : échantillon de sol soumis à un gradient hydraulique $i = h/L$.

2 – PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES SOLS

2.1 - LOI DE DARCY

Cette relation fondamentale s'écrit : $v = k i$ (avec v : vitesse de l'eau et i : gradient hydraulique), k est le coefficient de perméabilité du sol. Il vaut de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-10} m/s pour une argile et 10^{-4} à 10^{-6} m/s pour un sable.

2.2 - ÉQUIPOTENTIELLES ET LIGNES DE COURANT

Les équipotentiels sont les lignes où la charge h est constante. Elles sont orthogonales aux lignes de courant.

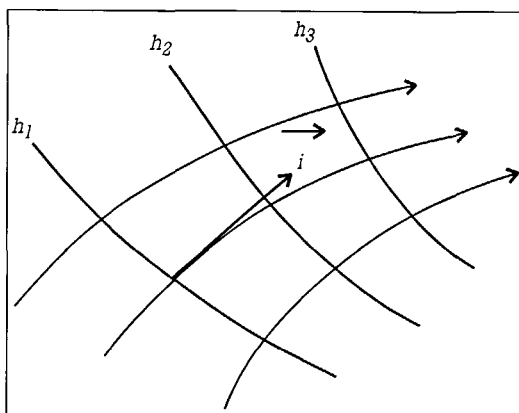


Figure 2 - Réseau de lignes de courant et d'équipotentiels.

Cas d'un barrage ou d'une digue à drain horizontal sur substratum imperméable

Considérons un barrage ou une digue drainé horizontalement, en situation d'écoulement permanent. Nous disposons de deux conditions aux limites en régime permanent : $h = H$ le long du parement amont AB et $h = z$ le long de BC (courbe de saturation).

Le potentiel est nul au niveau du drain. La courbe de saturation et le contact avec la fondation sont des lignes de courant. D'où l'allure du tracé de la figure 3.

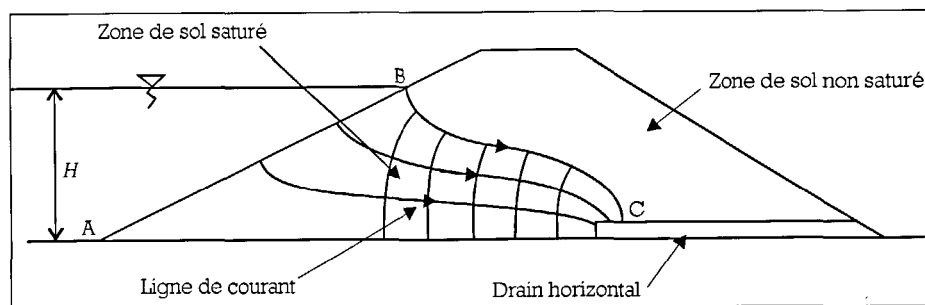


Figure 3 - Saturation d'un ouvrage hydraulique en terre.

Pour des raisons pédagogiques, nous avons montré l'exemple d'un drain horizontal dans un milieu isotrope. Or, les conditions de construction des remblais (par couches compactées) conduisent le plus souvent à une forte anisotropie du sol avec des perméabilités beaucoup plus fortes dans la direction horizontale.

Le débit de fuite total se calcule en sommant les débits de fuite dans chaque tube de courant où l'on applique la loi de Darcy.

2.3 - FORCES D'ÉCOULEMENT ET FORCES DE PESANTEUR DANS UN SOL SATURÉ

La force de pesanteur γ' appliquée à un grain de sol est proportionnelle à sa masse et de direction verticale.

La force d'écoulement $\gamma_w i$ est tangente à la ligne de courant, et proportionnelle au gradient hydraulique i .

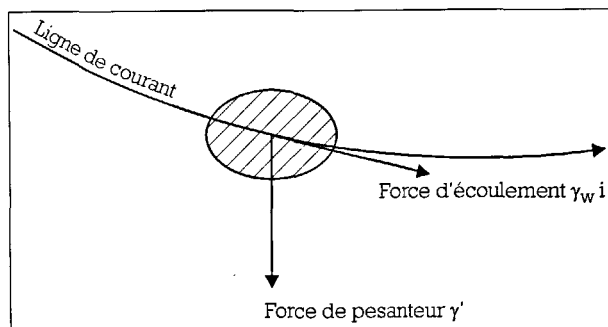


Figure 4 - Forces appliquées à un grain de sol.

2.4 - GRADIENT CRITIQUE ; RENARD

Un phénomène de renard intervient lorsque la force d'écoulement est ascendante et supérieure à la force de pesanteur, c'est à dire si $\gamma_w \cdot i > \gamma'$. D'où le gradient critique : $i_c = \gamma' / \gamma_w$. Pour un sable d'indice des vides $e = 0,7$:

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e} \approx \frac{27 - 10}{1,7} = 10 \text{ kN/m}^3,$$

avec γ_s : masse volumique des grains = 27 kN/m³.

Le gradient critique vaut donc dans ce cas $i_c = 1$. Sur la figure 5 ci-après, $i = h / (2.L)$ et le renard apparaît lorsque le rabattement de l'eau dans l'enceinte atteint $h = 2.L$.

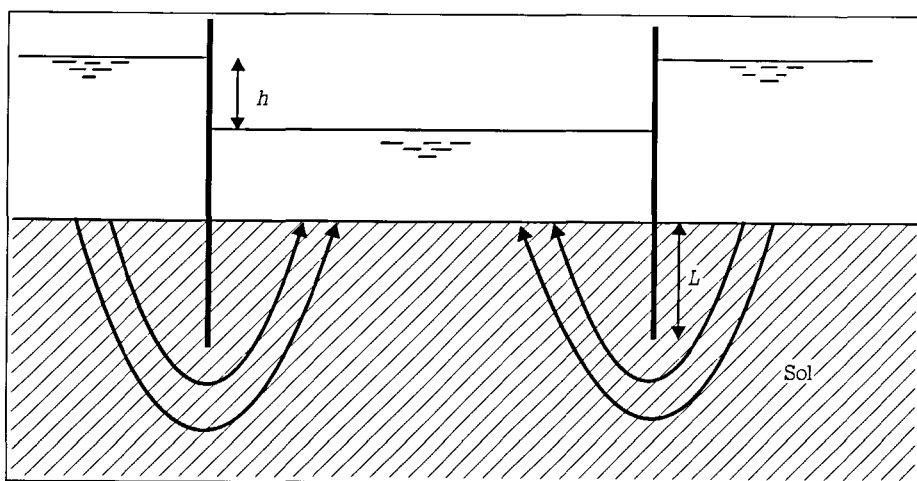


Figure 5 - Écoulement sous une enceinte en palplanches.

Dans le cas d'une digue en charge, le renard hydraulique apparaît préférentiellement en pied d'ouvrage (là où le gradient hydraulique est le plus élevé) ou le long de lignes d'écoulement préférentiel provoquées par des hétérogénéités (conduites traversantes, terriers et racines).

2.5 - MESURE DE LA PERMÉABILITÉ

- Au laboratoire, la perméabilité se mesure au perméamètre (dont le principe est présenté en figure 1) :

- à charge constante si l'on mesure le débit nécessaire pour maintenir plein le réservoir haut ;

- à charge variable si l'on mesure, en fonction du temps, la descente dans le tube (situé sous le réservoir haut).

• *In situ*, l'essai classique (norme NFP 94-130) consiste à pomper dans un forage, avec un débit constant Q jusqu'à ce qu'un régime permanent soit atteint ($h =$ constante).

On démontre que, lors de l'essai de rabattement en régime permanent, le coefficient de perméabilité est obtenu par la formule :

$$k = Q \frac{\ln(R/r)}{\pi(H^2 - h^2)}$$

les hauteurs h et H étant mesurées par rapport au substratum imperméable.

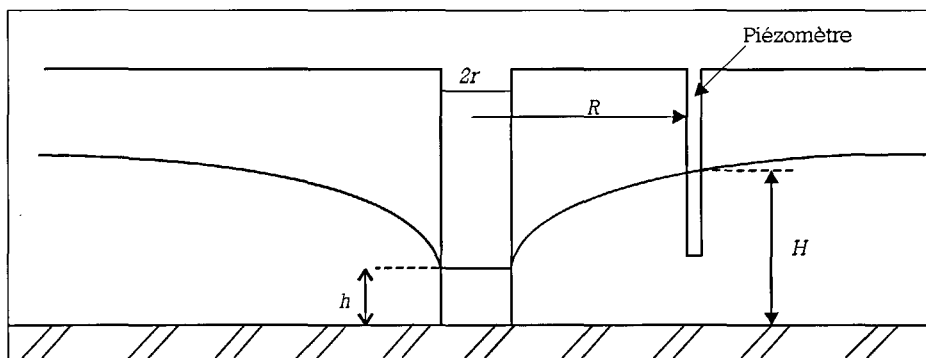


Figure 6 - Rabattement d'une nappe.

Dans les sols perméables sous la nappe, on pratique également l'essai Lefranc (norme NFP 94-132) : pompage ou injection à débit constant dans un forage et mesure de la variation de la charge avec le temps.

Dans les massifs rocheux, on pratique l'essai Lugeon (norme NFP 94-131) : injection d'eau sous pression constante dans un forage.

3 – RÈGLES DE FILTRES

Sous l'effet de la circulation de l'eau, les particules fines de sol peuvent migrer vers une zone de sol plus grossier. C'est par exemple ce qui peut se produire entre le corps de remblai d'un ouvrage hydraulique et le matériau de son drain. Pour éviter ce phénomène, deux zones successives d'un ouvrage hydraulique doivent vérifier des **conditions de filtre** qui sont des règles de transition granulométrique. En pratique, si les conditions de filtre ne sont pas respectées entre ces deux matériaux, on interpose un matériau de granulométrie intermédiaire, appelé filtre. Les conditions explicitées ci-après doivent être vérifiées aux deux interfaces : entre matériau fin du remblai et filtre puis entre filtre et drain. Dans chaque cas, D_a et d_b sont les diamètres des tamis laissant passer respectivement a % en poids du matériau le plus grossier D (drain) et b % en poids du matériau le plus fin d (remblai).

• Lorsqu'un matériau fin à granulométrie continue (la courbe granulométrique ne présente pas de changement de pente) est en contact, dans un ouvrage hydraulique, avec un matériau uniforme (drain ou filtre), leurs granulométries doivent répondre aux conditions suivantes :

- condition de non entraînement des fines : $D_{15} < 5.d_{85}$;
- condition de perméabilité : $D_{15} > 0,1 \text{ mm}$;
- coefficient d'uniformité (D_{60} / D_{10}) des filtres et des drains compris entre 2 et 8.

On impose aussi le plus souvent une condition de propreté pour le matériau constitutif d'un drain, condition qui s'écrit par exemple : $D_{05} > 0,08 \text{ mm}$.

• La condition de filtre au contact entre deux matériaux très uniformes ($D_{60}/D_{10} < 3$ et $d_{60}/d_{10} < 3$), – ce qui est le cas entre le filtre et le drain – s'écrit : $5d_{50} < D_{50} < 10d_{50}$.

• Enfin, un sol très gradué ($d_{60}/d_{10} > 16$) et à granulométrie discontinue présente des risques d'érosion interne de sa partie fine sous l'effet des circulations d'eau. Le filtre contigu à ce matériau doit donc être déterminé avec le d_{85} de la partie inférieure de la courbe granulométrique du sol, après le changement de pente.

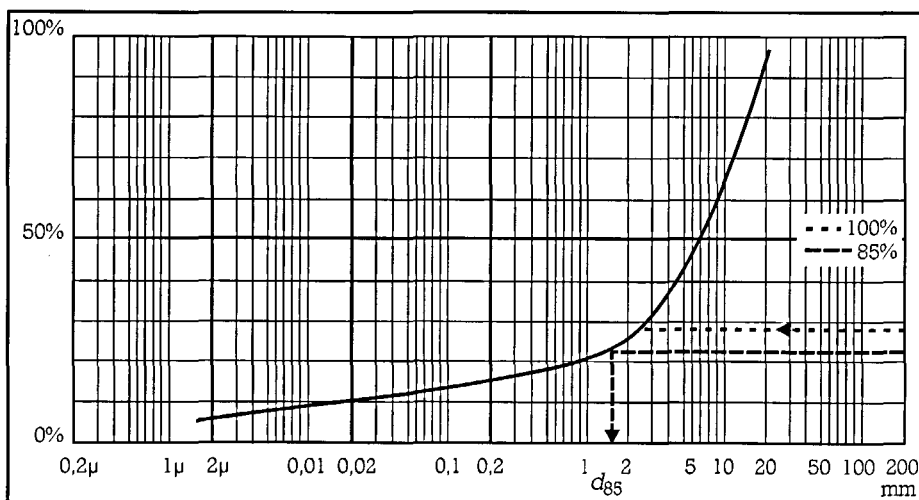
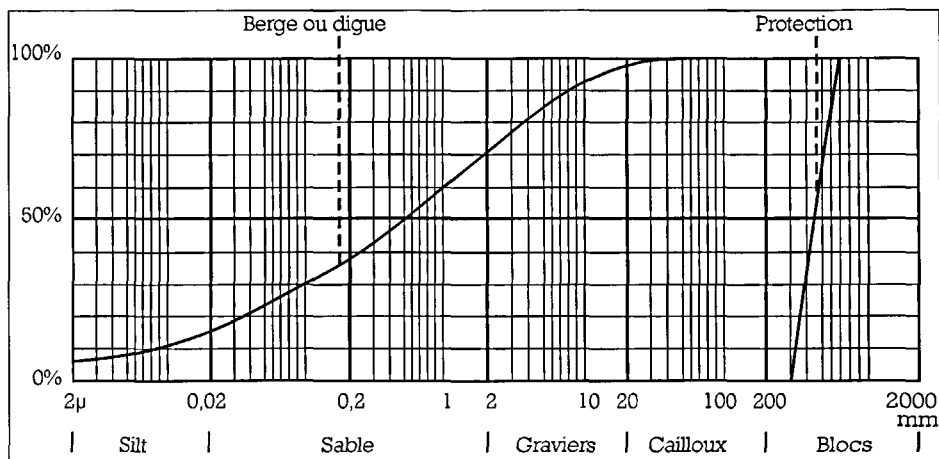


Figure 7 - Cas d'un sol à granulométrie discontinue.

Dimensionnement de la transition granulométrique d'une protection de berge ou de digue

Soit une berge ou une digue sableuse dont la courbe granulométrique est représentée ci-dessous et une protection contre l'érosion par le courant constituée de blocs 300-700 mm (c'est-à-dire 50-400 kg).



1 - NÉCESSITÉ D'UNE TRANSITION

Une transition est nécessaire si $0,2.d_{15}(\text{protection}) > d_{85}(\text{berge ou digue})$.

Ici : $d_{85}(\text{berge ou digue}) = 5 \text{ mm}$ et $d_{15}(\text{protection}) = 350 \text{ mm}$. $0,2 \times 350 = 70 > 5$. La condition n'est pas satisfaite, et de loin. Une transition est donc nécessaire.

2 - CONDITION SUR LE D_{50} DE LA TRANSITION

La transition et la protection étant uniformes, la condition à respecter est :

$$5.d_{50}(\text{transition}) < d_{50}(\text{protection}) < 10.d_{50}(\text{transition}).$$

$$\text{D'où } 5.d_{50}(\text{transition}) < 450 \text{ mm} < 10.d_{50}(\text{transition}),$$

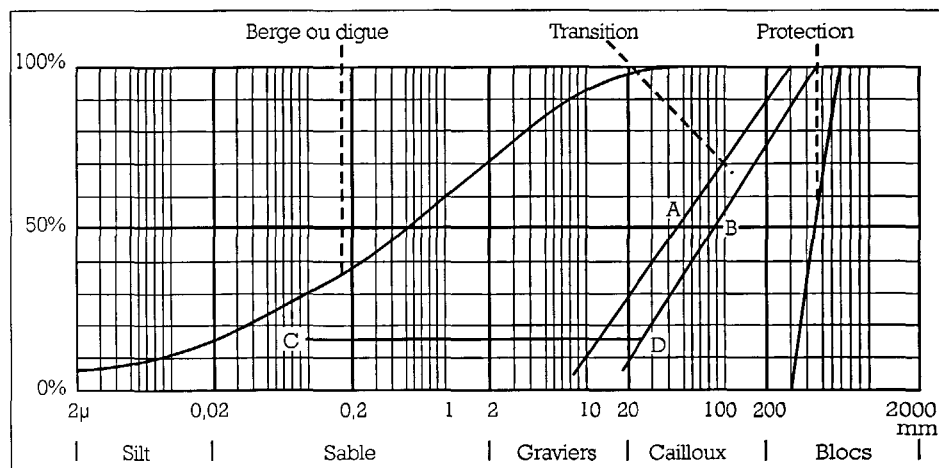
soit $45 \text{ mm} < d_{50}(\text{transition}) < 90 \text{ mm}$ (segment AB sur le graphique ci-après).

3 - CONDITION SUR LE D_{15} DE LA TRANSITION

$$0,1 \text{ mm} < d_{15}(\text{transition}) < 5.d_{85}(\text{berge ou digue})$$

$$\text{Soit } 0,1 \text{ mm} < d_{15}(\text{transition}) < 5 \times 5 = 25 \text{ mm} \text{ (segment CD).}$$

Le fuseau représenté ci-après convient car en outre $d_{60}/d_{10} = 6$ ou 7 est bien compris entre 2 et 8.



Annexe 3

Dossier de surveillance des digues à sec

Mode opératoire pour l'inspection visuelle d'une digue en remblai :

- reconnaissance initiale
- surveillance de routine

1 - PRINCIPE ET OBJECTIF DE L'INSPECTION

Le principe de l'inspection consiste à parcourir intégralement le linéaire de digue en répertoriant toutes les informations visuelles, d'une part sur *les caractéristiques morphologiques* externes de l'ouvrage et, d'autre part, sur *les désordres* ou les présomptions de désordres affectant l'une ou l'autre de ses composantes.

La reconnaissance initiale constitue une étape incontournable de toute démarche de diagnostic (rapide ou approfondi) d'un système d'endiguement.

La surveillance de routine entre, quant à elle, dans une démarche de suivi des ouvrages, ayant bénéficié au minimum d'une visite initiale. A travers elle, on s'attache donc à examiner les évolutions s'étant produites sur la digue et sur son environnement proche depuis une visite précédente.

1.1 - CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES DE LA DIGUE

L'ampleur des levés topométriques sommaires à effectuer au titre de la reconnaissance visuelle va dépendre bien évidemment des documents disponibles au préalable sur l'ouvrage et ses abords :

(A) CAS OÙ L'ON DISPOSE D'UN PLAN TOPOGRAPHIQUE À JOUR ET PRÉCIS (DE L'ORDRE DU 1/500) :

C'est la situation que nous recommandons pour un diagnostic correct des ouvrages. En tout état de cause, le plan topographique nous semble former un support indispensable pour une bonne restitution de la surveillance de routine.

Le travail se limite alors à vérifier et compléter les principales informations topographiques disponibles, ce qui nécessite de se repérer au fur et à mesure sur le plan existant. Des profils en travers ne sont levés qu'aux sections où il apparaît des singularités non visibles ou mal répertoriées sur le plan (ex. : maison ou construction édifiée à proximité de la levée ou encastrée dans le talus).

(b) CAS OÙ L'ON NE DISPOSE QUE DE LA CARTE I.G.N. AU 1/25000 :

Dans ce cas, les informations suivantes peuvent être assez facilement levées sans trop alourdir la reconnaissance visuelle :

- largeur et dévers éventuel de la crête, emprise de la chaussée éventuelle ;
- pente et longueur du talus côté rivière, distance au lit mineur du pied de digue ;
- pente et longueur du talus côté terre (val) ;
- niveau(x) d'eau le jour de la visite, niveau et/ou laisse de crue ;
- mention des ouvrages ou constructions présents ainsi que des singularités topographiques (ex. : existence d'une dépression côté val).

Le plus efficace pour ce faire est de lever des profils en travers successifs à l'aide d'un décamètre et d'un clisimètre (appareil optique simple de mesure des pentes, de la taille d'une boussole), débordant assez largement des pieds de talus et se raccordant à un point identifiable de la carte IGN au 1/25000, par hypothèse toujours disponible. Les points singuliers, tels que constructions ou indices de désordres, sont repérés sur le profil en travers et seront ainsi correctement positionnés lors de sa mise au propre au bureau. Le repérage longitudinal des profils peut se faire à l'aide d'un topofil (appareil de mesure des distances à fil perdu), tout en se calant sur le terrain au réseau de PK de la digue.

1.2 - INDICES DE DÉSORDRE

Les principaux points à observer sont répertoriés sur les tableaux insérés dans le texte principal du présent guide (cf tableaux 1 et 2 du § 3.3 de ce texte principal) suivant les mécanismes de rupture redoutés et les parties d'ouvrage respectivement examinées.

La prise de vue photographique des désordres les plus importants est intéressante et permettra d'effectuer des comparaisons visuelles avec des clichés pris ultérieurement aux mêmes points (dans le cadre des visites de routine). Quelques conseils pour des prises de vue exploitables : utiliser le flash dès que les conditions de luminosité ne sont pas optimales ou si l'on est à contre-jour, disposer un objet à côté du sujet pour donner l'échelle du cliché ; repérer et noter le point ainsi que l'angle de prise de vue.

2 - CONDITIONS GÉNÉRALES DE MISE EN ŒUVRE**2.1 - PRÉPARATION DE LA VISITE**

En préalable à la visite de reconnaissance, il est indispensable de collecter et d'analyser l'ensemble des documents disponibles se rapportant à la digue : plans topographiques actuels et anciens, plans des ouvrages mobiles, rapports d'études, comptes-rendus de travaux, documents historiques (plaintes de riverains, constats de dégâts, description de brèches, etc.).

S'il s'agit d'une visite de routine, il convient, bien sûr, de se procurer et d'analyser en détail les documents émanant des précédentes visites.

La possession d'un plan topographique détaillé permet une préparation minutieuse qui facilitera par la suite les opérations de terrain :

- choix de la référence kilométrique de base (PK) ;
- détermination des tronçons de description (cf § 2.2 ci-après) ;
- report sur le plan des limites entre tronçons et inventaire des points de recalage possible sur le terrain ;
- premier inventaire des singularités révélées par le plan (constructions, murs, chaussées, ouvrages d'entonnement, gros arbres isolés, vannes, mares, regards, etc.) ;
- préremplissage des fiches de visite (cf § 3 ci-après) : repérage PK, longueur de chaque tronçon, nom de la commune, nom du lieu-dit, ...

Le matériel emporté pour la reconnaissance visuelle se compose de :

- un jeu de cartes I.G.N. au 1/25000 et les éventuels plans de détail disponibles ;
- un toposil (ou un mètre-ruban de 50 mètres) ;
- un cliséimètre et une boussole de poche ;
- une serpe, un marqueur et une bombe de peinture ;
- un pic de géologue, une pelle U.S., un feutre à essence et des sachets à échantillons ;
- un mètre de poche et un mètre-ruban (50 mètres ou, à défaut, 20 mètres) ;
- un appareil photographique réflex 24 x 36 et, éventuellement, un Polaroid ou un appareil numérique ;
- une planchette avec crayons et gommes ;
- un jeu vierge de fiches descriptives de désordres et/ou de profils en travers ;
- un jeu de fiches descriptives de désordres et/ou de profils en travers relatif à la précédente visite, s'il s'agit d'une visite de routine ;
- une demi-douzaine de jalons ;
- les équipements de sécurité ;
- en option : une tarière manuelle ;
- en option (version informatisée de la fiche) : un ordinateur portable.

La période idéale d'intervention est la saison hivernale - après, si possible, débroussaillage des talus de la digue - afin de bénéficier des meilleures conditions d'observation. Si nécessaire (digue en contact avec le lit mineur), une visite complémentaire particulière du pied de talus immergé et/ou des berges sera programmée en période d'étiage et/ou à partir d'une embarcation légère.

2.2 - DÉROULEMENT DE LA VISITE

L'équipe de terrain est formée de deux ou trois agents formés au génie civil / mécanique des sols : l'intervention en binôme minimum s'avère indispensable pour le transport du petit matériel, pour la réalisation, dans de bonnes conditions, du levé

rapide des caractéristiques géométriques et, enfin, pour la sécurité des opérations. La description en trinôme se révèle intéressante pour des raisons d'efficacité lorsque la levée est large et/ou mal entretenue ou dans le cas où l'on ne possède pas la topographie de détail (nombreux profils en travers à lever). Le choix de disposer de personnels qualifiés en «génie civil» constitue, en outre, un gage de plus grande exhaustivité dans l'inventaire des désordres et permet une confrontation des points de vue lors de l'évaluation subjective des risques pour la pérennité de la digue.

Il est recommandé de conduire l'inspection des désordres par parcours méthodique de la digue. Une façon simple de procéder consiste à décrire la digue par tronçons de longueur prédéterminée (et adaptée à la complexité de l'ouvrage) : de 100 m pour les zones bien entretenues à 20-25 m pour les secteurs embroussaillés ou très dégradés (nombreux désordres et singularités). Soient A et B les extrémités du tronçon à investiguer : un cheminement possible du groupe d'opérateurs est de faire un premier aller A->B en crête de digue tout en implantant les éléments de repérage (jalons et topefil ou décamètre), puis un retour B->A sur l'un des talus (sans omettre l'examen du pied de talus et de la berge du cours d'eau, s'il se trouve à proximité) et, enfin, un deuxième aller A->B en décrivant le talus opposé.

Les riverains, rencontrés au hasard de la visite, doivent être interrogés sur le fonctionnement de la digue et les éventuels récents travaux d'entretien réalisés. La teneur des témoignages ainsi recueillis est reportée dans les zones de commentaires des fiches de désordres ou de profil en travers.

Saisie des informations sur le terrain :

Les modalités de saisie vont dépendre de la qualité des supports disponibles pour la visite :

A) CAS OÙ L'ON DISPOSE D'UN PLAN TOPOGRAPHIQUE À JOUR ET PRÉCIS (DE L'ORDRE DU 1/500) :

Il est ici envisageable de travailler sur le terrain directement sur un tirage de ce plan (en renvoyant à des fiches de désordres – cf. exemple en partie 3 ci-après – pour les annotations de détail ainsi qu'à des profils en travers levés sur des sections singulières), puis de mettre au propre ultérieurement ces informations au bureau. Les informations à porter sur fiches pourraient être saisies sur le terrain à l'aide d'un micro-ordinateur portable.

B) CAS OÙ L'ON NE DISPOSE QUE DE LA CARTE I.G.N. AU 1/25000 :

Un tel cas ne devra se présenter que lorsque le temps et les moyens auront manqué pour effectuer les travaux topographiques initiaux que nous recommandons. La description sur le terrain s'appuiera dès lors sur le levé de profils en travers avec respect d'un maillage systématique de base (exemple : un profil tous les 100 ou 50 mètres), les informations ponctuelles entre profils étant repérées en PK et saisies sur fiche (cf. modèle de fiche en annexe). Des profils supplémentaires pourront être levés aux sections singulières (exemple : présence d'un ouvrage ou

d'une construction sur, ou dans, le corps de digue, raidissement d'un talus, ...). Tous les profils seront mis au propre au bureau et, au minimum, repérés en PK et sur le meilleur support cartographique disponible.

Les riverains, rencontrés au hasard de la visite, doivent être interrogés sur le fonctionnement de la digue et les éventuels récents travaux d'entretien réalisés. Les témoignages ainsi recueillis sont consignés.

2.3 - TRAVAIL DE RESTITUTION AU BUREAU

L'essentiel de ce travail repose sur la mise au propre des informations récoltées sur le terrain : notes, croquis, profils en travers. Prévoir également tout le temps nécessaire au classement des photos réalisées et à l'établissement de légendes circonstanciées.

La saisie informatique des informations s'avère intéressante pour le suivi fin des ouvrages importants : des logiciels simples de type tableur ou base de données standard sont amplement suffisants à cette fin. L'idéal à ce titre est de faire développer une application informatique préprogrammée permettant de structurer et d'homogénéiser la saisie des informations à l'échelle d'un groupe d'utilisateurs suffisamment grand. Noter, cependant, que le temps nécessaire à la saisie informatique n'est jamais négligeable et que celle-ci gagne à être effectuée par l'opérateur ayant pris les notes sur le terrain.

3 - EXEMPLE D'UTILISATION D'UNE FICHE-TYPE DE RELEVÉ DES DÉSORDRES

3.1 - PRÉAMBULE

On dispose d'un plan topographique au 1/500 ou 1/1000 à jour du secteur de digue à inspecter.

La description s'opère à pied par tronçons élémentaires, de longueur prédéterminée, calés sur un PK existant et matérialisés provisoirement sur le terrain par au moins l'un des opérateurs (topofil ou mètre-ruban et jalons).

La surface de la digue à décrire est divisée, par convention, en 4 parties :

- berge du cours d'eau (rivière ou fleuve) ;
- talus et pied de digue côté rivière (dans le prolongement ou non de la berge) ;
- crête (y compris dispositif éventuel de revanche/rehausse) ;
- talus et pied de digue côté terre (ou val).

Pour chaque partie de digue comprise dans un tronçon élémentaire, les désordres et informations sur la constitution de l'ouvrage sont symbolisés sur le plan (à l'échelle dans toute la mesure du possible), au fur et à mesure de leur observation, avec une référence renvoyant à une ligne d'une fiche de relevé.

La fiche a pour objet de fournir, en complément des indications graphiques et des légendes directement portées sur le plan, des informations codées et alphanumériques (commentaires) qui pourront être stockées dans une base de données et exploitées par des outils d'analyse de données, le tout dans un format d'archivage commun, par exemple, à un groupe de gestionnaires.

3.2 - NOTICE D'UTILISATION DE LA FICHE

-> Organisation générale de la fiche :

Une fiche permet de décrire les quatre parties d'un tronçon élémentaire de digue : berge, talus de digue côté rivière, crête, talus de digue côté terre (ou val). Les deux cadres d'en-tête contiennent des informations générales et de repérage relatives au tronçon élémentaire, considéré dans son ensemble. Le corps de la fiche est divisé en 4 cadres se rapportant respectivement aux 4 parties de la digue définies ci-dessus. Les cadres de pied de page de la fiche sont constitués de tables aide-mémoire pour la codification à employer.

-> Informations d'en-tête :

A remplir, en principe et à l'exception des champs «Date» et «Opérateurs», avant le déplacement sur le terrain.

- **Date** : date du jour.
- **Commune** : nom de la commune de situation du tronçon élémentaire.
- **Lieu-dit** : nom du lieu-dit, le plus proche du tronçon, porté sur la carte IGN 1/25000.
- **Opérateurs** : nom des intervenants, avec en premier le nom du rédacteur de la fiche.
- **Longueur_tronçon** : longueur (en mètres) du tronçon décrit. Celle-ci correspond, sauf cas particulier, à une longueur fixe de tronçon élémentaire, prédéterminée préalablement au bureau pour l'ensemble d'un secteur de digue à reconnaître. Si, à la reconnaissance rapide préalable, la digue apparaît très hétérogène, mal dégagée (manque de visibilité du fait de la végétation) et/ou semble le siège de nombreux désordres, on optera pour une longueur de tronçon réduite (25 à 50 m).
- **Réf du PK** : référence en clair du PK de base utilisé pour le repérage longitudinal (ex : PK du logiciel COURSE).
- **Rive** : RD (rive droite) ou RG (rive gauche), selon le cas.
- **Page** : pour mentionner un numéro de page si la description tient sur plusieurs fiches.

-> Cadre repérage général (du tronçon décrit) :

- **PK** : coordonnée kilométrique, selon le PK de base utilisé pour le repérage longitudinal, du point de début du tronçon. Ce champ est, si possible, pré-rempli au bureau au moment de la délimitation des tronçons élémentaires. Sauf mention particulière, le PK du tronçon «n» est égal au PK du tronçon «n-1» additionné de la longueur (Longueur_tronçon) du même tronçon «n-1».

- **PM_déb** : indication métrique du point de début du tronçon, fournie par l'appareil de repérage de terrain (topofil ou mètre-ruban).

- **PM_fin** : indication métrique du point de fin du tronçon, fournie par l'appareil de repérage de terrain (topofil ou mètre-ruban).

En principe, $PM_{fin} = PM_{déb} + Longueur_tronçon$. Cependant, si un point de recalage par rapport au PK de base est exploité le long du tronçon décrit, le point métrique de fin est déplacé, si nécessaire, de façon à rétablir sa parfaite concordance avec le repérage PK. Enfin, si l'appareil de repérage sur le terrain (topofil) n'est pas réinitialisé, le $PM_{déb}$ du tronçon «n» est pris égal au PM_{fin} du tronçon «n-1».

-> Cadres de description des désordres et des observations par partie de digue :

Le corps de la fiche est divisé en 4 cadres se rapportant respectivement aux 4 parties adoptées conventionnellement pour la digue : berge de la rivière, talus et pied de digue côté rivière, crête y compris dispositif éventuel de revanche/rehausse, talus et pied de digue côté terre (ou val). La structure générale des cadres est identique d'une partie de digue à l'autre : seuls les codes «désordre» et «élément d'ouvrage» peuvent être différents (ex : le code «niveau de crue» [NVC] ne peut s'appliquer que sur les deux parties côté rivière (berge ou talus de digue), l'élément d'ouvrage «dispositif de revanche» [RVH] n'existe que pour la crête).

< Repérage/description des désordres >

Pour chacune des 4 parties de la digue, on dispose, dans les 3/4 gauche du cadre correspondant, de 6 ou 8 lignes, numérotées de 1x à 8x (ou 6x) (« x » est un symbole spécifique à chaque partie et destiné à éviter tout risque de confusion sur les indications du plan : « b » pour berge, « r » pour talus côté rivière, « c » pour crête, « t » pour talus côté terre (ou val), pour saisir autant (d'indices) de désordres ou de singularités :

- **Référ. dés.** : référence, comprise entre 1x et 8x (ou 6x), qui renvoie au même numéro porté sur le plan au 1/1000, dans la zone de digue concernée. S'il y a plus de 8 (ou 6) désordres à saisir pour l'une des parties du tronçon, il convient d'utiliser une deuxième fiche (sans numéro), en reprenant la numérotation à partir de 9x (ou 7x) et en rajoutant, dans le coin haut droit des fiches, les indications relatives à la pagination. Sur le plan lui-même, l'information est, si possible, symbolisée (au moyen d'une légende normalisée) et/ou dessinée à l'échelle.

• **Code désordr.** : code alphanumérique à 3 caractères décrivant la nature du désordre (de l'indice ou de la singularité). Ce code renvoie à une table aide-mémoire située en pied de page. Certains codes ne s'appliquent qu'à une partie spécifique de la digue (ex : **NVC/NVE**, pour laissée de crue/niveau d'eau, utilisable seulement pour les parties de digue côté rivière). D'autres codes «désordres» visent plus particulièrement les ouvrages rigides, maçonnés (en pierres maçonnées ou en béton) pour l'essentiel (ex : **DEJ** pour déjointoiement, **DES** pour déstructuration, etc. – cf. table correspondante). Quatre codes spéciaux peuvent, en outre, être utilisés ici pour repérer des éléments particuliers relevés ou exécutés lors de la visite et qui ne sont pas des désordres : **PZO** pour un piézomètre (si c'est possible, en relever le niveau lors de la visite), **SDG** pour un sondage, **PRV** pour un prélèvement de matériau de la digue (indiquer la profondeur et une éventuelle référence) et **PFT** pour un profil en travers (en préciser la justification).

Code ouvr. : code alphanumérique à 3 caractères qui permet d'indiquer, si nécessaire, l'élément d'ouvrage de la digue affecté par le désordre décrit. Ex : le code «ouvrage» **[RVT]** associé au code «désordre» **[FIS]** mentionne une fissure sur le revêtement de protection.

• **Nb** : nombre de désordres décrits au titre du numéro de référence. Si le nombre est plus grand que 1, il s'agit d'un ensemble de désordres (ex : terriers), soit regroupés sur une zone restreinte (**Repérage long.** ≠ vide), soit répartis sur toute la longueur du tronçon (**Repérage long.** = vide).

• **Repérage long.** : valeur métrique de repérage longitudinal «x (m)» d'un désordre ponctuel, comprise en valeur absolue entre 0 (minimum) et la valeur de **PM_fin - PM_déb** (maximum) ou couple d'extrémités du segment «x1 (m) - x2 (m)» pour repérage d'un ou plusieurs désordres se développant sur plusieurs mètres de longueur. Le champ laissé vide signifie que le désordre se remarque, ou s'étend, sur toute la longueur du tronçon.

• **PK (calculé)** : point kilométrique de repérage du désordre, selon le réseau de référence PK, calculé au bureau ou par le système informatique (si **Repérage long.** ≠ vide), en tenant compte de la correction éventuelle de repérage métrique issue d'un recalage PK.

Par exemple, si une erreur de mesure du repérage longitudinal peut être entièrement attribuée au dernier tronçon parcouru, le calcul du PK du désordre se formule comme suit (avec **Repérage Long.** > 0) :

$$PK[\text{désordre}] = PK[\text{tronçon}] + \text{Repérage long.}[\text{désordre}] / 1000 * (1 + (PM_{fin} - PM_{déb} - \text{Longueur_tronçon}) / \text{Longueur_tronçon})$$

Dans le cas contraire, le décalage constaté doit être réparti sur plusieurs tronçons successifs par l'application d'une formule appropriée.

• **Champs Photo :**

On indique, dans la colonne **Nb**, le nombre de photos (de détail) prises sur le désordre référencé et, dans la colonne **No**, le(s) numéro(s) de photo, sous la forme «nb1-nb2» s'il y en a eu plusieurs.

• **Description du(des) désordre(s) :** zone de commentaire libre pour toute information utile pouvant préciser la nature, l'étendue, la localisation ou les caractéristiques du désordre.

cod grav : notation subjective de la gravité du désordre, appréciée localement (c'est à dire au plan de la sécurité de l'élément d'ouvrage affecté ... et non de celle de l'ensemble de la digue) :

- => code 1 : amorce de désordre, désordre peu prononcé et/ou rare
- => code 2 : désordre prononcé et/ou assez fréquent
- => code 3 : désordre très prononcé et/ou omniprésent

Ex : une note 3 attribuée à des terriers [TER] répartis sur l'ensemble d'un talus [TAL] pourrait indiquer une très forte densité de débouchés de galerie.

< Observations sur l'ensemble du (de la partie de) tronçon >

L'extrémité droite du cadre de description de chacune des 4 parties de digue contient des informations qui se rapportent à l'ensemble du tronçon, pour la partie concernée.

Les 3 ou 4 (selon le cas) premières lignes servent à signaler la présence ou non (code **O/N/I** pour Oui/Non/Incertain) d'ouvrages annexes longitudinaux. La liste proposée comprend les principaux types d'ouvrage que l'on peut rencontrer sur telle ou telle partie de digue : RVT pour revêtement de protection sur le talus côté rivière, RVH pour dispositif de revanche sur la crête, etc. On mentionne, ensuite (champ **Précisions sur nature d'ouvrage**), pour les dispositifs existants, des compléments d'information sur leur nature et leur localisation (par exemple : s'ils ne couvrent pas toute la longueur du tronçon).

Le champ **Accès** permet, par la mention **O/N/I**, d'indiquer s'il existe un accès pour les engins mécaniques en pied de digue (pour les deux parties sur talus) ou en crête, selon le cas.

Le cadre **Photo d'ensemble** est utilisé pour référencer une prise de vue générale prise de la partie de digue concernée :

- **Rep. lg.(m) :** indication métrique (topofil ou mètre-ruban) du point de station du photographe.
- **Amont <—> Aval :** rayer le symbole inutile (< ou >) pour indiquer le sens de la prise de vue (amont => aval ou aval => amont).
- **Numéro :** numéro de la photo, lu sur l'appareil

La zone **Commentaire** permet de formuler des appréciations générales sur tout(e) (la partie de) le tronçon de la digue et de mentionner d'éventuels points particuliers à propos de la visite : par exemple, témoignage et coordonnées de riverain rencontré, etc.

3.3 - TABLES DES CODES DE DÉSORDRE ET GLOSSAIRE

-> Codes de désordre - toutes parties de digue :

- **CAN** : débouché de CANalisation, passage busé, dalot ou ouvrages annexes associés (ex : regard).
- **ERD** : EROsion longitudinale Diverse, autre que celle due au cours d'eau (ex : entaille du pied de digue par l'emprise d'un chemin ou d'une plateforme, «marche d'escalier»).
- **FIS** : FISsure dans le terrain ou sur une structure rigide.
- **FON** : FONtis, indice d'activité karstique (infiltration).
- **MVT** : affaissement, tassement, glissement, tout indice de MouVemenT du terrain ou d'une structure rigide (y/c basculement d'un mur ou d'un rideau de palplanche).
- **OSG** : Ouvrage SinGulier autre que canalisation (ex : construction, cave, mur dans le corps de digue, ouverture/porte dans la murette de réhausse).
- **RAV** : indice de RAVinement sur talus ou plateforme (a priori dans le sens transversal).
- **TER** : débouché de TERrier ou galerie d'animaux fouisseurs.
- **VEG** : présence de VEGétation arbustive et/ou arborescente, ou de souches.

-> Codes de désordre - partie côté terre :

- **DEP** : DEPression, étang, zone d'emprunt (au delà du pied de digue).

IFU : Indice de FUite (ex : zone humide, laisse de fuite après une crue).

-> Codes de désordre - parties côté rivière :

- **ERF** : EROsion (longitudinale) due au Fleuve.
- **NVC** : NiVeau / laisse de Crue.
- **NVE** : NiVeau d'Eau (de la rivière), à repérer systématiquement le jour de la reconnaissance lorsque le cours d'eau baigne le pied ou le talus de la digue.

- **PLI** (pour talus de digue uniquement) : Proximité du LIt mineur (talus ou pied de digue dans le prolongement direct - moins de 1 mètre, par convention - de la berge, glissée ou non, du cours d'eau).

-> Codes de désordre - sur ouvrages maçonnés ou rigides annexes :

- **ALT** : ALTération des pierres ou du béton d'un ouvrage de maçonnerie, corrosion d'un ouvrage métallique.

- **DEC** : DECollement, dissociation, mauvais contact entre 2 éléments d'ouvrage de nature différente (ex : décollement entre murette de revanche et son assise sur la digue).

- **DEJ** : DEJointoiement, pierres enlevées sur maçonnerie.

- **DES** : DEStructuration d'un ouvrage (au sens de désordre affectant la structure : effondrement, démantèlement, ...).

-> Codes de désordre spéciaux :

- **PFT** : ProFil en Travers dressé lors de la visite (à ne saisir qu'une seule fois dans le cadre correspondant à la partie de digue où une observation particulière a motivé le levé du profil, indiquer dans le champ «description» le motif du levé).

- **PRV** : PRélèvement de matériau de la digue effectué lors de la visite de reconnaissance (à repérer comme un désordre sur la partie de digue concernée, indiquer dans le champ «description» le motif et la profondeur du prélèvement ainsi que le numéro du sachet où l'échantillon a été conditionné).

- **PZO** : tête de PiéZOmètre découverte ou observée lors de la visite (à repérer comme un désordre sur la partie de digue concernée).

- **SDG** : SonDaGe (en principe, à la tarière manuelle) effectué dans la digue au cours de la visite (à repérer comme un désordre sur la partie de digue concernée, indiquer dans le champ «description» le motif et la profondeur du sondage ainsi que la référence de la coupe géologique).

-> Codes (éléments d') ouvrages :

Ces codes sont utilisés, soit pour indiquer quel élément d'ouvrage de la digue est affecté par le désordre saisi (cadre de description des désordres), soit pour signaler l'existence ou l'absence de cet élément d'ouvrage sur la partie de digue décrite (cadre d'observations d'ensemble). Il s'agit, en principe, d'ouvrages longitudinaux, c'est à dire dont la plus grande longueur est parallèle à l'axe de la digue :

- **CHE** : CHEmin de service, en pied de talus ou en crête.

- **FOS** : FOSsé (ou contre-fossé) côté terre en pied de digue.

- **MUR** : MUR de soutènement, sur un talus de la digue.
- **PPI** : Protection du Pied de la digue (massif en enrochements, risberme en terre, rideau de palplanches ou de pieux), en principe côté rivière.
- **RCH** : ReCHarge ou engraissement du talus de la digue, côté terre (val) ou côté rivière.
- **RTE** : RouTE (chaussée goudronnée).
- **RVH** : ouvrage de ReVancHe ou de rehausse en bordure de crête, banquette (en terre) ou murette (en pierres maçonnées ou en béton, selon le cas).
- **RVT** : ReVêTement de protection du talus de la digue (pierres maçonnées, béton, ou éléments préfabriqués).
- **TAL** : TALus (non revêtu) de la digue, côté terre (val) ou côté rivière.

-> Code AUT :

Partout, pour autres ou divers.

Pièce ci-jointe :

- 1 fiche vierge de relevé des désordres

INSPECTION VISUELLE DES DIGUES DU										Opérateurs:		Réf du PK :		Longueur_tronçon (m):			
Date : Commune :										Lieu-dit :		Rive : RD / RG		Page :			
Repérage général				PK :				PM_deb :				PM_fin :					
Parties côté Fl.	Référ. dés.	Code dés.	Code ouv.	Nb	Repérage long. (m)	PK (calculé)	Photos Nb No		Description du(des) désordre(s)	code grav	Observations d'ensemble : ouvrages longitudinaux/accès/photos						
											Code O/N/I	Précision(s) sur nature d'ouvrage					
Berge de la rivière	1b										PPI						
	2b										RVT						
	3b																
	4b																
	5b																
	6b											Accès:	Photo	Rep.lg.(m)	Direction	Numero	
	7b											d'ensemble		Amont<-->Aval			
	8b											Commentaire:					
Talus de digue côté rivière	1r										PPI						
	2r										RVT						
	3r																
	4r																
	5r																
	6r											Accès:	Photo	Rep.lg.(m)	Direction	Numero	
	7r											d'ensemble		Amont<-->Aval			
	8r											Commentaire:					
Crête	Référ. dés.	Code dés.	Code ouv.	Nb	Repérage long. (m)	PK (calculé)	Photos Nb No		Description du(des) désordre(s)	code grav	Observations d'ensemble : ouvrages longitudinaux/accès/photos						
												Code O/N/I	Précision(s) sur nature d'ouvrage				
	1c										RVH						
	2c										CHE						
	3c																
	4c											Accès:	Photo	Rep.lg.(m)	Direction	Numero	
Crête de digue	5c											d'ensemble		Amont<-->Aval			
	6c											Commentaire:					
	Partie côté Tr.	Référ. dés.	Code dés.	Code ouv.	Nb	Repérage long. (m)	PK (calculé)	Photos Nb No		Description du(des) désordre(s)	code grav	Observations d'ensemble : ouvrages longitudinaux/accès/photos					
													Code O/N/I	Précision(s) sur nature d'ouvrage			
		1t										RCH					
		2t										FOS					
3t																	
4t																	
5t												Accès:	Photo	Rep.lg.(m)	Direction	Numero	
6t												d'ensemble		Amont<-->Aval			
Talus / pied de digue côté terre (val)	7t											Commentaire:					
	8t																
Table des codes de désordre	Toutes par-ties :	VEG:Végétation	RAV:Ravinement	OSG:Ouvr. singul.	MVT:Afaisse/ Tasst/Gliss/Bascult	FIS:Frissure	CAN:Canalisation/Passage busé	FON:Fontis	ERD:Erosion long.diverse/Entaille	TER:Terrier	Partie côté terre :	DEP:Depression/Etang	IFU:Indice de fuite	Désordres s/ouvrage maç/anx :	DEJ : Dépointoyage/Pierres enievées	DES:Déstructuration	Partout : AUT :
	Codes (éit) (d)ouvrage	RCH:Recharge/Engraissement	MUR:de soutènement	CHE:Chemin (de service)	FOS:(contre-)fossé	PPI:Protection de pied (enrochements, palplanches, nsberme)	RVT:Revêtement (de protection)	TAL:Talus	PRV:Prélevement	PZO:piézomètre	PFT:Profil en travers	SDG:sondage					

Fiche vierge de relevé des désordres

Annexe 4

Note de présentation d'un exemple d'inspection post-crue et de premiers travaux d'urgence

INSPECTION VISUELLE DES DIGUES DE L'AGLY (66)
SUITE À LA CRUE DU 12-13 NOVEMBRE 1999 ET TRAVAUX DE RÉPARATION

1 - PRÉSENTATION RAPIDE DU CONTEXTE DE L'INSPECTION

1.1 - LES ENDIGUEMENTS DE LA BASSE PLAINE DE L'AGLY

L'Agly est un fleuve côtier méditerranéen, au bassin versant d'un peu plus de 1000 km², dont les crues – courtes mais violentes – ont toujours été redoutées des habitants de la plaine de la Salanque, qui s'étend au nord de la ville de Perpignan (Pyrénées Orientales). La crue catastrophique de 1940 est notamment dans toutes les mémoires.

Avant 1970, des endiguements partiels et de faible hauteur existaient le long de l'Agly. Au début des années 1970, le fleuve a fait l'objet d'un aménagement lourd consistant en une chenalisation du lit et un endiguement systématique sur les deux rives du pont de la Route Nationale n°9 (Perpignan-Narbonne) à la mer Méditerranée, soit 13,2 km. Les digues, en limon, dominent la plaine d'environ 2 à 3 m. La largeur en crête est de 8 m avec un chemin empierré à l'amont de la portion aménagée et revêtu à l'aval. Côté fleuve, la hauteur totale est de 6 m, coupée par une risberme à mi-hauteur ; le talus est protégé par des enrochements en partie basse (y compris une bêche para fouille) en section courante et sur toute la hauteur dans les courbes concaves et, localement, par des dalles en béton (vestiges de travaux de protection réalisés après la crue de 1940).

Par constitution, les digues de l'Agly sont situées dans le prolongement direct des berges du lit mineur (absence de ségonnal ou de franc-bord, si on fait abstraction de la petite risberme) et sont donc soumises à des sollicitations hydrauliques très fortes.

1.2 - LA CRUE DES 12 ET 13 NOVEMBRE 1999

L'épisode pluvieux exceptionnel des 12 et 13 novembre 1999 a entraîné une crue de l'Agly dont le débit - de l'ordre de 2000 m³/s enregistrés, en pointe, à la station de Rivesaltes - a dépassé la capacité du tronçon endigué (1500 m³/s en débit de plein bord) en aval de Rivesaltes.

En conséquence, le flot a débordé, pendant une période de l'ordre d'une heure, au-dessus des digues en de nombreux points et sur les deux rives, entraînant divers désordres dont le plus spectaculaire est une brèche d'environ 50 m de longueur au droit de la station d'épuration de Saint-Laurent-de-la-Salanque avec des dégâts importants sur cette dernière.

On a observé également de nombreuses zones d'érosion du talus aval (côté plaine ou val) et quelques points ayant présenté des écoulements singuliers dans la fondation ou à travers la digue.

1.3 - OBJECTIFS DE L'INSPECTION

Début décembre 1999, le Syndicat Intercommunal de l'Agly Maritime - gestionnaire des ouvrages depuis l'époque de leur création - a confié au Cemagref d'Aix-en-Provence une mission d'inspection post-crue de l'ensemble de l'endiguement, complétée d'un programme minimal de reconnaissances géotechniques sur divers secteurs à singularités. L'objectif de cette intervention était d'effectuer un diagnostic rapide, aussi complet que possible, des ouvrages et de définir les travaux prioritaires nécessaires à la remise en état des digues.

Dans le détail, cette mission comprenait :

- l'inspection visuelle des digues rive gauche et rive droite en aval de la RN 9, à trois opérateurs (dont un agent de la Direction départementale de l'Équipement) - à réaliser avant fin décembre 1999 ;
- le report des observations sur fiches et plans ainsi que la constitution d'un dossier photographique ;
- des investigations géotechniques sur certaines zones singulières (à base de sondages et prélèvements d'échantillons de sols à la pelle mécanique), avec essais de mécanique des sols en laboratoire ;
- la rédaction d'un rapport de synthèse avec définition des techniques de réparation et de confortement à mettre en œuvre et des éventuelles reconnaissances complémentaires.

2 - INSPECTION VISUELLE POST-CRUE DES DIGUES

2.1 - MÉTHODE ADOPTÉE

Les visites d'inspection visuelle post-crue ont eu lieu en rive gauche les 14, 16 et 17 décembre 1999 et en rive droite les 15, 29 et 30 décembre 1999. Elles ont été effectuées par trois opérateurs, dont deux équipés d'un carnet de note et d'un appareil photographique. Une visite supplémentaire, réalisée les 9 et 10 mars 2000, a permis de compléter l'inspection.

2.1.1 - REPÉRAGE

Le repérage métrique a été assuré par un topofil dont le point de départ (Pm 0) était le parement aval des culées du pont de la RN 9. Les mesures métriques

obtenues au topofil ont été recalées régulièrement sur des points de repères fixes (carrefours, limites de parcelles, etc.). Ceci a permis d'apporter ensuite, au bureau, les corrections nécessaires d'après les indications du plan disponible au 1/5000.

Il existe, donc, deux repérages métriques – un pour la digue rive gauche et un pour la digue rive droite – qui ont servi de références pour toute l'étude.

Après vérification au cours de visites ultérieures, on peut estimer que l'intervalle d'incertitude des indications métriques des informations, par rapport aux points de rappel bi-kilométriques qui ont été portés sur les plans au 1/5000, est compris entre 5 et 15 m, toutes sources d'erreur confondues et selon la distance à la crête de l'information repérée.

2.1.2 - RÉPARTITION DES TÂCHES

L'opérateur se déplaçant en crête de digue était chargé du repérage métrique à l'aide du topofil et du signallement des désordres sur le couronnement de l'ouvrage, la piste et ses accotements.

Un second opérateur était chargé de l'inspection visuelle du talus côté fleuve et de la berge.

Le troisième opérateur s'occupait de la description du talus côté plaine (ou val), en prenant note des informations données par l'opérateur en crête de digue pour ce qui concerne le couronnement.

Le rendement de l'inspection sur le terrain a été de l'ordre de 4,5 à 5 km de digues par jour, à trois opérateurs.

La mise au propre des informations au bureau (fiches descriptives, légendes des photographies, cartographie) s'est faite avec une cadence de 3 à 4 km par jour, à deux opérateurs (un traitant les informations relatives au côté fleuve et l'autre celles relatives au côté plaine et à la crête).

2.1.3. - FICHES DESCRIPTIVES

Les comptes rendus de visite ont été retranscrits sous forme de tableaux, et de façon linéaire (cf extraits en § 2.2).

Une fiche descriptive donnée correspond à un tronçon-date (portion de digue parcourue dans la journée indiquée), à un triplet d'opérateurs et à un des deux talus de digue visités.

Le nom de l'opérateur concerné par le talus décrit dans la fiche figure en gras dans l'en-tête de celle-ci. La date de la visite ainsi que le repérage métrique (Pm début – Pm fin) sont également précisés pour chaque tronçon.

Exemple d'en-tête de fiche :

Journée du 14 décembre 1999 :
Pm : 0 à 3850

opérateur côté fleuve : Cyril Folton (Cemagref)
 opérateur côté val : Sébastien Villa (DDE 66)
 opérateur crête : Sébastien Merckle (Cemagref)

Repères métriques	Description	Photos	Code photo*
----------------------	-------------	--------	----------------

- Le repère métrique (Pm) est celui du point (ou du tronçon) décrit donné par le topofil, après correction au bureau.
- La description concerne la nature des talus ou du (des) désordre(s) observé(s).
- La ligne figure en gras lorsque la description ou le désordre concerne un tronçon homogène.
- La description de singularités, ponctuelles ou non, à l'intérieur d'un tronçon homogène est en caractère normal dans le tableau.

2.1.4. PHOTOGRAPHIES

Trois types de photographies (au nombre de 400 au total) ont été réalisés :

a) Des photos numériques : dont le n° de code est par exemple «RGval-pm7058.n», avec la codification suivante :

- RG pour rive gauche et RD pour rive droite,
- val pour une photo concernant le val,
- crête pour une photo concernant la crête,
- pour le talus de berge côté fleuve, le code est simplement RG ou RD,
- pm7058 indique enfin le point métrique d'où a été prise la photo,
- « N » pour numérique. (2) N ou (3) N signifie qu'il y a 2 ou 3 clichés de la même vue.

b) Des diapositives : dont le n° de code est par exemple «Pm 8598 - 3 D», avec :

- 3 pour le n° inscrit sur la diapositive,
- Pm 8598 pour le point métrique de la prise de vue,
- « D » pour diapositive.

c) Des photographies sur support papier : dont le n° de code est du même type que pour les diapositives, suivi de « P » pour papier. Les clichés complémentaires pris à l'occasion des visites des 9, 10 mars et 19, 20 janvier sont signalés par la date de prise de vue entre parenthèses.

La mention éventuelle « amont » ou « aval » suivant la référence métrique de la photo (ex : Pm 8598 – amont) indique que la photo a été prise depuis le Pm vers l'amont ou vers l'aval, par rapport au sens d'écoulement de l'Agly.

2.1.5 - CARTOGRAPHIE

Les principales observations issues des fiches descriptives ont été portées sur des planches au format A3 (copie de plans au 1/5000 de juillet 1993). La légende des cartes est la suivante :

Protection des talus	Continue	Discontinue ou incertaine
Enrochement du bas de berge (en dessous de la risberme)		
Enrochement de la totalité de la berge (y compris le talus de la digue)		
Réparation récente en enrochements (parfois maçonnés)		
Mur ou protection en béton		
Épis récents (enrochements)		

Arbres	Isolés	Tombés ou déracinés
Arbres		
Arbres en bosquets		

Dégradations	Isolées	Nombreuses
Affouillement ou érosion du pied (sabot para fouille attaqué s'il existe)		
Terriers		
Glissement de talus		
Érosion localisée		
Remontées artésiennes près du pied de digue côté val		
Zone de surverse supposée		

Autres informations portées sur les plans :

- traversée de conduite ;
- points de rappel bi-kilométriques du repérage métrique ;
- position du lit mineur notée lors de la visite ;
- lit mineur ou bras secondaire en contact avec le pied de berge ou le sabot de pied.

2.2 - EXTRAITS DE TABLEAUX DE RELEVÉ DES INFORMATIONS

Inspection visuelle post-crue de la digue rive gauche de l'Agly

A. Talus côté Fleuve

Le secteur décrit est la digue rive gauche de l'Agly de l'aval du pont de la R.N 9 à la mer. Les points de repère métrique ont comme origine la pile rive gauche aval du pont.

Journée du 14 décembre 1999 :

**opérateur coté fleuve : Cyril Folton
(Cemagref)**

Pm : 0 à 3850

**opérateur coté val : Patrice Mériaux Cemagref
opérateur crête : Sébastien Merckle (Cemagref)**

*** Code photo :** N pour les photos numériques ; D pour les diapositives et P pour les photos papiers.

Repères Métriques	Description	Photos	Code photo*
0	Pont Route Nationale 9.		
0 à 90	La berge comporte trois zones : • Le haut de berge est un talus à forte pente de 2,5 m de hauteur environ recouvert de cannes de Provence. • Une risberme horizontale de 3 m de largeur est protégée par de gros enrochements.. Le bas de la berge est également protégé d'enrochements recouverts de dépôts limoneux et envahis de cannes de Provence.		
20	Enrochements désordonnés de la risberme.	RG-pm20 amont	N
70	Élargissement du ségonnal en pied de digue (5 à 10 m).		
90	Fin des enrochements en haut de berge et apparition de terriers. Important dépôt limoneux en bas de berge.	RG-pm90 aval	N
120	Arbres sur risberme.		
150	Enrochements apparents sur berge basse.		

190 à 380	Terriers, enrochements de bas de berge désordonnés ; cannes sur haut de berge et risberme.	RG-pm190 terriers.	N
229	Arbre dessouché en pied.		
260	Présence de taupes.		
275	Profil type : enrochements de la risberme et cannes de Provence	RG-pm275 aval.	N
380 à 551	Arbres et arbustes sur la risberme, le ségonnal a une largeur de 20 m environ.	RG-pm380 aval. RG-pm495 berge	N
390	Terrier de renard ou blaireau situé 1 m sous la crête.	RG-pm390 terrier.	N
475	Terrier de blaireau.	RG-pm475 terrier.	N
486	Terriers situés 1.5 m sous la crête.		
494	Terriers.		
502	Effondrements d'anciens terriers.		
508	Laisses de crue à 0.50 m sous la crête.		
512	Terriers.		
555 à 620	Taupes. La berge haute est recouverte de cannes, et la berge basse est protégée d'enrochements plus petits (0.40 m)	RG-pm550 berge aval	N
605	Terriers, diamètre 40 cm.		
620 à 837	Enrochement total de la berge, arbustes sur risberme et cannes.	RG-pm620 enrochements	N
670	Enrochements de la risberme désordonnés.		
700	Enrochements de taille supérieure à 1000 mm et plus.		
742	Enrochements désordonnés, laisses de crues dans les arbres de la risberme et embâcles.	RG-pm742 enrochements et laisses	N
825	Rejet d'eau pluviales. Le ségonnal s'élargit à 30 m environ.	RG-pm825 rejet E-P	N

Inspection visuelle post-crue de la digue rive gauche de l'Agly B. Talus côté val (et crête)

Le secteur décrit est la digue rive gauche de l'Agly de l'aval du pont de la R.N 9 à la mer. Les points de repère métrique ont comme origine la pile rive gauche aval du pont.

Journée du 14 décembre 1999 : opérateur coté fleuve : Cyril Folton (Cemagref)
Pm : 0 à 3850 opérateur coté val : Patrice Mériaux (Cemagref)
 opérateur crête : Sébastien Merckle (Cemagref)

*** Code photo :** N pour les photos numériques ; D pour les diapositives et P pour les photos papiers

Repères Métriques	Description	Photos	Code photo*
0	Pont Route Nationale 9.		
0-275	Talus dont la hauteur croît progressivement de 0,8 m à 1,4 m, de l'amont vers l'aval. Pente en général douce (inférieure à 50 %). Par places, îlots ou rangées de cannes, parfois de broussailles. Chemin de service en pied.	Pm0-aval Pm275-amont Vues générales	2 P 3 P
0-35	Talus embroussaillé (y compris quelques jeunes arbustes). Fosse d'affouillement au débouché aval du passage ARMCO sous RN9 (due a priori à un écoulement provenant de l'amont de la route). Chemin de pied de digue rejoignant presque celui de crête. Petite érosion de talus (sol caillouteux) au droit du transformateur EDF. Pluviomètre au PM25 en bordure de la crête, côté Val.	Pm35-amont Fosse au débouché de la buse ARMCO	0-1 P
60-80	Rangée d'arbustes en pied de talus.		
90	Bretelle de liaison entre les chemins de pied et de crête.		
90-140	Canes de Provence sur le rampant. Hauteur du talus : environ 0,8 m.		
140-190	Hauteur du talus s'élevant à 1,4 m. Rangée de cannes en bord de crête où le talus présente une petite raideur.		
190-210	Le talus se radoucit.		
210-275	Pas ou peu de cannes.		
275-475	Talus avec cannes, à pente localement raide et de hauteur de l'ordre de 1,5 m. Chemin de service en pied.		
298	Terrier de diamètre 40 cm à mi-pente (sol sableux, crottes de lapin).		

340	Pente du talus : 53 % (clisimètre). Toujours des cannes.		
350	Talus raide : 70-80 %. Hauteur : 1,5 m.		
400	Ancien terrier de diamètre 20 cm, au tiers inférieur du talus.		
440	Amorces de terrier de diamètre 20 cm (sol limoneux).		
450	Amorces de terrier de diamètre 10 cm, au tiers inférieur du talus.		
400-450	Laisses de crue visibles côté val dans les vignes.		
475	Petite construction en moellons (présence d'un reniflard et d'une alim) au pied Est du pylône électrique. L'extrémité déviée du chemin entaille légèrement le pied de digue.		
475-810	Talus de hauteur de l'ordre de 1,8-2,0 m, avec cannes en couverture plus ou moins dense. Absence de chemin de service en pied.	Pm600-amont Vue générale	4 P
485	Pente du talus : 50 %. Hauteur : 1,8 m.		
660-680	Laisse de crue en pied de talus : 0,3 à 0,4 m au dessus du TN. Crottes de lapin sur le sol.		
670-700	Hauteur du talus : 1,7 m.		
752	Hauteur du talus : 1,5 m.		
750-780	Amorces de terrier de lapin en pied de talus.		
810-1030	Talus de moindre hauteur (1,4 m à 1,2 m). Couverture de cannes variable. Toujours pas de chemin en pied.		
810	Chemin transversal atteignant la crête. Regard avec tampon fonte sur le chemin au delà du pied de digue. Regard d'arrosage un peu plus loin dans le champ (puits ? + pompe).		

3 - COMPTE RENDU DE VISITE-DIAGNOSTIC ET PROPOSITIONS DE TRAVAUX (SYNTHÈSE)

L'inspection visuelle post-crue des digues de l'Agly – complétée par quelques sondages de reconnaissance à la pelle mécanique – a permis d'inventorier, de repérer et de caractériser les désordres subis par les ouvrages (digue et protections de berge) suite à l'événement des 12 et 13 novembre 1999 et a servi de support à la définition des travaux de réparation et de confortement d'urgence (qui ont, pour la plupart, été réalisés au cours du printemps 2000).

3.1 - SECTEURS DE SURVERSE AU DESSUS DES DIGUES

Côté rive gauche, les zones de digue ayant surversé (dont la brèche de la station d'épuration de St-Laurent-de-la-Salanque) ont été réparées dans les jours qui ont suivi la crue.

Côté rive droite, l'inspection visuelle a permis de répertorier, de façon exhaustive, les secteurs où des surverses avaient provoqué des érosions importantes (griffes, niches, glissements) sur le parement aval de la digue. Ceci concerne essentiellement trois zones dans la partie aval de l'aménagement (au delà du point métrique 9500), pour un linéaire cumulé d'environ 550 m.

Ces zones gravement érodées devaient être réparées de manière urgente car constituant des points de faiblesse potentielle dans la digue : extrême sensibilité à l'érosion surtout en cas de nouvelle surverse (concentration des écoulements due aux excavations et aux irrégularités), instabilité des talus subverticaux qui s'étaient créés, réduction de la longueur des lignes de fuite (risque d'érosion interne sous la charge hydraulique). La question du traitement de fond des surverses n'est pas abordée ici (se reporter au § 3.6 ci-après).

Travaux proposés et mis en œuvre :

Réalisation d'un massif de remblai compacté et drainé en fondation par un tapis granulaire, en vue de reconstituer un talus aval ayant de bonnes caractéristiques mécaniques et assurant un drainage correct de cette partie de la digue.

3.2 - ZONE DE FUITE ET DE CORPS DE DIGUE PERMÉABLE

L'inspection visuelle post-crue a décelé les indices manifestes d'une fuite ayant débouché sur le talus aval en un point métrique précis de la digue rive droite (Pm 1720). Des reconnaissances complémentaires à la pelle mécanique ont permis de trouver l'explication de cette fuite – à savoir la présence d'un massif de gros enrochements à l'intérieur du corps de digue – et de délimiter l'extension longitudinale de l'anomalie de constitution qui en est la cause (soit une cinquantaine de mètres).

Le principal risque induit par une telle configuration de digue hétérogène et non étanche était celui du développement d'une érosion interne (renard), en particulier au droit des zones de transition «enrochements / limons» dont le nombre et la géométrie n'étaient pas connus. En fait, ce secteur de digue est apparu singulier sur plus de 400 m de longueur parce qu'englobant dans son talus côté fleuve un ancien mur en béton (protection du talus situé à l'extrados d'une courbe de la rivière), en arrière duquel on a relevé localement d'autres indices de désordre tels que des trous ou des fontis.

Travaux proposés et mis en œuvre :

Dans l'objectif de reconstituer une étanchéité satisfaisante de la digue et compte tenu du caractère hétérogène du remblai, il a été proposé de substituer le mur en

béton dégradé du talus côté fleuve par un dispositif de soutènement et de protection formé de gros enrochements soigneusement maçonnés.

3.3 - ÉROSION DU SABOT PARAFOUILLE EN PIED DE BERGES

Le profil-type de 1970 pour la construction des digues de l'Agly prévoyait la mise en œuvre systématique (c'est à dire sur l'ensemble du linéaire à endiguer) d'un sabot parafouille en gros enrochements (300 kg à 2500 kg) de 3,5 m de largeur et de 1,2 m d'épaisseur. D'une façon générale, l'inspection visuelle de décembre 1999 a montré qu'aux points – par exemple, en pied de berge affouillé – où l'on devrait voir ce sabot, il s'y trouvait effectivement et présentait une largeur souvent supérieure à celle prévue au projet (jusqu'à plus de 5 m).

Sur un certain nombre de tronçons, qui ont été repérés sur plans, ce sabot a été attaqué lors de la crue de novembre 1999 et emporté sur une partie de sa largeur : ceci concerne une longueur cumulée de l'ordre de 1,4 km en rive droite et de 1 km en rive gauche. Parfois, le sabot affouillé se trouve en contact direct avec le lit vif actuel de l'Agly - ce qui est une situation aggravante car l'affouillement risque de se poursuivre en débit d'étiage et lors des crues courantes. Nulle part, cependant, les protections de berge elle-même ne semblent avoir été touchées de manière significative : ce qui atteste d'un comportement hydraulique plutôt satisfaisant de ces aménagements de protection, y compris sous les conditions sévères maximales du débit de plein bord.

Le fusible - que constitue en quelque sorte le sabot parafouille - a donc bien fonctionné aux points où cela s'avérait nécessaire et il convient de le reconstituer dans la perspective de sollicitations futures.

Travaux proposés et mis en œuvre :

Reconstitution, à l'aide de gros enrochements secs, du sabot parafouille, au minimum dans ses dimensions d'origine, et comblement des fosses d'affouillement.

3.4 - REMONTÉES DUES AUX PRESSIONS DE LA NAPPE

Sur deux secteurs précis de digue (un en rive gauche et un en rive droite), ont été observés, à l'inspection visuelle post-crue et dans une bande d'un vingtaine de mètres longeant le pied du talus côté plaine, des formes singulières : tantôt cratères ou affaissements de 0,5 à 2 m de largeur, tantôt dômes circulaires très réguliers jusqu'à 1 m de diamètre. Une prospection par tranchées à la pelle mécanique a permis de constater que ces formes n'étaient apparues que dans les zones où une couche de limons recouvre les graviers alluvionnaires de fondation des digues.

L'explication des phénomènes serait la suivante : du fait de la présence de cette couche relativement imperméable, la nappe d'accompagnement de l'Agly se met en pression lorsque le fleuve est en crue et fait monter la charge derrière ses digues. Il se crée ainsi un gradient de pression entre la base de la couche de limon et son sommet. Si la couche de limons est suffisamment épaisse, le «couvercle est

bien verrouillé» et rien ne se passe ; dans le cas contraire (seuil d'épaisseur situé aux alentours de 2 mètres ?) et sous l'effet de la pression qui cherche à se soulager, il y a diffusion d'air - d'où l'observation de bulles mentionnée par des témoins -, d'eau et probablement de particules de sol entraînées, au travers de la couche de limon (dont les figures en relief ou en creux observées seraient les signatures).

Le principal risque qu'entraînent ces phénomènes pour la digue est de se produire sur ou à proximité immédiate du pied du talus aval qu'ils pourraient de ce fait déstabiliser.

Travaux proposés et mis en œuvre :

Création d'un dispositif de décompression basé sur une tranchée drainante de 1,5 m de profondeur maximum, longeant le pied de digue à une distance minimale de 2 mètres (afin de ne pas risquer d'en déstabiliser le pied lors du creusement de la fouille provisoire) et destiné à drainer les sous-pressions incriminées là où leurs conséquences seraient susceptibles de porter préjudice à la digue, c'est à dire vers le pied du talus aval.

3.5 - ZONES DE FISSURATION LONGITUDINALE EN CRÊTE DE DIGUE

Comme à la suite de la crue d'octobre 1992, a été relevée - ici, sur deux sections de la crête de digue rive droite - l'apparition d'une fissuration longitudinale dont la position et la forme (en arc de cercle) pouvaient présager d'une amorce de glissement du talus côté fleuve. Cependant, à la différence des désordres observés en 1992, l'inspection visuelle postérieure à la crue de 1999 n'a permis de déceler, à proximité de ces deux nouvelles zones de fissuration en crête, aucun indice tangible de déformation du talus (ni moutonnements sur le rampant, ni bourrelet sur la risberme). Il faut dire que la surface des talus côté fleuve était, dans les deux cas, fortement perturbée par de nombreux terriers qui n'ont pas facilité l'observation et qui ont, par ailleurs, sans doute une part de responsabilité dans les désordres (en ayant favorisé l'imbibition, lors de la crue, des matériaux du corps de digue).

De tels mouvements de terrain à la décrue - même s'ils ne conduisent pas à la formation d'une brèche - sont préjudiciables car ils portent atteinte à la géométrie et à l'intégrité de la digue.

Travaux proposés et mis en œuvre :

Dans la mesure où les travaux de stabilisation des trois glissements déplorés après la crue de 1992 se sont avérés efficaces (aucun nouveau désordre signalé, en ces points précis confortés, lors de l'inspection consécutive à la crue de novembre 1999), il a été suggéré, en toute logique, de mettre en œuvre, à titre préventif, un confortement du même type au droit des deux nouvelles zones de fissuration : purge des matériaux minés et potentiellement instables du talus côté fleuve et de la risberme (si non enrochée) et substitution par un massif en gros enrochements secs.

3.6 - DIVERS DÉSORDRES

D'autres désordres - plus ponctuels ou a priori moins préoccupants - ont été diagnostiqués au titre de la mission d'inspection post-crue :

- zone(s) de fuites suspectée(s) : témoignages à recueillir et surveillance en crue à mettre en place ;

- terriers de fouisseurs : il s'agit essentiellement de terriers de lapins - dont l'ouverture est parfois agrandie par les chiens. Les zones significativement dégradées s'avèrent plutôt ponctuelles. Traitements préconisés : colmatage par petits terrassements, revêtement d'enrochements (lorsqu'il y a association avec un confortement du talus) ou pose d'un grillage anti-fouisseurs après reprofilage, selon le cas ;

- végétation : elle est peu entretenue sur les talus de la digue *sensu stricto*. Elle gêne, de fait, la surveillance visuelle (cannes de Provence), est favorable à la quiétude des animaux fouisseurs et peut être une source directe de désordres (arbres arrachés). D'un autre côté, la végétation arborescente apporte une certaine diversité au milieu artificiel et monotone que forme le lit endigué de l'Agly. De plus, la crête de digue est large (de l'ordre de 8 m), ce qui va dans le sens d'une relative sécurité vis-à-vis du risque de renard dû au pourrissement des racines des arbres. Il a donc été préconisé de tendre vers un couvert herbacé, annuellement fauché, sur les talus de digue *sensu stricto* et d'élaborer, de façon concertée, puis de mettre en œuvre, un plan de gestion de la végétation des berges et du lit chenalisé ;

- fontis : des phénomènes incontestables de fontis se sont manifestés localement en crête de digue quelques jours après la crue et ont, parfois, continué à évoluer ensuite sur plusieurs semaines. Leur apparition résulte, en général, de la présence d'hétérogénéités dans le corps de digue : ont été préconisés, suivant les cas, une surveillance attentive en crue et post-crue et/ou des travaux de reprise de l'étanchéité de la digue.

Il a été, enfin, recommandé au syndicat, maître d'ouvrage, de se doter d'un outil cartographique performant de gestion des digues, dont la fonction première serait de pouvoir répertorier, au jour le jour, la nature et la localisation des travaux de réparation et d'entretien réalisés. Dans l'attente d'un tel outil, qui fait cruellement défaut aujourd'hui, il a été demandé de faire établir, chantier par chantier (et, en particulier pour ceux consécutifs à la crue de 1999), les dossiers et plans des *ouvrages conformes à l'exécution*.

3.7 - VERS UN TRAITEMENT DE L'ALÉA DE SURVERSE

Lors de la crue de novembre 1999, les surverses se sont produites parce que le débit de la crue a dépassé la capacité du lit endigué de l'Agly.

Depuis l'époque du reprofilage du lit et de la construction des digues au milieu des années 1970, l'Agly aménagée aura, donc, connu un débit de plein bord (crue d'octobre 1992) et un débit de surverse (crue de novembre 1999) : ceci corrobore le fait que les digues ont été conçues pour assurer la protection contre une crue d'occurrence vingtennale à trentennale.

Peu importe le chiffre exact. Il est évident que des surverses vont se reproduire plusieurs fois par siècle et qu'en l'absence de déversoirs¹, celles-ci provoqueront à nouveau des brèches² impossibles à localiser par avance et entraînant :

- au «mieux», des dégâts sur les digues elles-mêmes : brèches et/ou érosions du talus côté terre, qu'il faudra réparer dans les meilleurs délais après les crues débordantes ;

- au pire, des dégâts sur des bâtiments ou aménagements situés à proximité du pied aval de digue dans une zone de brèche (la brèche de St Laurent illustre un tel scénario ayant abouti au lourd endommagement de la station d'épuration), sans omettre les risques potentiels pour les vies humaines si, parmi les bâtiments exposés, il y en a qui sont habités.

Il convient donc d'aménager le système d'endiguement de la basse plaine de l'Agly de façon à ce qu'il supporte, sans dommage, une crue dite de sûreté (d'occurrence rare, bien supérieure à 30 ans), à l'instar de ce qui existe pour les barrages. Le souci serait, non pas d'augmenter la capacité d'écoulement du lit endigué, mais de prévenir la formation de brèches lors de crues dépassant cette capacité. Ceci milite pour la réalisation de déversoirs de sécurité dont l'implantation ne pourra résulter que d'une étude topographique, hydraulique et d'inondabilité complète ainsi que d'une négociation visant à identifier les sites de déversement dont les impacts socio-économiques pour l'aval seraient les plus faibles au vu de l'occupation actuelle du sol.

Au moment de la rédaction de la présente note (automne 2000), une telle étude est en cours de réalisation.

1 Tronçons de digue abaissée et aménagée (revêtement de pierres maçonnées ou de béton, prolongé par un radier de dissipation) de façon à déverser sans dommage pour les parties en remblai et le pied de talus.

2 L'hypothèse de base pour cette affirmation - hélas souvent vérifiée dans les faits - est que les ouvrages hydrauliques en remblai (dont les digues, mais aussi les barrages en terre) ne supportent pas la surverse.

Annexe 5

Extraits du Code rural

Arrêté du 23 mai 1984

Relatif au piégeage des populations animales.

Art. 1^{er}. — La régulation, par le piégeage, des populations animales en application du 1^{er} alinéa de l'article 393 du code rural est soumise aux conditions prévues au présent arrêté.

CHAPITRE I^{er}

CATÉGORIE DE PIÈGES AUTORISÉS

Art. 2. — Seul est autorisé, sous réserve des prescriptions particulières qui leur sont applicables, l'emploi des pièges des catégories suivantes :

1. Les boîtes à fauves, chatières, belettières, nasses, pièges-cages, mues et autres engins similaires permettant la capture des animaux vivants ;
2. Les pièges à mâchoires déclenchés par pression sur une palette ou enlèvement d'un appât, ou tout autre système de détente ;
3. Les collets munis d'un arrêtoir ;
4. Les pièges à lacet conçus pour prendre les animaux par la patte.

CHAPITRE II

HOMOLOGATION DE CERTAINS PIÈGES

Art. 3. — L'emploi des pièges mentionnés aux 2, 3 et 4 de l'article 2 ci-dessus est subordonné à l'homologation d'un modèle présenté par le fabricant.

L'homologation est prononcée, par arrêté du ministre chargé de la chasse, après avis de la commission visée à l'article 5 ci-après et consultation du Conseil national de la chasse et de la faune sauvage.

Les pièges doivent porter une marque distincte permettant l'identification du modèle.

Le refus d'homologation peut être fondé notamment sur les risques de blessures ou souffrances susceptibles d'être infligées aux animaux.

L'homologation de tout modèle peut être assortie de prescriptions d'emploi particulières fixées par arrêté ministériel. Elle peut être prononcée à titre provisoire pour une période déterminée de mise à l'essai.

Art. 4. — Le retrait de l'homologation de tout modèle peut être prononcé par arrêté ministériel, sur le rapport de la commission visée à l'article 5 ci-dessous et après avis du Conseil national de la chasse et de la faune sauvage, en fonction de l'évolution des techniques ou de la fréquence et de la gravité des souffrances et des blessures infligées aux animaux telles qu'elles sont constatées à l'usage.

Art. 5. — Pour l'application des articles 3 et 4 qui précèdent, il est institué auprès du Conseil national de la chasse et de la faune sauvage une commission d'homologation comprenant :

- Le directeur de la protection de la nature, président ;
- Le directeur de la qualité au ministère de l'agriculture ;
- Le directeur de l'Office national de la chasse ;
- Le directeur du département chargé de la faune sauvage à l'Institut national de la recherche agronomique ;
- Le président de l'assemblée permanente des chambres d'agriculture ;

Dix personnalités qualifiées, désignées par le ministre chargé de la chasse, dont deux représentants des intérêts cynégétiques, deux représentants des gardes-chasse privés et leurs employeurs, deux représentants des associations de protection de la nature ou de protection animale, deux représentants des fabricants de pièges ou des négociants spécialisés et deux scientifiques spécialistes de l'étude des prédateurs.

En cas d'empêchement, les membres de la commission peuvent se faire représenter.

Le comité pourra s'adjoindre, sur décision de son président, toute personne dont la présence à titre d'expert aurait été jugée nécessaire.

CHAPITRE III

AGRÈMENT DES PIÈGEURS

Art. 6. — Toute personne qui utilise des pièges d'une des catégories soumises à l'homologation prévue par l'article 3 du présent arrêté doit être agréée à cet effet par le commissaire de la République du département où elle est domiciliée. Cet agrément fait l'objet d'une attestation numérotée et est valable pour l'ensemble du territoire national.

Art. 7. — L'agrément visé à l'article 6 ci-dessus est subordonné à la participation du piègeur concerné à une session de formation au piégeage organisée par l'Office national de la chasse, une fédération départementale des chasseurs ou tout autre organisme habilité à cet effet par le commissaire de la République du département où se déroule la session.

Les programmes de formation font l'objet de protocoles établis par les organismes qui la dispensent et soumis à l'approbation du commissaire de la République.

La formation doit comporter au moins seize heures avec la répartition horaire globale suivante :

- connaissance des espèces recherchées : quatre heures ;
- connaissance des différents types de pièges, de leurs possibilités et condition d'utilisation : deux heures ;
- manipulation des pièges : quatre heures ;
- connaissance des mesures propres à diminuer les souffrances des animaux capturés : deux heures ;
- application des connaissances : quatre heures.

Sont dispensés de l'obligation de participer à une session pour être agréés :

- Les lieutenants de louveterie ;
- Les gardes de l'Office national de la chasse ;
- Les agents assermentés de l'Office national des forêts.

Art. 8. — Les piègeurs sont tenus de marquer leurs pièges au numéro qui leur est attribué par le commissaire de la République.

Ils peuvent également utiliser les pièges identifiés par la marque de leur employeur ; mention en est faite dans la déclaration prévue à l'article 17 ci-après.

Il n'est pas exigé que la marque soit apparente lorsque le piège est tendu.

Art. 9. — Les piègeurs agréés doivent tenir un relevé quotidien de leurs prises sur un registre coté et paraphé par le maire de la commune où ils sont domiciliés.

Ce relevé mentionne, pour chaque journée de piégeage, les communes concernées, le nombre de pièges utilisés de chaque catégorie, soumise ou non à l'homologation, ainsi que l'espèce et le nombre des prises.

Art. 10. — L'agrément est valable pour une durée illimitée. Il peut toutefois être suspendu, par décision motivée du commissaire de la République, pour une durée n'excédant pas cinq années, au cas où l'intéressé aurait contrevenu à une des dispositions du présent arrêté ou se serait rendu coupable d'une infraction caractérisée aux dispositions législatives ou réglementaires relatives à la police de la chasse ou à la protection de la nature et après qu'il aura été en mesure de présenter ses observations.

CHAPITRE IV

DÉCLARATION DES OPÉRATIONS DE PIÉGEAGE

Art. 11. — La pose de pièges, quelle que soit leur catégorie, doit faire l'objet, de la part du titulaire du droit de destruction ou de son délégué, d'une déclaration en mairie, sur papier libre.

La déclaration est établie en quatre exemplaires. Elle doit indiquer l'identité et la qualité (propriétaire, possesseur, fermier) du déclarant, l'identité et, le cas échéant, le numéro d'agrément des piègeurs, les motifs des destructions projetées, la nature des pièges, les époques de piégeage ainsi que les zones où seront tendus les pièges.

Le maire contrôle l'exactitude des mentions portées sur la déclaration et en vise chaque exemplaire. Il en remet un au déclarant, qui devra le présenter à toute demande des agents chargés de la police de la chasse ; il en transmet un au commissaire de la République, un à la fédération départementale des chasseurs, conserve le quatrième et fait publier la déclaration à l'emplacement réservé aux affichages officiels.

Art. 12. — Les déclarants sont tenus de signaler de manière apparente sur les chemins et voies d'accès les zones dans lesquelles sont tendus des pièges appartenant aux catégories visées aux 2, 3 et 4 de l'article 2 ci-dessus.

Art. 13. — Pour chaque campagne, les déclarants adressent au commissaire de la République compétent un relevé des prises effectuées sur leur territoire par eux-mêmes ou par leurs délégués.

Le relevé est établi pour la campagne allant du 1^{er} juillet au 30 juin de l'année suivante ; il doit parvenir au commissaire de la République avant le 15 octobre suivant.

CHAPITRE V

PRESCRIPTIONS GÉNÉRALES POUR LE PIÉGEAGE

Art. 14. — Tous les pièges, quelle qu'en soit la catégorie, doivent obligatoirement être visités au moins tous les matins, dans l'heure qui suit le lever du soleil au plus tard, par le piégeur ou un préposé désigné à cet effet.

La mise à mort des animaux capturés doit intervenir immédiatement et sans souffrances.

En cas de capture accidentelle d'animaux non visés par le 1^{er} alinéa de l'article 393 du code rural, ces animaux sont relâchés sur-le-champ.

Art. 15. — Les boîtes à fauves et autres engins visés au 1 de l'article 2 ci-dessus peuvent être placés en tous lieux.

L'utilisation d'appellants vivants des espèces recherchées est autorisée dans les pièges-cages.

Art. 16. — 1. Les pièges à mâchoires ne peuvent être tendus qu'à deux cents mètres au moins des habitations des tiers et à cinquante mètres au moins des routes et chemins ouverts au public ;

2. Le piégeage en coulée est interdit ; toutefois les pièges peuvent être tendus dans l'eau ou dans les coulées des herbes aquatiques pour la capture du rat musqué et du ragondin ;

3. Les pièges à mâchoires ne peuvent être tendus que de nuit ; ils doivent être détendus ou neutralisés au moment de la visite quotidienne visée à l'article 14 qui précède. Toutefois ces dispositions ne s'appliquent pas aux pièges placés en jardinet ou en gueule de terrier ;

4. L'emploi de pièges à mâchoires et à palette d'une ouverture ou d'un diamètre supérieurs à vingt-deux centimètres est interdit ;

5. Seul est autorisé l'emploi des pièges à mâchoires et à palette visés au 3 de l'article 2 ci-dessus munis de l'un au moins des dispositifs suivants :

— garniture de matière plastique, de caoutchouc ou de lame métallique destinée à augmenter la surface portante ;

— présence de butées ou de tout autre dispositif permettant de maintenir un écartement de cinq millimètres au moins entre les mâchoires après fermeture.

Art. 17. — Seul est autorisé l'emploi de collets, de fabrication industrielle ou artisanale, homologués dans les conditions prévues à l'article 3 ci-dessus et destinés à la capture du renard.

L'arrêtoir doit être inamovible et disposé de façon à ménager à la boucle une circonférence minimale de dix-huit centimètres pour éviter la strangulation des animaux.

L'utilisation de tout système de détente destiné à entraîner la mort des animaux par strangulation est interdite.

Pour assurer le piégeage sélectif du renard, le collet après mise en place doit présenter une ouverture maximale de vingt centimètres de diamètre, la partie basse de l'engin étant disposée à dix-huit centimètres au moins et à vingt-deux centimètres au plus au-dessus du niveau du sol.

Art. 18. — L'emploi des pièges à lacet conçus pour la capture des animaux par la patte peut être soumis à des prescriptions particulières fixées par l'arrêté d'homologation.

Art. 19. — L'attache reliant les pièges à mâchoires ou à lacet, visés aux articles 16 et 18 ci-dessus, à un point fixe ou mobile doit comporter au moins deux émerillons permettant au piège d'accompagner les mouvements de l'animal capturé.

La longueur de l'attache doit être inférieure à trente centimètres.

CHAPITRE VI

DISPOSITIONS DIVERSES

Art. 20. — L'utilisation des pièges à loutre, des pièges à poteau ou de pièges à mâchoires placés sur poteau ainsi que celle de pièges à feu ou de batterie d'armes à feu sont interdites.

Est également interdite l'utilisation des pièges à mâchoires munis de dents ou de crans susceptibles de blesser les animaux capturés vivants, à moins que les dents ou les crans ne soient arasés.

Art. 21. — Les dispositions des articles 6 à 10 et 16 du présent arrêté ne sont pas applicables au piégeage à l'intérieur des bâtiments, cours et jardins, installations d'élevage et, d'une façon générale, aux enclos attenants à l'habitation visés à l'article 366 du code rural.

Art. 22. — Les dispositions des articles 6 à 10 ne sont pas applicables aux opérations collectives de destruction des rats musqués et des ragondins réalisées dans le cadre des syndicats de lutte contre les ennemis des cultures.

CHAPITRE VII

DISPOSITIONS TRANSITOIRES

Art. 23. — Les dispositions du 5 de l'article 16 ci-dessus relatives aux dispositions conçues pour éviter les blessures infligées aux animaux entreront en vigueur dans le délai d'un an à compter de la publication du présent arrêté.

Art. 24. — Les dispositions du 4 de l'article 16 ci-dessus relatives à l'ouverture maximale des pièges à mâchoires entreront en vigueur dans le délai de deux ans à compter de la date de publication du présent arrêté.

Art. 25. — Les dispositions des articles 3 à 10 ci-dessus relatives, d'une part, à l'homologation des pièges et, d'autre part, à l'agrément des piégeurs entreront en vigueur dans le délai de trois ans à compter de la date de publication du présent arrêté.

Toutefois l'agrément des piégeurs et l'homologation des pièges pourront être prononcés à la demande des intéressés.

Art. 26. — Les personnes justifiant d'une expérience suffisante du piégeage à la date de publication du présent arrêté, attestée par un certificat délivré par la fédération départementale des chasseurs, sont dispensées de la participation à la session de formation visée à l'article 7 ci-dessus, pour obtenir l'agrément prévu à l'article 6 qui précède.

Art. 27. — Sont abrogées toutes dispositions sur le piégeage des animaux nuisibles contraires aux dispositions du présent arrêté figurant dans les arrêtés réglementaires permanents sur la police de la chasse dans les départements.

Art. 28. — Le directeur de la protection de la nature est chargé de l'exécution du présent arrêté, qui sera publié au *Journal officiel* de la République française.

Complété par l'Article 29 (Arr. du 10 - 02- 1986) : «Le présent arrêté est applicable dans les départements du Bas-Rhin, du Haut-Rhin et de la Moselle.

L'ordonnance du 16 juillet 1980 modifiée concernant le gibier nuisible est abrogée dans ses dispositions contraires au présent arrêté».

Arrêté du 1^{er} août 1986

Relatif à divers procédés de chasse, de destruction des animaux nuisibles
et à la reprise du gibier vivant dans un but de repeuplement

Art. 1^{er}. - Sont interdits pour la chasse de tout gibier et pour la destruction des animaux nuisibles :

- l'emploi de la canne-fusil ;
- l'emploi des armes à air ou gaz comprimé dénommées aussi « armes à vent » ;
- l'emploi des armes à feu non susceptibles d'être épaulées sans appui ;
- l'emploi de toute arme à rechargement automatique permettant le tir de plus de trois coups sans réapprovisionnement.

Art. 2. - Sont interdits pour la chasse de tout gibier et pour la destruction des animaux nuisibles :

- l'emploi de toute arme munie d'un dispositif fixe ou amovible comportant des graduations ou des repères de réglage de tir pour les distances supérieures à 300 mètres ;
- l'emploi sur les armes à feu de tout dispositif silencieux destiné à atténuer le bruit au départ du coup ;
- l'emploi de dispositifs de visée comportant un convertisseur d'image ou un amplificateur d'image électronique.

Art. 3. - Est interdit l'emploi pour le tir des ongulés de toute arme à percussion annulaire ainsi que celui d'armes rayées à percussion centrale d'un calibre inférieur à 5,6 millimètres ou dont le projectile ne développe pas une énergie minimale de 1 kilojoule à 100 mètres.

Art. 4. - Sont interdits pour la chasse et la destruction des animaux nuisibles :

- l'emploi dans les armes rayées d'autres munitions que les cartouches à balle expansive dont la vente est libre ;
- l'emploi de toute chevrotine ou de tout plomb de chasse d'un diamètre supérieur à 4 mm.

Les animaux des espèces suivantes : cerf, daim, mouflon, chamois ou isard et sanglier ne peuvent être tirés qu'à balle.

Toutefois, dans les départements présentant des formations d : garrigues ou maquis, le ministre chargé de la chasse peut autoriser par un arrêté annuel, sur proposition du commissaire de la République, après avis du président de la fédération départementale des chasseurs, les conditions dans lesquelles l'emploi de chevrotines est autorisé pour le tir du sanglier en battues collectives.

Art. 5. - Toute arme de chasse ne peut être transportée à bord d'un véhicule que démontée ou déchargée et placée sous étui.

Art. 6. - Est interdit en action de chasse et pour la destruction des animaux nuisibles, y compris pour le rabat, l'emploi :

- de tout aéronef ;
- de tout engin automobile, y compris à usage agricole ;
- de tout bateau à moteur fixe ou amovible ;
- de tout bateau à pédales, sauf dans les cas autorisés par le ministre chargé de la chasse.

Art. 7. - Sont interdits pour la chasse et la destruction des animaux nuisibles :

- l'emploi d'émetteurs ou de récepteurs radiophoniques ou radiotéléphoniques ;
- l'emploi pour attirer le gibier de disques ou de bandes enregistrées reproduisant le cri des animaux ;
- l'emploi de sources lumineuses de nature à faciliter la capture ou la destruction du gibier ;
- l'emploi délibéré de tout dispositif électrocutant.

Art. 8. - Sont interdits :

- la chasse à tir de la perdrix ou du faisan au poste, soit à l'agrainée soit à proximité d'abreuvoirs ;
- la chasse de la bécasse à la passée ou à la croule ;
- le déterrage de la marmotte ;
- l'emploi des chiens lévriers pur sang ou croisés.

Art. 9. - L'emploi d'engins tels que pièges, cages, filets, lacets, hameçons, gluaux, nasses et de tous autres moyens ayant pour but d'effectuer ou de faciliter la capture ou la destruction du gibier est interdit sauf dans les cas autorisés :

1° Par le ministre chargé de la chasse :

- pour la chasse des oiseaux de passage ;
- pour la destruction des animaux nuisibles ;

2° Par le commissaire de la République en application de l'article 11 du présent arrêté.

Art. 10. - L'emploi de toxiques, poisons ou drogues est interdit pour enivrer ou empoisonner le gibier, sauf dans les cas autorisés en application des dispositions du titre X du livre II du code rural relatif à la protection des végétaux et du code de la santé publique.

Art. 11. - Les propriétaires ou les ayants droit, autorisés individuellement par le commissaire de la République, peuvent capturer, même en temps prohibé, avec les engins et dans les conditions déterminées par lesdites autorisations, certaines espèces de gibier pour les conserver provisoirement et les relâcher ensuite dans un but de repeuplement.

Art. 12. - Le troisième alinéa de l'article 3 de l'arrêté du 2 octobre 1951 susvisé est remplacé par les dispositions suivantes :

« En outre, des captures de gibier vivant, destiné au repeuplement, peuvent y être autorisées par arrêté du commissaire de la République, sur proposition du directeur départemental de l'agriculture et de la forêt, après avis du président de la fédération des chasseurs. »

Art. 13. - Sont abrogés :

- l'arrêté du 7 août 1959 relatif aux reprises de gibier vivant en vue de repeuplement ;
- l'arrêté du 2 mars 1972 relatif à l'emploi des armes à feu pour la chasse et la destruction des animaux nuisibles ;
- toutes dispositions contraires au présent arrêté figurant dans les arrêtés réglementaires permanents sur la police de la chasse dans les départements.

Arrêté du 26 juin 1987

Fixant la liste des espèces de gibier dont la chasse est autorisée

Art. 1^{er}. - La liste des espèces de gibier que l'on peut chasser sur le territoire européen de la France et dans sa zone maritime est fixé comme suit :

Gibier sédentaire

Oiseaux : colins, faisans de chasse, gélinotte des bois, lagopède alpin, perdrix bartavelle, perdrix rouge, perdrix grise, tétras lyre (coq maillé) et tétras urogalle (coq maillé).

Mammifères : blaireau, belette, cerf élaphe, cerf sika, chamois isard, chevreuil, chien viverrin, daim, fouine, hermine, lapin de garenne, lièvre brun, lièvre variable, marmotte, martre, mouflon, putois, ragondin, rat musqué, raton laveur, renard, sanglier, vison d'Amérique.

Gibier d'eau

Barge à queue noire, barge rousse, bécasseau maubèche, bécassine des marais, bécassine sourde, canard chipeau, canard colvert, canard pilet, canard siffleur, canard souchet, chevalier aboyeur, chevalier arlequin, chevalier combattant, chevalier gambette, courlis cendré, courlis corlieu, eider à duvet, foulque macroule, fuligule milouin, fuligule milouinan, fuligule morillon, garrot à l'œil d'or, harlede de Miquelon, huîtrier pie, macreuse brune, macreuse noire, nette rousse, oie cendrée, oie des moissons, oie rieuse, pluvier argenté, pluvier doré, poule d'eau, râle d'eau, sarcelle d'été, sarcelle d'hiver et vanneau huppé.

Oiseaux de passage

Alouette des champs, bécasse des bois, caille des blés, grive draine, grive litorne, grive mauvis, grive musicienne, merle noir, pigeon biset, pigeon colombin, pigeon ramier, tourterelle des bois, tourterelle turque et vanneau huppé.

Art. 2. - L'arrêté du 12 juin 1979 fixant la liste des espèces de gibier est abrogé.

Arrêté du 30 septembre 1988

Fixant la liste des animaux susceptibles d'être classés nuisibles

Art. 1^{er} - La liste des espèces d'animaux susceptibles d'être classés nuisibles par le préfet est fixée comme suit :

Mammifères

Belette (*mustela nivalis*).
 Chien viverrin (*nyctereutes procyonoides*).
 Fouine (*martes foina*).
 Lapin de garenne (*oryctolagus cuniculus*).
 Martre (*martes martes*).
 Putois (*putorius putorius*).
 Ragondin (*myocastor coypus*).
 Rat musqué (*ondatra zibethica*).
 Raton laveur (*procyon lotor*).
 Renard (*vulpes vulpes*).
 Sanglier (*sus scrofa*).
 Vison d'Amérique (*mustela vison*).

Oiseaux

Corbeau freux (*corvus frugilegus*).
 Corneille noire (*corvus corone corone*).
 Etourneau sansonnet (*sturnus vulgaris*).
 Geai des chênes (*garrulus glandarius*).
 Pie bavarde (*pica pica*).
 Pigeon ramier (*colomba palumbus*).

Arrêté du 18 mars 1982

Relatif à l'exercice de la vénerie

Art. 1^{er}. — La vénerie, qui comprend la chasse à courre, à cor et à cri, et la chasse sous terre se pratiquent avec un équipage comprenant une meute de chiens servis par des veneurs se déplaçant soit à pied, soit à cheval.

Art. 2. — Pour la chasse à courre, à cor et à cri, l'équipage doit être susceptible de découpler :

Trente chiens courants créancés des races spécialisées servis par au moins deux personnes à cheval pour le courre du cerf et du sanglier ;

Vingt chiens courants créancés des races spécialisées servis par au moins une personne à cheval pour le courre du chevreuil et du dalm ;

Dix chiens courants créancés des races spécialisées servis, sauf dérogation accordée par le directeur départemental de l'agriculture par au moins une personne à cheval pour le courre du renard ;

Six chiens courants créancés des races spécialisées pour le courre du lièvre.

Les relais en voiture et en camion sont interdits. Il est toutefois toléré, sauf pour la vénerie du lièvre, que six chiens au maximum soient transportés dans un véhicule pendant la chasse ; ils doivent être donnés en une seule fois en la présence d'au moins un cavalier.

Le maître d'équipage peut autoriser les membres chassant à cheval à porter le couteau de chasse, la dague ou la lance et deux membres, également à cheval, à porter sur leur selle une arme à feu autorisée pour servir l'animal lorsqu'il est forcé.

Art. 3. — La chasse sous terre consiste à capturer par déterrage l'animal acculé dans son terrier par les chiens qui y ont été introduits ou à l'y faire capturer par les chiens eux-mêmes.

Seul est autorisé pour la chasse sous terre l'emploi d'outils de terrassement, des pinces destinées à saisir l'animal et d'une arme pour sa mise à mort, à l'exclusion de tout autre procédé, instrument ou moyen auxiliaire, et notamment des gaz et des pièges.

Les meutes doivent comprendre au moins trois chiens créancés sur la voie du renard et du blaireau.

Art. 4. — Les chiens des équipages de vénerie doivent obligatoirement être identifiés par tatouage conformément aux modalités fixées par le ministre de l'agriculture.

Art. 5. — Au cours de la chasse, chaque équipage de chasse à courre ou de chasse sous terre doit être dirigé par un responsable titulaire et porteur du permis de chasser visé et validé.

Tout membre de l'équipage portant soit simultanément le fouet et la trompe de chasse (ou corne de chasse), soit une arme destinée à servir l'animal, doit être titulaire et porteur du permis de chasser visé et validé.

L'action de faire le bois avec limier implique la possession du permis de chasser visé et validé.

Art. 6. — Le directeur départemental de l'agriculture établit pour tout équipage dont le chenil est situé dans le département une attestation de conformité de la meute aux dispositions ci-dessus. Cette attestation comporte tous renseignements utiles sur les caractéristiques de l'équipage ainsi que le nom et l'adresse de son responsable ; elle est valable six ans.

Toutefois pour les nouveaux équipages en cours de constitution qui la sollicitent pour la première fois, l'attestation est délivrée à titre provisoire pour une durée d'un an ; à l'expiration de cette période probatoire, elle est reconduite pour cinq ans sous réserve que les aptitudes de la meute aient été confirmées.

Annexe 6

Recueil commenté des principaux textes réglementaires relatifs aux digues de protection contre les inondations

(1) Circulaire Interministérielle du 24 janvier 1994 relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables.

Volonté de durcissement de la politique de l'Etat en matière de gestion des zones inondables, autour de trois principes : interdiction de toute construction nouvelle dans les zones inondables, contrôle strict de l'extension de l'urbanisation en zones d'expansion des crues, limitation des endiguements et remblaiements nouveaux. La cartographie des zones inondables (atlas, PER, PSS, carte R111-3, etc.) constitue le moyen à privilégier pour la mise en oeuvre de cette politique.

(2) Circulaire Interministérielle du 17 août 1994 relative aux modalités de gestion des travaux contre les risques d'inondation.

Consécutives aux inondations de la Camargue au cours de l'hiver 1993-1994. Il s'agit du premier texte demandant aux préfets de dresser un inventaire des structures gestionnaires des digues et, si possible, des ouvrages eux-mêmes.

(3) Circulaire DE/SDGE/BPIDPF-MPN/n° 629 du 28 mai 1999 du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, relative au recensement des digues de protection des lieux habités contre les inondations fluviales et maritimes.

Lancement de l'inventaire national des digues, de leurs gestionnaires et des zones protégées, à l'appui du logiciel « DIGUES ».

(4) Décret n°2002-202 du 13 février 2002 modifiant le décret n° 93-743 du 29 mars 1993 relatif à la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou déclaration en application de l'article 10 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau (J.O. du 16 février 2002 et B.O. MATE du 21 mai 2002, p. 49-50).

Ce décret insert, dans la nomenclature, la rubrique « 2.5.4. Installations, ouvrages, digues ou remblais, d'une hauteur maximale supérieure à 0,50 m au-dessus du niveau du terrain naturel dans le lit majeur du cours d'eau ». Ces installations sont désormais soumises à autorisation ou à déclaration en fonction de la surface et/ou de la largeur occupée dans le lit majeur.

(5) Arrêté du 13 février 2002 fixant les prescriptions générales applicables aux installations ou ouvrages soumis à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-6 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 2.5.4 (2° et 3°) de la nomenclature annexée au décret n° 93-743 du 29 mars 1993 modifié.

Ainsi que le stipule la circulaire (6) ci-dessous, ces prescriptions générales applicables aux digues soumises à déclaration doivent constituer des bases minimum de prescriptions pour les arrêtés spécifiques à faire prendre pour les digues soumises à autorisation.

(6) Circulaire DE/SDGE/BPIDPF-CCG/n° 426 du 24 juillet 2002 du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable relative à la mise en œuvre du décret n° 2002-202 du 13 février 2002.

Cette circulaire détaille les conditions d'application de la nouvelle rubrique de la nomenclature.

(7) Circulaire MATE/SDPGE/BPIDPF/CCG n°234 du 30 avril 2002 relative à la politique de l'Etat en matière de risques naturels prévisibles et de gestion des espaces situés derrière les digues de protection contre les inondations et les submersions marines.

Rappel des principes de la politique de l'Etat en matière du risque de submersion marine ou d'inondation, et formulation de sa position en ce qui concerne l'urbanisation dans les zones endiguées, notamment dans le cadre de l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation (PPR-i).

(8) Circulaire interministérielle DE/SDGE/BPIDPF-CCG / n° 8 du 6 août 2003 du Ministère chargé de l'Intérieur et du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, relative à l'organisation du contrôle des digues de protection contre les inondations fluviales intéressant la sécurité publique.

Instaure un dispositif de contrôle visant les digues « intéressant – ou susceptibles d'intéresser – la sécurité publique » (à l'instar de celui qui existe pour les barrages), avec définition des obligations qui incombent aux propriétaires, d'une part, aux services de contrôle (en l'occurrence, services chargés de la Police de l'Eau), d'autre part. Les ouvrages concernés sont : les digues de protection contre les débordements de cours d'eau, y compris torrentiels ainsi que les digues construites dans le cadre d'aménagements de « ralentissement dynamique ».

(9) Lettre-circulaire interministérielle du 21 janvier 2004 du Ministère chargé de l'Equipement et du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, relative à la maîtrise de l'urbanisme et à l'adaptation des constructions en zone inondable et à destination des préfets des départements 07, 11, 13, 26, 30, 34, 48, 66 et 84

Suite aux retours d'expérience apportés par les crues de la dernière décennie, mise en œuvre d'un plan d'actions concernant la gestion de l'urbanisme en zone inondable et fondé sur 4 axes :

- la maîtrise du développement urbain,
- l'adaptation des constructions,
- la gestion des ouvrages de protection,
- l'organisation des actions et des moyens.

Relativement à l'axe « gestion des ouvrages de protection », rappel de la nécessité de ne pas augmenter la vulnérabilité derrière les digues et de prendre en compte l'hypothèse de la rupture des ouvrages de protection.

Ce guide technique est destiné aux personnels des services ou structures impliqués dans l'exploitation des digues de protection contre les inondations dues aux crues de rivières. Il s'adresse à un public de techniciens

et vise à vulgariser :

- les principes de fonctionnement d'un système d'endiguement ;
- les risques encourus ;
- les actions de surveillance ;
- les actions d'entretien.

Son ambition est de justifier et décrire l'ensemble des actions à entreprendre pour assurer sur le long terme la pérennité et la sécurité des ouvrages dans l'esprit des dispositions de la Loi sur l'eau.

Réalisé en 2000 – 2001 à l'initiative du ministère chargé de l'Environnement (Direction de l'eau), ce guide a été rédigé par le Cemagref sous le pilotage d'un groupe de travail qui a contribué à en enrichir le contenu.

La présente réédition 2004 est complétée d'une annexe supplémentaire récapitulant les principaux textes réglementaires parus dans la dernière décennie à propos des digues de protection contre les inondations.

ISBN 2-85362-636-9



30 € TTC