



HAL
open science

Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai. Guide technique.

M. Vennetier, P. Mériaux, C. Zanetti

► **To cite this version:**

M. Vennetier, P. Mériaux, C. Zanetti. Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai. Guide technique.. Cardère éditeur; Irstea, pp.232, 2015. hal-02601733

HAL Id: hal-02601733

<https://hal.inrae.fr/hal-02601733>

Submitted on 16 May 2020

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

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



MICHEL VENNETIER
PATRICE MÉRIAUX
CAROLINE ZANETTI

Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai



Dessins d'en-tête : Myriam Tallah
(inspirés de *La Linea*, série télévisée d'animation italienne
créée en 1971 par le dessinateur Osvaldo Cavandoli)

Référence

Vennetier M., Mériaux P., Zanetti C., 2015. *Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai*. Cardère éditeur, Irstea Aix-en-Provence, 232 p.

© Irstea 2015 – ISBN version internet : 979-10-94074-01-5

La publication de cet ouvrage a bénéficié d'une aide financière
de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur

Région



Provence-Alpes-Côte d'Azur

© Cardère éditeur – Irstea Aix-en-Provence ISBN 978-2-914053-84-6 (livre papier)
Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage, est interdite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) 3 rue Hautefeuille, Paris 6^e.

Michel Vennetier

Patrice Mériaux

Caroline Zanetti

Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai

Guide technique

une coédition

Irstea Aix-en-Provence – Cardère éditeur





Sommaire

Préface	8
Avant-propos	10

1 RÔLES ET RISQUES ASSOCIÉS À LA VÉGÉTATION PRÉSENTE SUR LES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Les types de végétation	14
Risques et bénéfices liés aux différents types de végétation	17
Herbacées	17
Arbustes	18
Arbres	18
Vitesse de croissance des arbres et de leurs racines	23
Facteurs contrôlant la croissance aérienne des arbres	23
Modèles de croissance en hauteur	25
Vitesse de croissance et taille des racines	27
Développement et impacts des systèmes racinaires dans les ouvrages hydrauliques en remblai	31
Structure et architecture racinaires	34
Le développement des systèmes racinaires	40
Décomposition racinaire	44
Influence des dimensions et du type d'ouvrage	45
Influence de la nature des matériaux constitutifs du remblai	47

2 RÉGLEMENTATION ET RÈGLES DE L'ART

Réglementation	53
Aspects sécuritaires et végétation sur les ouvrages hydrauliques	53
Droit environnemental et ouvrages hydrauliques boisés	53
Pratiques actuelles : Principes généraux d'entretien des ouvrages et aspects environnementaux	59
Les apports de ce guide	62



3

DU DIAGNOSTIC À LA GESTION DE LA VÉGÉTATION

L'ouvrage hydraulique et son environnement	65
Les types et principales constitutions d'ouvrages	65
Structure interne des ouvrages et développement racinaire	70
Les peuplements végétaux	73
Détermination d'une typologie de végétation	73
Caractéristiques détaillées des types de végétation	76
Cartographie des types de végétation	84
Zonage de la végétation en fonction des types d'ouvrages	85
État individuel des arbres	89
Risque prévisible et causes de dépérissement des arbres	89
Risques imprévisibles ou aléatoires : le vent et l'ancrage de l'arbre	91

4

GESTION ET CONFORTEMENT DES OUVRAGES HYDRAULIQUES BOISÉS

Le plan de gestion.....	99
Les bases d'un plan de gestion de la végétation	99
Les outils d'aide à la conception et au suivi de la gestion	101
Gestion courante de la végétation	104
Objectifs	104
Surveillance des ouvrages	104
Techniques d'entretien	119
Prise en compte de l'écologie et du climat	123
Recommandations de gestion curative des ouvrages hydrauliques boisés	136
Entretien curatif de la végétation.....	136
Travaux de confortement	144

5

ÉTUDES DE CAS

Cas des digues du Vidourle	168
Description de l'ouvrage	168
Historique et comportement de l'ouvrage.....	168
Contexte	170
Pression administrative et contraintes écologiques	170
Problématique liée à la végétation : boisement des digues et berges	170
Mesures de réduction des risques préconisées	172
Mise en œuvre et retours d'expérience	174
Perspectives	175



Cas de la digue d'Eyglies	176
Description de l'ouvrage (état au moment du diagnostic de végétation)	176
Historique et comportement de l'ouvrage.....	177
Problématique liée à la végétation	177
Caractérisation et diagnostic de la végétation arborée	179
Réalisation des travaux Retours d'expérience	181
Cas des digues de l'Isère	183
Description de l'ouvrage	183
Historique et comportement de l'ouvrage.....	183
Contexte	185
Pression administrative et contraintes écologiques	185
Problématique liée à la végétation : digue boisée	185
Mesures de réduction des risques mises en œuvre	187
Perspectives	189
Retours d'expérience	189
Cas de la digue de Cusset	191
Description de l'ouvrage : Digue de canal.....	191
Historique et comportement de l'ouvrage.....	191
Problématique liée à la végétation : digue fortement boisée ..	192
Mesures de réduction des risques mises en œuvre	194
Retours d'expérience	195
Perspectives	196
Cas de la digue du Robinet.....	197
Description de l'ouvrage (état au moment du diagnostic de végétation)	197
Historique et comportement de l'ouvrage.....	197
Contexte	197
Problématique liée à la végétation : digue boisée	198
Mesures de réduction des risques mises en œuvre	200
Retours d'expérience. Comportement de l'ouvrage depuis les travaux	201
Perspectives	201
Cas du barrage de Montjoux	202
Description de l'ouvrage (état au moment du diagnostic de végétation)	202
Historique et comportement de l'ouvrage.....	203
Problématique liée à la végétation	203
Caractérisation et diagnostic de la végétation arborée	204
Mesures de réduction des risques mises en œuvre (parement aval)	206
Retour d'expériences. Perspectives	208



REMERCIEMENTS, CONCLUSION, BIBLIOGRAPHIE ET ANNEXES

Remerciements	212
Conclusion	214
Bibliographie	215
Annexe 1. LES ESPÈCES VÉGÉTALES LIGNEUSES LES PLUS PRÉSENTES EN FRANCE SUR LES DIGUES ET BARRAGES ET DANS LEUR ENVIRONNEMENT PROCHE (LISTE NON EXHAUSTIVE)	218
Annexe 2. ESPÈCES PROTÉGÉES : PROCÉDURES DE DEMANDE DE DÉROGATION ..	220
Éléments de calendrier	221
Le contenu du dossier de demande	222
Les formulaires Cerfa	223
Cas des dérogations prévues à l'article L411-2 c	223
L'autorisation	224
Annexe 3 : Glossaire	226



PRÉFACE

En France, la plupart des digues et de nombreux barrages en terre souffrent ou ont souffert d'un manque d'entretien, qui a conduit au développement d'une végétation arborescente abondante sur les remblais et à leurs abords. L'existence de végétation non maîtrisée sur les ouvrages hydrauliques présente plusieurs inconvénients vis-à-vis de leur sécurité : surveillance difficile, abri pour les animaux fouisseurs, risque d'érosion interne dans les conduits liés à la décomposition des racines, risque d'arrachement d'arbre par prise au vent, etc. Ce sont plus de 10 000 km de digues fluviales et de canaux et plusieurs milliers de petits barrages en remblai qui sont potentiellement concernés en France. Sur cette thématique, existe une forte expression de besoin de la profession. Face à des digues, des canaux ou des barrages comportant des arbres, voire recouverts d'une végétation ligneuse, les gestionnaires, les exploitants et les bureaux d'études qui les accompagnent sont souvent en peine à proposer des solutions adéquates, compromis nécessaire entre le contrôle du développement de la végétation, la proposition d'un traitement pérenne sans compromettre la sécurité des ouvrages, la préservation écologique de la ripisylve et des écosystèmes et le respect des usages dans un environnement de qualité.

Irstea répond à cette demande en dirigeant, depuis 20 ans, des travaux sur les questionnements scientifiques et techniques liés au développement de la végétation sur les ouvrages hydrauliques en remblai : plusieurs thèses ont été conduites sur le sujet, de très nombreuses expérimentations engagées *in situ* et au laboratoire, un important retour d'expérience accumulé lors d'expertises et d'études et une connaissance complète de la bibliographie et des acteurs sur le plan national et international.

Ce livre, composé par Irstea, comble un manque en termes d'informations, de méthodologies et d'accompagnement des gestionnaires et des bureaux d'études sur la question de la gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques. Il vise à apporter des méthodes opérationnelles aux professionnels du domaine pour établir le diagnostic d'un ouvrage boisé et proposer un plan de gestion de la végétation.

Au croisement de plusieurs disciplines – l'écologie, le génie civil et l'hydraulique –, ce guide est le trait d'union entre des enjeux souvent contradictoires nécessitant des compétences plurielles pour apporter



des solutions durables et intégrées pour la gestion de la végétation. Ces compétences sont le plus souvent présentes au sein des services techniques des gestionnaires et des bureaux d'études, mais c'est bien la pluridisciplinarité des compétences qui faisait défaut et qui permet de proposer des solutions adéquates. Le temps de préparation de cet ouvrage, 5 ans, est révélateur de la difficulté de cette tâche, qui a nécessité un travail considérable pour aboutir à un manuel cohérent, clair et facile d'emploi que la profession pourra aisément s'approprier.

Les professionnels des ouvrages hydrauliques ont été étroitement associés, faisant de cet ouvrage un véritable manuel intégré opérationnel. Ils ont aussi largement contribué financièrement aux études en prenant en charge une grande partie des travaux sur le terrain, notamment l'arrachage de plusieurs centaines d'arbres pour l'étude des systèmes racinaires. Sans être exhaustif, je citerai les contributions de l'Association Départementale Isère-Drac-Romanche, des Dreal Paca et Franche-Comté, de la Compagnie Nationale du Rhône, d'EDF, de VNF, de Chambéry Métropole, du conseil départemental de l'Isère, du SMAVD, de la DDT de la Nièvre et de plusieurs autres gestionnaires publics d'ouvrages. Il faut également rappeler les organismes qui ont financé ces recherches depuis son origine ou qui contribuent aux recherches actuelles : Irstea, le ministère chargé de l'Écologie, la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (qui a également subventionné l'édition de ce guide), l'Europe, l'Irex via le projet National Erinoh, le Symadrem, la Fédération de recherche Eccorev et le Labex OT-MED.

Rédigé par deux de nos meilleurs ingénieurs chercheurs spécialistes en écologie forestière et en génie civil et notre premier docteur sur cette thématique, cet outil très complet propose les bonnes pratiques de la gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai et apporte des réponses précises et opérationnelles.

Je suis convaincu qu'il sera précieux à tous les techniciens et ingénieurs qui s'engagent dans une gestion durable et intégrée de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai des rivières et des fleuves.

Laurent Peyras

Ingénieur des Ponts, des Eaux et des Forêts

Docteur génie civil – Habilité à diriger des recherches

Directeur adjoint de l'unité de recherche Risques, Écosystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience d'Irstea



AVANT-PROPOS

Le présent guide s'intéresse aux ouvrages hydrauliques en remblai confrontés à un développement plus ou moins prononcé de végétation ligneuse. S'appuyant sur les connaissances et retours d'expérience les plus récents, il vise à expliquer aux gestionnaires de ces ouvrages la dynamique de croissance des arbres et arbustes et de leurs racines, à souligner les enjeux de sécurité liés au développement anarchique de la végétation ligneuse et à leur proposer des solutions concrètes d'intervention et de gestion, intégrant les critères environnementaux.

Les ouvrages hydrauliques concernés, à charge permanente ou temporaire, sont ceux constitués de remblai ou mixtes (remblai et maçonnerie). Pour ces ouvrages, une partie en remblai (terre, tout-venant, remblai compacté) et une fondation meuble assurent une fonction d'étanchéité, principale ou complémentaire, et sont potentiellement sujettes à l'installation et au développement d'arbres. Il s'agit de barrages en terre de diverses fonctions (eau potable, irrigation, loisirs, écrêtement des crues...), de digues d'aménagement hydroélectrique ou de canaux de navigation ou d'irrigation ou, enfin, de digues de protection contre les inondations de cours d'eau ou les crues torrentielles. Ces dernières digues sont des ouvrages à charge temporaire et leur parement côté rivière, exondé en dehors des crues, peut se boiser dans son intégralité, tout comme la crête et le parement côté zone protégée. Pour les barrages et digues à charge permanente, seul le sommet de parement amont peut se végétaliser, en plus de la crête et du parement aval. Les digues maritimes sont exclues du champ d'application du présent guide, bien que sur le principe, les risques liés à la végétation ligneuse soient similaires.

Par fonction, les ouvrages ciblés dans ce guide sont implantés au contact direct ou à proximité de l'eau, et les matériaux qui forment le remblai, les fondations et les sols aux alentours sont souvent fertiles. Ils constituent donc un milieu idéal pour l'installation de la végétation arborée, surtout s'ils sont peu ou pas compactés, cas général des constructions anciennes, abondantes dans le parc. De nombreuses digues de protection ont été édifiées au plus près ou même directement



au sommet de la berge (absence de ségonnal ou franc-bord, c'est-à-dire d'espace entre la berge et le pied de digue) et, dans ce cas, la nature et la gestion de la végétation des berges influent, elles aussi, sur la sécurité des ouvrages. La gestion de la végétation des berges et de l'ouvrage doit donc être intégrée dans une approche globale.

Cette gestion intégrée n'est pas un simple problème technique. Bien qu'artificiels ou artificialisés, ces milieux sont soumis à de multiples pressions sociales et les enjeux environnementaux y sont exacerbés. Les digues et les ripisylves associées constituent des corridors écologiques essentiels dans les zones de grande culture et les zones urbaines. Les milieux humides et rivulaires comptent parmi les habitats les plus menacés, et ayant perdu en proportion le plus de surface à l'échelle européenne en un siècle. Leur sauvegarde et leur réhabilitation éventuelle sont donc des priorités, traduites fréquemment par des statuts de protection ou de vigilance à différentes échelles : habitat prioritaire, site Natura 2000, réserve naturelle, espace naturel sensible, Znieff, espace boisé classé des PLU, etc. Dans les zones urbaines et à leurs abords, les berges et digues sont aussi devenues une composante importante des espaces verts, parfois la seule, et un élément clé du paysage, lieu de détente, promenade et activité sportive. C'est aussi le domaine des pêcheurs, et la végétation des berges et digues joue un rôle écologique important pour le milieu aquatique, comme décrit dans le chapitre 4 de ce guide. Malgré l'acuité des enjeux sécuritaires dans ces zones, les travaux visant à éliminer les arbres et arbustes, ou toute opération en modifiant la végétation, y sont donc perçus comme une dégradation de l'environnement. Ils provoquent fréquemment des protestations et souvent des blocages de la part des populations ou des élus locaux et d'associations de protection de la nature. Dans ce domaine, on verra que les plans de gestion, discutés dans le chapitre 4, sont de bons outils de négociation, médiation et communication qui permettent de prioriser les interventions pour une remise en état raisonnée des ouvrages.

Pour répondre aux objectifs ci-dessus, ce guide se décompose en quatre chapitres :

Le **chapitre 1** décrit les types de végétaux rencontrés sur les ouvrages hydrauliques en remblai et leurs avantages et inconvénients en termes de sécurité. Pour étayer l'analyse des risques, il précise la vitesse de croissance des arbres, et détaille particulièrement le mode et la vitesse de développement des systèmes racinaires dans les remblais, ainsi que leur décomposition, en fonction de l'environnement.



Le **chapitre 2** donne les informations clés sur la réglementation et les règles de l'art actuelles dans le domaine de la gestion des ouvrages hydrauliques et de leur végétation. Chacun devra l'actualiser car la réglementation évolue très vite.

Le **chapitre 3** fournit les bases pour un diagnostic objectif de la végétation et des risques associés. Après la description des principales natures d'ouvrages, il propose une typologie opérationnelle de la végétation, associée à des recommandations générales sur l'acceptabilité des types de végétation, en fonction des risques encourus, suivant les natures d'ouvrages hydrauliques. Il propose aussi des outils pratiques d'aide à la décision sur les objectifs de gestion.

Le **chapitre 4** pose en préambule les bases de la rédaction d'un plan de gestion, puis il développe successivement : les éléments à prendre en compte dans la gestion courante d'une végétation acceptable en termes de sécurité des ouvrages, et les recommandations pour la gestion curative d'une végétation jugée inacceptable en l'état, ou à terme, pour cette sécurité.

Enfin, le guide propose dans son **chapitre 5** six études de cas tirées de diagnostics et de travaux récents, ayant servi à affiner les connaissances qui sont présentées dans ce guide. Elles sont représentatives de situations fréquemment rencontrées, mais sans aucune prétention d'être exhaustives.



chapitre 1

Rôles et risques associés à la végétation présente sur les ouvrages hydrauliques



LES TYPES DE VÉGÉTATION

Les végétaux peuvent être classés en trois groupes selon leurs conditions optimales de développement en relation avec le bilan hydrique :

- les végétaux hygrophiles : ils ont besoin ou ils tolèrent de fortes quantités d'eau tout au long de leur développement ; certains sont adaptés à la submersion ou aux sols saturés d'eau ;
- les végétaux xérophiles : espèces pouvant s'accommoder de milieux ou climats secs, les plus résistantes d'entre elles tolérant une dessiccation partielle ;
- les végétaux mésophiles : intermédiaires entre hygrophiles et xérophiles, ces végétaux ne tolèrent ni l'engorgement prolongé du sol par l'eau, ni une forte ou longue sécheresse.

Comme les berges des cours d'eau, les ouvrages hydrauliques en remblai (digues et barrages) présentent des milieux variés, propices suivant le cas au développement de chacun de ces groupes : espèces hygrophiles à proximité des nappes phréatiques, canaux ou rivières en pied d'ouvrage ou de la retenue pour les barrages, espèces xérophiles sur les matériaux grossiers et drainants en crête ou haut de parement, et espèces mésophiles dans les situations intermédiaires. Le climat joue parallèlement un grand rôle dans la sélection des espèces : un matériau ou une position prédisposant au stress hydrique peuvent être compensés par un climat frais sans période sèche, tout comme un environnement a priori favorable peut être dégradé par de fortes sécheresses, en région méditerranéenne par exemple.

Au sein de ces trois groupes (hygro, xéro, méso), on distingue différentes strates de végétation (cf. annexe 1) :

- la strate herbacée, composée de plantes à tige verte et souple, non ligneuse, atteignant de 0,5 à 1,50 m de hauteur à maturité en général. Cette même famille comprend également les roseaux, cannes, et autres joncs (à tige creuse et rigide) qui peuvent parfois dépasser 4 m de haut ;
- la strate arbustive, composée d'arbustes ou buissons, végétaux mesurant moins de 7 m de haut à l'état adulte, dotés d'un ou plusieurs troncs ligneux de petite dimension (diamètre généralement inférieur à 7,5 cm) ;



- la strate arborée, composée d'arbres (végétaux ligneux de grande taille qui possèdent un tronc bien différencié dont les ramifications n'apparaissent qu'à une certaine hauteur au-dessus du sol) d'une hauteur potentielle supérieure à 7 m. Les arbres peuvent cependant avoir des troncs multiples s'ils rejettent après une coupe.

Il existe dans chaque strate des espèces exotiques envahissantes. Il s'agit d'espèces introduites par erreur ou volontairement dans un écosystème et qui peuvent engendrer des nuisances environnementales, économiques ou sanitaires, notamment par leur prolifération. Parmi les plus courantes : le robinier faux-acacia (improprement nommé acacia), l'érable negundo et l'ailante pour les arbres, l'arbre à papillon (*Buddleia*) pour les arbustes, la renouée du Japon et la berce du Caucase pour les grandes herbacées, des balsamines, solidages et asters pour les petites herbacées. Mais plus de 10 autres espèces posent des problèmes plus locaux, et sont parfois en forte et rapide expansion. Certaines plantes autochtones ayant un fort pouvoir de colonisation peuvent parfois devenir tout aussi envahissantes, comme la canne de Provence dans le sud de la France. Des plantes aquatiques comme les jussies peuvent aussi être envahissantes sur les rivières et plans d'eau, et véhiculées accidentellement par des travaux sur les berges et digues.

A contrario, certaines espèces végétales sont protégées. Au niveau national, elles sont listées dans des arrêtés du gouvernement français : celui du 20 janvier 1982, modifié à trois reprises en 1995, 2006 et 2013 (cf. chapitre 2 p. 51) :

<http://www.legifrance.gouv.fr/>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_espèces_végétales_protégées_sur_l'ensemble_du_territoire_français_métropolitain

D'autres espèces à enjeux plus locaux bénéficient d'une protection régionale, dont le niveau est équivalent à celui offert par les arrêtés nationaux. Des arrêtés ministériels spécifiques aux différentes régions concernées listent ces espèces.

Les arbres les plus fréquemment rencontrés sur les ouvrages hydrauliques en remblai en France métropolitaine sont :

- d'une part, des hygrophiles tels que les peupliers, les saules et l'aulne glutineux, ces deux derniers étant plus fréquents au pied des remblais à proximité immédiate de l'eau. L'aulne a la particularité de développer, en plus des racines terrestres habituelles, des racines supportant d'être noyées continuellement et qui tapis-



sent les berges sous l'eau. C'est pourquoi on le trouve surtout en alignement en bordure de l'eau. Peu d'autres arbres hygrophiles ont ce pouvoir. En France, seul le platane semble capable de l'imiter dans certains cas.

- d'autre part, des mésophiles tels que le robinier (parfois issu de plantations), le frêne, les érables, les chênes et plus localement le platane, qui se situent plus fréquemment sur les talus et crêtes d'ouvrages. Quand le climat n'est pas trop aride, le peuplier noir, tout en étant naturellement hygrophile, supporte les conditions assez sèches des remblais de digues où sa croissance est cependant très diminuée.



RISQUES ET BÉNÉFICES LIÉS AUX DIFFÉRENTS TYPES DE VÉGÉTATION

Bien que propices au développement d'une biodiversité floristique et faunistique, toutes les strates de végétation, si elles ne sont pas régulièrement entretenues (fauchage, débroussaillage, abattage), gênent la surveillance visuelle des ouvrages (cf. chapitre 3 p. 63) et favorisent l'installation d'animaux fouisseurs qui creusent des terriers dans les remblais. Comme les travaux d'entretien peuvent impacter la biodiversité, leur réalisation doit être parfaitement réfléchi (cf. chapitre 4 p. 97).

Afin d'évaluer les avantages et les inconvénients des végétaux implantés sur les ouvrages (tableau 1 p. 21 pour le cas des digues), il faut considérer leurs parties aérienne et racinaire. Il faut aussi distinguer, le plus souvent, les talus côté terre (aval) et côté cours d'eau, retenue ou canal (amont), qui sont soumis à des contraintes en partie différentes : celles liées à l'écoulement externe ou à la présence de l'eau (batillage, courant, tourbillons, hauteur d'eau, surverse), celles liées à l'écoulement interne éventuel (position de la nappe, systèmes de drainage), celles liées aux protections (perrés, revêtements) si elles existent, etc.

Herbacées

Les herbacées souples offrent une protection superficielle du sol : leur partie aérienne intercepte les eaux et forme un tapis protecteur tandis que la partie racinaire fixe quelques dizaines de centimètres d'épaisseur de sol. Elles permettent un entretien mécanique par fauchage, rapide et peu onéreux. Ainsi entretenues, elles ne favorisent pas l'installation d'animaux fouisseurs et leur présence est avantageuse à bien des titres.

Les herbacées rigides comme les cannes de Provence ont les mêmes propriétés mais peuvent générer des embâcles lorsqu'elles sont déracinées par grosses touffes ou plaques pendant les crues, leur enracinement étant assez superficiel. De plus, elles présentent l'inconvénient



d'être souvent envahissantes : en couverture dense ou haute (par manque d'entretien), elles masquent les désordres, cachent les animaux fouisseurs et peuvent empêcher ou au moins compliquer l'accès aux ouvrages.

Arbustes

Les strates arbustives ont également un rôle de protection et de renforcement du sol en surface et plus en profondeur (jusqu'à parfois plus d'1 m). Mais leurs racines ligneuses peuvent être à l'origine de dégradations, notamment pour les parties d'ouvrage « dures » (maçonnées, bétonnées ou bitumineuses) comprenant des joints ou des fissures que les racines pénètrent et agrandissent (fig. 1.1). Les formations arbustives denses gênent la surveillance visuelle des talus et constituent un habitat très propice aux animaux fouisseurs. Dans des systèmes endigués très étroits, et côté cours d'eau, elles peuvent diminuer la capacité d'écoulement du lit, donc surélever la ligne d'eau. Par contre, elles ralentissent le courant à proximité des talus, donc diminuent l'érosion externe potentielle. Les arbustes à port rigide et à couronne dense peuvent, lorsqu'ils sont isolés ou en petits massifs, provoquer des tourbillons érosifs s'ils se trouvent noyés dans un courant.



Figure 1.1. Dégradation d'une dalle béton par des racines d'arbuste ayant colonisé une fissure (ph. C. Zanetti).

Arbres

La strate arborescente peut avoir des fonctions bénéfiques : interception des pluies, renforcement du sol en surface et dans la zone d'exploration des racines (de 1 à 5 m de profondeur en général), stabilisation des terrains en pente par augmentation de la cohésion du sol et de sa



résistance au cisaillement et, en saison de croissance (du printemps à l'automne), par absorption de l'eau dans le sol. Elle ombrage et couvre en partie les cours d'eau, limitant les températures extrêmes en été comme en hiver. Elle a un rôle écologique et social (cf. chapitre 4 p. 97). C'est pourquoi de nombreux arbres ont été plantés, surtout jusqu'aux années 1950 mais encore récemment, sur des digues et barrages afin de stabiliser les talus en surface ou de les végétaliser dans un but paysager. On ignorait alors leurs impacts négatifs potentiels. Remarquons que les remblais modernes sont normalement construits dans le respect des règles de calcul de stabilité et n'ont pas besoin du renfort des racines ligneuses pour être stables.

Mais la présence d'arbres sur les ouvrages hydrauliques génère des risques importants, principalement liés à leur système racinaire.

Risque d'érosion externe, par arrachement comme détaillé ci-dessous et **risque d'érosion interne**, développé plus en détail dans le paragraphe sur le développement des racines p. 31. Côté cours d'eau, un peuplement arboré ou arbustif dense accentue aussi le risque de surverse par rehaussement de la ligne d'eau dans les lits étroits (cf. chapitre 3 p. 63, fig. 3.21 p. 82).

Lorsqu'un arbre est déraciné par le vent ou le courant, le système racinaire emporte avec lui une quantité variable de matériaux : cette quantité dépend d'une part du type et de la densité de ce système, et d'autre part de la cohésion du sol. La loupe d'arrachement peut mesurer de 1 à 10 m de diamètre et de 0,5 à 3 m d'épaisseur (cf. paragraphe sur le développement des racines p. 31 et fig. 1.19 p. 45 et fig. 3.26 p. 95). Cela réduit ponctuellement la largeur du remblai lorsque l'arbre se situe sur l'un des talus, et engendre un point bas lorsque l'arbre occupe une crête étroite. Il peut en résulter alors :

- un glissement du talus de l'ouvrage du fait de la rupture de pente (instabilité mécanique) ;
- un affouillement du pied ou une érosion externe du talus de l'ouvrage côté rivière ou canal par des courants tourbillonnaires (fig. 1.2) ;
- un raccourcissement du gradient hydraulique dans le remblai avec risque d'érosion interne (cf. paragraphe sur le développement des racines p. 31) ;
- une surverse au niveau du point bas créé en crête ¹.

¹ Un cas avéré de brèche de ce type sur digue de protection a été signalé lors des crues de l'été 1997 en Allemagne, Pologne et Tchéquie (cf. rapport de mission Mériaux-Tourment en Pologne – novembre 1998).



Figure 1.2. Affouillement du pied d'une digue par des courants tourbillonnaires derrière un arbre tombé (ph. C. Zanetti).

Le risque de déracinement d'un arbre est bien sûr lié entre autres à la taille de son houppier. Les arbres jeunes, plus souples, sont moins susceptibles d'être déracinés que les arbres plus âgés qui offrent une grande prise au vent et moins de flexibilité. Mais ce risque dépend aussi beaucoup du rapport entre la taille de l'arbre et celles de son système racinaire, et du type de système racinaire :

- sur les milieux riches et bien alimentés en eau, les arbres peuvent atteindre rapidement de grandes hauteurs et de forts diamètres avec des systèmes racinaires peu développés. Ce sera le cas notamment quand ils poussent à proximité immédiate d'une rivière, d'un canal ou d'une retenue. Quand ils poussent sur des matériaux pauvres et drainants, ou en climat très sec sans accès proche à une ressource en eau, les arbres restent petits et consacrent beaucoup plus de ressources au développement des racines : des petits arbres peuvent alors avoir un système racinaire très étendu ou très profond, ce qui les rend relativement plus résistants à l'arrachement par le vent ou le courant. Dans les zones habituellement ventées avec une direction préférentielle, les arbres développent des racines « haubans » qui les protègent de ces vents dominants, mais pas de vents venant d'autres directions ;
- concernant le type de système racinaire, sa résistance à l'arrachement dépend beaucoup de sa profondeur et de la présence ou non de pivots ancrant l'arbre dans le sol et opposant une forte résistance au basculement. Ce point est détaillé dans le paragraphe sur la structure racinaire p. 34 (cf. encadré p. 39).

Le poids des arbres et la force exercée sur eux par le vent sont transmis au sol par les racines, réduisant le facteur de sécurité et augmentant le risque de glissement. Ce risque s'accroît lors d'une décrue rapide (digue de protection) ou lors d'une vidange de plan d'eau (canal ou barrage) lorsque le remblai est saturé, à cause des sous-pressions que cela crée. Les arbres venant à basculer dans le cours d'eau, le canal ou



la retenue forment des embâcles, qui entravent l'écoulement et induisent un risque de colmatage et de débordement sur des zones à fort enjeu telles que les piles de pont, usines hydroélectriques, zones étroitement endiguées ou évacuateurs de crues. La rupture brutale de ces obstacles peut provoquer des submersions par la vague de débâcle¹. Même lorsqu'ils sont debout, la base des troncs d'arbres constitue un obstacle ponctuel pour l'écoulement de l'eau, favorisant la formation de tourbillons. Ces tourbillons très érosifs sont susceptibles de se former à la fois dans le courant côté rivière (digue de protection) et, en cas de surverse, dans la lame d'eau qui descend le talus aval. L'érosion ainsi créée est susceptible à son tour de déstabiliser les arbres en déchaussant leurs racines.

	Herbacées souples fauchées	Herbacées rigides	Arbustes	Arbres
Contrôle de l'érosion superficielle	😊	😊	😊	😊
Intérêt potentiel écologique	😊	😊	😊	😊
Intérêt paysager et social	😊	😊	😊	😊
Stabilisation des pentes (jusqu'à 3 – 5 m de profondeur)				😊
Permettent 😊 ou entravent 🚫 l'entretien mécanique ^a	😊	😊	😊	🚫
Prise au vent et au courant (déstructuration du sol, renversement avec arrachage d'une loupe de matériaux)				🚫
Réduction de la capacité d'écoulement du lit ^b			🚫	🚫
Favorisent l'érosion par tourbillons			🚫	🚫
Pèsent sur le remblai (à la décrue ou vidange)				🚫
Favorisent 🚫 ou pas 😊 les animaux fouisseurs	😊	🚫	🚫	
Formation d'embâcles		🚫	🚫	🚫
Dégradations externes : perrés, revêtements		🚫	🚫	🚫
Dégradations internes (décompaction, érosion)			🚫	🚫

(a) La végétation arbustive gêne ou empêche le fauchage mais pas le broyage mécanique.

(b) Une réduction significative de la capacité d'écoulement du lit par une végétation dense surélève la ligne d'eau à son niveau et en amont.

Tableau 1. Bénéfices 😊 et risques 🚫 liés aux différents types de végétation sur les digues.

¹ Une vague de débâcle est créée par la rupture brusque d'un embâcle qui formait un barrage dans un cours d'eau.



Enfin, les arbres développent des systèmes racinaires de grandes dimensions susceptibles de dégrader physiquement les ouvrages. Ce point est détaillé dans le paragraphe sur le développement des racines p. 31 et le tableau 1.

Sur les ouvrages hydrauliques, les risques liés aux arbres et arbustes dépendent largement de la taille de ces derniers. Concevoir un plan de gestion implique souvent de leur imposer un âge limite ou des dimensions maximales (et une densité en rapport avec ces dimensions), que ce soit pour leur partie aérienne (hauteur, diamètre) ou pour leur système racinaire. La gestion doit aussi prévoir un échancier de travaux en fonction de ces limites. Il faut donc bien connaître la vitesse de développement de ces deux parties (aérienne, racinaire) pour les principales espèces végétales concernées, ce qui implique une étude spécifique. Bien qu'elles soient théoriquement corrélées, les dimensions relatives des parties aériennes et racinaires vont dépendre de nombreux facteurs : climat et type de matériaux, comme discuté précédemment, disponibilité de ressources en eau ou nutritives, densité du peuplement et mode de gestion. Enfin, il est fréquent que les arbres poussant sur des ouvrages hydrauliques soient régulièrement coupés pour limiter leur hauteur ou leur diamètre. Lorsque ces arbres sont capables de rejeter de souche, ces recépages ralentissent provisoirement la croissance racinaire, mais celle-ci reprend rapidement. Si le peuplement est ainsi traité en taillis depuis longtemps, on peut avoir d'énormes souches sous des petits arbres.

La gestion des arbres et arbustes en fonction de leur taille ou de leur âge doit par ailleurs tenir compte du fait que le cortège d'espèces animales et végétales évolue avec ces dimensions et avec le temps et que les travaux modifient en permanence la structure et le nombre des habitats correspondants.

Le paragraphe suivant détaille successivement la croissance des parties aériennes et souterraines des arbres.



VITESSE DE CROISSANCE DES ARBRES ET DE LEURS RACINES

Facteurs contrôlant la croissance aérienne des arbres

La production de biomasse par la partie aérienne des arbres est globalement contrainte par la fertilité du sol, celle-ci comprenant la richesse minérale et l'approvisionnement en eau. Le climat joue également un rôle important : directement par la durée de la période chaude favorable à la croissance ; et indirectement par la répartition des pluies dans l'année et leur régularité d'une année sur l'autre. Ces paramètres climatiques, combinés aux caractéristiques du sol (ou ici au matériau de l'ouvrage), vont déterminer la quantité d'eau disponible pour l'arbre. Le régime d'écoulement de la rivière ou du canal mais aussi la profondeur de la nappe et ses variations temporelles sont à prendre en compte, car ils peuvent rendre l'arbre partiellement indépendant ou au contraire totalement dépendant du climat ou du sol pour leur approvisionnement en eau.

Si l'eau est indispensable, l'excès d'eau à faible profondeur ou latéralement, qu'il soit permanent ou temporaire, empêche le développement de racines pour de nombreuses espèces d'arbres et se révèle donc défavorable à leur croissance. Leur sensibilité à cet engorgement est cependant très variable. L'aulne peut développer une partie de ses racines à la surface de berges immergées et les espèces hygrophiles (saules, peupliers) sont plus tolérantes à ces engorgements et à la submersion temporaire que les espèces plus forestières.

Finalement, il est impossible de prédire le développement aérien potentiel des arbres (vitesse, taille maximale) sans connaître l'ensemble de ces facteurs du milieu.

Le potentiel de production de biomasse aérienne est réparti entre la croissance primaire (allongement des branches et du tronc, production de feuilles ou aiguilles et reproduction) et la croissance secondaire (croissance en diamètre du tronc et des branches). Pour un arbre donné, cette répartition dépend beaucoup de la concurrence avec ses voisins :



- en peuplement dense, à cause de la concurrence pour la lumière, l'arbre privilégie la croissance en hauteur pour rester dominant, au détriment de la croissance en diamètre. Les branches basses meurent rapidement, ce qui limite aussi l'approvisionnement du tronc. Il existe cependant différents types d'espèces vis-à-vis du besoin en lumière : certaines dites héliophiles ne tolèrent pas l'ombre (peupliers, saules, robinier, frêne, merisier, pins, mélèze...) et ne peuvent pousser que si elles sont dominantes ou si elles se situent dans des trouées du peuplement. D'autres, dites sciaphiles, tolèrent bien l'ombre au moins durant leur jeunesse (hêtre, ormes, chêne blanc, sapins) ; elles peuvent pousser lentement mais régulièrement en sous-bois durant de longues années, en attendant que le couvert s'ouvre. Toutes les espèces sciaphiles poussent cependant plus vite en hauteur comme en diamètre lorsqu'elles sont en pleine lumière. Dans les peuplements extrêmement denses et dans les milieux pauvres ou secs, l'excès de concurrence entre arbres peut limiter globalement la croissance de chaque individu, y compris en hauteur, par manque de ressources pour chacun ;
- à densité intermédiaire ou faible, la croissance en hauteur sera peu modifiée par rapport aux fortes densités, car la concurrence existe encore pour la lumière. Mais la croissance en diamètre sera plus rapide en raison d'une plus grande quantité d'énergie captée et de la survie de nombreuses branches dans le bas des houppiers qui permettra de lui affecter plus de ressources ;
- à l'état isolé, les arbres privilégient un développement maximal en largeur de houppier et nombre de branches, qui est optimal pour la photosynthèse et minimise l'énergie dépensée pour faire monter la sève des racines à la cime. Ils investissent dans la croissance secondaire qui les rend physiquement plus résistants. Ils poussent donc un peu moins vite en hauteur et plus vite en diamètre.

En pratique, la croissance en hauteur dépend surtout de la fertilité dans une large gamme de densités, en dehors des deux extrêmes : arbres isolés et peuplement extrêmement dense. La hauteur d'un arbre peut donc être un bon indicateur des conditions de milieu une fois son âge connu, ou un bon indicateur de son âge si la qualité du milieu est connue. Au contraire, le diamètre d'un arbre, qui dépend surtout de l'histoire du peuplement, est rarement un indicateur fiable. Il est cependant corrélé à la fertilité, toutes conditions semblables par ailleurs.



Modèles de croissance en hauteur

Pour une espèce d'arbre et dans un contexte environnemental donné, l'évolution de la croissance en hauteur avec l'âge obéit à des lois simples. Il peut y avoir une période de croissance lente dans le très jeune âge qui correspond à la phase d'installation du système racinaire à la recherche de ressources, phase d'autant plus longue que le milieu est pauvre ou les ressources lointaines. En principe, la croissance est ensuite rapide dans le jeune âge puis ralentit progressivement en approchant de la hauteur maximale potentielle dans ce contexte. Il peut aussi y avoir une phase d'installation en sous-bois ou en concurrence avec des arbustes avant que l'arbre ne devienne dominant.

Comme il est rare que cette croissance en hauteur soit mesurée en continu sur les ouvrages hydrauliques, on établit ces lois en faisant des analyses de tiges. Cette technique consiste (1) à débiter le tronc d'arbres adultes, de la souche au sommet, en billons d'une longueur allant de quelques décimètres à quelques mètres, (2) à compter les cernes de croissance à chaque niveau de coupe et donc à différentes hauteurs, (3) connaissant l'âge qu'avait l'arbre à chacune de ces hauteurs, à reconstituer sa croissance passée. On peut alors modéliser cette croissance à l'aide d'équations, qui sont traduites sous forme de courbes et abaques à l'usage des gestionnaires (fig. 1.3c).

On peut aussi évaluer ces courbes de croissance en hauteur en mettant en relation l'âge et la hauteur d'individus de toutes les classes d'âge. On obtient l'âge soit en abattant les arbres puis en comptant les cernes sur la souche, soit en prélevant des carottes de bois à l'aide d'une tarière le plus près possible de la souche. Cependant, pour être fiable, cette technique demande un grand nombre d'arbres. D'autre part, elle est moins précise sur le modèle de croissance dès que le milieu est un peu variable, bien que cette précision reste en général largement suffisante pour les besoins de la gestion.

La forme du modèle de croissance est le plus souvent stable pour une espèce dans une large gamme de climats d'un type donné : méditerranéen, atlantique, montagnard, continental (fig. 1.3). Elle peut varier entre ces types climatiques. La vitesse peut aussi varier avec le milieu tout en conservant la forme du modèle. Les courbes sont en général établies pour des arbres poussant en pleine lumière. Pour les arbres poussant sous couvert, la croissance en hauteur est trop variable, dépendant de la quantité moyenne de lumière disponible, de la répartition spatiale de cette lumière en fonction des saisons et de l'évolution de ces facteurs au fil des ans.

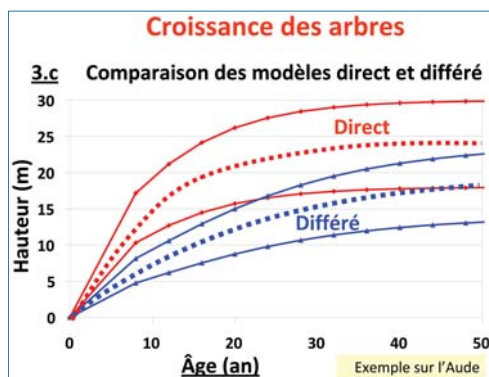
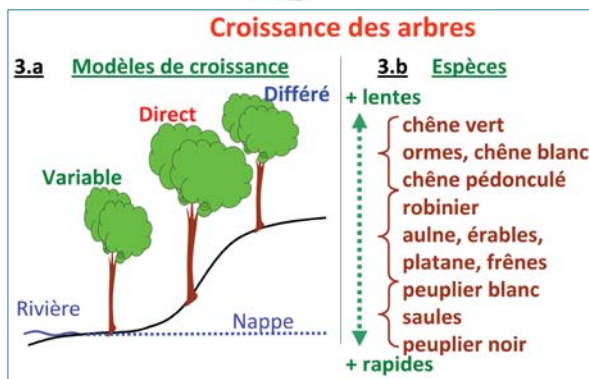


Figure 1.3. Cas des berges et digues de l'Aude : croissance en hauteur des arbres poussant en pleine lumière en fonction de l'accès à l'eau et de l'espèce. 3a : Modèle « direct » si l'eau est accessible dès le jeune âge, différé si la ressource est plus lointaine. En cas d'excès d'eau (nappe affleurante, hydromorphie sévère, submersions fréquentes), la croissance est variable en fonction de l'espèce, de sa tolérance à cet excès et à la fréquence des épisodes d'asphyxie. 3b : Potentiel relatif de vitesse de croissance en hauteur des espèces. 3c : Courbes de croissance en hauteur avec l'âge suivant le modèle. Dans la gamme d'amplitude des modèles directs et différés, les espèces se positionnent en fonction de leur potentiel relatif de croissance. Les espèces à croissance rapide seront en haut du faisceau, les espèces plus lentes dans sa partie inférieure.

La figure 1.3 donne un exemple de modèles de croissance et de leurs variations avec le milieu dans le contexte des digues et berges de l'Aude, sur un substrat de matériaux fins. La croissance peut accélérer dès le plus jeune âge lorsqu'une ressource en eau est proche, pour les arbres situés près du pied de digue ou de berge (fig. 1.3a). Mais alors, la limite de hauteur propre à l'espèce, qui est, dans cet exemple, contrainte en outre par les vents violents et fréquents (tramontane), est atteinte assez rapidement. Si l'arbre doit préalablement explorer le milieu sur une grande profondeur ou jusqu'à une grande distance de la souche pour trouver des ressources en eau, la croissance est différée. Mais les ressources n'étant pas trop limitantes, une fois que les racines ont atteint



la nappe en profondeur ou la berge en suivant le talus, cette croissance se poursuit plus longtemps et ces arbres rattrapent en partie leur retard. Sur un milieu très limitant (matériaux grossiers dans ce contexte méditerranéen), les courbes de croissance plafonneraient aussi très vite sur les hauts de digues et berges, en raison de l'absence de ressources nutritives couplées au manque chronique d'eau. Elles auraient aussi une phase de croissance très faible dans le très jeune âge, suivie d'une légère accélération. Dans l'hypothèse où les racines des arbres du haut de digue atteindraient la rivière ou le canal au bout de 15 ou 20 ans, on pourrait observer une forte accélération après la phase initiale de croissance lente.

Les modèles de la figure 1.3 sont assez représentatifs de la croissance des principales espèces poussant sur les digues et berges, mais ils doivent cependant être adaptés à chaque contexte climatique et à chaque type de matériaux. La croissance initiale est souvent plus lente pour le modèle « différé ». Par ailleurs, chaque espèce possède un potentiel intrinsèque en termes de vitesse de croissance en hauteur (fig. 1.3b).

Si le rapport en biomasse des parties aériennes et souterraines des arbres est très variable, le rapport entre hauteur de l'arbre et profondeur de l'enracinement l'est encore plus, car il dépend de contraintes physiques indépendantes. Or ce rapport détermine très largement la résistance des arbres au vent, et donc le risque d'arrachement. Un arbre peut combiner une grande hauteur, grâce à une ressource en eau importante, et un enracinement superficiel en raison de contraintes physiques (hydromorphie, nappe permanente). Il est alors très vulnérable. Cette vulnérabilité peut être partiellement compensée par le développement de grosses racines traçantes qui courent en surface du sol sur de longues distances, et qui servent de haubans.

Vitesse de croissance et taille des racines

L'architecture des systèmes racinaires (disposition, taille et orientation des racines) ainsi que la vitesse de croissance des racines sont des sujets fondamentaux pour la sécurité des digues et barrages en remblai, tant sur le plan mécanique qu'hydraulique.

Un arbre adulte de grande taille peut cumuler plus d'un kilomètre de racines ligneuses (diamètre > 2 mm). On observe dans ces racines, comme dans le bois de la partie aérienne, des cernes de croissance an-



nuels (fig. 1.4) pour la plupart des espèces. Ils sont plus ou moins visibles selon l'espèce et l'âge de l'arbre : très lisibles chez les résineux, le robinier (fig. 1.4a), les chênes à feuilles caduques, les frênes ou les érables, moins chez les peupliers (fig. 1.4b), les saules et les feuillus à feuilles persistantes (chêne vert par ex.). Chez certaines espèces, telles que le robinier, les chênes, les frênes, il est aisé de distinguer le bois de cœur (duramen) de l'aubier où circule la sève. Ce bois de cœur se développe en partant du centre après un nombre d'années variable (8-25 ans) suivant l'espèce et la vigueur de l'arbre. Il correspond à la mort des cellules qui sont progressivement remplies de substances assurant leur rigidification (et donc la résistance mécanique de la racine) et leur protection contre les agents destructeurs (insectes, champignons). Le bois de cœur est, chez certaines espèces comme les chênes et le robinier, très résistant à la dégradation, contrairement à l'aubier qui ne l'est quasiment jamais, quelle que soit l'espèce.

Chez toutes les espèces, le diamètre des racines croît avec l'âge. Cette relation n'est cependant pas simplement quantifiable car elle dépend de nombreux facteurs. La figure 1.5 donne quelques exemples de vitesses de croissance en diamètre de racines mesurées dans des milieux différents (Zanetti et al. 2010¹). Elle est **purement illustrative et ne doit pas être généralisée**. En moyenne, la croissance des racines apparaît plus lente dans les sites de montagne (courte saison de végétation) et en zone méditerranéenne (sécheresse estivale). Chez toutes les espèces, sauf l'érable negundo pour lequel il y a peu de données, on observe une forte variabilité (30 à 50 % de la moyenne) de la croissance des racines.



Figure 1.4. Coupes de racines de robinier (a) et de peuplier (b) (photos C. Zanetti).

¹ Zanetti C., Guibal F., Brugier M., Vennetier M., Mériaux P., Provansal M. (2010). « Caractérisation de la croissance racinaire d'essences ligneuses implantées sur des digues fluviales ». Coll. Edytem 11 :115-122.

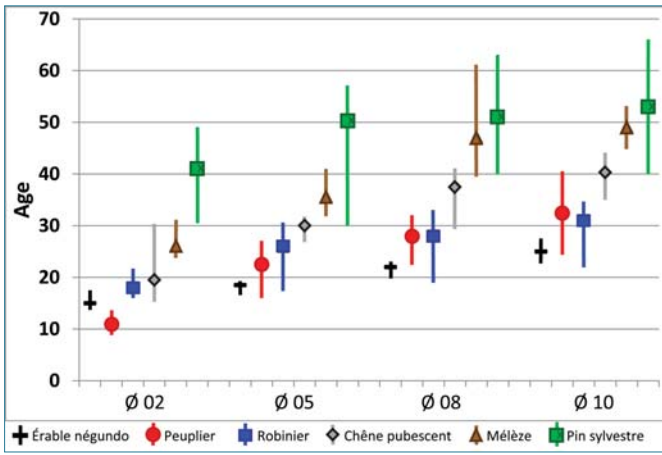


Figure 1.5. Âge des racines en fonction du diamètre et de l'espèce. Érable négundo et peuplier hybride sur les digues de la Loire, robinier et chêne pubescent sur les digues du Rhône en région méditerranéenne, mélèze et pin sylvestre sur une digue de retenue de montagne dans le sud des Alpes.

Cette variabilité est générale : certaines racines se développent rapidement parce qu'elles ont un accès à des ressources essentielles, d'autres beaucoup plus lentement en absence de ces ressources. Pour les racines traçantes, longues et peu ramifiées, la croissance en diamètre est relativement homogène sur une grande partie de leur longueur. Pour les racines courtes très ramifiées, cette croissance est d'autant plus rapide que l'on se trouve à proximité de leur point d'insertion, chaque segment dépendant du nombre de ramifications qui l'alimentent. La croissance en longueur des racines traçantes est évidemment beaucoup plus rapide que celle des racines courtes (fig. 1.6), la différence étant plus marquée sur matériaux grossiers.

Sur matériau fin, un grand nombre de racines se partagent les ressources et alimentent l'arbre. Cette concurrence limite leur croissance en diamètre. Sur matériau grossier, peu de racines partagent les ressources et elles ne sont pas en concurrence. Leur croissance est donc plus rapide. C'est ainsi

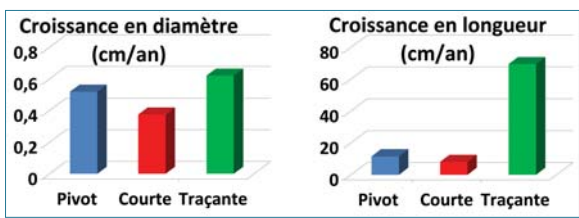


Figure 1.6. Vitesse de croissance en diamètre et en longueur des trois types de racines chez le peuplier. Exemple des digues du Rhône sur matériaux grossiers.



que, pour une espèce donnée, le diamètre moyen des racines primaires insérées sur la souche est 50 % supérieur sur matériau grossier à celui sur matériau fin alors que le diamètre moyen des troncs est à l'inverse 50 % plus faible. À matériau et climat équivalents, la croissance des racines est proportionnelle à la croissance de la partie aérienne des arbres.

Comme déjà suggéré ci-dessus par la figure 1.3, la croissance relative de parties aériennes et racinaires peut varier dans le temps. Dans le cas d'arbres situés sur des hauts de talus ou crêtes dans des matériaux grossiers pauvres et filtrants, le système racinaire à la recherche de ressources peut se développer plus rapidement que la partie aérienne dans un premier temps. Puis l'arbre ayant accès à ces ressources et notamment à l'eau en bas de talus ou en profondeur, la relation peut s'inverser, les racines n'ayant plus de raisons de prospecter tandis que la partie aérienne bénéficie de ressources abondantes. C'est typiquement le cas de la croissance « différée ».



DÉVELOPPEMENT ET IMPACTS DES SYSTÈMES RACINAIRES DANS LES OUVRAGES HYDRAULIQUES EN REMBLAI

Rappelons ici que l'enracinement des arbres engendre des risques pour les ouvrages hydrauliques en remblai, qu'ils soient à charge temporaire (digues de protection contre les inondations) ou permanente (digues de canaux ou barrages).

Figurant parmi les principales causes de rupture de ces ouvrages hydrauliques en terre, **le mécanisme d'érosion interne** est favorisé par la présence des systèmes racinaires : ceux-ci constituent dans tous les cas des zones d'hétérogénéité dans le corps du remblai ou au contact remblai-fondation (fig. 1.16 p. 39), et des zones de perméabilité accrue lors de leur décomposition. *A contrario*, lorsque la circulation d'eau est faible dans un remblai, un système racinaire puissant et dense peut la réduire en absorbant une partie de cette eau en période d'activité de la végétation, et parce qu'il représente un obstacle physique à l'écoulement. Mais plus cet effet est favorable durant la vie de l'arbre (occupation dense de l'espace), plus le risque sera grand à sa mort ou lors du dépérissement d'une partie du système racinaire. La mort partielle de ce système peut se produire en raison de maladies, attaques de parasites, vieillissement, ou lors de la coupe des espèces qui rejettent. Sur un arbre adulte même bien portant, il est courant d'observer 10 à 15 % de biomasse morte dans les racines ligneuses. Par ailleurs, le renouvellement continu et la décomposition des radicelles et poils absorbants, qui assurent le prélèvement de l'eau et des éléments nutritifs, contribue à modifier la composition, la structure et la perméabilité du matériau. Ces radicelles, qui se comptent par millions dans un seul mètre cube de sol fertile sous un gros arbre, représentent jusqu'à 90 % de la longueur totale du système racinaire, soit plusieurs kilomètres.



Figure 1.7. Colonisation par des racines d'arbres d'un joint ouvert de perré maçonné. Amorces de déstructuration pouvant aboutir à un large trou dans l'ouvrage en cas de déracinement de l'arbre (ph. C. Zanetti).

De leur vivant, les racines peuvent avoir une action mécanique ou hydraulique défavorable :

- décompactage des matériaux de remblai, suivant leur nature ;
- déstructuration des revêtements maçonnés, bétonnés ou bitumineux (fig. 1.7) ;
- colonisation et agrandissement des fissures et des joints (fig. 1.1 p. 18) ;
- envahissement et colmatage des systèmes de drainage ou des filtres.

On leur reconnaît cependant un rôle protecteur pour les talus en pentes fortes (fig. 1.8) et un rôle stabilisateur pour les berges et talus de digue quand elles pénètrent en profondeur dans le sol et se ramifient. C'est pourquoi des arbres ont jadis été plantés en nombre sur les digues, et en particulier celles de canaux de navigation. C'est aussi la base des techniques de génie végétal pour la protection des berges. Comme pour la circulation de l'eau, leur efficacité à renforcer le sol lorsqu'elles sont vivantes est proportionnelle aux risques qu'elles engendrent en mourant. Après pourrissement, les systèmes racinaires génèrent un risque d'effondrement lorsqu'il s'agit de souches ou de racines de fort diamètre



Figure 1.8. Racines exposées sur une portion de digue érodée. On peut imaginer aussi bien : 1) le rôle protecteur et stabilisant joué par ce système racinaire, dont certaines racines s'enfoncent dans le talus ; 2) le rôle de plan de glissement qu'il a pu jouer pour la couche de terre sous laquelle il s'est développé initialement, et qu'il a pu déstabiliser à cause de la croissance en diamètre des racines ; 3) le danger que représente un tel système racinaire s'il vient à se décomposer dans la digue, créant de larges vides, ou s'il était arraché avec l'arbre lors d'une tempête, emportant avec lui l'ensemble du remblai qu'il a entièrement colonisé. (ph. Irstea).



Figure 1.9. Effondrement en crête de digue lié à la décomposition d'une souche (ph. J.-F. Gomez).



Figure 1.10. Érosion interne active débouchant sous une vieille souche en décomposition, l'eau suivant probablement le cheminement de racines dans le talus. (ph. M. Vennetier).

(fig. 1.9). De plus, la création de conduits francs ou à perméabilité élevée, par décomposition des racines, favorise les infiltrations et la circulation de l'eau (fig. 1.10). Cela amène dans les cas extrêmes à la formation de renards hydrauliques (manifestation finale de l'érosion interne) pouvant dégénérer rapidement en brèches (fig. 1.11). Dans certains cas extrêmes (petites digues de canaux avec arbres centenaires), le système racinaire a envahi la totalité du remblai et représente un fort pourcentage de la digue elle-même, ce qui peut provoquer localement la destruction totale de l'ouvrage par arrachement ou son effondrement généralisé par pourrissement. Comme rappelé précédemment, la décomposition continue des racines fines au fur et à mesure de leur renouvellement peut aussi modifier à long terme les caractéristiques du matériau, et donc aggraver le risque.



Figure 1.11. Formation d'une brèche sur une digue du Vidourle (ph. mairie Marsillargues).



Le développement racinaire des espèces arborescentes implantées dans les ouvrages hydrauliques peut être plus ou moins gênant vis-à-vis de la sécurité. Le risque lié aux racines vivantes dépend de la structure des systèmes racinaires, de la morphologie des racines et de leurs dimensions, et de la sensibilité des ouvrages concernés. Pour des racines mortes, le risque dépend de la taille et du degré de décomposition des racines, de leur position dans le remblai, de la dimension de l'ouvrage et de la nature et de la répartition des matériaux constitutifs du remblai.

Structure et architecture racinaires

On distingue les risques liés à la structure des systèmes racinaires entiers (observation globale des souches) de ceux liés à l'architecture des racines individuelles.

Les types de systèmes racinaires

Les systèmes racinaires peuvent être classés en quatre types suivant la répartition spatiale des racines : systèmes traçants, fasciculés, mixtes ou pivotants (fig. 1.12).

Dans les **systèmes traçants** (appelés aussi superficiels), toutes les racines principales de gros diamètre se développent parallèlement à la surface du sol, et à faible profondeur, formant une « galette » peu épaisse. À l'opposé, dans les **systèmes fasciculés**, les racines principales se développent sans angle préférentiel par rapport à la surface, formant une boule homogène dans toutes les directions. Les **systèmes pivotants** sont dominés par une ou plusieurs racines verticales de fort diamètre. Les **systèmes mixtes** sont une combinaison des systèmes pivotants et superficiels. Ils allient un réseau de racines superficielles et une ou quelques grosses racines verticales. Les déterminismes du type d'enracinement sont précisés plus loin dans ce paragraphe.

Les études conduites par Irstea le long d'une dizaine de rivières et fleuves ont démontré que la structure des systèmes racinaires est surtout influencée par l'environnement de l'arbre (type et répartition des matériaux dans l'ouvrage et à proximité, accès à des ressources en eau, richesse minérale et contraintes physiques du sol) et peu par l'espèce. L'espèce d'arbre joue surtout sur sa capacité à s'adapter à différents



environnements, et donc à pousser sur des parties variées de l'ouvrage et à ses abords, ainsi que sur les dimensions maximales des racines (diamètre et longueur). Lorsque cette capacité adaptative est limitée, elle confine l'espèce à des conditions particulières, ce qui peut en retour et indirectement limiter la variété des types racinaires qu'elle développe : c'est ce qui a conduit à surestimer dans le passé le rôle direct de l'espèce.



Figure 1.12. Structure des systèmes racinaires: (a) traçant, (b) fasciculé, (c) mixte, (d) pivotant (photos C. Zanetti).

Les types de racines

Dans la plupart des systèmes racinaires, quels que soient leur type et leur taille, on peut distinguer deux types de racines (fig. 1.13) :

- des racines traçantes ou longues, qui combinent un faible taux de décroissance en diamètre et un faible taux de ramification. De ce fait, elles peuvent être longues tout en étant fines, mais aussi conserver un fort diamètre loin de leur point de naissance ;
- des racines très ramifiées et avec un fort taux de décroissance en diamètre. Ces racines sont courtes (maximum 2-3 m) quel que soit leur diamètre de départ.



Figure 1.13. Racines de robinier (a) longue, (b) courte (diamètre de départ : 5-6 cm) (photos C. Zanetti).

Les racines traçantes sont dangereuses en termes d'érosion interne : en raison de leur capacité à traverser de toute part un ouvrage, elles peuvent potentiellement créer après leur mort et décomposition un véritable « tuyau » dans l'ouvrage si le matériau est suffisamment cohésif (risque d'érosion interne, dite de conduit). Les racines courtes sont plutôt potentiellement dangereuses par leur ramification dense, qui augmente leur force de liaison avec le sol : c'est un avantage dans le sens où elles assurent un bon ancrage de l'arbre, mais un inconvénient lorsque cette résistance est dépassée : elles entraînent alors avec elle lors de l'arrachement une quantité importante de matériau, ce qui augmente le risque d'érosion externe.

Les relations entre système racinaire et environnement

La figure 1.14 synthétise les relations entre l'environnement d'un arbre (au sein d'un ouvrage hydraulique et à ses abords) et les caractéristiques de son système racinaire. Les systèmes fasciculés se développent exclusivement dans des matériaux fins et profonds, tandis que les trois autres types se retrouvent généralement dans des matériaux grossiers ou lorsque des contraintes au développement racinaire existent dans les matériaux fins (par exemple nappe trop proche de la surface, noyau d'ouvrage compacté...).

En France, la majorité des digues de plaine sont en matériaux fins (besoin d'imperméabilité), avec une exception notable pour certaines digues d'aménagement hydroélectrique du Rhône qui sont de type perméable ou dont le cœur compacté est couvert d'une couche de graviers et galets. Mais les relations entre l'enracinement des arbres et la sécurité des ouvrages concernent aussi :

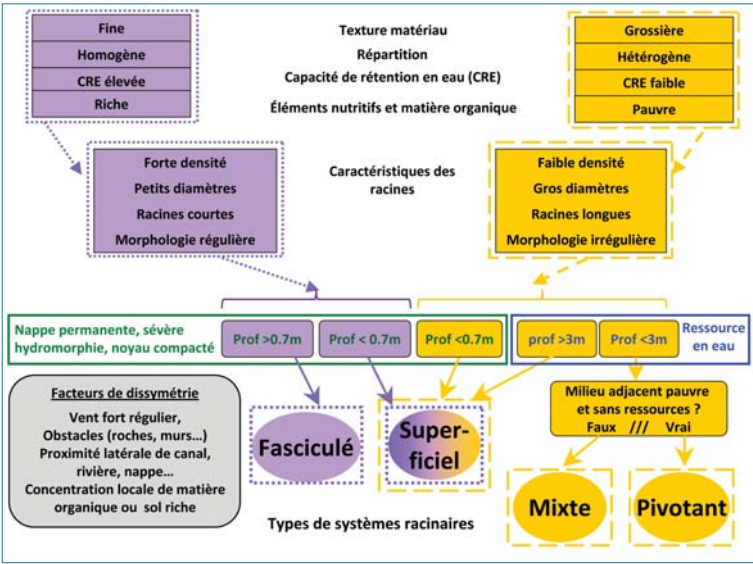


Figure 1.14. Paramètres contrôlant la structure des enracinements (le climat doit être pris en compte pour interpréter les contraintes décrites dans ce schéma, cf. p. 41).

- les berges et terrains proches des digues côté terre, avec souvent des lits de matériaux grossiers ;
- les soubassements de la digue, notamment digues anciennes sans traitement des fondations, les racines des arbres voisins pouvant traverser sous la digue ;
- les digues anciennes faites de matériaux spatialement hétérogènes, les racines adaptant alors leur enracinement aux conditions à l'échelle très locale (cf. paragraphe sur le développement des racines p. 40) ;
- les massifs drainants au pied de certains ouvrages (et notamment de nombreux barrages), constitués de matériaux grossiers perméables.

Dans les matériaux fins et homogènes, bien alimentés en eau par un climat humide ou par capillarité, ne souffrant pas généralement de carence en éléments nutritifs, les racines sont nombreuses, réparties dans toutes les directions, ont une morphologie régulière, sont majoritairement de petit diamètre (2-10 cm) et plutôt courtes (3-7 m). La variabilité au sein d'un système racinaire est faible, sans racines surdimensionnées en longueur ou diamètre. C'est le système fasciculé typique. Ce système peut cependant être superficiel, tout en conservant dans les horizons de surface ses autres caractéristiques, s'il existe une limite physique à faible profondeur : nappe permanente, horizon de sol très hydromorphe ou couche de matériau compacté.



Figure 1.15. Racines irrégulières développées dans des matériaux grossiers ayant généré leur croissance en longueur et diamètre. De très nombreux graviers et galets sont englobés par la croissance racinaire (photos M. Vennetier).

Dans les matériaux grossiers à faible capacité de rétention en eau, généralement pauvres en éléments nutritifs, les racines sont beaucoup moins nombreuses que dans les matériaux fins (3 à 4 fois moins), et en moyenne plus longues [jusqu'à plus de 15-30 m] et plus grosses [jusqu'à 20-40 cm de diamètre, et plus pour les pivots]. Elles présentent surtout une forte hétérogénéité, certaines pouvant être surdimensionnées en longueur et diamètre par rapport à la moyenne. Elles peuvent avoir une morphologie irrégulière liée à la présence de blocs, galets et cailloux qu'elles doivent contourner et entre lesquels elles doivent se faufiler en les englobant parfois (fig. 1.15).

Des obstacles physiques, les mêmes qu'en matériaux fins, peuvent rendre ces systèmes superficiels. Même sur matériau ou sol très épais, le manque de ressources facilement accessibles (profondeur supérieure à 3 m pour une nappe ou des éléments nutritifs) empêche le développement de racines profondes, celles-ci avortant rapidement, ce qui aboutit au même résultat. Lorsqu'une ressource en eau est accessible à moins de 3 m de profondeur, un pivot et parfois quelques autres racines verticales les atteignent et les exploitent, et dans ce cas peuvent atteindre de très grandes dimensions (des pivots de 60 cm de diamètre et 3 m de long ont été mesurés sur des peupliers de 30 ans). Dans ce cas, les arbres développent aussi des racines traçantes superficielles explorant l'environnement à grande distance. La combinaison d'un pivot fort et d'une couronne de racines superficielles donne un système mixte. Les plus grosses racines horizontales de ces systèmes sont toujours celles qui ont accès aux ressources en eau en pied de digue ou de berge, jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de la souche.



Type de système racinaire et risques

- Un système traçant est peu résistant à l'arrachement, ce qui rend les arbres sensibles au vent (chablis), mais il assure en contrepartie une bonne fixation de la partie superficielle du sol face au ruissellement ou au courant. Les loupes d'arrachement peuvent être étendues en surface mais sont peu profondes. Par nature et en principe, les racines traçantes ne s'enfoncent pas profondément au cœur de l'ouvrage à l'horizontale, sauf à exploiter une interface singulière (ex : contact remblai-fondation non décapé de la terre végétale à la construction, fig. 1.16). Ce type de structure racinaire est cependant dangereux pour l'ouvrage si les racines traversent une partie ou la totalité de l'ouvrage, même superficiellement, près de la crête. Un arrachement peut créer un point bas sur toute la largeur de l'ouvrage. Si elles ont un gros diamètre, les racines en pourrissant créent alors un risque d'érosion interne en laissant une « canalisation » traversante (cf. fig. 1.22 p. 49).
- Un système fasciculé présente une bonne résistance à l'arrachement du fait de la répartition dense et homogène des racines. À cause de la concentration de biomasse près de la souche, il est dangereux pour les ouvrages en cas de pourrissement (risque d'effondrement et forte augmentation de la perméabilité) ou d'arrachage (il entraîne avec lui une grosse épaisseur de matériau).
- Un système pivotant mature pénètre profondément le corps du remblai avec un fort diamètre. Il assure un bon ancrage de l'arbre par son ou ses pivots mais pose cependant des problèmes de déstructuration des matériaux. Les pivots de gros diamètre engendrent un risque d'effondrement après leur pourrissement. En cas d'arrachement, ils peuvent emmener une grande épaisseur de matériau, mais sur un faible diamètre. Ce sont ceux qui créent a priori le moins de risque d'érosion interne en raison de leur faible développement latéral.
- Un système racinaire à structure mixte, composé de racines horizontales et verticales, rassemble les avantages et inconvénients précédemment énoncés pour les systèmes traçants et pivotants. Ils sont particulièrement résistants au vent en raison de la combinaison d'un pivot assurant l'ancrage et de racines traçantes assurant le haubanage. En contrepartie, ce sont les systèmes qui peuvent, en cas d'arrachement, emmener le plus gros volume de matériau en combinant un grand diamètre et une épaisseur importante au cœur du système.



risque d'érosion interne par la longueur et le diamètre de leurs racines traçantes, associés à la déstructuration du matériau au cœur du système au niveau des pivots.

Figure 1.16. Développement de racines à l'interface entre la digue et le sol qui la porte, révélé par l'érosion du remblai lors d'une rupture. La présence d'un horizon humifère (ancien sol) non décapé à la construction, ou d'une nappe en provenance du canal alimentant le sol en eau sous l'ouvrage, peut favoriser ce développement. Le maintien d'une réserve d'humidité sous la digue, en raison de l'épaisseur du remblai qui limite l'évaporation profonde, peut aussi contribuer à de tels phénomènes dans les climats présentant une saison sèche (ph. P. Mériaux).



Dans de rares cas (digue large ou berges hautes en matériau très grossier), lorsque seule une nappe est accessible en profondeur et qu'il n'y a pas de ressources proches latéralement, l'arbre développe un ou plusieurs gros pivots qui exploitent cette nappe et peu de racines latérales qui restent faibles. On a alors un système pivotant.

Le développement des systèmes racinaires

Les mécanismes de développement et leur contrôle par l'environnement

Les différences de morphologie de systèmes entre matériaux fins et grossiers s'expliquent par les mécanismes de développement racinaire. Quasiment toutes les espèces d'arbres produisent initialement un pivot à la naissance, avec une croissance verticale. Celui-ci survit et se développe s'il trouve des ressources sous la souche. Dans le cas contraire, il avorte ou arrête sa croissance au profit de ramifications latérales. Par ailleurs, les racines latérales issues de ce pivot initial explorent densément l'espace dans toutes les directions.

Si le matériau est assez riche et humide, la plupart de ces racines exploratoires survivent et se concurrencent mutuellement, ce qui limite leur diamètre. Comme chacune contribue à alimenter l'arbre, toutes grossissent et continuent à se ramifier, donnant un système homogène et très dense dans toutes les directions, le pivot ne se différenciant des autres que par sa verticalité. Les ressources nécessaires à l'arbre étant disponibles dans un faible volume de sol, les racines n'ont aucune raison de beaucoup s'allonger.

Si le matériau est grossier (et dans ce cas généralement pauvre), peu de racines arrivent à trouver assez de ressources pour se développer. À cause de contraintes physiques, elles ont parfois simplement du mal à se frayer un passage sinueux et à grossir entre les éléments grossiers du matériau (fig. 1.15). Les ressources sont soit en profondeur (eau essentiellement, sol naturel sous le remblai éventuellement), soit en surface du sol (humus, eau de pluie), et pas dans le reste du sol ; d'où le développement de systèmes mixtes ou pivotants, sans racines obliques, ni racines horizontales de profondeur intermédiaire. L'alimentation de l'arbre dépendant des rares racines qui survivent, celles-ci monopolisent l'activité et grossissent rapidement. De plus, le volume de sol nécessaire pour alimenter l'arbre étant important, les racines s'allongent



Figure 1.17a. Sur la gauche de cet arbre en cours de dégagement, une énorme racine (diamètre 25 cm, flèche blanche) s'enfonce en plongeant vers le cœur de la digue. Sa taille, surdimensionnée par rapport aux autres racines, indique qu'elle a probablement atteint le sol et la nappe sous le remblai ou de l'autre côté de l'ouvrage et joue un rôle clef dans l'alimentation de l'arbre. Sa décomposition laisserait une galerie de gros diamètre dans la digue (ph. C. Zanetti).

Figure 1.17b. L'érosion de cette digue du Danube, lors des crues de 1988, révèle des racines venant de la gauche, et ayant traversé le remblai de part en part à la recherche de l'eau du côté rivière. On notera le fort diamètre d'une des racines relativement à celui des troncs. Le déracinement d'arbres proches de la crête a été à l'origine de plusieurs brèches au cours de cette crue (ph. C.H. Ifft, USACE).

au maximum. Dans le contexte des digues et barrages, certaines de ces racines traçantes et le pivot atteignent les ressources en eau et le sol plus fertile qui se trouvent en pied de talus ou sous le remblai. L'arbre les privilégie alors, d'où leur surdimensionnement par rapport au reste du système (fig. 1.17a). C'est donc paradoxalement sur matériaux pauvres et parfois sous des arbres de taille modeste que l'on peut trouver les racines les plus grosses et les plus longues.

Il arrive que, même dans des matériaux fins, les racines d'arbres poussant dans le talus côté terre développent quelques racines plus grosses que les autres, traversant le remblai si elles peuvent s'alimenter de l'autre côté de celui-ci, dans la rivière ou le canal (fig. 1.17a et 1.17b).

Le climat joue un rôle complémentaire important, essentiellement sur l'alimentation en eau. Un matériau grossier et très filtrant, pourvu qu'il permette physiquement le passage des racines, peut être traversé par elles dans un climat froid et humide où il ne se dessèche jamais, en montagne par exemple, mais ne le sera pas en climat plus chaud et sec. Un matériau fin et riche mais très contraignant physiquement, comme un limon pur ou une argile compacte, sera colonisé dans un climat ne présentant ni excès ni déficit majeur en eau, mais pas dans un climat qui le rend asphyxiant par engorgement excessif à une période de l'année (hydromorphie marquée), ou trop sec avec des fentes de retrait sur une longue période.



Indépendamment de ces déterminismes liés au sol et au climat, quelques autres facteurs peuvent influencer le développement racinaire. En cas de vent fort et fréquent avec une direction dominante (zones de mistral, tramontane, vents côtiers en région littorale, etc.), les arbres développent spontanément des racines plus grosses et plus longues, et parfois plus ramifiées, dans le sens inverse du vent dominant, agissant comme des haubans. Cette tendance peut être en partie contrariée par les contraintes du milieu, ce qui fragilise alors les arbres. La tendance naturelle des arbres est aussi de faire des racines plus grosses, plus longues ou plus nombreuses du côté amont sur les pentes fortes, toujours dans un objectif de haubanage. Si cette tendance est parfois confirmée sur des pentes et talus d'ouvrages de grandes dimensions, et pour des arbres jeunes, elle est le plus souvent contredite par la propension encore plus forte des racines à rechercher les zones de ressources maximales, situées majoritairement en pied de talus ou de berge. En moyenne, les racines sont donc plus grosses et souvent plus nombreuses en direction du bas des talus d'ouvrages hydrauliques.

Enfin, il arrive que les ressources soient très inégalement réparties dans l'espace, latéralement et verticalement : c'est le cas des ouvrages réalisés avec les matériaux locaux très variables tirés du lit ou de la berge, des ouvrages réalisés en plusieurs fois à des époques très différentes, des zones ayant subi des réparations multiples. Dans ce cas, la répartition des racines dans l'ouvrage est totalement liée à l'intérêt que présente chaque matériau pour l'arbre. Celui-ci concentre ses racines dans les poches ou les couches de matériaux riches et fins. Il est donc impossible de connaître la position et la taille potentielle des racines dans un ouvrage hétérogène dont la composition n'est pas précisément décrite et cartographiée. Une couche favorable de quelques centimètres d'épaisseur suffit pour que des racines traversent de part en part un ouvrage ou ses fondations (fig. 1.16 p. 39) : par exemple ancienne couche humifère enterrée lors de la création ou du rehaussement d'un ouvrage. Si les racines ne pénètrent jamais un noyau en limon ou argile correctement compacté au cœur d'un ouvrage, elles savent exploiter la moindre faille de compactage (cf. fig. 3.11 p. 71) ou zone plus sableuse en cas de mauvaise mise en œuvre.



Le rôle des espèces

Bien que la structure des systèmes racinaires dépende peu de l'espèce végétale, comme discuté précédemment, quelques essences ont des prédispositions qui demandent une attention particulière sur certaines parties des ouvrages. C'est le cas du **robinier** et des **peupliers** qui développent souvent quelques grosses racines traçantes, aux dimensions particulièrement disproportionnées par rapport à la moyenne des autres racines de la souche. Ces grosses racines dépassent souvent 15 m de longueur (des cas supérieurs à 30 m sont connus dans la littérature) et 30 cm de diamètre. Les saules semblent avoir une tendance similaire, bien que moins systématique en raison de leur développement préférentiel à proximité immédiate de l'eau. La tendance du robinier à draageonner lui permet d'alimenter certaines racines superficielles avec de multiples troncs situés dans un rayon de plusieurs mètres. On peut alors avoir une racine plus grosse que les troncs qu'elle porte.

À la différence du robinier qui ne possède que des petits pivots lorsqu'il est doté d'une structure mixte, les peupliers peuvent développer de puissantes et profondes racines verticales (cf. fig. 1.12d p. 35). D'autres espèces développent parfois des pivots de gros diamètre (chênes et érables notamment) mais leur croissance est beaucoup plus lente que celle du peuplier.

Les peupliers ont une capacité à développer des racines verticales dans les fentes de retraits des sols très hydromorphes de type pseudogley. Les conditions sont moins asphyxiantes dans ces zones en raison de l'aération rapide du sol lors des phases de dessèchement. Si un ouvrage hydraulique repose sur un sol de ce type, les peupliers poussant en pied d'ouvrage peuvent émettre, à partir des racines superficielles traçantes, des dizaines de suçoirs verticaux d'un diamètre de 5 à 15 cm et de 1 à 2 m de long, qui vont s'immiscer dans ces fentes sur un rayon de plusieurs mètres autour de la souche. En grossissant et en pompant l'eau de part et d'autre de ces fentes, les racines vont encore améliorer les conditions locales d'oxygénation et donc accentuer et accélérer la colonisation. De tels systèmes racinaires, que l'on peut assimiler au type « mixte », sont rares dans le contexte des ouvrages hydrauliques. Ils sont particulièrement résistants à l'arrachement car ils possèdent d'innombrables ancrages répartis sur une grande surface en plus des racines traçantes. Par contre, le volume de terre retourné en cas d'arrachement est très supérieur à celui déplacé par tout autre système (cf. encadré p. 39) car les multiples petits pivots emmènent une grande épaisseur de terre sur cette surface importante.



Décomposition racinaire

Après la mort des arbres, et en partie déjà lors de leur vieillissement, les systèmes racinaires se décomposent. En cas d'abattage, pour les espèces qui rejettent et en particulier pour les arbres de grandes dimensions, une partie des racines meurt car les rejets aériens ne sont pas suffisants pendant plusieurs années pour alimenter en sève élaborée la totalité du système racinaire. Les rejets, tout en utilisant partiellement le système racinaire ancien, développent parfois sur le pourtour de l'ancienne souche un nouveau système indépendant des autres rejets. Le cœur de la souche, exposé à l'air, se décompose en favorisant le cheminement des pathogènes vers l'insertion des racines, d'où ils pourront se propager le long des racines elles-mêmes. Certaines espèces drageonnent également (peupliers, robinier). Les nouveaux individus apparaissant le long des racines superficielles peuvent maintenir en vie ces racines. Cependant là encore, ces rejets ne peuvent sauver la totalité des racines anciennes. Si le recépage permet de maintenir en vie les souches, et de ralentir les phénomènes de décomposition des organes souterrains, il ne supprime donc pas totalement ni définitivement les risques liés à la décomposition des systèmes racinaires. Ce sont les dimensions des racines et souches en décomposition, leur position dans le remblai et leur direction qui sont susceptibles de générer des problèmes de sécurité vis-à-vis des ouvrages hydrauliques en remblai. Les racines longues peuvent créer des galeries tandis que les souches et les pivots de gros diamètre engendrent un risque d'effondrement. Généralement, une variation de la décomposition du matériel végétal en fonction de l'éloignement de la souche et du diamètre a pu être décrite. Les racines de faible diamètre pourrissent et disparaissent plus rapidement que les racines de diamètre important.

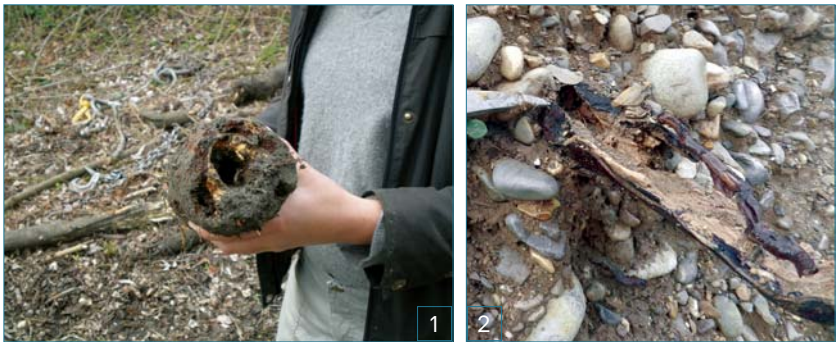


Figure 1.18. Formation de galerie interne par disparition du centre (1. *peuplier*, ph. J.-F. Gomez) et conservation de l'écorce de la racine (2. *essence inconnue*, ph. P. Mériaux).



La conservation de l'écorce et la disparition du bois de cœur, chez certaines espèces, induisent la formation d'une galerie interne à la racine (fig. 1.18). Il y a cependant une grande variabilité du phénomène liée aux attaques de champignons ou d'insectes.

Des expérimentations récentes menées sur différentes digues en milieu méditerranéen, tempéré et montagnard, montrent qu'au bout de 4 à 6 ans des racines de petit diamètre (2 à 3 cm) d'espèces à bois peu durable (peuplier) peuvent être complètement décomposées, et formeraient dans un matériau cohésif un conduit favorisant la circulation de l'eau. Dans le même temps, certaines racines de fort diamètre (> 5 cm) peuvent être éclatées et par endroits fortement attaquées par les agents décomposeurs (insectes et champignons), sans former encore de conduit. Dans les mêmes conditions, certaines racines d'espèces à bois dur comme le chêne, bien qu'ayant perdu beaucoup en densité, restent entières au bout de 6 ans. On est donc loin de pouvoir prédire avec précision le temps qu'il faut pour que la décomposition d'un système racinaire entraîne une augmentation significative du risque, mais on peut affirmer que quelques années (4 à 6) sont suffisantes dans certains cas.

Influence des dimensions et du type d'ouvrage

Le risque lié aux racines dépend évidemment des dimensions relatives de l'ouvrage hydraulique. Sur les barrages ou digues à profil en travers étroit, les souches d'arbres âgés ou de grande dimension peuvent occuper une part importante (fig. 1.19), voire la totalité du remblai : ce dernier cas se présente par exemple avec des arbres centenaires sur digues de canaux de navigation, mais n'est pas rare sur des digues de



Figure 1.19. Système racinaire d'un mélèze ayant déstabilisé une digue sur plus de la moitié de sa largeur. Certaines grosses racines s'enfoncent profondément au cœur de l'ouvrage (ph. Zanetti C.).



protection contre les crues à profil étroit (crête peu large et/ou pentes de talus raides) (fig. 1.20). L'arrachement d'un de ces arbres avec une grande quantité de matériau peut provoquer à lui seul une rupture. En cas de localisation du côté rivière, il exacerbe les phénomènes tourbillonnaires lors d'une crue, et donc l'approfondissement ou l'élargissement rapide de l'encoche créée (fig. 1.21). En outre, sur les digues étroites, les racines traçantes peuvent traverser l'ouvrage de part en part, et donc créer des conduits francs sur toute la largeur après décomposition, ouvrant la voie au développement rapide d'une érosion interne de conduit.

Les digues à charge temporaire ne voient pas nécessairement un écoulement s'établir en leur sein si les crues qu'elles subissent sont de courte durée : on pourrait donc penser qu'étant en charge sur de courtes périodes, elles sont moins sensibles au risque d'érosion interne que les digues à charge permanente. L'expérience montre qu'il n'en est rien.



Figure 1.20. Alignement de platanes centenaires sur une crête de digues à charge temporaire. Un perré bétonné protège le talus côté fleuve mais il est par endroits soulevé par les racines. Le système racinaire de ces platanes occupe la totalité du corps de digue. Leur déracinement provoquerait une loupe d'arrachement au moins équivalente, en proportion, à celle de la figure 1.19 (ph. M. Venetier).

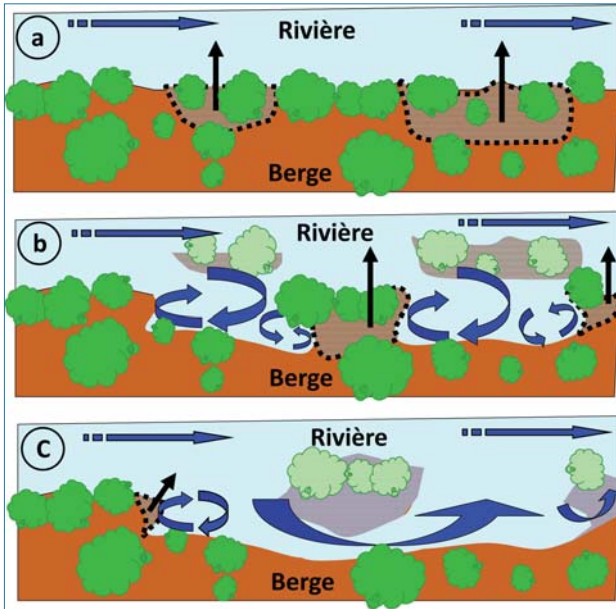


Figure 1.21. Formation de tourbillons érosifs après arrachement ou glissement d'arbres dans le courant. (a) Arrachement ou glissement d'arbres sous l'effet du vent ou de l'instabilité du talus. (b) Érosion par les tourbillons, déstabilisant par déchaussement les arbres voisins. (c) Régularisation et élargissement de l'encoche par les tourbillons et le courant. Avant d'être emportés, les arbres et les portions de berges restés sous l'eau accentuent le phénomène en détournant le courant.

Influence de la nature des matériaux constitutifs du remblai

Les digues et barrages en remblai sont réalisés par la mise en œuvre d'un ou plusieurs matériaux, de nature et d'origine différentes. Une analyse granulométrique permet de classer chacun de ces matériaux par taille croissante de grains : argiles, limons, sables, graviers, cailloux et blocs. Dans l'analyse du risque lié à l'enracinement des arbres, on distingue deux types de matériaux :

- des matériaux fins, majoritairement composés de limons et d'argiles avec au moins 50 % en poids de particules d'un diamètre inférieur à 80 μm , et peu de gros éléments. Ils se caractérisent par leur forte cohésion et leur faible perméabilité. Leur capacité à être compactés permet d'améliorer leurs propriétés mécaniques et de diminuer encore leur perméabilité ;



- des matériaux grossiers, dominés par les sables, graviers, cailloux et blocs. Ils se caractérisent par une faible cohésion et une perméabilité élevée que le compactage ne peut pas significativement améliorer.

Les matériaux jouent un rôle important dans la structure des systèmes racinaires (cf. paragraphe sur la structure et l'architecture des racines p. 34). En fonction du matériau et des autres facteurs de l'environnement, les racines pénétreront ou pas dans le remblai, verticalement ou horizontalement, ce qui va jouer à la fois sur le risque d'érosion externe (arrachement) et sur le risque d'érosion interne (racines pénétrantes), points précédemment développés.

Indépendamment de la structure racinaire, d'autres points essentiels sont à considérer.

À structure racinaire identique, en raison de différences dans la cohésion du sol, le risque de déracinement est plus élevé dans les matériaux sableux que dans des matériaux argileux ou limoneux. Mais en contrepartie, en raison aussi de ces différences de cohésion, les loupes d'arrachement dans les milieux sableux sont moins volumineuses que dans les matériaux argilo-limoneux pour un système racinaire de même taille.

Dans les matériaux très grossiers de type gravelo-sableux ou caillouteux, utilisés pour la construction de digues perméables (ex : digues larges du Rhône aménagé, digues de protection torrentielle...), les racines n'ont que peu d'effets négatifs de leur vivant et pendant leur croissance en termes de déstructuration du remblai. De même lors de leur décomposition, elles augmentent peu la perméabilité du matériau, qui est déjà élevée. Enfin, le réarrangement naturel des éléments peu cohésifs de ces matériaux a tendance à combler les vides laissés par les racines au fur et à mesure de leur décomposition. Seules de très grosses racines traversantes peuvent laisser localement des conduits plus perméables, mais on a vu que dans ces matériaux, les racines ne pénétraient généralement pas profondément en dehors des pivots dans certaines conditions. Néanmoins, on peut penser que le réarrangement des grains conduit à un décompactage local du sol : celui-ci pourrait à son tour favoriser des entraînements de matériau (érosion interne de suffusion ou érosion de contact) si le pourcentage de matériau fin n'est pas négligeable au sein d'un matériau globalement grossier, et si la granulométrie se prête au phénomène. Par ailleurs, la décomposition de grosses souches et des racines principales de part et d'autre de celles-ci peut laisser des vides importants ou des zones de très forte perméabilité.



Figure 1.22. Galerie laissée en place par une racine décomposée de peuplier (10 cm de diamètre) dans des matériaux cohésifs (matrice limoneuse). De nouvelles racines empruntent ce chemin privilégié (ph.C. Zanetti)

Dans les matériaux fins et cohésifs avec une proportion significative de limon ou d'argile, et non compactés, les empreintes des racines ont tendance à demeurer après décomposition et peuvent créer de véritables conduits dans le corps de digue (fig. 1.22). Ces conduits, riches en matière organique et faciles à pénétrer, sont d'ailleurs les voies privilégiées de développement des nouvelles racines, ce qui ne fait qu'amplifier le phénomène avec le temps. De plus, ces matériaux sont ceux qui se prêtent le plus à la pénétration en profondeur des racines et notamment aux racines traversantes. Le risque d'érosion interne de conduit y est fortement accentué.

Bien que les impacts liés aux enracinements des ligneux commencent à être connus, leur prise en compte dans la gestion des ouvrages hydrauliques reste complexe à cause du cadre réglementaire, du fait de la nécessité de prise en compte des aspects écologiques et environnementaux (biodiversité floristique, faunistique, cadre paysager, pollution chimique...). Les aspects réglementaires sont traités dans le chapitre 2 ci-après, et les aspects gestion dans le chapitre 4.



chapitre 2

Réglementation et règles de l'art



Bien que le rôle premier des ouvrages soit d'assurer la sécurité des biens et des personnes, beaucoup de digues et certains barrages sont devenus, au fil des années, le support d'une végétation luxuriante et ont peu à peu été assimilés à des zones de sauvegarde de la biodiversité floristique, faunistique et du cadre de vie. En témoignent les statuts de protection qui sont appliqués sur de nombreux secteurs endigués, répondant à des réglementations variées, et le nombre élevé d'espèces rares, menacées ou emblématiques qui y sont répertoriées.

Cependant, les catastrophes hydrologiques de ces dernières décennies nous ont rappelé que les ouvrages doivent être entretenus et surveillés pour assurer leurs fonctions dans des conditions durables et de sécurité maximale.

La réglementation sécuritaire s'est ainsi renforcée avec la parution du décret du 11/12/2007¹ qui énonce les grands principes de gestion des ouvrages hydrauliques. Les pratiques actuelles sont encore variées, mais l'ensemble des pays concernés par cette problématique s'accorde sur le fait que la végétation sur les digues et barrages doit faire l'objet d'un entretien spécifique et rigoureux.

Concilier les réglementations de protection et de sécurité est un des enjeux majeurs des gestionnaires. Ce chapitre présente d'une part les réglementations existantes dans ces domaines, puis les « bonnes pratiques » existantes actuellement, et enfin les apports de ce guide dans l'aide à la décision.

¹ Complété depuis par le décret du 12/05/2015 qui a modifié le Code de l'Environnement.



RÉGLEMENTATION

Aspects sécuritaires et végétation sur les ouvrages hydrauliques

L'entretien des ouvrages hydrauliques (digues de protection contre les crues, digues de canaux, barrages) nécessite de respecter des principes de sécurité rigoureux, notamment vis-à-vis du développement de la végétation comme démontré dans le premier chapitre.

Cependant, les documents réglementaires relatifs à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques sont très imprécis quant aux recommandations de gestion de la végétation. La réglementation impose un « contrôle de la végétation », sans en détailler les modalités (*arrêté du 29 février 2008 fixant des prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques, NOR:DEVO0804503A, mis à jour le 29 juin 2009, article 4*).

Il appartient donc au gestionnaire de définir le plan de gestion adapté, pour lequel les contraintes réglementaires sont déséquilibrées : d'un côté les arrêtés concernant les mesures à respecter en termes de sécurité des ouvrages hydrauliques vis-à-vis de la végétation ligneuse sont inexistantes ou très vagues, de l'autre les aspects environnementaux sont bien plus développés et détaillés : de nombreux articles du Code de l'environnement fixent les principes de protection des milieux et espèces.

Droit environnemental et ouvrages hydrauliques boisés

Bien que la sécurité soit l'élément prioritaire dans l'entretien des ouvrages protégeant des populations ou des enjeux particuliers (digues) ou situés à l'amont de ces mêmes enjeux (barrages), il est fortement suggéré par la réglementation, de prendre en compte et d'intégrer les aspects écologiques et environnementaux (biodiversité floristique, faunistique, paysage), lorsque cela est possible.



Depuis le 1^{er} janvier 2011, les directions régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (Dreal) sont en charge des services de Contrôle de la Sécurité des Ouvrages Hydrauliques ; ils ont pour mission l'inspection des digues en plus de celle des barrages. Les services Eaux & Biodiversité ont pour mission de contrôler le respect des consignes de protection de l'environnement. Dans le cas des ouvrages hydrauliques en remblai, ces deux services sont amenés à émettre des avis, parfois contradictoires, donc difficiles à mettre en œuvre pour les gestionnaires et maîtres d'ouvrage. L'expérimentation de l'autorisation unique¹, généralisée depuis le 1^{er} juillet 2014 sur tout le territoire, identifie dorénavant un seul service instructeur pour les démarches relatives à la loi sur l'Eau (autorisation au titre de l'article L.214-3 CE), au titre des réserves naturelles nationales (sauf autorisation spéciale), au titre des sites classés (L.341-7 et L341-10 sauf accord exprès), au titre des autorisations de défrichement (L.214-13 et L.341-3 du Code forestier) et dérogation au titre du 4^o de l'article L.411-2 du CE (dérogation pour destruction d'espèces protégées). Aussi une prise de décision commune prenant en compte les aspects sécuritaires, de façon prioritaire, et les aspects environnementaux, relèvera désormais d'un seul service instructeur.

Espèces protégées et possibilités de dérogation

Les mesures de protection

Certaines mesures de protection de la faune et de la flore, peuvent être prises en compte et respectées dans la mesure où elles ne nuisent pas à la sécurité des ouvrages (tabl. 2).

Les articles L411-1 et 2 du Code de l'environnement fixent les principes de protection des espèces et se traduisent notamment par l'établissement de listes d'espèces protégées. Ainsi, on entend par « espèces protégées » toutes les espèces visées par les arrêtés interministériels de protection, pour lesquelles sont interdits : l'atteinte aux spécimens, la perturbation intentionnelle des animaux dans le milieu naturel, la dégradation des habitats (toutes les espèces ne sont pas concernées par cet item), la détention, le transport, la naturalisation, le colportage, la

¹ Ordonnance n° 2014-619 du 12 juin 2014 relative à l'expérimentation d'une autorisation unique pour les installations, ouvrages, travaux et activités soumis à autorisation au titre de l'article L. 214-3 du Code de l'environnement.

Décret n° 2014-751 du 1^{er} juillet 2014 d'application de l'ordonnance n° 2014-619 du 12 juin 2014 relative à l'expérimentation d'une autorisation unique pour les installations, ouvrages, travaux et activités soumis à autorisation au titre de l'article L.214-3 du Code de l'environnement.



mise en vente, la vente ou l'achat, l'utilisation commerciale ou non, des spécimens prélevés dans le milieu naturel.

Il y a cependant différents niveaux de protection : pour certaines espèces, la destruction, l'altération ou la dégradation de leur milieu particulier ne sont pas interdits (en particulier celles non listées à l'annexe IV de la directive Habitats). Il est nécessaire de se reporter à chacun des arrêtés pour plus de précisions sur la liste des interdictions applicables.

Mesures à prendre en compte	Faune et flore à préserver
Éviter d'intervenir sur la végétation entre mars et fin juillet, et plus généralement en période de reproduction ou de nourrissage des jeunes des espèces concernées	Saison de nidification des oiseaux, de reproduction des chauves-souris, des papillons (ex : Proserpine, papillon dont la plante hôte est l'aristoloche), de floraison des plantes mellifères ou protégées...
Maintien d'un corridor boisé (idéalement 5 m de large ou plus, à plus de 5 m du pied de l'ouvrage) avec conservation de vieux arbres-gîtes et de bois mort	Habitat de castors, de chauve-souris, d'oiseaux et autres espèces ripicoles
Maintien des zones humides en pied de digue (ex : zones d'emprunt de matériaux ayant servi à construire la digue)	Habitat de la cistude d'Europe et de l'émyde lépreuse (tortues d'eau douce), d'amphibiens, d'insectes (Odonates) et d'espèces végétales

Tableau 2. Mesures générales relatives à la protection des espèces dans la gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques. Voir la partie sur la prise en compte de l'écologie et du climat p. 123 pour plus de détails.

Les dérogations possibles

Le champ des dérogations possibles a été élargi (il n'était auparavant possible qu'à des fins scientifiques), mais est strictement encadré. Ainsi l'article L411-2, modifié en 2006, précise que : « La délivrance de dérogation aux interdictions mentionnées aux 1^o, 2^o et 3^o de l'article L. 411-1, peut être demandée, à condition qu'il n'existe pas d'autre solution satisfaisante et que la dérogation ne nuise pas au maintien, dans un état de conservation favorable, des populations des espèces concernées dans leur aire de répartition naturelle. »

Trois conditions doivent donc être réunies pour qu'une dérogation puisse être accordée :

1. Qu'on se situe dans l'un des 5 cas suivants :

- dans l'intérêt de la protection de la faune et de la flore sauvages et de la conservation des habitats naturels ;
- pour prévenir des dommages importants notamment aux cultures, à l'élevage, aux forêts, aux pêcheries, aux eaux et à d'autres formes de propriété ;



- dans l'intérêt de la santé et de la sécurité publiques ou pour d'autres raisons impératives d'intérêt public majeur, y compris de nature sociale ou économique, et pour des motifs qui comporteraient des conséquences bénéfiques primordiales pour l'environnement ;
- à des fins de recherche et d'éducation, de repeuplement et de réintroduction de ces espèces et pour des opérations de reproduction nécessaires à ces fins, y compris la propagation artificielle des plantes ;
- pour permettre, dans des conditions strictement contrôlées, d'une manière sélective et dans une mesure limitée, la prise ou la détention d'un nombre limité et spécifié de certains spécimens.

2. Qu'il n'y ait pas d'autre solution ayant un impact moindre (localisation, variantes, mesures d'évitement et de réduction, choix des méthodes...).

3. Que les opérations ne portent pas atteinte à l'état de conservation de l'espèce concernée (que l'on affecte des individus, des sites de reproduction ou des aires de repos).

La circulaire du 21 janvier 2008 vient compléter les annexes des circulaires de 1998 et 2000 pour constituer un recueil des procédures à suivre pour chaque cas de dérogation aux mesures de protection des espèces de faune et de flore sauvages. Elle comporte autant d'annexes que de nouveaux cas de dérogation possible qui décrivent la procédure à suivre dans chaque cas (cf. annexe 2).

Le régime général reste cependant l'interdiction et les dérogations doivent rester exceptionnelles et limitées. Il est conseillé aux maîtres d'ouvrage de prendre contact le plus en amont possible avec la Dreal, pour les accompagner dans la prise en compte des espèces protégées, avant le dépôt d'un dossier.

Traitements phytocides

La législation européenne sur les produits phytosanitaires s'est fortement renforcée avec la directive 91/414 CE. Dans ce cadre, les zones non traitées (ZNT) – c'est-à-dire les zones qui ne doivent recevoir aucun traitement phytosanitaire quel qu'il soit – ont été attribuées par la commission des Toxiques à partir de 1998. Les ZNT représentent une mesure de gestion du risque dont l'objectif est d'éviter des impacts non intentionnels de dérive des produits phytosanitaires sur les organismes aquatiques : poissons, algues, daphnies, plantes.



Toutes les autorisations de mise sur le marché (AMM) des produits ne sont pas encore à jour de cette nouvelle mesure, mais depuis le 1^{er} janvier 2007, en l'absence de ZNT indiquée sur l'étiquette d'un bidon, aucun traitement phytosanitaire n'est possible dans la zone des 5 mètres bordant l'eau [rivière, canal, mare, etc.]. Il s'agit de la ZNT minimale applicable à l'ensemble des produits.

Cependant, les distances d'application par rapport au cours d'eau varient selon les produits. L'arrêté du 12 septembre 2006 a pour objectif de simplifier et harmoniser les ZNT en créant quatre classes : 5, 20, 50 et 100 m. Lorsqu'une ZNT est spécifiée sur l'étiquette, une table de correspondance est prévue entre cette distance et les 4 classes (tabl. 3). La figure 2.1 illustre la mise en place de la ZNT pour un produit de classe 2 imposant une zone non traitée de 20 m.

Classe 1	Risque le plus faible	5 mètres
Classe 2	Risque modéré	20 mètres
Classe 3	Risque fort	50 mètres
Classe 4	Risque exceptionnel	> 100 mètres

Tableau 3. Gestion du risque aquatique et des ZNT : Répartition des couples produits-usages en 4 classes de risque.

Les produits utilisables sur digues sont classés dans l'index phytosanitaire et dans la base en ligne e-phy (<http://e-phy.agriculture.gouv.fr/>) sous l'usage : traitements généraux / désherbage / dévitalisation des broussailles (sur pied) / dévitalisation des arbres (injection) / dévitalisation des souches. Les marques des produits, leurs spécificités, leurs molécules et leur dosage sont indiqués. Il faut ensuite vérifier la ZNT prescrite pour chacun, qui peut, selon la taille de l'ouvrage, exclure l'usage du produit. Lorsqu'il n'y a pas d'indication sur la ZNT, elle est nécessairement de 5 m vu l'arrêté de 2006. La base e-phy peut cependant comporter des erreurs sur ce point et il faut alors voir le site des fabricants ou les fiches disponibles chez les revendeurs. L'augmenta-

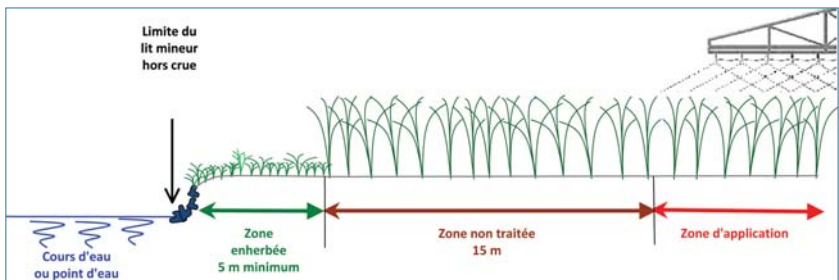


Figure 2.1. Exemple pour un produit de classe 2 = zone non traitée de 20 m : bande enherbée (5 m) et ZNT (15 m) (sch. M. Vennetier, d'après Phytoma mars 2007).



tion des ZNT semble assez inéluctable au vu des évolutions réglementaires ; par exemple, les produits de dévitalisation des souches ont maintenant une ZNT de 20 ou 50 mètres, ce qui rend leur utilisation impossible sur la quasi-totalité des ouvrages hydrauliques.



PRATIQUES ACTUELLES : PRINCIPES GÉNÉRAUX D'ENTRETIEN DES OUVRAGES ET ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX

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

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

L'entretien sécuritaire des ouvrages repose sur les axes suivants :

- la pratique de l'examen visuel des ouvrages, en routine et après les crues, cette dernière étant indispensable à l'inventaire des éventuelles dégradations subies ;
- le contrôle de la végétation sur l'ouvrage et à ses abords ;
- la lutte contre les dégâts des animaux fouisseurs ;
- l'entretien des parties d'ouvrages et parafoilles en maçonnerie, gabions, éléments métalliques, etc.

L'impact environnemental lié au contrôle de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai est évidemment moins important dans le cas où l'entretien est régulier (milieu ouvert) que dans celui où l'intervention vient rattraper une situation antérieure (milieu re-naturalisé), avec risque d'impact plus fort (ex : grosses interventions en milieu boisé avec risque de destruction d'habitat, d'espaces verts urbains, de paysages).

Afin de satisfaire les enjeux sécuritaires et écologiques, une solution consiste à maintenir des corridors boisés ou arbustifs (fig. 2.2), lorsque c'est possible, à 5 m minimum du pied de l'ouvrage de part et d'autre de celui-ci pour les digues (fig. 2.2b), côté aval uniquement pour les barrages. Du côté rivière (digue de protection), le corridor doit être compatible avec les autres enjeux : capacité d'écoulement du lit, risque d'embâcles.

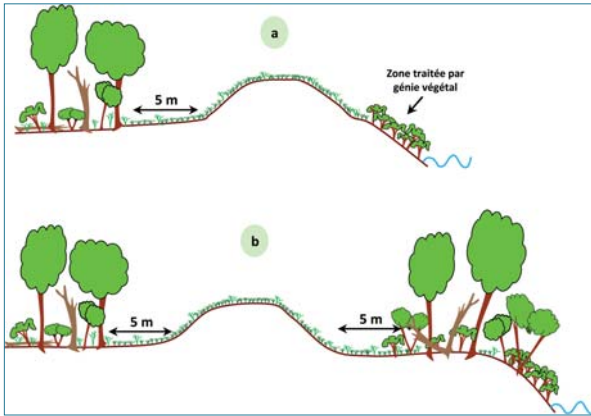


Figure 2.2. Respect d'une distance minimale de 5 m des arbres au pied des digues de protection. Des bandes boisées ou arbustives au-delà de cette limite compensent leur élimination de l'ouvrage. Sur le schéma du haut, présence d'une bande de protection en génie végétal arbustif sur la berge. Des arbres morts sont conservés pour la biodiversité.

De plus, dans ces corridors, les arbres penchés, malades et morts peuvent être conservés et favoriser ainsi la biodiversité, sauf s'ils entraînent un risque de contagion, en cas de pullulations d'insectes notamment, ou d'embâcles.

Ces mesures de protection sont parfois difficiles à prendre en compte, notamment pour les digues. D'une part, lorsque la digue est dans le prolongement de la berge (fig. 2.2a) : dans ce cas, la berge doit être dépourvue d'arbres susceptibles d'induire des érosions par courants tourbillonnaires ou des glissements sous l'effet du poids des arbres. Les techniques de génie végétal qui consistent à armer la berge grâce aux racines d'essences arbustives (telles que le saule pourpre) peuvent être employées dans la mesure où la végétation est implantée en dessous du niveau de la digue, afin que les racines ne pénètrent pas le remblai. D'autre part, lorsque l'ouvrage dispose d'une emprise restreinte (cas des digues érodées d'un côté par la rivière et grignotées de l'autre par les champs ou les habitations et jardins privés). Ces configurations sont fréquentes et les problèmes fonciers difficiles à résoudre. Enfin, certaines parties des ouvrages doivent impérativement être exemptes de végétation ligneuse (ouvrages de drainage, protection étanche, prise d'eau, zones de fuites connues...) obligeant à un contrôle rigoureux de la végétation. Cela est parfois très complexe, car comme dans le cas du castor, l'habitat et les aires de nourrissage sont également protégés et leur destruction nécessite la constitution de dossiers de dérogation.



Dans le cas des digues et barrages en remblai, le respect de la politique nationale de protection de la faune et de la flore ne doit pas nuire à la sécurité des ouvrages, qui reste prioritaire.

Sur la crête, sur les talus des ouvrages ainsi que sur une bande de 5 m de large minimum de part et d'autre des pieds de talus (fig. 2.2), l'idéal est :

- de maintenir un couvert herbacé le plus ras possible ;
- et d'éradiquer toute végétation ligneuse.

Cependant, les moyens de traitements chimiques permettant le contrôle efficace et à moindre coût de la végétation ligneuse ont été fortement restreints au cours des dernières années. L'évolution réglementaire a conduit à la suppression de l'utilisation des produits phytosanitaires à proximité immédiate des points d'eau ou des zones humides (ZNT de 5 m minimum).

Depuis, de nombreux gestionnaires de digues visent l'objectif « zéro phytosanitaire » pour les années à venir et certains, tels que l'association départementale Isère-Drac-Romanche, ont déjà pris les devants : depuis plus de 15 ans, ils ne gèrent leur végétation que par entretien mécanique. De plus, des gestionnaires sont engagés dans des programmes de recherche sur l'éradication de certaines invasives, comme la renouée du Japon (AD Isère-Drac-Romanche) ou le robinier (Compagnie Nationale du Rhône), visant à perfectionner les méthodes mécaniques et manuelles pour contrôler le développement de ce type d'essences.

Cela implique une veille réglementaire rigoureuse car l'évolution est rapide pour de nombreux produits et tous les gestionnaires d'ouvrages ne sont pas toujours à jour dans leur connaissance de la réglementation et utilisent parfois des produits interdits en termes d'usage ou de ZNT. Enfin, il faut rester vigilant quant aux produits de revente provenant d'autres pays européens. Il n'y a pas d'harmonisation dans les législations et, marché unique aidant, on peut retrouver chez nos entreprises des produits interdits en France ou pour des usages non agricoles (ce que la réglementation appelle les traitements généraux).

Les gestionnaires et maîtres d'ouvrage peuvent se faire appuyer par les services de l'État (services régionaux de la protection des végétaux – <http://pv.agriculture.gouv.fr/listesrpv.htm>) ou les organismes liés au monde agricole (Fredon Région).



LES APPORTS DE CE GUIDE

Concilier l'enjeu sécuritaire et l'enjeu environnemental dans la maîtrise de la végétation implantée sur les ouvrages hydrauliques en remblai, et à leurs abords, est rarement un exercice simple. La conception et l'application d'un plan de gestion pluriannuel sont bien souvent la base indispensable pour remettre une digue ou un barrage en état, et disposer à la fois d'un état des lieux, d'un outil de suivi et d'un outil de négociation, médiation et communication. C'est l'objet des chapitres 1 et 3 de ce guide qui donnent les clefs pour un diagnostic objectif et une bonne description de la végétation et de sa dynamique, et du chapitre 4 qui présente tous les aspects à intégrer pour la conception des plans de gestion. Ces plans définissent les objectifs à atteindre sur plusieurs années, tout en priorisant et sectorisant les interventions. Ils doivent intégrer non seulement l'ouvrage mais aussi la végétation des abords, des berges et d'un éventuel ségonnal, et autant que possible coupler les aspects végétation et génie civil. Une gestion de populations animales peut y être jointe si c'est utile pour une meilleure intégration dans une gestion globale.

Les plans de gestion de la végétation prennent en compte les enjeux en fonction des saisons, notamment de la présence de sites particuliers et d'espèces protégées ou patrimoniales. Les visites de surveillance et d'examen visuel des ouvrages sont à prévoir à la suite des travaux d'entretien, permettant de bonnes conditions d'observations. La probabilité d'occurrence des crues suivant les saisons est également à prendre en compte pour définir les périodes et la fréquence des travaux.



chapitre 3

Du diagnostic à la gestion de la végétation



De nombreux paramètres sont à considérer pour gérer la végétation ligneuse implantée sur les ouvrages hydrauliques : d'un côté, les propriétés géométriques et constitutives de l'ouvrage (dimensions, pentes des parements, constitution interne, singularités, état général...) et ses fonctions (protection contre les crues ou ouvrage de stockage ou de transport d'eau), ainsi que la nature des contraintes qu'il va subir (charge hydraulique temporaire ou charge permanente, courants ou vagues sur le parement amont...), et de l'autre les caractéristiques de la végétation (zones végétalisées, type et état de la végétation, densité, âge moyen des arbres, présence d'espèces envahissantes ou d'exotiques invasives, enjeux écologiques...). Le croisement de ces informations permet d'identifier les tronçons à risque de dégradation plus élevé et de définir les priorités d'intervention.

Trois échelles d'observation sont à considérer pour le diagnostic de la végétation ligneuse : l'ouvrage et son environnement (p. 65), les peuplements végétaux (p. 73) et les individus (arbres et arbustes, p. 89). Un plan de gestion de la végétation (chap. 4 p. 99) doit intégrer ces différents paramètres afin de sectoriser et prioriser les interventions sur la végétation ligneuse.



L'OUVRAGE HYDRAULIQUE ET SON ENVIRONNEMENT

Il existe différents types d'ouvrages hydrauliques¹ en remblai², caractérisés par des fonctions, des dimensions et des constitutions variées. Le mode d'installation et de développement de la végétation ligneuse, et son impact sur les structures génie civil (cf. chapitre 1 p. 13), vont être variables suivant le type d'ouvrage.

Les types et principales constitutions d'ouvrages

Du point de vue réglementaire (décrets du 11-12-2007 et du 12-05-2015), les ouvrages hydrauliques sont classés en fonction de leur hauteur (m), de la population en zone protégée pour les digues (nombre d'habitants) et du volume d'eau stocké (en m³) pour les barrages.

Sur le plan technique, les digues se distinguent des barrages par leur longueur (de 100 à 1 000 fois plus grande que leur hauteur) et par le fait qu'elles sont implantées parallèlement au cours d'eau ou au canal, en général sur des fondations meubles, au moins en surface. Cependant, de nombreuses digues se rattachent à des infrastructures perpendiculaires au cours d'eau ou à des terrains naturels à leurs extrémités.

Vis-à-vis des caractéristiques de la charge hydraulique, deux types d'ouvrages peuvent être décrits : les ouvrages de protection contre les crues à charge hydraulique temporaire (petites digues, digues classées et barrages écrêteurs ou de ralentissement dynamique), et les ouvrages à charge hydraulique permanente (digues de canal et barrages).

¹ La fonction première de tout ouvrage hydraulique – digue ou barrage – est de retenir de l'eau : pour la stocker (barrage), ralentir la dynamique des crues (barrage écrêteur), la canaliser (digue de canal d'amenée ou de fuite d'aménagement hydroélectrique, de canal d'irrigation ou de voie navigable) – ces trois premiers cas entrent dans la définition d'un barrage au sens de la rubrique 3.2.5.0 de la nomenclature des installations, ouvrages, travaux et aménagements (Iota), article R.214-1 du Code de l'environnement – ou l'empêcher d'envahir une zone inondable (digue de protection contre les inondations), rubrique 3.2.6.0.

² Dans le présent guide, on se limite aux cas des ouvrages hydrauliques (barrages ou digues) en remblai homogène ou zoné ou composites (remblai et maçonnerie). Les digues et ouvrages de protection contre les submersions marines sont exclus.



Les petites digues rustiques de protection (non classées)

Ces petits ouvrages ont une hauteur inférieure à 1,5 m (fig. 3.1) et bordent souvent un petit cours d'eau (fig. 3.2). Fréquemment proches des berges et constituées par simple déblai-remblai, notamment lors d'opérations de curage, elles sont parfois perchées en limite d'une pente abrupte du fait de la dynamique actuelle d'incision des cours d'eau. Dans ces cas, l'action des racines ligneuses sur la stabilité de l'ensemble peut s'avérer efficace. Cependant, les systèmes racinaires des arbres occupent sans peine l'intégralité du remblai, même si ces arbres poussent à quelques mètres de la digue. Le déracinement d'un arbre peut alors entraîner l'effacement d'une portion de l'ouvrage, et la mort des racines fragilise grandement l'ouvrage



Figure 3.1. Petite digue du Verdon (83) implantée sur un ségonnal, à plusieurs mètres de la berge du cours d'eau (ph. C. Zanetti).



Figure 3.2. Petite digue de l'Albanne (73) perchée en haut de berge abrupte (ph. C. Zanetti).

(cf. chapitre 1 p. 13). Dans ces situations, si la digue est au ras de la berge, il faut trouver un compromis entre l'objectif de renforcer la berge qui supporte la digue et celui d'assurer la sûreté du petit ouvrage. Les techniques de génie végétal peuvent être appliquées à la berge en veillant à ce que la végétation de la berge n'envahisse pas l'ouvrage (Valé et al. 2013).

Les digues de protection classées¹ au sens du Code de l'Environnement

Ces digues ont une hauteur supérieure à 1,5 m, mais sans dépasser 10 m en France (et majoritairement inférieure à 6 m) (fig. 3.3).

Ce sont généralement des ouvrages anciens (remontant parfois au Moyen-Âge), souvent construits par étapes, rehaussés et confortés après les grandes crues historiques, avec des matériaux extraits du cours d'eau (fig. 3.4).

¹ Ces digues sont classées (A, B ou C) dès lors que la population protégée dépasse 30 personnes.



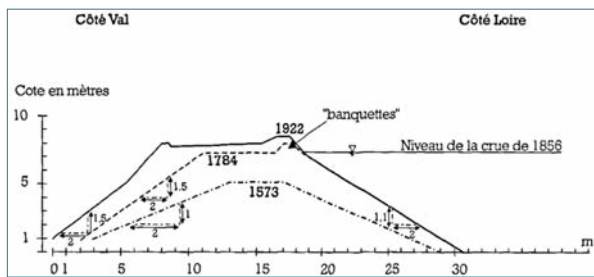
Les talus côté cours d'eau sont parfois protégés des courants par un perré en maçonnerie (fig. 3.5). Sur les secteurs plus exposés aux affouillements, des enrochements de pied ou des dispositifs parafouilles sont mis en place.



Leur tracé en plan tantôt s'éloigne, tantôt s'approche – parfois jusqu'au contact – du lit mineur (fig. 3.6). Les pentes des parements sont parfois supérieures à 50 %, soit au-delà des standards actuels de sécurité pour des ouvrages hydrauliques en remblai homogène étanche. Leurs fondations – en général non traitées à la construction – sont formées de dépôts alluviaux, qui peuvent être localement très perméables, par exemple à l'aplomb d'anciens lits du cours d'eau.

Figure 3.3. Digue de l'Isère alternant des zones herbacées sur des talus récemment rénovés, des bouquets d'arbres résiduels, des fourrés denses d'arbustes et de rejets d'arbres coupés (ph. C. Zanetti).

Figure 3.4. Coupes caractéristiques des levées de la Loire avant confortements récents (auteur : Irstea, extrait de Mériaux et al. 2001, d'après Dion, 1961. Histoire des levées de la Loire. Paris, édité par l'auteur, 312 p.).



Constituant un obstacle physique entre le lit de la rivière – source d'approvisionnement en eau – et les parcelles agricoles ou urbaines du lit majeur, ces digues sont devenues au fil du temps des remblais traversés par de multiples ouvrages de prise d'eau (galleries, conduites...), construits par des tiers, malheureusement parfois sans concertation avec le responsable de la digue : des occurrences de près de deux ouvrages traversants par kilomètre sont ainsi couramment observées dans le parc des digues anciennes.



Figure 3.5. Digue de la Loire avec perré maçonné. Noter les rejets de souche d'arbres poussant directement dans le perré et récemment coupés (ph. C. Zanetti).

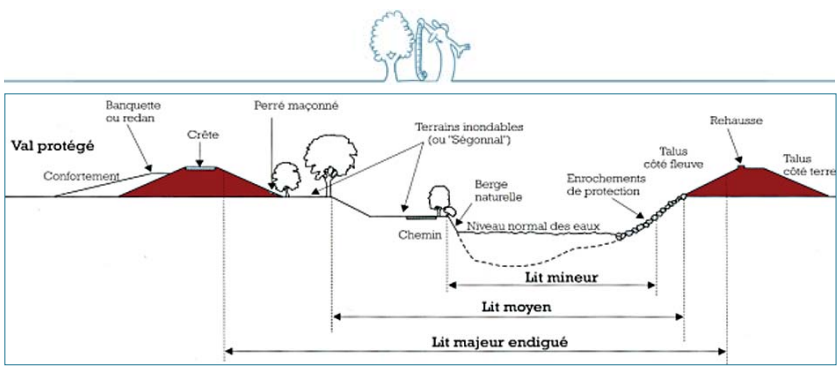


Figure 3.6. Coupe en travers type d'une vallée endiguée (auteur : Irstea, extrait de Mériaux et al. 2001).

Plus récemment, mais dans le sens longitudinal cette fois-ci, les gestionnaires de réseaux les plus divers ont profité des remblais de digue pour y enfouir des canalisations d'eau potable, des conduites d'eau usée, des réseaux électriques ou téléphoniques, etc. Enfin, de longs linéaires de digue fluviale supportent une voie de circulation plus ou moins large en crête.

Le manque d'entretien sur ces ouvrages aux cours des dernières décennies a souvent induit un boisement plus ou moins dense des talus, rendant leur surveillance difficile (fig. 3.3 p. 67).

Les digues à charge permanente

Ces digues sont généralement plus récentes, le plus souvent moins d'un siècle (cas des digues d'aménagement hydro-électrique) avec des exceptions notables comme de nombreux canaux de navigation et d'irrigation, dont certains remontent à la Renaissance. Leur fonction est de contenir de l'eau de façon permanente : canaux hydro-électriques d'amenée ou de fuite (fig. 3.7), canaux de voies navigables (fig. 3.8), canaux d'irrigation. Leur conception se rapproche de celle des barrages de retenue : d'ailleurs ces ouvrages relèvent de la nomenclature des barrages au titre de la loi sur l'Eau. On y re-



Figure 3.7. Digue de canal du Rhône (XX^e siècle) (ph. C. Zanetti).



Figure 3.8. Digue du canal du Midi (XVIII^e siècle) (ph. C. Zanetti).

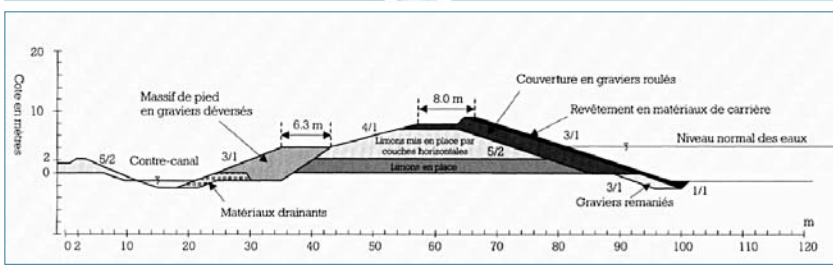


Figure 3.9. Digue en graviers avec noyau étanche en limon (canal du Rhône) (auteur : Irstea, extrait de Mériaux et al. 2001).

trouve parfois un zonage des matériaux avec séparations des fonctions d'étanchéité et de drainage (fig. 3.9). Leur emprise à la base peut atteindre 80 à 100 m, pour des hauteurs d'une dizaine de mètres (jusqu'à 30 m), ce qui se traduit par des pentes de talus en moyenne beaucoup plus douces que pour les digues de protection contre les crues. Certaines de ces digues sont perchées sur l'un des bords du lit majeur du cours d'eau, ce qui sollicite fortement leurs fondations.

Ces digues se sont souvent boisées naturellement par manque d'entretien, mais certaines ont également fait l'objet de plantations. C'est le cas pour le canal du Midi dont les alignements de platanes désormais centenaires sont classés, avec l'ensemble de l'ouvrage, au patrimoine mondial de l'Unesco (fig. 3.8).

Les barrages

Il s'agit ici des barrages en terre petits et moyens (de hauteur inférieure à 20 m). Il y a plusieurs dizaines de milliers de barrages de ce type en France si on englobe les petits barrages d'étang, les plus anciens (beaucoup remontant au Moyen Âge) et les plus nombreux. Leur constitution dépend de la région géographique, de l'époque de construction et de la fonction du barrage : réserve de pêche (fig. 3.10), irrigation, base de loisirs, écrêtement des crues, réserve d'eau potable.



Figure 3.10. Barrage sur la Gervonde en Isère après une première tranche de rénovation. Le talus amont portait des gros peupliers qui ont été éliminés. Le plan de gestion de la végétation du talus aval doit tenir compte de la présence d'espèces animales rares à proximité (ph. C. Zanetti).



Il existe trois types de barrages en remblai : (i) les barrages en terre homogènes constitués de matériaux fins étanches, (ii) les barrages zonés avec recharge amont ou noyau central assurant l'étanchéité, et (iii) les barrages en matériaux perméables munis d'un dispositif d'étanchéité mince installé sur leur parement amont (ex : géomembrane, masque en béton...).

Par défaut d'entretien, ces barrages, et notamment les plus anciens d'entre eux, se sont parfois boisés. Ils sont devenus, malgré eux, des substrats et des milieux propices au développement de la faune et de la flore terrestre et aquatique, intéressantes pour la biodiversité, mais dont certaines espèces nuisent à l'intégrité de l'ouvrage.

Quelle que soit la fonction première des digues et des barrages que nous avons présentés, une fois édifiés, ces ouvrages, qui retiennent des plus ou moins grandes quantités d'eau, doivent absolument être en bon état de fonctionnement et d'entretien afin d'éviter tout risque de rupture. En effet, les conséquences d'une rupture d'ouvrage hydraulique sur un territoire sont bien plus graves, du fait de la formation d'une onde de submersion, que celles d'une inondation naturelle, plus progressive. L'importance des dégâts potentiels dépend de deux facteurs : d'une part la hauteur de l'ouvrage, et, pour les barrages, le volume d'eau stocké (m^3) ou, pour les digues, le débit de la crue (m^3/s) dans le cours d'eau ; et d'autre part l'importance des enjeux protégés (zones agricoles, zones urbaines, zones industrielles à risques, centrales nucléaires...).

Structure interne des ouvrages et développement racinaire

Comme on l'a vu au paragraphe sur l'influence de la nature des matériaux du remblai p. 46, les matériaux fins étanches utilisés dans les remblais homogènes ou les noyaux d'ouvrages zonés sont cohésifs et ont ainsi la particularité de conserver la forme des conduits laissés par les racines décomposées. Au contraire, les matériaux grossiers utilisés dans les recharges des ouvrages zonés à noyau ou dans les digues perméables ne sont pas ou peu cohésifs. Au cours de la décomposition des racines, il se produit un réarrangement des grains qui rebouche les vides et ne favorise pas la conservation de conduits francs.

Le compactage permet d'améliorer les caractéristiques physiques d'un remblai : mécaniques (augmentation de la densité et de la résistance) et corrélativement hydrauliques (diminution de la perméabilité).



Figure 3.11. Pivot et ses ramifications en forme de raquette plate ayant colonisé une faille de compactage sur une digue (dimensions 100 x 80 x 10 cm). Le phénomène a été découvert lors de la tempête de 1999 : tous les arbres tombés avaient un enracinement très superficiel s'arrêtant à 20 cm de profondeur au niveau du matériau compacté ; tous les arbres restés debout avaient ce type de pivot colonisant sur 1 à 2 m de profondeur de minces bandes verticales mal compactées (ph. C. Ripert).



Figure 3.12. Les racines des arbres poussant sur les parements ont envahi, sur toute sa hauteur, cette digue ancienne non compactée. Certaines la traversent de part en part, profitant d'horizons plus favorables liés à des rehaussements successifs qui sont visibles dans la stratification des matériaux (ph. G. Doirat).

Les matériaux limoneux ou argileux compactés sont très défavorables au développement des racines, car insuffisamment aérés. On n'observe pas de développements racinaires significatifs dans des matériaux fins correctement compactés. Mais les racines exploitent les moindres défauts de compactage (fig. 3.11) ou de composition du matériau (passées sableuses par exemple). En cas d'absence ou d'insuffisance de compactage (cas des ouvrages anciens n'ayant pas bénéficié d'engins mécaniques de terrassement pour leur construction), les racines peuvent occuper l'ensemble du volume de remblai (fig. 3.12).

De nombreux ouvrages sont équipés de dispositifs ou parties à fonction spécifique : des drains, des parois étanches (parois moulées ou palplanches) destinés à réguler les propriétés hydrauliques du remblai, des perrés ou carapaces en encochements assurant la protection contre l'érosion externe des talus, notamment côté cours d'eau ou retenue. L'efficacité des drains, qui débouchent en pied aval du barrage ou de la digue, peut être fortement dégradée par le colmatage lié au développement des racines à la recherche de l'eau, que ces ouvrages ont justement vocation à collecter. Celles-ci sont, en effet, capables de créer des bouchons très denses de plusieurs mètres de long formés de dizaines de milliers de radicelles (cf. fig. 4.12b p. 115) qui rendent le drain inopérant, ce qui peut entraîner le glissement du parement aval lorsque l'ouvrage est en charge ou favoriser une érosion interne.



Figure 3.13 (ci-contre). Soulèvement des blocs de pierre taillés du perré maçonné par un saule arborescent (ph. C. Zanetti).

Figure 3.14 (ci-dessus). Enrochement de protection colonisé par les arbres et déstructuration des blocs (ph. C. Zanetti).

Si elles sont correctement réalisées, les parois étanches rigides (palplanches métalliques ou parois moulées) arrêtent totalement la propagation des racines. Cependant, des observations de racines traversant des voiles épais (50 à 70 cm d'épaisseur) prouvent que les racines savent exploiter le moindre défaut de réalisation ou de vieillissement des ouvrages : nids de cailloux, fissures...

Sur les perrés maçonnés ou bétonnés, les jeunes pousses d'essences arborées arrivent à s'installer puis à se développer au niveau des joints ou des fissures : en grandissant, elles soulèvent et écartent les blocs de pierre (fig. 3.13) ou déchaussent les dalles (fig. 1.1 p. 18). Dans le cas des protections en enrochements, il faut veiller à ce que les arbres de grandes dimensions ne basculent pas sous l'effet du vent ou des courants. En se déchaussant, leur système racinaire risque de désolidariser les blocs autour desquels ils se sont développés et même d'en arracher certains, créant un défaut, un trou, voire une « brèche », dans la protection (fig. 3.14).

Enfin, les ouvrages singuliers tels que les galeries et conduites traversant les digues et barrages génèrent des hétérogénéités qui sont favorables à la colonisation par les racines (cf. fig. 4.12b p. 115). Celles-ci exploitent préférentiellement les zones de sous-compactage qui existent à proximité des interfaces « remblai/structure rigide » puis les fissures éventuelles dans la structure rigide elle-même.

Le mode de dégradation d'un ouvrage par la végétation ligneuse dépend donc des caractéristiques des matériaux constitutifs du remblai, mais aussi de la position et de l'état des dispositifs d'étanchéité, de drainage et/ou de protection contre l'érosion externe de l'ouvrage.

Au-delà des propriétés de l'ouvrage, les caractéristiques de la végétation installée sur ce dernier sont également à prendre en compte. Différents types de peuplements végétaux colonisant les digues et les barrages peuvent être identifiés.



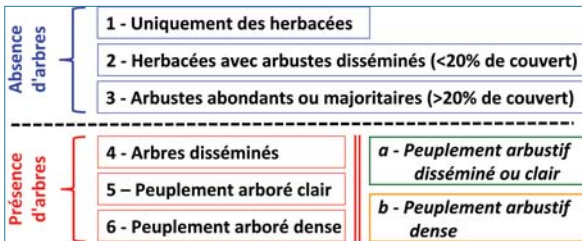
LES PEUPELEMENTS VÉGÉTAUX

Détermination d'une typologie de végétation

La végétation est formée par des arbres, des arbustes et des herbacées qui s'organisent dans l'espace et dans le temps suivant des systèmes complexes et dynamiques (évolutifs). La description de ces systèmes doit être simplifiée pour être opérationnelle, en faisant appel à quelques caractéristiques faciles à décrire.

Nous proposons comme base générale une typologie simplifiée qui s'applique à la plupart des digues et barrages français, constituée de six types de végétation (fig. 3.15). Pour chaque type, les risques induits et les éventuels avantages pour les ouvrages hydrauliques seront bien définis, et donc un scénario de gestion spécifique sera applicable. On se base sur trois critères :

- la strate dominante (herbacées, arbustes, arbres) ;
- les espèces composant cette strate ;
- la densité des arbres et arbustes lorsqu'ils sont présents.



Type de végétation	Type d'ouvrage	Petits ouvrages	Ouvrages moyens	Ouvrages larges
1 - Herbacées pures		Accepté	Accepté	Accepté
2 - Herbacées et arbustes disséminés		Accepté sous conditions	Accepté sous conditions	Accepté sous conditions
3 - Arbustes abondants ou majoritaires		Interdit	Interdit	Interdit
4 - Arbres disséminés *		Interdit	Interdit	Interdit
5 - Peuplement arboré clair *		Interdit	Interdit	Interdit
6 - Peuplement arboré dense		Interdit	Interdit	Interdit

* Pour le sous type avec peuplement arbustif dense, se reporter au type 3

Légende	
Accepté	Accepté
Accepté sous conditions	Accepté sous conditions
Interdit sauf cas particulier	Interdit sauf cas particulier
Interdit	Interdit

Figure 3.15. (a) Principaux types de végétation rencontrés sur les ouvrages hydrauliques ; (b) Types de végétation acceptés et interdits selon le type d'ouvrage (petit, moyen ou large).



Pour chaque type comprenant des arbres, on différencie deux sous-types en fonction de la densité de la strate arbustive (forte ou faible). Mais chaque cas de digue ou barrage étant particulier, des types différents de ceux proposés ou plus nombreux peuvent être déterminés et utilisés en fonction des conditions locales et du niveau de finesse souhaité pour la gestion. On peut en particulier faire des types ou sous-types supplémentaires limités à une ou quelques espèces d'arbres si certaines ne poussent localement que sur une partie précise de la digue, si une espèce atteint des dimensions très supérieures aux autres ou si certaines posent un problème particulier : par exemple, mortalité massive d'une espèce à cause de maladies (cas actuel, dans certaines régions, du platane, de l'aulne glutineux ou du frêne), cas des alignements d'arbres plantés en crête de digues, des ripisylves étroites et linéaires à l'interface entre la terre et l'eau, des roselières développées sur des zones de dépôts de sédiments en bordure d'un chenal, etc. Il ne faut pas oublier de prendre en compte, avec les contraintes spécifiques que cela entraîne, la densité des souches qui pourraient provenir d'un ancien peuplement coupé.

La typologie proposée se base en premier lieu sur la présence ou l'absence d'arbres, facteur principal de danger potentiel par leur enracinement (cf. chapitre 1 p. 13), et la densité du peuplement arboré. En effet, la question primordiale sera toujours la possibilité ou pas de conserver des arbres sur une digue, et si oui sur quelle partie de celle-ci, jusqu'à quelle taille ou quel âge et à quelle densité. C'est ensuite la présence et la densité de la strate arbustive qui intervient ; celle-ci ne présente des inconvénients directs que pour l'intégrité des parements de surface lorsqu'ils existent (perrés, revêtements bitumineux...), sur les pentes érodables à cause des turbulences dans le courant, et à forte densité parce qu'ils gênent la surveillance visuelle des talus et favorisent l'installation des animaux fouisseurs. Une strate arbustive peut être présente sous tous les types de peuplements arborés. La strate herbacée – régulièrement fauchée – devrait, dans l'idéal et dans la majorité des cas, être la seule acceptée. En pratique, elle n'occupe parfois que les espaces disponibles sous les deux autres strates ou dans les trouées du couvert ligneux.

Les seuils de densité à prendre en compte pour les strates arborées et arbustives doivent être déterminés localement en fonction de la taille et de la vitesse de croissance de ces végétaux. En effet, on ne peut pas, pour une typologie, généraliser des nombres de tiges par hectare ou des distances entre individus. Pour une même espèce, par exemple le peu-



plier noir, on peut avoir affaire à l'âge adulte à des arbres de plus de 30 m de haut et 1 m de diamètre en climat humide sur une digue en matériaux fins, ou ne dépassant pas 10 m de hauteur et 25 cm de diamètre sur une digue en matériaux grossiers en climat méditerranéen. À écartement identique des arbres entre eux, le peuplement pourrait être considéré comme dense dans le premier cas et plutôt ouvert et clair dans le deuxième. Les vitesses de croissances aérienne et racinaire seront aussi très variables, et pourront donc donner lieu à des choix de gestion radicalement différents. Un peuplement bas et relativement peu dense à un stade jeune, qu'il s'agisse de semis ou de rejets après une coupe, peut rapidement devenir haut et dense si les arbres ont une croissance rapide. Il reste clair et ouvert très longtemps dans le cas contraire. Lorsque c'est utile, les espèces composant la végétation peuvent être classées en trois groupes selon leurs besoins en eau et leur résistance à la sécheresse (voir « Les types de végétation » p. 14) :

- les essences hygrophiles : elles ont une forte demande en eau toute l'année (saule blanc, peupliers, platane, aulne glutineux). On les retrouve fréquemment alignées en pied de talus à proximité du cours d'eau ou du canal, ou quand une nappe permanente est accessible à faible profondeur. Ces espèces sont capables de pousser très rapidement en hauteur, jusqu'à plus d'un mètre par an dans les meilleures conditions et encore plus quand elles rejettent de souche après une coupe, mais aussi en diamètre : un peuplier peut atteindre 50 cm de diamètre et 20 m de haut en seulement 20 à 30 ans ;
- les essences xérophiles : les plus représentatives sont le pin d'Alep en région méditerranéenne, le chêne blanc ou le chêne vert. Elles tolèrent une sécheresse prolongée en été ou au printemps, ou une sécheresse du sol créée par une forte épaisseur de matériaux très drainants. Leur croissance est lente dans les milieux où elles dominent ;
- les essences mésophiles : dominant en situations intermédiaires, elles supportent des conditions moins favorables mais pas des sécheresses prolongées. Les plus fréquentes sur les digues sont le robinier, les chênes rouvre et pédonculé, les frênes et les érables, mais aussi certains résineux comme le pin sylvestre, ou encore le mélèze en montagne. Leur vitesse de croissance est intermédiaire entre hygro- et xérophiles (fig. 1.3 p. 26). Elles peuvent tirer parti de la proximité de l'eau pour pousser assez vite si la nappe n'est pas trop superficielle et si les submersions ne sont pas trop fréquentes, car elles sont moins tolérantes à l'engorgement du sol que les espèces hygrophiles.



Ce classement permet d'identifier les espèces d'arbres et arbustes qui s'adaptent aux différentes parties de digues et aux berges ou d'en prévoir la vitesse de croissance. C'est utile notamment quand les remblais sont larges et hauts et qu'il est nécessaire de distinguer différentes zones sur les talus ou la crête, présentant des potentialités écologiques variables pour la végétation et des risques induits différents.

Suivant les cas, on pourra aussi faire appel à d'autres caractéristiques des espèces : leurs qualités esthétiques ou leur intérêt pour la population (belle floraison, feuillage permanent ou pas, qualité d'ombrage), leur résistance à la sécheresse dans une optique d'anticipation du changement climatique, leurs fonctions écologiques (comme par exemple un potentiel mellifère important, la production de fruits pour la faune...) ou, côté négatif, leur caractère envahissant. Les insectes pollinisateurs récoltent le nectar (robinier, tilleuls, fruitiers, certains érables, aubépines, ronces, beaucoup d'espèces herbacées), des pollens (saules et peupliers, intéressants par leur floraison précoce, chênes vert et blanc) et de la propolis (pousses de peupliers surtout mais aussi aulnes, saules, frênes, bouleau, ormes, certains chênes). Des détails sur l'intérêt des végétaux pour les abeilles et autres pollinisateurs figurent dans le chapitre 4 (p. 123). Dans le cadre de mesures environnementales concernant des digues admettant une végétation arbustive maîtrisée, on devrait envisager de créer des peuplements végétaux très mellifères, faciles à entretenir : milieux herbacés florifères (par exemple des légumineuses comme certains trèfles, mais il a beaucoup d'autres espèces intéressantes), parsemés éventuellement d'arbustes bas eux-mêmes mellifères (aubépines, ronces, etc.).

L'intégration de la gestion de la végétation des ouvrages dans celle de l'ensemble de l'environnement proche (ripisylve, ségonnal, massifs boisés proches...) permet aussi de compenser et d'équilibrer les différentes fonctions de la végétation à une échelle plus large.

Caractéristiques détaillées des types de végétation

Chaque type de végétation peut être décrit en fonction de sa structure, de ses impacts potentiels sur les ouvrages hydrauliques et de son intérêt écologique ou paysager. On en déduit (cf. fig. 3.15b p. 73) son degré d'acceptabilité générale suivant le type d'ouvrage hydraulique et les caractéristiques de celui-ci (dimensions, matériaux). Tous les types de végétation exigent un plan de gestion approprié qui tienne compte de leurs



caractéristiques, ce plan étant d'autant plus complexe que le nombre et la taille de végétaux ligneux augmentent.

Type 1 : Herbacées pures

Ce type regroupe des milieux assez différents au niveau écologique. Les herbacées peuvent être pérennes ou annuelles et de taille variable. Elles peuvent être composées majoritairement de graminées ou de nombreuses autres familles. Le couvert peut être dense et continu sur les sols fins et riches ; il est parfois discontinu sur les matériaux grossiers et pauvres.

Un tapis herbacé pérenne et de faible hauteur, naturellement ou grâce à des fauchages réguliers, est le type de formation végétale le plus recommandé sur les ouvrages hydrauliques (fig. 4.2 p. 105, 4.15 p. 124 et 5.20 p. 195). Il protège efficacement le sol des différents modes d'érosion superficielle :

- il intercepte les gouttes de pluie, empêchant l'impact direct qui déstructure l'horizon superficiel du sol et mobilise des particules fines ;
- un feutrage racinaire dense et superficiel renforce la cohésion du sol et limite le ravinement ;
- la densité des végétaux ralentit le ruissellement ;
- en se couchant au sol lorsqu'il est submergé dans un courant ; il forme une couche protectrice.

Offrant peu de prise au courant et occupant un faible volume, la végétation herbacée basse ne risque pas d'être arrachée, ni d'élever le niveau de l'eau. Si elle est régulièrement fauchée, elle ne gêne pas l'examen visuel, principale méthode de surveillance des digues. Ses systèmes racinaires ne comportent que des racines fines : en dehors de revêtements superficiels peu épais, que les herbacées peuvent dégrader en provoquant des fissures par soulèvement ou en envahissant celles qui existent, elle ne fait courir aucun risque direct à l'ouvrage. Certaines herbacées peuvent cependant avoir des enracinements profonds (plusieurs mètres) sur matériaux riches et fins non compactés, mais les diamètres de leurs racines restent faibles. Ils peuvent participer à la stabilisation des matériaux et à des prélèvements d'eau significatifs dans le corps de digue hors période hivernale.

Quelques espèces herbacées peuvent cependant atteindre plusieurs mètres de hauteur et une forte densité, notamment la canne de Provence dans le sud de la France et quelques plantes invasives comme la

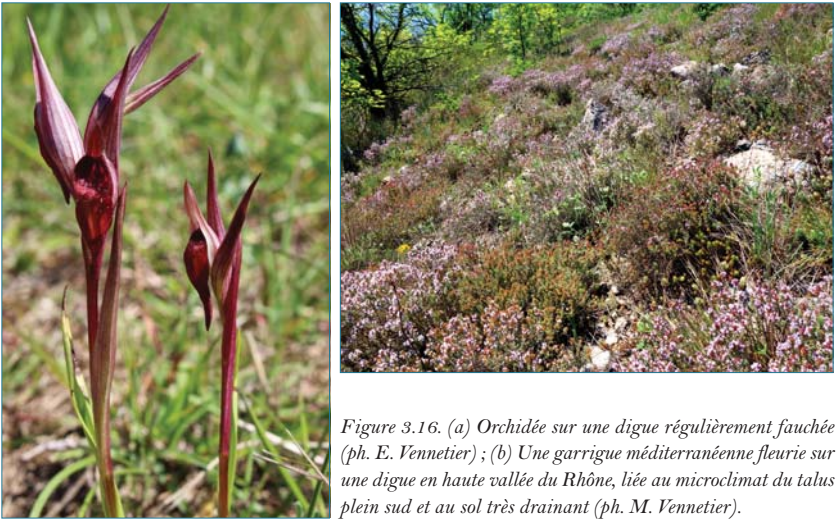


Figure 3.16. (a) Orchidée sur une digue régulièrement fauchée (ph. E. Venetier) ; (b) Une garrigue méditerranéenne fleurie sur une digue en haute vallée du Rhône, liée au microclimat du talus plein sud et au sol très drainant (ph. M. Venetier).

grande berce du Caucase, l'herbe de la pampa ou la renouée du Japon (fig. 4.18 p. 129). Elles limitent la visibilité sur les talus et sont difficiles à éliminer. La canne de Provence a un enracinement superficiel, et peut être déracinée en grandes plaques par la force du courant, avec un risque de former ou d'alimenter des embâcles du fait de la forte densité et de la longueur des tiges. L'herbe de la pampa peut former des feutres racinaires très denses sur zones drainantes.

La biodiversité des formations herbacées peut être intéressante, même quand elles sont entretenues régulièrement : elles accueillent des espèces de milieux ouverts comme des orchidées (fig. 3.16a) et des papillons, de nombreuses plantes à fleurs favorables aux pollinisateurs (fig. 3.16b et 4.17 p. 127), et parfois des associations originales de plantes et animaux liées à l'artificialité du milieu. On trouve par exemple des milieux subméditerranéens dans des régions fraîches et humides, à cause de l'orientation chaude de talus en pente forte et de la nature très perméable et pauvre de certains substrats grossiers (fig. 3.16b), ou à cause de la compaction de limons qui induit une sécheresse édaphique.

Type 2 : Herbacées et arbustes disséminés

Il s'agit de milieux à dominante herbacée, avec des arbustes disséminés dont le couvert ne dépasse pas 20 % (fig. 3.17).

Cette formation végétale est globalement satisfaisante en termes de risques pour les digues. Elle a des qualités proches de celles du type 1. Les arbustes à faible densité n'empêchent pas la surveillance visuelle



des ouvrages, leur système racinaire reste limité en taille de souche et de racines, et donc en général sans danger. Côté rivière, ils n'opposent pas une grande résistance à l'eau donc ne posent pas de problème hydraulique.



Avec certaines méthodes de fauchage ou broyage, la présence des arbustes complique

Figure 3.17. Arbustes très dispersés sur une digue fauchée régulièrement (type 2). Une densité double d'arbustes serait encore considérée comme type 2 (ph. M. Venetier).

l'entretien mécanique si on veut les épargner (mais ce ne doit pas être un argument suffisant à lui seul pour les éradiquer). Certaines espèces comme les ronces se multiplient rapidement si l'entretien n'est pas régulier. Les racines des arbustes peuvent, comme tout système racinaire, dégrader des revêtements superficiels. Elles ont assez de force en grossissant pour soulever des dalles de béton et élargir des joints dans lesquels elles se sont immiscées à l'état de radicelle.

Ce type de végétation présente un intérêt écologique supérieur aux groupements herbacés purs. Les espèces végétales et animales ayant besoin de milieux ouverts y trouvent encore des conditions propices, mais de nombreuses autres espèces d'oiseaux, petits mammifères et pollinisateurs y sont favorisés par la source de nourriture que constituent les arbustes souvent très florifères de ces milieux et leurs fruits (aubépine, cornouiller, viornes, prunelier, fruitiers, etc.) Il présente aussi un attrait paysager qui le rend intéressant dans les milieux fréquentés. À faible densité, les arbustes disséminés n'offrent pas de refuge ou de cache aux animaux fouisseurs. La limite entre ce type et le suivant est progressive, et va dépendre de la taille et du type d'arbustes en cause.

Type 3 : Arbustes abondants ou dominants

Ce type est caractérisé par la forte présence d'une végétation arbustive qui comporte des bouquets plus ou moins denses et contigus. Le reste de la couverture végétale est formé par des herbacées qui peuvent occuper une surface variable en fonction de la densité locale et du type d'arbustes. Des arbustes hauts, à couvert léger et régulièrement espacés, permettent une relativement bonne visibilité des talus lorsqu'on les examine de près et si l'herbe est fauchée autour. Ils n'empêchent pas le maintien d'une végétation herbacée continue en sous-étage, sauf



aux plus fortes densités. Avec des arbustes bas à couvert dense, ou des tapis de plantes en partie rampantes comme les ronces, la visibilité depuis le sol peut être fortement réduite dès qu'on dépasse une couverture de 30 % (fig. 3.18). Mais le couvert peut aussi se regrouper par tâches denses séparées par des zones ouvertes. Dans ce cas, la visibilité est réduite dans ces tâches et meilleure ailleurs.



Figure 3.18. Couvert arbustif dense gênant l'inspection visuelle. Le retour à une situation satisfaisante (type 2) peut être rapide et n'impose pas de travaux de réfection du remblai (ph. M. Venetier).

La plus importante des gênes causées par ce type de végétation est la dissimulation des désordres lors de la surveillance visuelle. Par ailleurs, la végétation arbustive, dès qu'elle est localement dense, est propice aux animaux fouisseurs qui y trouvent un abri. Les dégâts causés par ces fouisseurs, comme les autres désordres, sont alors camouflés. Ce type de peuplements ne présente pas en général de risque hydraulique direct pour les digues : la plupart des arbustes plient dans le courant et leur faible volume ne diminue pas significativement la capacité d'écoulement du lit, sauf dans le cas des très petits cours d'eau. Par contre, ils protègent efficacement les digues et berges de l'érosion en couvrant le sol et en diminuant la vitesse de l'eau à son contact. Les risques d'arrachement sont faibles mais des phénomènes de stockage de petits embâcles peuvent commencer à apparaître.

Les milieux arbustifs appelés fruticées, en raison de leur production souvent importante de petits fruits, sont écologiquement intéressants puisqu'ils accueillent une abondante population de petits animaux (principalement oiseaux et rongeurs) qui y trouve nourriture et abri. En France, les espèces arbustives fréquentes sur les digues sont majoritairement mellifères.

Il faut penser que les types 2 et 3 peuvent résulter d'un début de déficience d'entretien, conduisant à court ou moyen terme à des couverts de type 4 ou supérieur, de plus en plus difficilement réversibles.



Types 4 à 6 : Présence d'arbres en densité croissante

Pour chacun de ces types, on distingue deux sous-types en fonction de la densité du sous-étage arbustif : dense ou clair. On ne reviendra pas sur les avantages et inconvénients des milieux herbacés et arbustifs détaillés ci-dessus : ils sont identiques qu'il y ait ou pas des arbres qui les dominent, et le traitement qui les concerne doit être réalisé avec les mêmes objectifs de bonne visibilité des parties sensibles des ouvrages.

La densité des arbres peut avoir plus ou moins d'importance en fonction du type d'ouvrage, de leur localisation sur ou à proximité de l'ouvrage, des risques encourus et des espèces concernées.

Si la présence d'arbres n'est pas souhaitable sur tout ou partie de l'ouvrage, quelques individus même isolés ou dispersés sur les zones à risque (type 4) suffisent à poser problème, mais celui-ci pourra être résolu rapidement et à moindre coût (voir le paragraphe sur la prise en compte de l'écologie et du climat p. 123). Si les arbres sont plus nombreux (types 5 et 6, fig. 3.19), une intervention devenant



Figure 3.19. Couvert arboré moyen à dense dominant une pelouse sur digue étroite. L'élimination des arbres, dont le système racinaire occupe tout le remblai avec de grosses racines traversantes, implique à terme la rénovation complète de l'ouvrage (ph. C. Zanetti).

très coûteuse, leur élimination pourra être programmée sur une durée plus ou moins longue, soit par portions successives, soit en commençant par les plus dangereux ou les plus gros. Dans tous les cas, il sera nécessaire de concevoir un plan de gestion prévoyant la durée et les différentes phases des interventions sur la végétation, le traitement d'attente sur les parties où l'élimination des arbres est différée, et enfin la réhabilitation par génie civil de l'ouvrage après les travaux forestiers. On pourra aussi, si l'on souhaite garder des arbres à tout prix pour des raisons sociales, écologiques ou autres, prévoir des travaux de génie civil éliminant le risque (parois ou revêtements étanches, élargissement...) (cf. Travaux de confortement p. 144).

Lorsque la présence des arbres peut être tolérée sur un plus ou moins long terme, un plan de gestion devra définir ce qui est acceptable en termes de taille, âge, espèces et densité (voir au chapitre 4 le plan de



gestion p. 99). De façon générale, il n'est quasiment jamais acceptable de laisser se développer un peuplement arboré dense sur un ouvrage hydraulique. Le type 6 (fig. 3.20), bien qu'il existe encore sur certains ouvrages, est donc a priori banni.



Figure 3.20. Ambiance bucolique le long de cette rivière ombragée par ses digues. La végétation de type 6 (arbres et arbustes denses) gêne la surveillance visuelle et fragilise les ouvrages, qui ne sont ni très hauts ni larges, et qui se situent dans la continuité des berges potentiellement instables, car assez raides (ph. C. Ripert).

Les types 4 à 6 ont en commun le danger propre aux arbres de façon générale (voir le développement des racines p. 31) mais aussi les avantages de ceux-ci. On retrouve les risques d'érosion interne liée aux systèmes racinaires, d'érosion externe liée au déracinement ou aux turbulences, et le risque lié aux embâcles qu'ils peuvent produire, à leur niveau ou plus en aval en cas de chute et/ou de casse. À l'inverse, on peut porter à leur crédit la stabilisation plus ou moins efficace des pentes, une protection relative contre l'érosion et leur rôle de peigne pouvant piéger des objets flottants et limiter les embâcles plus en aval (du moins tant que les arbres concernés résistent aux contraintes qu'ils subissent). Les embâcles végétaux peuvent se décomposer sur place s'ils ne sont pas libérés rapidement. Mais ce stockage, s'il est fréquent, peut à terme se révéler négatif : diminution de la capacité d'écoulement, libération brutale de grosses quantités d'embâcles lors d'une crue majeure. La présence simultanée d'arbres et d'arbustes à densité moyenne à forte constitue un obstacle significatif à l'écoulement de l'eau, notamment s'ils sont entièrement submergés lors d'une crue. Il en résulte une surélévation de la ligne d'eau : celle-ci peut être critique si on se trouve en limite de surverse de digue ou de débordement. Le rapport entre le volume du lit et le volume de la végétation joue sur la hauteur de la surcote relative obtenue (fig. 3.21).

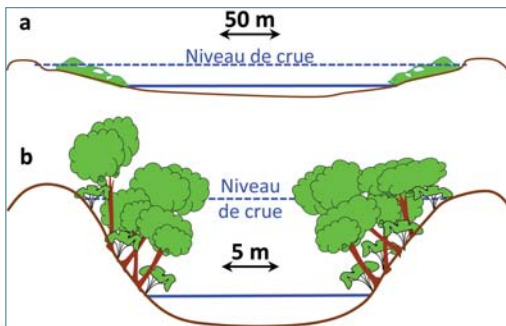


Figure 3.21. Impact de la végétation sur la capacité du lit d'une rivière. Végétation identique en volume ayant (a) peu d'influence ou au contraire (b) une forte influence sur le niveau de la ligne d'eau en crue suivant la taille du lit.



Dans les peuplements de type 4, la faible densité des arbres n'apporte pas de bénéfice global pour la stabilité des talus ou la lutte contre l'érosion. Des individus isolés, qui ont en général un houppier très développé car sans concurrence, offrent une forte prise au vent ou au courant auquel ils sont exposés entièrement et sans protection. Ils peuvent par leur grande taille et leur isolement créer des gros tourbillons. Leur système racinaire est proportionnel à leur développement aérien, donc potentiellement important, ce qui accroît le danger localement. Le risque est par contre bien délimité spatialement et concerne de faibles surfaces.

Types 5 et 6 : le risque lié aux racines est généralisé dans l'espace, et multiplié en proportion de la densité du peuplement. Dans certains cas, la totalité de l'ouvrage peut être colonisée par des racines enchevêtrées des systèmes racinaires, d'où un risque important pour la perméabilité du remblai en cas de pourrissement plus ou moins généralisé (qui impactera aussi le rôle protecteur contre l'érosion/glisement). Le peuplement s'autoprotège en partie en ralentissant le vent et le courant, d'où des turbulences plus nombreuses mais plus faibles. Le système racinaire de chaque individu est moins étendu que pour des arbres isolés, avec une taille potentiellement plus faible de la loupe d'arrachement. Par contre, le poids combiné ou la prise au vent ou au courant de tout un bouquet d'arbres peut être déstabilisant et provoquer des glissements amples et profonds (fig. 5.1 et 5.2 p. 171).

Les milieux présentant plusieurs strates de végétation équilibrées (arbres, arbustes et herbacées) sont en général les plus riches biologiquement, et ils sont aussi souvent les plus recherchés en termes de paysage et d'accueil du public (fig. 3.22).

Figure 3.22. Végétation équilibrée d'arbres et arbustes dispersés sur un tapis herbacé (ph. C. Ripert).





Cartographie des types de végétation

L'un des buts d'une typologie simplifiée de la végétation, outre le cadrage technique et financier de la gestion, est de permettre sa cartographie rapide. La cartographie peut être faite en parcourant les digues et les berges et en pointant par différentes méthodes (GPS, topofil) les limites entre ces types sur les différentes parties de la digue. C'est le moyen le plus simple sur les petits systèmes de digues de faible linéaire. C'est applicable aussi sur les plus grands systèmes de digues bien qu'alors très consommateur de temps.

Lorsque de grandes surfaces ou de longs linéaires sont concernés, notamment si on doit aussi étudier les berges et le voisinage des digues, la cartographie par Lidar (*light detection and ranging*) aéroporté haute définition peut être envisagée (Clément & Mériaux 2007) (cf. encart p. 148-149). Cette méthode moderne était assez coûteuse mais se « démocratise » rapidement avec le progrès des capteurs, matériels et logiciels et devient compétitive dès lors que de grands linéaires de digue peuvent être levés en une seule opération (typiquement plus de 60 à 80 km). Elle a l'avantage de fournir beaucoup d'autres informations comme une topographie extrêmement détaillée et complète de l'ouvrage (précision de l'ordre de quelques cm en X, Y et Z), de ses éventuels défauts externes, de la situation de tous les ouvrages annexes, parements de bâtiments, débouchés ou regards de conduites (Auriau et al. 2012, Mériaux et al. 2013). Elle est applicable même en présence d'un couvert végétal, à condition toutefois que la densité de points laser soit suffisante (plus de 50 à 100 points au mètre carré au niveau du sursol). On peut à l'aide de méthodes statistiques appropriées faire une reconnaissance et une cartographie automatique des types de végétation, qui n'a plus qu'à être rapidement vérifiée et validée sur le terrain, en désignant tout de suite les parties sensibles qui doivent faire l'objet d'une attention particulière (Vennetier et al. 2010). Elle permet entre autres de mesurer facilement et avec une bonne précision la hauteur des arbres et la densité du couvert, et leur évolution dans le temps.



Zonage de la végétation en fonction des types d'ouvrages

Comme il a été récemment rappelé dans un ouvrage international de référence (Ciria - International Levee Handbook 2013), le maintien d'un couvert herbacé bas excluant la présence d'arbres est recommandé et parfois imposé sur la grande majorité des digues, dans la quasi-totalité des pays européens et dans beaucoup d'autres régions du monde. Cette position conforte les préconisations françaises figurant dans le précédent guide de surveillance et d'entretien des digues (Mériaux et al. 2004). Cependant, les digues en place ne répondent pas toujours à ce critère et certaines se sont naturellement boisées avec le temps, voire ont été plantées. Leur remise en état du point de vue de la végétation génère des controverses du fait du bouleversement paysager et écologique.

Lorsque l'état de l'ouvrage le permet (sûreté, fonction, dimension, constitution), il peut être envisageable d'intégrer les paramètres écologiques et le paysage en conservant des arbustes et des arbres sous conditions (limites de densité, hauteur, diamètre) et sur certaines parties de l'ouvrage qui doivent être précisément délimitées. En admettant que les différences entre les ouvrages (digues et barrages) reposent uniquement sur les dimensions de ces derniers, les types de végétation acceptés, tolérés sous conditions ou interdits sont présentés dans la figure 3.15.b (voir Typologie de la végétation p. 73).

Lorsque les peuplements arbustifs et arborés sont tolérés sur une partie de l'ouvrage, un zonage précis s'impose. Deux exemples de zonage tirés d'études françaises sont donnés ci-dessous à titre d'illustration. Ils ne sont absolument pas généralisables : même si on considérait des types précis d'ouvrages ayant les mêmes caractéristiques physiques (dimensions, matériaux, protections), il ne pourrait y avoir de « zonage type » car d'autres paramètres sont à considérer pour chaque situation : climat, niveau des nappes, niveau des crues, leur type (durée, courant) et leur fréquence, capacité du lit (donc encombrement relatif de la végétation), espèces végétales, enjeux protégés, enjeux sociétaux. Dans le cadre d'une gestion à court et moyen termes d'une végétation existante, l'état de santé des arbres et l'âge des souches doivent aussi être pris en considération (voir État individuel des arbres p. 89). Cela veut dire qu'une étude spécifique de diagnostic et d'inventaire, base du plan de gestion, s'impose pour tous les grands ouvrages (voir Le plan de gestion p. 99).

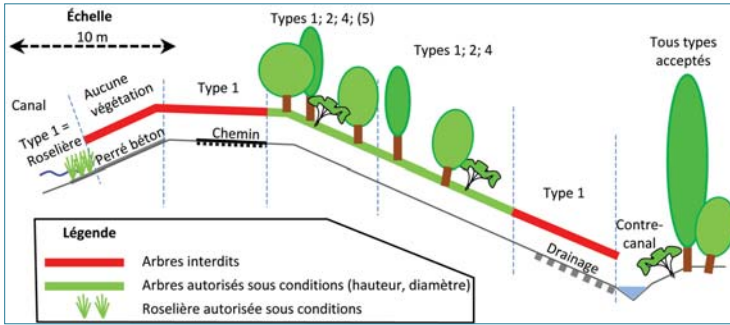


Figure 3.23. Zonage de la végétation sur une digue de canal large (base > 30 m).

La figure 3.23 présente une digue large (plus de 30 m à la base) en matériaux grossiers, pauvres et perméables, où les racines ne se développent pas dans le corps de digue en absence d'eau en profondeur (fig. 1.14 p. 37). La présence d'arbres n'est pas autorisée en pied d'ouvrage à proximité du contre-canal du fait de la présence du système de drainage, ni sur le parement amont recouvert d'un perré bétonné. Pour des raisons écologiques, la roselière peut être conservée à condition de limiter son emprise sur le canal et de l'entretenir pour éviter le développement des arbres au milieu des roseaux : leur système racinaire pourrait nuire au parement bétonné. Vu la largeur de l'ouvrage, une bande de végétation arborée peut éventuellement être conservée pour diverses raisons sur le milieu et le haut du parement amont sous conditions d'entretien régulier (diamètre inférieur à 30 cm et hauteur inférieure à 10 m). Dans la partie de cette zone la plus proche du drainage, les racines des arbres pourraient atteindre en profondeur la nappe (qui est à l'altitude du contre-canal) et développer de gros pivots. Ils pourraient aussi produire de grosses racines traçantes traversant la zone de drainage pour s'alimenter dans le contre-canal. C'est pourquoi il est souhaitable, pour l'intégrité du remblai et du massif drainant, de les maintenir à faible densité (type 4). Cette faible densité assure aussi une bonne visibilité du talus depuis l'autre côté du contre-canal. Sur le haut de ce talus, les racines ne peuvent pas atteindre la nappe en profondeur, et resteront donc très superficielles. Si on le juge utile pour des raisons paysagères ou pour ombrager le chemin de crête fréquenté par le public, on pourra garder des arbres à densité moyenne (type 5). En raison de leur hauteur et moyennant une gestion assurant leur renouvellement progressif, ils ne gêneront pas la surveillance du talus depuis le chemin de crête.

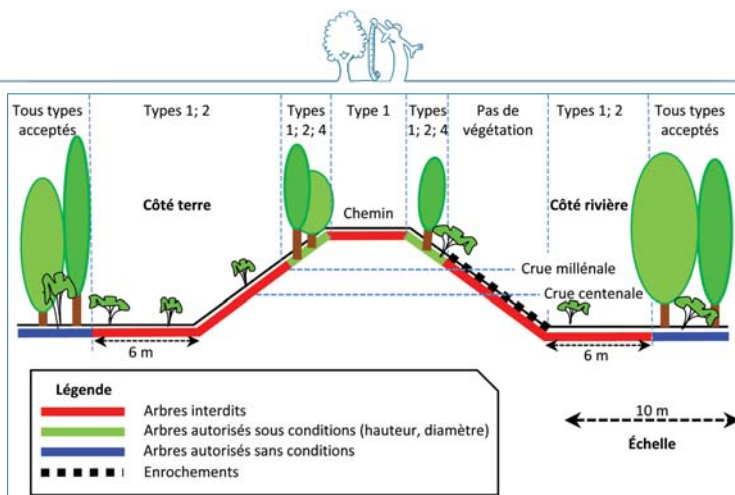


Figure 3.24. Zonage de la végétation sur une digue de protection contre les inondations de dimension moyenne (20 m à la base).

La figure 3.24 illustre une digue de protection contre les inondations dont le risque de surverse est extrêmement faible (car équipée d'un déversoir) et dont la crête possède une revanche importante par rapport à la crue centennale et même millénaire. Des arbres (type 4) sont donc admis sous conditions de hauteur et diamètre au niveau du haut des talus et sont interdits en dessous du niveau de la crue de référence. Les arbres et arbustes sont interdits au niveau des enrochements de protection contre le courant, car en crue, ils pourraient être arrachés et désolidariser les blocs. Les arbres sont aussi exclus des parties basses des talus hors enrochements et d'une zone de sécurité de 6 m à partir du pied de l'ouvrage. De ces zones, leurs racines pénètrent le remblai ou ses fondations (et même, suivant les matériaux, peuvent les traverser de part en part), au niveau où des circulations d'eau sont possibles en temps de crue.

Si le niveau de la crue centennale était plus proche de la crête, les arbres seraient interdits sur tout l'ouvrage où une végétation herbacée (type 1) serait recommandée. Seuls de petits arbustes pourraient, sous condition, être tolérés dans sa partie haute (type 2).

Il n'y a pas de « zonage type » car de nombreux paramètres sont à considérer pour chacune des situations. La dimension de l'ouvrage est un paramètre important mais est loin d'être le seul à prendre en compte pour déterminer le niveau de risque qu'induisent les différents types de végétation sur une digue ou un barrage et pour définir un zonage rigoureux de la végétation. Aux éléments que nous avons déjà cités (type de matériaux, fonctionnement hydraulique, hauteur d'eau permanente ou en crue, courant, spécificités de l'ouvrage, type de végétation, espèce



végétale...) s'ajoute un autre élément à considérer : il s'agit de la diversité de l'état des arbres au sein d'un peuplement végétal. Chaque arbre est un individu vivant qui se caractérise par sa dimension, son âge, sa morphologie, son état sanitaire. Ces différentes propriétés qui caractérisent un individu ligneux sont à prendre en considération dans le diagnostic de la végétation, à confier donc à des bureaux d'études spécialisés.



ÉTAT INDIVIDUEL DES ARBRES

Dans la mesure où ils génèrent des risques pour l'ouvrage mais aussi – il ne faut pas l'oublier – pour les personnes susceptibles de fréquenter la digue, l'état sanitaire des arbres et leur risque de déracinement doivent être pris en compte pour la priorisation des interventions à effectuer sur les ouvrages, et éventuellement sur leur zonage.

Les signes de dégradation ou de risque sont parfois nettement perceptibles (arbre fortement penché, malade, marqué par un dépérissement partiel, attaques de champignons ou d'insectes), mais ils sont parfois indécélables à première vue. Il y a donc deux types de risques dépendant de l'état sanitaire :

- le risque prévisible : lié aux maladies, pourriture apparente, fructification de champignons à la base du tronc ou sur des racines principales, cavité humide, fissuration du tronc, suintements colorés, écoulements de résine, écorce incluse, arbre creux, forte inclinaison, rapport hauteur/diamètre trop élevé ;
- le risque imprévisible : lié à la force du vent (nature du vent, nature du sol, structure racinaire) ou à une pourriture interne ou racinaire sans signe extérieur.

Comme il a déjà été mentionné, les arbres morts et dépérissants sont d'importants foyers de biodiversité : il ne faut les abattre et les éliminer qu'en cas de nécessité, et en prenant alors des précautions pour limiter les dégâts sur les cortèges faunistiques qui les utilisent (oiseaux, chauves-souris, insectes saproxylophages, etc.) ou des mesures compensatoires.

Risque prévisible et causes de dépérissement des arbres

Dans un même arbre, plusieurs organismes peuvent cohabiter avec des relations variées d'interdépendance. Leur action dépendra étroitement les uns des autres : un champignon lignivore facilitera l'infestation par les insectes et le creusement par certains animaux, tandis qu'une pi-



Figure 3.25. Attaque de champignon lignivore sur un arbre. Suivant le type de champignon, son agressivité, son mode d'action sur le bois et son potentiel d'extension (tronc seulement ou aussi racines), un arbre attaqué ainsi peut survivre des dizaines d'années ou au contraire être menacé de mort ou de chute à court terme (ph. M. Venetier).

qûe ou une cavité creusée par un insecte constituera une porte d'entrée pour des attaques de champignons. Certains insectes sont porteurs eux-mêmes de champignons qu'ils transmettent directement aux arbres attaqués. C'est le cas par exemple pour le scolyte de l'orme qui transmet la graphiose, maladie rapidement fatale aux parties aériennes de cet arbre, jadis très fréquent sur les digues et les berges des cours d'eau européens et maintenant décimé.

Un arbre déstabilisé par le vent, affaibli par des conditions météorologiques exceptionnelles, des conditions de croissance difficiles, des agressions biologiques, des blessures d'origine naturelle (crués, vent) ou humaine (élagage, taille, travaux) sera plus sensible aux attaques de pathogènes et de prédateurs. Il existe différents types d'insectes et champignons responsables de l'affaiblissement des arbres (tabl. 4 p. 92-93).

Les arbres sont constitués majoritairement de lignine et cellulose. Certains champignons sont spécialisés dans la consommation de l'un ou de l'autre de ces composants (fig. 3.25). Les espèces potentiellement pathogènes sont innombrables. Elles sont généralement reconnaissables à leurs fructifications présentes sur le tronc ou au pied de l'arbre. La suppression des fructifications ne sert à rien car elle ne ralentit pas la progression interne du parasite : si la chute totale ou d'une partie d'un arbre (dépérissant ou manifestant des signes de dégradation physique avancée) constitue un risque pour les personnes ou pour la formation d'embâcles, l'abattage est préconisé, en veillant à la désinfection des outils (cf. chapitre 4 p. 97).

La vitesse de progression de la pourriture est variable mais peut atteindre 1 m par an. Lorsque la pourriture est détectée, il est souvent difficile d'évaluer sans analyse approfondie jusqu'où elle s'étend et son niveau



de gravité, et de donner un délai d'abattage¹. Un simple sondage à la tarière à bois permet de mesurer ponctuellement l'étendue de la pourriture ou de la mortalité du tronc. Des sondages peuvent être réalisés à différentes hauteurs et dans plusieurs directions autour du tronc. Des méthodes basées sur la tomographie électrique ou acoustique permettent maintenant de cartographier précisément l'état du bois en 3D à l'intérieur du tronc. Lorsque le bois de cœur est atteint, l'arbre est fragilisé physiquement mais il peut survivre très longtemps car seul l'aubier conduit la sève. Une petite portion d'aubier vivant suffit à maintenir un arbre en vie très longtemps. En absence de risque particulier, il est donc inutile de couper précipitamment un arbre creux ou dont le bois est mort sur une partie de la périphérie du tronc, car il constitue un foyer de biodiversité.

Risques imprévisibles ou aléatoires : le vent et l'ancrage de l'arbre

Le vent est un phénomène pulsatoire formé de rafales de quelques secondes, dont l'action s'opère principalement dans le houppier, et qui entraîne un mouvement oscillatoire de l'arbre. Suivant l'espèce, l'état des arbres et leur histoire, la vitesse nécessaire pour les casser ou les déraciner est très variable. Sur des arbres sains, les dégâts débutent généralement lorsque la vitesse du vent atteint 100 km/h et peu de peuplements résistent sans casse si elle dépasse 140 km/h. Mais ces chiffres sont à moduler en fonction de l'exposition habituelle des arbres au vent : lorsqu'ils sont soumis régulièrement à des vents violents, les arbres développent des systèmes racinaires plus puissants et adaptent leur hauteur ainsi que la structure de leur houppier. Ils pourront ainsi résister à des vents qui dépassent 170 et même 200 km/h. Les arbres isolés habitués à subir les assauts du vent, ainsi que les arbres de lisière, résistent mieux que les arbres ayant poussé à l'abri dans un peuplement dense ou derrière un obstacle qui les protège. Si un arbre habituellement abrité perd sa protection, il devient très vulnérable : soit que son enracinement ne soit pas proportionné à sa hauteur (risque de déracinement), soit que son diamètre soit trop faible par rapport à sa

¹ Des informations plus détaillées sont disponibles dans des ouvrages de botanique et horticulture ou sur des liens spécialisés (<http://cfppah.free.fr/maladies.htm>) et donnent des indications sur les traitements à mettre en œuvre.



	Symptômes	Dégâts	Exemples
Les chenilles défoliatrices	<ul style="list-style-type: none"> - présence de nids - feuilles, bourgeons attaqués, troués, déformés 	<ul style="list-style-type: none"> - défoliation parfois totale - réduction de croissance - affaiblissement et mort des arbres 	<ul style="list-style-type: none"> - processionnaire sur pin et chêne - les chenilles mineuses sur marronnier - les chenilles tordeuses sur chêne
Les insectes parasites	<ul style="list-style-type: none"> - prolifération de pucerons agglomérés sur les rameaux et les feuilles - présence de revêtement blanc laineux - déformation et enroulement des feuilles attaquées - perforation de l'écorce avec présence de scierie - boursoufflures - amas de sciure au pied des arbres - suintement au moment de la montée de sève 	<ul style="list-style-type: none"> - risques de cassures - portes d'entrées de nombreux champignons - destruction des systèmes racinaires - affaiblissement et dépérissement des arbres 	<ul style="list-style-type: none"> - cochenilles et pucerons, cicadelles, phylloxera, thrips et autres insectes suceurs de sève ou phytophages (tigre du platane, galéruque de l'orme ou de l'aulne...), - insectes xylophages, en particulier termites et nombreux coléoptères : scolytes, capricornes, charançons, abeilles charpentières
Les champignons à pourriture blanche	<p>Pourriture blanche : causée par des champignons qui dégradent principalement la lignine. Le bois devient spongieux, clair et mou</p>	<ul style="list-style-type: none"> - arbre dangereux, le bois attaqué perd sa résistance mécanique - l'armillaire et le polypore sont responsables des pourridiés racinaires (contamination de racine à racine). <p>Ils entraînent la mort des arbres par attaque de l'aubier au niveau des racines et du collet, induisant la destruction des tissus et l'arrêt de la circulation de la sève</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ganoderme - phellin tacheté - amadouvier - polypore écailleux et hérissé - armillaire
Les champignons à pourriture marron cubique	<p>Pourriture marron cubique : causée par les champignons qui dégradent principalement la cellulose. Le bois devient friable et cassant</p>		<ul style="list-style-type: none"> - polypore soufré - fistuline hépatique - unguine marginée



Autres maladies graves ou mortelles des arbres de digues et berges	Graphiose des ormes : causée par le champignon <i>Ophiostoma ulmi</i>	Transmise par un coléoptère (scolyte de l'orme) qui consomme l'écorce et pond dans les arbres dépérissants, mais aussi par contact racinaire. Cette maladie tue les parties aériennes des arbres, qui cependant peuvent rejeter de la base
	Chalarose du frêne : causée par le champignon <i>Chalara fraxinea</i>	Maladie émergente qui décime les frênes. Arrivée de Pologne par l'est et le nord de la France, en progression géographique rapide. Symptômes : flétrissement de rameaux, dessèchement de l'écorce, mort de la cime, nécroses corticales. Certains individus sont plus résistants que d'autres, ce qui laisse espérer une sélection naturelle efficace à moyen terme, après une phase de forte mortalité
	Phytophthora de l'aulne : causée par le champignon <i>Phytophthora alni</i>	Maladie apparue en Europe dans les années 1990, maintenant généralisée. Touche les aulnes et particulièrement l'aulne glutineux le long des cours d'eau. Symptômes : feuilles trop petites et jaunes, houppier clair, exsudations noirâtres et tâches rouilles à noirâtres à la base du tronc, nécroses sous l'écorce. La mort des arbres atteints est fréquente. Pour ne pas propager la maladie, il faut couper et enlever rapidement les troncs contaminés, désinfecter les outils de coupe et bien nettoyer les engins travaillant dans les zones atteintes, car la transmission se fait par l'écorce, les racines, l'eau et le sol. Il ne semble pas y avoir de résistance naturelle à la maladie

Tableau 4. Symptômes et dégâts liés à différents insectes et champignons attaquant les arbres.



hauteur (risque de casse). S'il existe une direction privilégiée du vent dominant (mistral, tramontane, zones côtières atlantiques), le système racinaire se développe préférentiellement du côté d'où il souffle (voir Structure et architecture racinaires p. 34). Dans ce cas, un vent fort venant exceptionnellement d'une autre direction (tempête, orage) pourra leur être fatal en dessous de la limite habituelle du vent dominant.

La stabilité des arbres est un compromis entre :

- les forces qui ont tendance à faire basculer l'arbre en cas de vent et qui dépendent de son architecture aérienne (taille et forme du houppier), de la saison (présence ou non de feuilles) et de sa hauteur (prise au vent), mais aussi de la résistance et de l'élasticité du bois qui permettront d'esquiver et d'encaisser les rafales en se courbant ;
- les facteurs qui s'opposent à l'arrachement de l'arbre, comme la résistance mécanique, la longueur, la profondeur et la ramification des racines, ainsi que la cohésion du sol, dont dépendent le poids et le volume de la motte qui peut être arrachée (fig. 3.26). La sensibilité des arbres au déracinement est plus élevée sur les sols sableux que sur les sols limoneux ou argileux. Le risque d'arrachement augmente rapidement en cas de saturation du sol du fait de l'instauration d'un régime de sous-pression. Retenons que c'est lors des crues, qui saturent le sol de fondation et le corps des ouvrages, que le risque est maximal. On notera donc que les coups de vent ou tempêtes doivent déclencher des visites post-événement au titre de la surveillance lorsque les ouvrages sont boisés, et particulièrement si les sols sont saturés en eau (voir Gestion courante de la végétation p. 104).

Si la résistance du système sol-racine est supérieure à la résistance mécanique du tronc, l'arbre pourra être cassé. Le risque direct est alors minime pour l'ouvrage. Mais d'autres risques peuvent apparaître : embâcle de grande dimension, gêne à l'inspection ou à la circulation sur la digue.

Les arbres très hauts, penchés, présentant un port asymétrique, doivent être traités en priorité. Cependant, il est nécessaire d'être attentif aux conséquences de la suppression d'un arbre sur le comportement de ses voisins qu'il protégeait éventuellement. Le risque de basculement de ces derniers est alors augmenté.



Figure 3.26. Peuplier déraciné sur une digue de protection contre les inondations en Californie, emportant une imposante masse de terre. Cette encoche pourra générer des tourbillons érosifs en cas de crue. Le déracinement a aussi totalement déstructuré les matériaux en surface du talus sur plusieurs dizaines de mètres carrés au-delà de la motte arrachée (au premier plan), et éparpillé les blocs d'un enrochement de surface à travers lequel il avait poussé. Le talus est donc, jusqu'à sa réfection, très vulnérable à l'érosion (ph. C. Ifft, USACE).

Les risques liés à la force d'un courant de rivière lorsque des arbres sont partiellement ou totalement submergés sont identiques à ceux liés au vent. Le courant est moins rapide que le vent mais la pression exercée par l'eau est beaucoup plus forte que celle de l'air. Il convient donc, dans la gestion de la végétation ligneuse des digues de protection, de prendre en compte la position de l'ensemble de l'arbre (tronc, branches et cime) par rapport au niveau des crues potentielles. Le risque d'embâcles est immédiat et beaucoup plus élevé dans le cas d'un arrachage ou d'une casse d'arbre par le courant. Le risque d'érosion par tourbillon dans l'encoche de la motte arrachée est également immédiat. La gestion de la végétation des berges et ségonnaux, dans le prolongement de celle des digues, doit être particulièrement rigoureuse vis-à-vis de ces risques (Evette et al. 2014 ; cf. également le guide GeniAlp : <http://www.geni-alp.org>).

Dans tous les cas, une gestion préventive est toujours moins risquée et souvent moins coûteuse que les problèmes engendrés en cas de crise.



chapitre 4

Gestion et confortement des ouvrages hydrauliques boisés



La végétation des ouvrages en remblai n'est pas figée dans le temps. Elle peut évoluer très vite, particulièrement lorsque l'eau est disponible et les matériaux fertiles. Les arbres et arbustes peuvent apparaître à tout moment, de façon insidieuse sous forme de semis ou rejets dispersés, ou de façon massive mais initialement discrète. Ils semblent parfois pousser lentement, et on pourrait être tenté de sous-estimer la montée des risques qu'ils induisent. C'est ce qui a conduit dans le passé à laisser se développer une végétation arborée sur certains ouvrages, et même de véritables forêts denses et hautes. Dans certains cas, et encore très récemment, on a même planté des arbres sur des digues, parfois même sur des barrages, pensant bien faire.

Grâce aux travaux de recherche menés depuis 20 ans, on sait maintenant évaluer cette évolution probable de la végétation (cf. chapitre 1 p. 13) : modèles de croissance en hauteur, connaissance du développement des systèmes racinaires et de la taille des racines. On peut la prédire sur le moyen terme, ainsi que ses conséquences, et donc la gérer dans un souci de minimiser les risques et le coût de la gestion.

Cette dynamique de la végétation et la longue durée de vie des arbres imposent d'avoir une vision à moyen et long termes, qu'il s'agisse de maintenir un état actuel satisfaisant (cf. Gestion de la végétation p. 104) ou de travaux lourds visant à corriger une situation à risque (cf. Recommandations de gestion p. 136). Cette gestion de la végétation doit être parfaitement intégrée à la gestion globale de l'ouvrage. Dès qu'il s'agit d'ouvrages de grande ampleur ou porteurs d'enjeux sécuritaires importants, il est donc nécessaire de s'appuyer sur des plans de gestion pluriannuelle (cf. ci-dessous Le plan de gestion). Outre la facilité qu'ils offrent de planifier dans le temps les travaux, et donc les financements nécessaires, ils permettent de conserver une mémoire de ces travaux, indispensable parfois pour le suivi futur des risques.



LE PLAN DE GESTION

Les bases d'un plan de gestion de la végétation

Lorsque les risques générés par la végétation sur un ouvrage sont caractérisés, il est possible de définir les secteurs et les interventions prioritaires. Afin d'organiser au mieux le déroulement des interventions dans le temps, le plan de gestion est un élément incontournable. Il a pour but :

- de faire l'état des lieux et sa cartographie, notamment de la végétation dans son contexte physique et des enjeux de biodiversité (ce travail doit être réalisé par des spécialistes avec des méthodes éprouvées) ;
- de fixer les objectifs à atteindre par la gestion ;
- de définir les actions urgentes ou prioritaires ;
- de définir, décrire, homogénéiser et normaliser les actions de gestion ;
- de répartir le coût des travaux de remise en état et d'entretien sur plusieurs années, en lien avec la gestion des autres caractéristiques de l'ouvrage et en rapport avec les moyens disponibles ;
- de garder la mémoire des travaux effectués, de l'emplacement des arbres ou des peuplements ainsi que des habitats sensibles, et donc des zones qui demanderont dans le futur une surveillance attentive ou renforcée.

En général, le plan de gestion de la végétation d'une digue définit les objectifs et le programme de travaux pour une durée de 10 à 15 ans. C'est un outil de communication et de négociation, technique, écologique et financière, avec les diverses parties prenantes. En lien avec un éventuel outil de cartographie ou un SIG, il joue un rôle clef pour conserver la mémoire de la gestion, de la dynamique végétale, des succès et échecs dans les objectifs. Les cartes doivent notamment permettre de situer les zones où des arbres ont été présents, après leur élimination, si les souches n'ont pas été enlevées. S'il existe un risque potentiel dans le temps, ces zones devront faire l'objet d'une surveillance particulière.

Cette information est souvent manquante actuellement, alors qu'elle est capitale à préserver.



Validé par le propriétaire, chaque plan de gestion est spécifique puisque les choix, dans le cadre de la législation, sont déterminés en fonction des contraintes liées au terrain et à l'état des peuplements. Les moyens requis et la précision d'un plan de gestion dépendent évidemment des enjeux : le plan pourra tenir en quelques pages pour une petite digue en bon état ne présentant pas de problèmes majeurs ; il pourra représenter plusieurs mois de travail pour une équipe pluridisciplinaire de spécialistes sur un gros système endigué présentant une végétation arborée anarchique, des problèmes de maintenance physique et des enjeux de biodiversité ou sociaux. Les moyens mis en œuvre pour son suivi (manuels ou utilisation d'un système informatisé) peuvent également varier avec ces enjeux et le personnel disponible.

Un plan de gestion de la végétation contient au minimum :

- un descriptif de la végétation initiale, et éventuellement des cortèges faunistiques associés, et leur cartographie détaillée si c'est justifié par l'ampleur et la complexité des travaux à réaliser, ou par l'obligation de conserver une mémoire des zones posant problème (zonages longitudinaux et transversaux, typologie de végétation, définition de parcelles homogènes, habitats écologiques...)
- un descriptif et une cartographie des enjeux de biodiversité ou sociaux ;
- un descriptif des actions d'entretien courant et des travaux exceptionnels à réaliser pour atteindre une structure de végétation conforme à la sûreté de l'ouvrage, pour chaque zone ou type de zone préalablement définie ;
- un programme annuel de travaux précisément quantifié, et spatialisé si nécessaire ;
- un programme de dépenses et un plan de financement conformes à l'échéancier des travaux.

Les bases d'un plan de gestion sont la **sectorisation** et la **priorisation** des interventions.

La conception d'un plan de gestion s'appuie sur le croisement des caractéristiques de l'ouvrage avec celles de la végétation.

La typologie de végétation proposée p. 73 peut être enrichie et intégrer les paramètres suivants :

- espèce végétale ;
- âge/dimension des arbres ou souches ;
- position des arbres sur l'ouvrage ;
- contraintes environnementales (zone protégée, espèces rares, espèces invasives...)
- climat local.



Les paramètres à considérer pour l'ouvrage sont :

- ses dimensions ;
- les matériaux constitutifs, leur disposition et leur mise en œuvre ;
- le fonctionnement hydraulique ;
- les singularités (perré, drain, fuites, ouvrages traversants) ;
- l'historique de l'ouvrage (relevés de la construction, travaux ultérieurs, zones de fuite, anciennes brèches, et autres incidents).

Ces éléments sont récoltés dans le cadre d'un diagnostic génie civil approfondi de l'ouvrage (Lino et al. 2000, Ciria 2013).

Par ailleurs, les barrages de classe A et B, les digues de classe A, B et C (au sens des articles R.214-112 et R.214-113 du Code de l'environnement) sont soumis à l'obligation de réaliser une étude de dangers. Cette étude de dangers prend en considération, entre autres, les aléas naturels et s'appuie sur une analyse de risques permettant d'identifier les causes, les combinaisons d'événements susceptibles d'être à l'origine d'un accident important. Les risques intrinsèques à l'ouvrage sont évalués en tenant compte de la conception, de son état, de son comportement vis-à-vis des aléas naturels. Aussi, pour les ouvrages végétalisés soumis à étude de dangers, le plan de gestion de la végétation doit être élaboré à partir des risques analysés de manière à le justifier dans le cadre de l'étude de dangers comme une mesure de réduction des risques.

Une cartographie sous SIG (système d'information géographique) permet d'intégrer l'ensemble des données nécessaires à la planification de la gestion, et de suivre en temps réel le pilotage de la gestion.

Les outils d'aide à la conception et au suivi de la gestion

Un système informatique dédié à la gestion des digues a été développé afin d'homogénéiser les données acquises lors du recensement des digues de protection des lieux habités contre les inondations, lancé par enquête nationale en 1999. Le SIRS-digues¹ est un outil informatique, qui couple un SIG à une base de données. Il permet de gérer le patrimoine d'informations relatif aux différents composants du système

¹ SIRS : système d'information à référence spatiale. Ce terme est préféré au terme SIG trop souvent considéré comme une « simple » application logicielle en omettant les composantes humaines, organisationnelles et économiques des systèmes d'information.



« digue » : structure et géométrie de la digue et partie du lit du cours d'eau, ouvrages hydrauliques, réseaux de communication, de flux et d'énergie, désordres, historique des crues, travaux et études, végétation, organismes et intervenants.

Le SIRS-digues est actuellement dans sa version 1.4 et le code source ainsi que tous ces composants faisant l'objet d'un droit de propriété ont été déposés à l'Agence de protection des programmes (APP). Le Symadrem, l'AD Isère-Drac-Romanche et la Dreal Centre sont copropriétaires de l'application initialement spécifiée, puis développée dans une version de démonstration, par le Cemagref (Irstea aujourd'hui) de 1998 à 2000.

L'application principale utilise ArcView 9.2 (© ESRI) et la base de données Access (© Microsoft). Elle est dotée de l'ensemble des fonctionnalités de gestion des données cartographiques et alphanumériques. Un module dit « autonome » a été conçu à l'origine pour permettre une saisie dans un environnement plus souple, sans cartographie, et d'autoriser des saisies dans la base de données sur le terrain. Les fiches terrains ont été élaborées de manière à être compatibles avec la description de la digue utilisée par l'application informatique. Elles permettent de saisir des relevés directement sur le terrain sans besoin de mise en forme ultérieure.

Cette première version est utilisée en routine par plusieurs gestionnaires de gros systèmes endigués. Elle présente cependant des limites qui rendent son utilisation parfois difficile par les utilisateurs finaux non familiers avec les SIG.

Face à cette situation, le Symadrem en collaboration avec l'AD Isère-Drac-Romanche et la Dreal Centre, ont lancé une « étude préliminaire et de propositions d'architecture logicielle en vue du développement d'une seconde génération de l'application SIRS-digues ».

L'étude préliminaire doit étudier la faisabilité technique du projet de version 2 du SIRS-digues. Depuis son déploiement en 2004, les utilisateurs ont eu l'occasion de faire le bilan des manques, dysfonctionnements, besoins d'évolution du SIRS-digues V1. Certaines demandes simples ont été traitées dans le cadre de la maintenance de l'application. D'autres, impliquant potentiellement des changements de fond de l'application, ont été mémorisées pour une version V2 future en phase de test par les partenaires précédemment cités.

Les deux prochaines parties de ce chapitre présentent les opérations d'entretien courant des ouvrages, puis les recommandations de gestion curative lorsque les ouvrages souffrent d'une végétation inadaptée qui peut les mettre en danger.

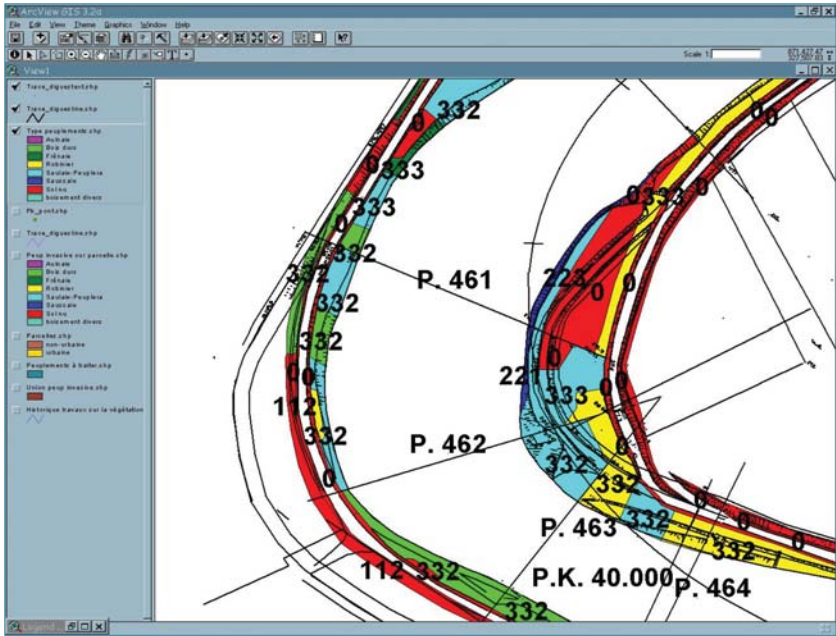


Figure 4.1. SIRS dédié à la gestion intégrée des digues, qu'il s'agisse de la partie ouvrage hydraulique ou de la végétation. Un outil idéal pour cartographier, planifier, suivre les opérations et mémoriser les interventions. Ici la carte interactive de la végétation, à laquelle est liée la programmation passée et future des travaux d'entretien prévus dans le plan de gestion décennal (digues de l'Isère, AD Isère-Drac-Romanche – Irstea) (sch. G. Doirat).



GESTION COURANTE DE LA VÉGÉTATION

Objectifs

La gestion courante de la végétation consiste à la maintenir dans un état optimal, ou du moins acceptable, une fois que cet état a été choisi et obtenu. Dans cette gestion courante, on intègre chaque mesure destinée non seulement à entretenir la végétation, mais aussi à lui permettre de remplir tous ses rôles : de protection, écologique, paysager, d'accueil du public éventuellement. Ces rôles reposent sur l'ensemble du système comprenant l'ouvrage hydraulique et ses alentours : berges, ségonnal, autres milieux connectés.

Si la végétation d'un ouvrage n'est pas dans un état acceptable, à court ou long terme, une gestion curative devra l'y amener progressivement, ou encore une gestion d'attente devra limiter les risques jusqu'à la remise à niveau. C'est l'objet du sous-chapitre suivant (Gestion curative des digues p. 136).

Par principe, l'état optimal de la végétation sur la plupart des ouvrages hydrauliques en terre est un tapis herbacé dense et bas. Cependant, pour un certain nombre d'ouvrages et dans des situations variées, l'état optimal ou acceptable – et donc les travaux concernés – peut être sensiblement différent. Cet état optimal doit au moins permettre de surveiller facilement les ouvrages : les conditions et méthodes de la surveillance sont détaillées dans le paragraphe suivant. Sont ensuite abordés les principaux modes de gestion courante de la végétation (p. 119) et la prise en compte de la biodiversité et du climat dans cette gestion (p. 123).

Surveillance des ouvrages

La surveillance régulière des ouvrages hydrauliques constitue l'un des fondements de la gestion de leur sécurité. Le législateur l'a bien compris puisque le décret du 11 décembre 2007 impose aux propriétaires des digues comme des barrages d'établir des consignes de sur-



veillance de leurs ouvrages, en toutes circonstances d'une part, en période de crue, d'autre part. Les situations de crue sont particulièrement importantes pour le cas des digues de protection puisqu'elles correspondent aux seules périodes où ces ouvrages sont soumis à la charge hydraulique. De fait, les dispositions réglementaires de 2007 contraignent les responsables à pratiquer a minima une surveillance visuelle circonstanciée, soit par leur propre personnel, soit par celui d'un exploitant en contrat avec eux.

Nous ne reprendrons pas ici en détail les recommandations techniques déjà formulées dans deux guides pratiques ¹ d'Irstea (anciennement Cemagref) pour une bonne conduite de la surveillance des ouvrages :

- soit, pour les digues de protection : *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations* (Mériaux et al., 2004, Cemagref éditions) ;
- soit, pour les petits barrages (qui ont en commun avec les digues de canaux le caractère permanent de la charge hydraulique) : *La surveillance et l'entretien des petits barrages* (Royet, 2006, Cemagref éditions).

Toutefois, en présence de végétation arborescente sur les ouvrages – ou à leur proximité – des adaptations sont à prévoir dans la démarche de surveillance visuelle courante. Dans la section qui suit, nous détaillons ces adaptations, et nous indiquons comment gérer la surveillance instrumentale pour les ouvrages hydrauliques boisés dotés d'un dispositif d'auscultation.

Visites de surveillance des ouvrages à la végétation présumée bien entretenue

Ces ouvrages sont réputés bien entretenus et régulièrement fauchés (fig. 4.2), l'hypothèse – à vérifier sur le terrain – étant que leurs parements sont alors revêtus d'une couverture herbacée.



Figure 4.2. Parement aval enherbé de petit barrage, juste après une tonte. Conditions idéales pour un examen visuel (ph. F. Pondevie, Dreal).

¹ Guides à diffusion libre, en version électronique, sur simple demande à Irstea.



Pour les ouvrages hydrauliques à long linéaire que sont les digues de protection ou de canaux, la fréquence idéale des visites « de routine »¹ du garde-digue est relativement lâche : d'une à quelques-unes par an. Pour les barrages, les visites sont en principe plus rapprochées : une fréquence minimale d'une visite tous les deux mois est souhaitable.



Figure 4.3. L'absence de fauche récente rend difficile l'examen visuel du parement aval enherbé de ce barrage (ph. P. Mériaux).

Quel que soit le type d'ouvrage, la première des recommandations à formuler ici est de programmer au moins l'une des visites prévues dans l'année juste après une fauche d'entretien (fig. 4.2). L'herbe haute a tendance à masquer, en effet, les indices de désordre que l'on cherche à détecter lors de telles visites ou ceux préexistants dont on souhaite suivre l'évolution (fig. 4.3). Dans les cas extrêmes, la présence de ronces peut même empêcher l'accès pédestre du surveillant à certaines parties des ouvrages.

Si aucune des visites ne peut avoir lieu après une fauche (on peut alors douter de la qualité de l'entretien !...), prévoir d'en programmer au moins une au cœur de l'hiver (sans neige), c'est-à-dire hors période de végétation (fig. 4.4).

Si, comme c'est à recommander, la visite intervient juste après une fauche réputée exhaustive, elle permettra justement de vérifier la qualité de l'opération et d'identifier les zones éventuelles sur la digue ou le barrage où la fauche est imparfaite, voire non réalisée. Il y a alors fort à pa-



Figures 4.4. Différence de visibilité en crête d'une digue de torrent entre le cœur de l'été (a) et la fin de l'hiver (b) (photos P. Mériaux).

¹ On pourra préférer le terme de « visite programmée » à celui de « visite de routine ».



rier que telles zones soient récurrentes, du fait d'un accès difficile ou dangereux (ex. : pente élevée, proximité de l'eau, gêne à la fauche mécanique occasionnée par des poteaux, pylônes, regards...) pour les engins mécaniques ou les opérateurs manuels. Ces zones singulières d'entretien défaillant sont à repérer soigneusement sur les documents supports de la visite (plans topographiques, fiches papier ou informatiques...). Il convient alors d'y procéder à un inventaire rapide de la végétation en place, à la recherche d'éventuelles plantes invasives et de pieds ou rejets d'espèces arborescentes ou de la présence d'espèces hygrophiles. On vérifiera si ces zones avaient été repérées lors de la précédente visite et, si oui, on évaluera leur extension éventuelle. L'une des conclusions de la visite pourra alors consister à préconiser, en application immédiate, un complément de fauchage et/ou de débroussaillage.

Bien évidemment, lors de ces visites, la présence d'arbres – en principe rare et localisée – reste à rechercher, en s'intéressant en priorité :

- aux secteurs où le gestionnaire pourrait considérer qu'ils ne sont pas dangereux, comme sur les bandes de pied de talus¹ (fig. 4.5) ;
- dans les zones environnant les ouvrages ou parties d'ouvrages sensibles tels que les structures en maçonnerie, les débouchés de drains ou de collecteurs, les instruments d'auscultation (piézomètres, repères topographiques...), etc.



Figure 4.5. Haie d'arbres trop proche du pied de parement aval d'un barrage, avec troncs poussant au débouché du tapis drainant (ph. P. Mériaux).

On rappelle que, pour les ouvrages à charge permanente, la présence de végétation hygrophile (jonc, carex...) sur le parement aval ou à son pied, loin d'un exutoire de drainage, peut être un indice de débouché de fuite non maîtrisée ou de la ligne de saturation.

Enfin, notons que les recommandations précédentes quant à la « surveillance particulière de la végétation » d'un ouvrage présumé bien entretenu peuvent avantageusement être appliquées par le chargé de la

¹ On considère idéalement qu'un ouvrage en remblai bien entretenu présente une bande d'une largeur d'au minimum 5 m exempte de toute végétation ligneuse au pied de ses deux talus (de son talus aval uniquement, s'il s'agit d'une digue de canal ou d'un barrage).



visite technique approfondie (VTA), dont la périodicité minimale est imposée par la réglementation en fonction de la classe de l'ouvrage (par exemple, au minimum une fois tous les 6 ans pour les digues de classe C, 5 ans pour les barrages de la même classe).

Visites de surveillance des ouvrages comportant de la végétation arborée

Quatre principales situations sont à considérer :

- (a) l'ouvrage comporte des arbres isolés ;
- (b) l'ouvrage supporte des bouquets ou îlots de végétation arborée ;
- (c) l'ouvrage est plus ou moins complètement boisé ;
- (d) l'ouvrage a été boisé dans le passé.

Dans les situations (a) et (b), les secteurs enherbés – a priori majoritaires en superficie – sont à entretenir et à surveiller selon les préconisations du paragraphe précédent p. 105.

Les arbres isolés ou les îlots boisés doivent, quant à eux, faire l'objet d'une surveillance particulière qui nécessite qu'au moins une fois par an, un débroussaillage ou un fauchage soigneux soit opéré autour des troncs ou des souches (fig. 4.6) ou dans le sous-bois des bouquets.

On s'arrangera pour que l'une des visites de surveillance intervienne juste après cette opération de débroussaillage, si possible à charge hydraulique haute (plan d'eau complètement rempli pour un barrage, bief plein pour une digue de canal). On rappelle qu'une observation en hautes eaux ou juste après une crue est importante pour une digue de protection. Certains cours d'eau connaissent une saison plus propice aux crues (fonte des neiges, épisodes méditerranéens d'automne) et les travaux de fauche peuvent alors être programmés juste avant celle-ci.



Lors des visites de surveillance et concernant les parties aériennes de la végétation ligneuse, on s'attachera à :

Figure 4.6. Arbres épars vers l'appui rive droite d'un talus aval de petit barrage, soigneusement fauché, même entre les troncs (ph. F. Pondevie, Dreal).



- apprécier une éventuelle extension des îlots arborés ou une augmentation du nombre d'arbres ;
- identifier les espèces auxquelles appartiennent les arbres présents (si cela n'a pas été fait auparavant) et évaluer leur état sanitaire ainsi que la qualité de leur port.

Pour ce qui est de la recherche d'indices de désordre affectant l'ouvrage autour des arbres isolés ou à l'intérieur des îlots boisés, on appliquera les mêmes consignes que pour le cas des ouvrages complètement boisés : en conséquence, se reporter sur ce point à la situation traitée ci-dessous.

En situation (c), lorsque l'ouvrage est boisé sur de plus ou moins grandes surfaces¹, il convient tout d'abord de pratiquer un débroussaillage soigné et régulier du sous-bois. Outre le fait de rétablir des conditions satisfaisantes de visibilité de surface, cela permet au garde-digue ou garde-barrage d'avoir à nouveau accès, sans moyens spéciaux, à toutes les parties de la structure et de s'y déplacer. Le développement de ronciers, en particulier, peut entraver ces déplacements, et doit donc être contrôlé.

À terme, une telle pratique peut favoriser l'installation d'une couverture herbacée entre les troncs, plus facile et moins coûteuse à entretenir, par simple fauche ou tonte (fig. 4.7).



Figure 4.7. Talus aval boisé de digue d'aménagement hydroélectrique. Sous-bois débroussaillé, puis entretenu en pelouse (ph. P. Mériaux).

La digue ou le barrage boisé doit faire l'objet d'une surveillance renforcée, à prévoir et à décrire comme telle dans les consignes. Il convient de programmer au moins l'une des

visites prévues dans l'année juste ou peu après le débroussaillage ou la fauche du sous-bois, si possible à charge hydraulique haute.

La recherche d'indice de désordres liés à la végétation ligneuse – ou masqués par elle – consiste alors, pour l'essentiel à :

¹ L'abattage systématique des arbres est à proscrire (rappel) sauf s'il intervient dans une opération de confortement génie civil de l'ouvrage, qui n'est pas du ressort de la « gestion courante », objet du présent chapitre.



- repérer, autour des troncs ou dans le sous-bois débroussaillé : (1) l'existence de débouchés de terriers – nouveaux ou non (dans tous les cas, tenter d'identifier l'espèce animale grâce aux empreintes ou déjections) ; et (2) de toutes singularités non repérées jusque-là du fait de la végétation présente au sol ou des difficultés d'accès : fissures en surface du sol, déformations, fontis, ouvrages encastrés, regards...
- et, pour ce qui est des arbres installés sur le talus aval, vérifier l'absence d'humidité ou (d'indices) d'écoulements à proximité de la base des troncs et des grosses racines, si l'ouvrage est en charge ou vient de connaître une charge (examen post-crue pour une digue de protection).

Les fontis, en particulier, apparaissent sur les talus ou la crête et constituent des désordres, signes d'une dégradation potentiellement grave dans le corps de l'ouvrage ou dans sa fondation. Ils résultent de l'effondrement d'un vide dans le sol, lui-même dû à des écoulements internes avec érosion (fig. 4.8a), au pourrissement d'une souche ou d'un tronc enfoui ou d'une grosse racine (fig. 4.8b), à un terrier de fousseurs ou, dans certains contextes géologiques, à une cavité karstique en fondation.



Figures 4.8. Fontis d'origines différentes sur une crête de digue résultant : (a) d'écoulements internes lors d'une crue récente (photo prise lors d'un examen visuel post-crue), (b) de la probable décomposition d'une grosse souche pour cette digue située en environnement boisé (photos P. Mériaux).

Lors d'une visite de routine d'un ouvrage boisé, le temps et les moyens manquent pour effectuer un examen et une analyse détaillés de la végétation arborée – cela relevant d'une démarche d'inventaire forestier, préalable à l'élaboration d'un plan de gestion (cf. p. 99). On se contentera donc d'apprécier l'état sanitaire général des arbres et la qualité de leur port, étant rappelé que les chutes de branches ou d'arbres peuvent constituer une source de danger pour les promeneurs et riverains susceptibles de fréquenter le site.



La situation (d) d'un ouvrage anciennement boisé peut paradoxalement s'avérer la plus dangereuse si le gestionnaire a perdu la mémoire de cet état antérieur et que l'on se trouve à un pic de pourrissement des souches et racines des arbres disparus¹. Une telle situation peut se révéler de trois manières différentes, d'ailleurs non exclusives :

- par la présence de souches, plus ou moins décomposées, remontant donc à d'anciennes opérations d'abattage (fig. 4.9a) ;
- par l'existence de petites dépressions ou encoches (fig. 4.9b) sur la surface des parements, correspondant à « l'empreinte » d'anciennes souches décomposées s'il n'y a pas eu de travaux de reprofilage ou de reconstitution du talus depuis la coupe ;
- par examen du dossier de l'ouvrage et/ou témoignage du propriétaire², relatant un ou plusieurs abattages dans le passé.



Figure 4.9. Souches pourrissantes au pied d'un talus de digue. (a) Dans une première étape, la souche est encore visible. (b) Dans une deuxième étape, la souche pourrissante provoque un petit effondrement local et un début d'érosion. Des tourbillons en cas de crue peuvent surcreuser cette encoche dans le talus (digue de protection, talus côté cours d'eau). Dans une troisième étape, il ne restera peut-être qu'une irrégularité dans la surface du talus, mais si la souche était grosse et profonde, cette zone sera durablement fragilisée. Elle pourra donner lieu à un fontis (fig. 4.8), favoriser une érosion importante du talus lors d'une crue, ou faciliter une érosion interne (photos M. Venetier).

En présence de souches isolées ou regroupées par îlots, on appliquera respectivement les mêmes spécifications de surveillance que pour les troncs et bouquets des situations (a) ou (b), avec en premier lieu l'instauration d'un débroussaillage ou d'une tonte réguliers autour des souches. Si cela n'a pas été fait auparavant et profitant du fait que les souches sont encore visibles, on procédera à la cartographie sommaire de ces zones sur un support permettant de garder en mémoire leur fragilité. Si possible, l'essence de la souche sera identifiée et également reportée sur la carte.

¹ Mentionnons le cas du barrage de Torcy-Vieux présenté dans la communication « Diagnostic et gestion de la végétation sur les digues et les barrages en remblai » (Mériaux et al. 2006).

² On cherchera alors à connaître la ou les dates de ces coupes, la nature et l'âge des essences qui étaient présentes et, s'il s'agit d'une digue de protection, si l'ouvrage a connu des crues depuis ces coupes.



Si l'ouvrage se révèle comme anciennement densément boisé, une surveillance renforcée similaire au cas de la digue ou du barrage boisés (c) mérite d'être instaurée, en exploitant les périodes post-fauche et de charge hydraulique élevée et en examinant de façon plus attentive la proximité des souches encore visibles et les singularités de morphologie (dépressions) résultant de probables anciennes souches.

Examen de parties ou composants particuliers d'ouvrage hydraulique exposés à la végétation ligneuse

Les préconisations des sous-sections précédentes concernaient essentiellement les parties courantes du talus aval d'un barrage ou d'une digue. Dans ce paragraphe, nous abordons les cas de la surveillance de la végétation se développant côté « eau » (c'est-à-dire sur le talus côté retenue pour un barrage ou un canal, côté rivière pour une digue) ou sur – ou à proximité – des parties particulières de l'ouvrage.

Talus « côté eau »

Pour un barrage ou une digue de canal, la végétation ne peut se développer sur ce talus qu'au-dessus du niveau normal des eaux, dans la zone pratiquement toujours émergée en haut du parement amont. Cette bande de talus, par définition proche d'un point d'eau, constitue un milieu très favorable à l'installation et au développement de grands arbres (fig. 4.10).



Figure 4.10. Arbres de haute tige, au port dangereusement penché, se développant au-dessus du niveau normal des eaux d'un petit barrage d'étang et ayant tendance à déstructurer la protection anti-batillage, ici par pieux-bois (ph. P. Mériaux).

Or, sauf pour les plus petits d'entre eux, les barrages sont dotés, sur leur talus amont, d'un ouvrage de protection contre le batillage, au moins dans la zone de marnage (c'est-à-dire sur une plus ou moins large bande de part et d'autre du niveau normal des eaux). Cet ouvrage est souvent constitué d'un revêtement en maçonnerie (pierres sèches ou maçonnées, béton) ou en petits enrochements, plus rarement de pieux bois (fig. 4.10) ou de matériau bitumineux. Il est, par nature, très exposé au risque de déstructuration par la croissance racinaire. Parfois



même, une structure en maçonnerie jointoyée recouvre toute la surface du parement amont et, raccordée à un parafouille en fondation, possède alors une fonction d'étanchéité pour le corps du barrage.

L'examen visuel de la zone de talus concernée s'attachera donc à vérifier l'absence de développement de végétation ligneuse sur ou à proximité immédiate des structures de protection. Si une telle végétation est présente, il faudra repérer les arbres susceptibles d'être à l'origine des dégradations et inventorier les éventuels désordres induits par les racines sur ces parties sensibles d'ouvrages. Si la visite a révélé un début d'installation de ligneux (pousses, broussailles ou arbustes), on préconisera leur éradication systématique, de manière urgente lorsque la structure de protection du parement contribue aussi à l'étanchéité du barrage ou du canal.

Pour les digues de protection ¹, la principale différence avec les barrages tient dans le fait que l'extension de la végétation ligneuse n'est pas limitée par la présence permanente de l'eau et qu'en conséquence les arbres peuvent s'installer sur l'ensemble du talus côté rivière. Les impacts de ces arbres sur l'écoulement du cours d'eau en crue peuvent être très forts : surélévation de la ligne d'eau avec risque de surverse (cf. fig. 3.21 p. 82), activation d'érosions externes voire de glissements. Lors de la surveillance visuelle, ce sont donc les indices liés aux phénomènes précédents qui seront recherchés : présence d'embâcles, d'arbres penchés, d'érosions localisées autour des troncs, d'anses d'érosion, de fissures, de loupes de glissement, etc.

Par ailleurs, si la digue est à proximité immédiate du cours d'eau ², la surveillance visuelle doit s'étendre à la berge et à l'éventuel ouvrage de protection dont elle est dotée. Cela peut nécessiter le recours à des moyens spéciaux (ex. : examen par bateau ou progression en technique acrobatique).

Si cette protection est constituée de maçonneries ou d'enrochements (fig. 4.11), on recherchera d'éventuelles dégradations d'origine mécanique créées par des ligneux poussant dans l'ouvrage ou à proximité.

¹ Et également pour le cas particulier des barrages écrêteurs de crue en remblai, sans plan d'eau permanent.

² Le guide *Génie végétal en rivière de montagne* (Valé et al. 2013), à la rédaction duquel les auteurs du présent ouvrage ont contribué, propose de retenir une distance horizontale entre « le sommet de berge et le pied côté rivière de digue » de l'ordre de 5 m comme valeur en deçà de laquelle la digue doit être considérée comme très proche du cours d'eau. Guide téléchargeable gratuitement sur le lien <http://ouvrage.geni-alp.org>



Si la protection de berges sensibles au contact du pied de digue est réalisée à base de techniques de génie végétal ou mixte, on veillera au cours de la visite de surveillance à apprécier la qualité de l'entretien des végétaux constituant ou contribuant à cette protection : taux de reprise ou de mortalité, dimension et port des ligneux, éventuel début d'envahissement par des espèces d'arbres indésirables à croissance rapide (ex. : peupliers). Pour le reste, on se référera aux recommandations du récent guide technique *Génie végétal en rivière de montagne* (Valé et al. 2013).



Figure 4.11. Arbres commençant à détruire un ouvrage de protection de berge en maçonnerie de pierres (ph. P. Mériaux).

Parties d'ouvrages en maçonnerie ou en matériau rigide

Des parties d'ouvrage en maçonnerie se rencontrent fréquemment, nous l'avons vu, sur les digues et les barrages, en particulier en revêtement total ou partiel du parement amont avec un rôle de protection et/ou d'étanchéité.

Mais, on peut également trouver des maçonneries et d'autres structures rigides (en béton, matériau bitumineux...) dans bien d'autres endroits de l'ouvrage :

- murs de soutènement ;
- superstructures de vannes ;
- regards ;
- galeries ou conduites de prise d'eau, de rejet ou de vidange ;
- voie de circulation en crête ;
- etc.

Vis-à-vis de ces structures, il faut garder en mémoire que, d'une façon générale, ouvrages en maçonnerie et végétation ligneuse ne font pas bon ménage ; et lorsque des racines ont commencé à déstructurer la partie d'ouvrage concernée, les dégradations sont irréversibles et nécessitent, à terme, une reconstitution complète des surfaces endommagées. De plus, il est à redouter des destructions en cascade pour les perrés, secs ou maçonnés, exposés directement à l'action des crues ou d'un fort batillage : une amorce de désordre peut se propager à de grandes surfaces en un seul événement.



En conséquence, ces parties d'ouvrages justifient une attention particulière quant aux impacts potentiels de la végétation ligneuse sur leur état. Certains ouvrages, comme les galeries ou les conduites, ne peuvent être examinés qu'avec des procédures (ex. : fermeture et consignation de vanne) ou des moyens ou équipements spéciaux (ex. : microcaméra, waders...). En dépit de ces réelles difficultés, il est important d'organiser périodiquement de tels examens intérieurs spéciaux qui peuvent révéler des dégradations avancées par des racines à la recherche d'eau ou d'humidité, surtout sur des ouvrages hydrauliques anciens et très boisés, non récemment expertisés.

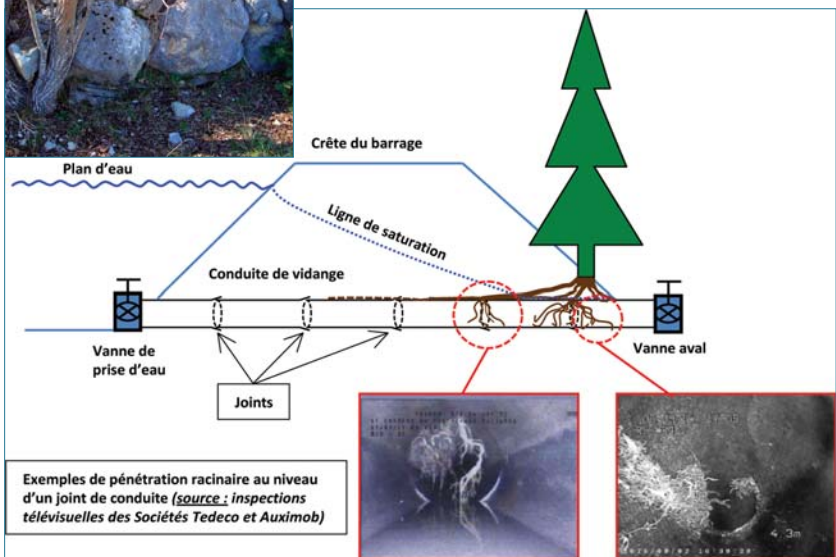
Débouchés de drain

Les débouchés de drain constituent, par fonction, des petites zones humides, affectionnées par la végétation hygrophile, ligneuse ou non (fig. 4.12). Les racines des végétaux, à la recherche de l'eau captée et collectée par les drains, ont, en outre, tendance à pénétrer dans les conduits soit par les joints ouverts ou déboîtés, soit par les crépines. Elles forment les fameuses « queues de renard », bien connues des égoutiers (fig. 4.12b), qui d'abord gênent l'écoulement et réduisent donc



Figure 4.12a (ci-contre). Arbres et arbustes se développant au débouché aval d'un dispositif de drainage subhorizontal (ph. P. Mériaux).

Figure 4.12b (ci-dessous). Schéma des mécanismes d'obstruction des conduits par le chevelu racinaire (formation des « queues-de-renard ») : cas de la conduite de vidange d'un petit barrage.





la capacité d'écoulement du collecteur. Elles peuvent, à terme, obstruer complètement le drain. Ce colmatage sera d'autant plus rapide que les eaux véhiculent des particules fines, que le bouchon racinaire aura tendance à stopper.

On rappelle que le bon fonctionnement des drains est un gage important de la sécurité d'un ouvrage hydraulique car ceux-ci ont pour fonction de rabattre la ligne de saturation dans le remblai et parce qu'ils font généralement partie de son dispositif d'auscultation (cf. sous-section suivante).

Aussi, la surveillance visuelle à leur niveau consiste en premier lieu à vérifier que les zones de débouché de drain sont bien dégagées et fauchées (permettant un examen et un jaugeage faciles) et que les engins de fauchage ou de débroussaillage n'ont pas endommagé l'extrémité des conduits. Si de la végétation ligneuse ou des souches sont présentes à proximité du débouché ou à l'aplomb du drain, il convient d'examiner, avec l'appoint d'une lampe puissante, l'état intérieur de l'extrémité du collecteur ou du drain. S'il y a un doute sur l'existence d'entrées de racines dans le conduit, un examen télévisuel (microcaméra) méritera d'être programmé ainsi que, si nécessaire, une opération de curage mécanique ou hydromécanique, en veillant à ne pas endommager le drain.

Ouvrages dotés d'un dispositif d'auscultation

L'auscultation est une composante essentielle de la surveillance des ouvrages hydrauliques à charge permanente. Méthode quantitative, elle est basée sur l'analyse des mesures fournies par une instrumentation spécifique à chaque ouvrage et est susceptible de mettre en évidence d'éventuelles anomalies de comportement, avant même que celles-ci ne se manifestent par des signes extérieurs. Le décret du 11 décembre 2007 impose l'installation d'un dispositif d'auscultation pour tous les barrages et digues de canal de classe A, B ou C.

Nous allons rappeler dans cette sous-section en quoi consiste l'auscultation des ouvrages hydrauliques en remblai, et voir comment elle peut anticiper des dégradations imputables à un développement racinaire. Le cas des digues de protection est plus complexe vis-à-vis de l'auscultation, du fait de leur charge temporaire, et fera donc l'objet d'un développement particulier.



Barrages et digues à charge permanente

Pour les ouvrages à charge permanente, on mesure essentiellement des débits de fuite ou de drainage, des pressions ou des niveaux d'eau dans le remblai (piézométrie) et des déplacements.

Ce sont surtout les paramètres hydrauliques (débit de fuite, piézométrie) qui peuvent être influencés par la présence de racines en cours de décomposition ou de développement dans le corps de l'ouvrage, en lien plus ou moins direct avec une augmentation de la perméabilité ou une amorce d'érosion interne (cf. encart page suivante). Le jaugeage des débits de fuite ou de drainage présente l'avantage d'être une mesure intégratrice (vis-à-vis d'un important « volume » d'ouvrage), à la différence de la piézométrie qui s'apprécie par des mesures ponctuelles (tube piézométrique ou sonde de pression). L'analyse statistique des mesures d'auscultation permet d'identifier les variations irréversibles de ces paramètres (à conditions constantes de charge hydraulique et de climat), synonymes de dégradation de fonction(s) de l'ouvrage. Cela nécessite, toutefois, de mesurer impérativement la charge hydraulique (la cote du plan d'eau) en même temps que les autres paramètres.

Enfin, les instruments d'auscultation doivent être surveillés, contrôlés et entretenus comme les autres composants de l'ouvrage. Vis-à-vis de ces dispositifs, la végétation ligneuse proche est une source de détérioration, notamment pour les appareillages auscultant les paramètres hydrauliques (drains, piézomètres...) que les racines à la recherche d'eau ont tendance à envahir, à colmater puis enfin à déstructurer si on les laisse croître (cf. Débouchés de drain p. 115). Elle doit donc être éradiquée dès le plus jeune âge dans les zones concernées. Cette recommandation vaut totalement pour les ouvrages dotés d'un dispositif de détection de fuites à base de fibre optique – technologie en plein essor dans le parc des digues à charge permanente : la fibre enfouie devant être préservée de toute action mécanique susceptible de perturber son fonctionnement, voire de la casser, il convient de laisser une large bande au-dessus d'elle exempte de toute végétation ligneuse et de contrôler son bon entretien.

Digues de protection

L'auscultation des digues de protection – non imposée par la réglementation – est une pratique encore peu développée du fait des difficultés techniques et procédurales propres à ce type d'ouvrage hydraulique, notamment :



- leur long linéaire qui, couplé à leur grande hétérogénéité, rend peu pertinente au plan technico-économique leur surveillance par des instruments ponctuels (type piézomètres) ;
- le caractère temporaire de la charge hydraulique ne permettant pas l'amorçage des drains ou la stabilisation de leur débit pour une mesure fiable.

Analyse qualitative de quelques évolutions irréversibles de mesures hydrauliques pouvant avoir comme origine la présence actuelle ou passée de végétation ligneuse sur l'ouvrage

Augmentation des débits des drains

L'augmentation des débits de drainage à plan d'eau constant traduit une détérioration de l'étanchéité de l'ouvrage, dont les racines d'arbres peuvent être (co)responsables de deux manières : (i) soit parce qu'elles pourrissent dans le remblai (et y créent des vides), (ii) soit parce que, par leur développement, elles détériorent un organe d'étanchéité mince de l'ouvrage s'il existe (par exemple, un perré maçonné, dont les joints seraient dégradés par des racines vers la zone de marnage). Le phénomène est d'autant plus inquiétant qu'il est rapide, car il peut signifier le pourrissement simultané de nombreuses grosses racines (par exemple plusieurs années après une coupe d'arbres). Il convient dans tous les cas d'essayer de cerner l'origine de l'évolution à la hausse des débits, en scindant si possible les zones de mesure.

Baisse des débits des drains

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la baisse des débits de drainage peut être aussi inquiétante que leur augmentation. En effet, une baisse de débit à conditions hydrostatiques et climatiques constantes peut avoir deux origines :

- une amélioration naturelle de l'étanchéité de l'ouvrage et de sa fondation par colmatage à l'amont de la porosité et des fissures. Ce cas est, bien sûr, tout à fait favorable et rassurant ;
- un colmatage du dispositif de drainage qui se trouve peu à peu contourné et ne contrôle plus les débits de fuite. Ce colmatage peut être dû (i) au développement d'une érosion interne à « l'amont » du drain (qu'une augmentation de la perméabilité due à la décomposition des racines a pu déclencher ou accélérer) ou (ii) à l'obstruction directe de tout ou partie du drain par des racines (fig. 4.12b). Le colmatage du drain entraîne une augmentation de la piézométrie (cf. alinéa suivant) et les écoulements non contrôlés peuvent être à l'origine de glissements du talus aval de l'ouvrage.

Augmentation d'un niveau piézométrique dans un remblai

Une telle évolution est inquiétante surtout si elle est constatée au-dessus du drain tapis ou en aval du drain vertical. Elle peut être le signe du colmatage ou du contournement de ce drain, éventuellement du fait de l'action plus ou moins directe des racines (pourrissement ou envahissement : cf. alinéa précédent). Dans tous les cas, la stabilité du remblai aval va s'en trouver diminuée. Si la ligne piézométrique vient affleurer le talus, cela se manifeste par des suintements qui peuvent dans certains cas amorcer une érosion interne régressive ou un glissement de peau.



Rares sont donc les digues dotées d'instruments d'auscultation et celles qui le sont ne comportent que peu d'appareils (ex. : forages de reconnaissance transformés en piézomètres). S'ils existent, on veillera bien sûr à les surveiller et à les entretenir comme ceux des barrages, notamment vis-à-vis des impacts néfastes de la végétation.

Toutefois, des pistes existent ¹ pour adapter les moyens ou dispositifs d'auscultation aux digues de protection. Parmi ces pistes, la technologie Lidar héliporté à haute résolution, que nous évoquerons de façon plus détaillée au paragraphe sur le diagnostic approfondi du présent guide (p. 145), est présentée comme un moyen potentiel de suivi quantitatif du développement de la végétation ligneuse – raison pour laquelle nous la mentionnons ici comme méthode pouvant être rattachée à de l'auscultation. En effet, grâce à ses hautes performances (en particulier, forte densité de points permettant d'acquérir des informations « sol » et « sur-sol », même en présence de végétation dense), elle permet de caractériser à un instant donné la végétation poussant sur les digues et à leur proximité et ce, sur de longs linéaires. Aussi, en répétant, tous les dix ans par exemple, l'acquisition laser couplée à la prise d'images aériennes haute définition et en renouvelant la caractérisation et la cartographie des espaces végétalisées, il serait possible de suivre quantitativement l'évolution des peuplements (ex. : croissance en hauteur, extension ou diminution en surface) et d'anticiper les opérations de gestion sylvicole.

Techniques d'entretien

Notre propos n'est pas ici de décrire en détail les techniques d'entretien courant (fauche, broyage, pâturage et abattage), bien connues des gestionnaires qui les mettent en pratique directement ou avec des entreprises spécialisées. Les recommandations particulières pour ces méthodes sont très variables en fonction des conditions locales de milieu, de climat, de matériau, pente, exposition et longueur des remblais, et en fonction d'enjeux sociaux ou écologiques. Il s'agit plutôt d'en souligner certaines contraintes et surtout les enjeux en relation avec l'écologie et le climat (p. 123).

¹ *L'auscultation des digues de protection contre les inondations : un concept encore à inventer* (Mériaux et al. 2012).



Le fauchage

Il est pratiqué sur la végétation herbacée basse, souvent de façon mécanique, méthode la plus économique dès que les surfaces sont importantes. On fait appel à des techniques manuelles, par débroussailluse portée, quand les conditions de pente, de longueur de talus ou d'obstacles nombreux (arbres, arbustes) ne permettent pas le passage d'engins. Un passage manuel et sélectif peut aussi être nécessaire très localement pour la préservation d'espèces rares ou bénéficiant d'un statut de protection.

Le fauchage se pratique le plus souvent annuellement, lorsqu'on a affaire à des herbacées basses. Des passages plus fréquents peuvent être nécessaires lorsque les herbacées sont plus hautes ou dynamiques (ex. : canne de Provence), ou pour des besoins particuliers de surveillance de points critiques ou post-crue (cf. Recommandations de gestion curative p. 136). Plus le fauchage est fréquent et régulier, plus la végétation tend vers un milieu herbacé. En présence d'espèces ligneuses indésirables qui s'installent abondamment, on peut donc être amené à faucher fréquemment pendant quelques années avant de relâcher le rythme progressivement. La prise en compte de l'environnement dans le cas du fauchage se fait surtout par un choix judicieux des dates et fréquences de passage en fonction d'enjeux de floraison ou de fructification d'espèces végétales, et de dates de nidification ou de développement d'espèces animales.

Le broyage

Le broyage remplace le fauchage lorsque la végétation comprend une proportion significative de ligneux ou des herbacées hautes et coriaces. Il existe différents engins de broyage, à lames, chaînes ou marteaux. Chacun est adapté à un type de végétation et à un type de sol. Certains broyeurs peuvent s'attaquer à des ligneux jusqu'à 10 cm de diamètre, d'autres se limitent à des petits ligneux ne dépassant pas quelques centimètres de diamètre. Certains broyeurs peuvent travailler en terrain caillouteux (fig. 4.13).



Figure 4.13. Engin de broyage en action sur végétation arbustive dense (ph. J. Baudel).



Le broyage peut aussi être une option :

- sur certains matériaux grossiers où de nombreux cailloux ou blocs peuvent dépasser de la surface du sol et risquent de briser les outils de fauche ;
- lorsque la pente est forte et longue, et que seuls certains engins munis d'un broyeur sur un bras déporté ou télescopique peuvent réaliser le travail ;
- lorsqu'on veut travailler superficiellement le sol pour détruire ou fragiliser les souches de certains ligneux pour limiter leur repousse (broyeurs à marteaux « mange-cailloux »). Ce type de broyeur, qui est utilisé entre autres pour les besoins des pare-feu, permet de rattraper des situations d'enfrichement avancé avant le retour à des méthodes de broyage ou fauchage plus légères. Il faut l'employer hors des périodes à risque de pluie intense, car il désstructure l'horizon superficiel et peut donc favoriser l'érosion. Cependant, si la végétation initiale est abondante et en particulier si elle est riche en ligneux, le broyage laisse sur place un paillage de débris végétaux qui couvre et protège le sol provisoirement.

Comme pour le fauchage, la prise en compte de l'environnement dans le broyage repose sur le choix des dates de passage, mais aussi parfois sur une rotation de zones broyées alternativement pour permettre le maintien d'un potentiel de floraison ou de fructification d'arbustes et de petits ligneux, et de zones refuge pour les animaux. Pour certaines espèces de faune, le broyage peut être extrêmement destructeur, notamment les reptiles et amphibiens en saison froide (pas de capacité de fuite), dans des zones enfrichées qui sont au fil du temps paradoxalement devenues de plus en plus favorables pour ceux-ci. En plus du calendrier, il faut alors être attentif aux sites sensibles et adapter la hauteur de coupe du broyeur.

Il est totalement exclu d'utiliser un broyage mécanique en présence de certaines plantes invasives comme la renouée du Japon qui se propage par boutures de tiges ou de racines. Les engins risquent en effet de disséminer la plante au-delà de ses limites actuelles. Si des massifs de telles plantes sont broyés involontairement, il est obligatoire de nettoyer très attentivement les engins avant de les réutiliser dans d'autres chantiers.



Le pâturage

Il peut en partie remplacer ou compléter le fauchage et le broyage pour l'entretien d'une végétation à dominante herbacée (fig. 4.14). Son efficacité, notamment sur les ligneux à forte capacité d'extension, dépend du type d'animaux utilisés, de la pression de pâturage (nombre d'animaux à l'hectare et temps de parcours) et des



Figure 4.14. Animaux en pâture sur une digue (ph. C. Ripert).

espèces végétales : certains végétaux sont très appétants quel que soit l'animal, et sont systématiquement broutés. D'autres ne sont prisés que par certains animaux ou pas consommés du tout. Enfin, certains végétaux sont consommés uniquement sous forme de pousses tendres et pas lorsqu'ils sont plus âgés et que leurs tiges ou feuilles sont devenues coriaces. En présence de nombreux arbustes et végétaux ligneux bas, il peut être nécessaire de débroussailler au préalable pour relancer la production herbacée d'une part, et d'autre part permettre aux animaux de se nourrir des rejets. La consommation des rejets et leur piétinement limiteront la repousse des ligneux.

En présence d'arbustes peu consommés, ou de végétation très dynamique, une combinaison de débroussaillage et de pâturage peut être nécessaire. La densité du pâturage aura aussi une forte incidence sur l'efficacité du contrôle de la végétation ligneuse. Un excès de densité des animaux peut conduire à la disparition des herbacées et à des risques d'érosion. Par ailleurs, le passage répété de gros animaux sur les talus en pente forte (vache, chevaux) peut directement provoquer de l'érosion le long des chemins préférentiels utilisés par les animaux, notamment lorsque le sol est détrempé. Ces animaux lourds ne sont donc pas recommandés lorsque les pentes sont fortes.

Suivant la fertilité du matériau du remblai, la surface disponible, la qualité des herbacées (qui peuvent avoir été semées spécialement pour cet usage) et des autres végétaux présents, le climat et la disponibilité locale des animaux, le pâturage peut réduire plus ou moins fortement le coût d'entretien des talus. Il est dans tous les cas nécessaire de faire appel à des professionnels spécialisés pour bien calculer le potentiel de l'ouvrage et de ses environs et la charge d'animaux correspondante. Une combinaison dans le temps de différents types d'animaux peut



conduire à la fois au contrôle d'un grand panel de plantes, et à l'amélioration des qualités fourragères permettant de maintenir un pâturage raisonné sur site.

Abattage

Si le plan de gestion prévoit que la présence d'arbres est possible dans certaines limites de position et de dimension ou d'âge, l'abattage régulier des arbres ayant dépassé ces limites ou présentant d'autres problèmes de sécurité (mortalité, inclinaison, pourritures) doit être programmé dans la gestion courante. Ces travaux doivent s'accompagner du repérage systématique et précis de l'emplacement des arbres abattus si la souche n'est pas éliminée et le remblai réparé (voir les recommandations de gestion curative p. 136).

L'abattage d'arbres doit être confié à des professionnels. Comme pour les autres méthodes d'entretien, le choix des dates et la répartition spatiale des travaux peuvent contribuer à limiter les dégâts sur l'environnement, ou même favoriser la biodiversité comme suggéré dans les paragraphes suivants. La prise en compte d'enjeux liés à la biodiversité est nécessaire préalablement à ces opérations d'abattage (cas des arbres gîtes notamment), pour proposer des adaptations éventuelles à celles-ci (abattage doux, maintien de chandelles, tronc ou andins laissés au sol à proximité de l'ouvrage si ce n'est pas en contradiction avec les autres objectifs de gestion, etc.).

Prise en compte de l'écologie et du climat

Les enjeux écologiques sont potentiellement nombreux sur les ouvrages hydrauliques. Les milieux rivulaires sont en effet parmi les plus menacés en Europe et dans le monde. Ces enjeux sont abordés dans les paragraphes suivants et comprennent les enjeux de biodiversité terrestre, les enjeux de biodiversité aquatique et de qualité de l'eau, des enjeux d'aménagement du territoire, et des enjeux liés au changement climatique.

Les enjeux de biodiversité terrestre

Ils portent sur la biodiversité exceptionnelle (espèces rares), mais aussi sur la biodiversité ordinaire. Rappelons que la biodiversité doit être



considérée et gérée à l'échelle du système entier, comprenant bien sûr l'ouvrage mais aussi les berges, un éventuel ségonnal pour les digues, et le milieu aquatique considéré (rivière ou plan d'eau de retenue). Les ouvrages étant soumis à bien plus de contraintes que les zones voisines, celles-ci jouent un rôle essentiel. Lorsque c'est possible, éloigner les digues du cours d'eau donne beaucoup plus de souplesse à la gestion de la végétation en laissant un large corridor.

Les plantes

Les plantes rares ou protégées les plus fréquemment listées sur les digues ou les barrages sont des herbacées, mais il peut s'agir de plantes typiques des berges des cours d'eau. Elles sont souvent liées aux milieux ouverts, ce qui va dans le sens d'un entretien en végétation herbacée basse. C'est d'ailleurs fréquemment cet entretien qui a permis leur expression ou leur installation et leur maintien. Le respect des périodes de floraison et de fructification permet leur sauvegarde, sans renchérir le coût d'entretien des ouvrages.

Il peut, bien sûr, y avoir des cas plus complexes. Mais on se souviendra que les ouvrages hydrauliques étant des milieux artificiels, leur colonisation par des espèces rares a été possible grâce à la gestion passée, dont on pourra souvent s'inspirer pour leur sauvegarde. On peut rencontrer aussi des espèces qui ne sont pas rares par elles-mêmes mais rares dans un contexte particulier, ou en limite de leur aire de répartition : par exemple des plantes méditerranéennes très au nord de leur aire habituelle, grâce aux conditions particulières du milieu artificiel des digues.

On peut aussi rencontrer en abondance sur les digues des plantes qui, sans être rares, sont moins abondantes dans les milieux naturels, comme certaines orchidées (fig. 4.15).



Figure 4.15. Orchidée (*Himantoglossum robertianum*) sur une digue en herbe fauchée annuellement. Cette espèce spectaculaire n'est ni rare ni protégée, mais bien représentative des espèces favorisées dans les milieux ouverts entretenus (ph. M. Vennetier).

Le cas de la végétation des berges à proximité des pieds de digues, qu'il convient de gérer dans la continuité des talus, est différent : on peut être amené à couper la végétation ligneuse et notamment les arbres



sur plusieurs mètres de large par rapport au pied des talus d'ouvrages (une largeur de 5 m est recommandée, cf. Travaux de confortement p. 144), dans des milieux plus naturels. La diversité des espèces rares rencontrées et de leurs exigences écologiques est alors importante.

Animaux rares ou protégés

Parmi les gros animaux, le castor (fig. 4.16) et la loutre reviennent le plus souvent. Pour les petits animaux, les cas sont beaucoup plus variés, mais souvent des insectes (papillons notamment, comme la Diane inféodée à une plante hôte assez commune sur ces ouvrages), ou des espèces inféodées à l'eau (salamandres, libellules par ex.). La sauvegarde de chaque espèce passe par des mesures spécifiques adaptées aux conditions locales, qu'il est impossible de généraliser. Pour un papillon par exemple, il peut aussi bien s'agir de respecter une période de floraison que de conserver une plante-hôte de la chenille. Pour le castor, la préservation de sites de tranquillité et de reproduction doit s'accompagner d'une conservation des espèces d'arbres dont l'écorce constitue une nourriture importante (peupliers, saules).



Figure 4.16. Les castors consomment des écorces de saule et de peuplier. Ils abattent des arbres entiers, parfois gros, pour s'alimenter des écorces des branches et pour construire ou entretenir leurs barrages (photos troncs C. Zanetti, photo castor E. Vennetier).

Quand des plantes et animaux rares ou protégés sont identifiés, ils sont souvent dépendants de milieux particuliers, parfois déclinés dans les plans de gestion ou d'objectif de zones de protection spécifiques (réserves naturelles, sites Natura 2000, etc.). Il faut alors se référer à ces plans pour adapter au mieux les périodes et la nature de travaux.

Biodiversité ordinaire

Une des principales sources de biodiversité dans les milieux arborés est le bois mort ou vieillissant. On trouve en effet dans les vieux arbres des sites de nidification ou de gîte pour certaines chauves-souris, oiseaux, insectes, et dans les débris de bois mort au sol tout un cortège



d'insectes saproxylophages (i.e. « mangeurs de bois mort »), des caches pour les amphibiens et reptiles, etc. Or le bois mort est souvent la hantise des gestionnaires pour de multiples raisons : sécurité des promeneurs et usagers vis-à-vis de la chute de branches ou d'arbres, risques d'embâcles, pourrissement des souches, etc. Conserver des arbres morts est souvent perçu comme un défaut de gestion. C'est pourquoi l'élimination des arbres malades ou morts fait partie des pratiques quasi-systématiques. Dans la gestion des digues et des barrages, mais aussi de l'environnement de ceux-ci, il faut cependant considérer avec intérêt la possibilité d'en conserver certains autant que le permet la sécurité des personnes et des ouvrages hydrauliques.

Par ailleurs, les rubriques suivantes insistent, dans le cas des ouvrages hydrauliques en remblai principalement de type digues¹, sur des points particuliers qui concourent à cette biodiversité souvent invisible mais importante !

Pollinisateurs, butineurs

Nous avons déjà vu qu'il était possible, et souvent facile, d'adapter les dates et modes d'entretien de la végétation pour conserver et même optimiser les floraisons. Cela suffit à améliorer l'alimentation de l'ensemble des espèces butineuses et pollinisatrices (fig. 4.17). Si l'on pense souvent aux floraisons printanières, il ne faut pas oublier les floraisons d'été dans beaucoup de régions et même les floraisons automnales. Ces dernières sont cruciales pour la constitution de réserves qui permettront aux colonies de survivre en hiver et de bien démarrer au printemps suivant. Une fauche ou un broyage trop tardifs peuvent affaiblir les floraisons d'automne sans rien apporter aux floraisons de printemps. Un équilibre est à trouver dans chaque site. Quelques espèces fréquentes dans les milieux rivulaires, comme le lierre, font partie des plantes mellifères d'automne. Or ce dernier est fréquemment éliminé sous prétexte qu'il envahit les arbres et les étouffe, ce qui est faux². Plus le lierre est gros et développé, plus il est florifère. La préservation des gros pieds de lierre est donc très recommandée, même si cela devait être au détriment d'un arbre.

¹ Certaines de ces recommandations peuvent toutefois être étendues aux barrages, notamment ceux de grande longueur.

² En général si le lierre étouffe un arbre, c'est que celui-ci ne poussait plus, donc périssait déjà. Il peut y avoir de rares exceptions.



Potentiel mellifère (fig. 4.17)

En complément de leur intérêt pour les pollinisateurs sauvages, certaines dagues de grandes dimensions ont ou pourraient avoir un réel potentiel mellifère (nectar et pollens) pour les abeilles domestiques. Leur exploitation à certaines saisons pourrait être négociée avec des apiculteurs, et les travaux d'entretien peuvent être optimisés dans cet objectif : date, méthode et hauteur de fauche ou de broyage par exemple. Lors de l'installation d'une végétation herbacée ou de ligneux bas sur des dagues après travaux, on peut aussi semer en priorité des plantes particulièrement mellifères. Il faut cependant faire attention à ne pas utiliser de plantes potentiellement invasives, ou des cultivars qui pourraient polluer génétiquement les espèces locales. Pour cela, le label « semence locale » en cours de développement par les conservatoires botaniques nationaux peut être une solution. En partenariat avec divers acteurs, on pourrait même créer des plantations mellifères de ligneux bas (par ex. lavande, thym) sur certains ouvrages dont le substrat et le climat sont favorables : ces plantes qui couvrent peu le sol, et donc ne gênent pas la surveillance, demandent peu d'entretien. Outre leur intérêt écologique et économique, elles ont un fort potentiel paysager qui serait très apprécié dans les zones fréquentées par le public. Favoriser le potentiel mellifère est en pratique bon pour l'ensemble des pollinisateurs sau-



Figure 4.17. Les herbes et petits ligneux des milieux ouverts sont souvent mellifères. Un choix judicieux des modes et des dates d'entretien peut tirer parti de ce potentiel. La plantation ou le semis de plantes mellifères (en faisant attention à l'origine des plantes utilisées), est aussi envisageable dans un objectif environnemental, notamment en milieux urbains ou agricoles (photo R. Celse – en haut à droite – et M. Vennetier – autres photos).



vages, à condition de ne pas créer une surcharge d'abeilles domestiques qui pourrait faire une concurrence trop forte aux espèces sauvages. Par ailleurs, les saules et peupliers jouent par leur floraison très précoce un rôle clef dans l'alimentation des abeilles domestiques et sauvages en fin d'hiver. En garder dans une certaine proportion ou les favoriser est important s'ils sont rares localement. Cette recommandation vaut pour les berges et ségonnaux voisins autant que pour les digues où il n'est pas toujours possible de conserver des arbres.

Diversité spatiale et temporelle des milieux

Bien que considéré comme ouvrage « linéaire », une digue vue en coupe transversale peut héberger sur le remblai et dans son environnement des milieux et des types de végétation très différents. La gestion de « ces végétations » ne peut pas être dissociée. Des variations sont possibles et souvent souhaitables entre la berge, l'éventuel ségonnal, la digue et la végétation côté terre. Bien qu'étroites, et outre leur diversité de composition et de structure, ces bandes créent de longues lisières, lesquelles sont toujours des zones favorables à la biodiversité. Si la digue est large, et si sa structure comporte des matériaux variés, les parties de digue (pied, milieu et haut de talus, crête, talus amont et aval) peuvent aussi présenter des bandes de végétation variées.

Longitudinalement, un ouvrage et son environnement proche (berges, ségonnal, ouvrages annexes hydrauliques...) présentent souvent des variations de profil, de largeur, de pente, de sol ou de matériaux, ainsi que d'enjeux. Ces variations vont permettre aussi, si on le souhaite, de créer des variations longitudinales de végétation.

En combinant variations longitudinales et transversales, avec une gestion précise et circonstanciée, on peut obtenir des variations de composition et de structure de végétation en mosaïque, très favorables à la biodiversité même si la digue elle-même reste herbacée en totalité ou en majorité.

L'étalement de travaux dans le temps, comme la rotation entre des zones préservées et broyées à tour de rôle, peut aussi contribuer à des mosaïques spatiales et temporelles de structure de végétations.

Corridors écologiques

Dans les zones agricoles de grandes cultures ou dans les milieux urbains et périurbains, les rivières constituent souvent l'un des derniers liens entre des habitats naturels fragmentés et disséminés. Les digues



jouent dans ce cas un rôle de corridor écologique, permettant la circulation des espèces. L'importance de ce rôle est variable d'un cas à l'autre, et des recommandations de gestion ne peuvent en général pas être données, sinon celles d'éviter les obstacles infranchissables et de conserver une largeur suffisante au corridor en évitant son artificialisation. On traitera différemment le cas d'un corridor généraliste destiné à toutes les espèces sans priorité, et celui d'un corridor qui sera considéré comme vital pour une espèce particulière dont les exigences locales sont spécifiques.

Un corridor peut être mixte, constitué d'un milieu ouvert (digue fauchée) et d'un milieu ligneux (haie ou bandes boisée en pied de digue), les deux corridors étant utilisés par des espèces différentes. À ce titre, les bandes boisées à proximité des digues, si elles sont compatibles avec la sécurité de l'ouvrage, doivent être conservées voire renforcées, notamment en assurant autant que possible leur continuité.

Plantes envahissantes

Il existe de nombreux ouvrages, rapports et sites internet concernant le danger (et le coût futur pour la société) que font courir les plantes invasives à la biodiversité le long des cours d'eau. On pourra s'y reporter. Ils proposent parfois des méthodes de lutte dont aucune pour l'instant n'est pleinement satisfaisante sur les populations déjà développées et disséminées, les chances de succès étant limitées aux traitements très précoces prévenant l'installation localisée de ces espèces dans de nouveaux sites. Les plus fréquemment citées, parmi les exotiques, sont la renouée du Japon (*Reynoutria japonica* Houtt.) (fig. 4.18), l'arbre à papillon ou buddleia (*Buddleia davidii* Franch.) et le faux indigo (*Amorpha*



Figure 4.18. Invasion de digues par la renouée du japon : à partir d'un petit bouquet isolé, installé par une crue ou involontairement par des travaux, la renouée peut à la longue étouffer toute végétation herbacée et arbustive sur des dizaines ou centaines de mètres de digue et de berge (photos M. Venetier et G. Doirat).



fruticosa L.). Dans le sud de la France, la canne de Provence (*Arundo donax* L.) est autochtone mais pose les mêmes problèmes. Ces plantes forment des massifs denses et hauts, difficilement pénétrables, dont la concurrence pour la lumière et dans le sol éradique les espèces locales. Ils rejettent très rapidement après coupe ou broyage. Ils sont aussi capables de se multiplier par bouturage de tiges ou de racines, ce qui rend la lutte difficile et coûteuse car les résidus de coupe ou de broyage doivent être ramassés et détruits. Ces inconvénients s'ajoutent aux problèmes de sécurité créés par ces massifs denses qui gênent la surveillance des ouvrages. Les tiges mortes de ces plantes, qui peuvent être disponibles en grandes quantités, contribuent à la formation d'embâcles. Très demandeuses en lumière, elles sont favorisées par l'élimination du couvert arboré. Il faut donc parfois trouver un compromis, au moins temporaire, entre élimination d'arbres gênants et contrôle des invasives.

La renouée du Japon, introduite en Europe comme plante ornementale, mellifère et fourragère, est l'une des invasives les plus dynamiques. Elle a conquis la totalité du territoire français en moins d'un siècle, aidée par son implantation dans de nombreux jardins et parcs, et sa dissémination facile par les crues et les travaux d'entretien.

Le buddleia produit en abondance des fleurs très attractives pour les papillons (et de nombreux autres nectarivores) et il est parfois considéré à ce titre comme intéressant écologiquement. Mais il ne nourrit quasiment aucune chenille. Quand il prend trop d'importance le long d'un cours d'eau, il devient limitant au contraire pour les papillons qui se nourrissent des plantes habituelles des berges.

L'ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia* L.) est une plante invasive en expansion. Elle est actuellement très présente dans le Sud-Est de la France mais signalée dans presque toutes les régions (et dans toute l'Europe). Ayant besoin de lumière, elle affectionne les zones ouvertes herbacées de friche, les talus de route et autres voies de transport, et donc aussi les digues. Elle n'atteint pas de grandes dimensions (30 à 120 cm) et forme rarement des fourrés denses, donc ne peut être considérée seule comme gênante pour la surveillance. Cependant, très allergisante par son pollen, cette plante pose un problème de santé publique et fait l'objet d'arrêtés préfectoraux ou municipaux organisant son contrôle ou des travaux de lutte contre sa dissémination. Les graines, qui ne sont disséminées ni par le vent ni par des animaux qui les mangeraient, sont transportées surtout avec de la terre dans les roues d'engins ou avec des remblais, ou dans les sabots d'animaux qui pâturent les zones infestées, voire dans les semelles de promeneurs.



Sa présence sur une digue impose donc des précautions particulières pour éviter de la disséminer lors des entretiens ou des travaux nécessitant des déplacements de terre. Faucher les zones infectées avant la période de maturité des graines est un moyen de limiter progressivement sa présence.

Le robinier (*Robinia pseudoacacia* L.) qui a été fréquemment planté sur les digues pour stabiliser les talus, l'ailante (*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle) et l'érable negundo (*Acer negundo* L.) sont aussi considérés comme des espèces invasives dans l'étage arboré. Le robinier peut se révéler particulièrement envahissant grâce à son pouvoir de drageonner à partir de racines très loin du pied-mère, et dès qu'il est coupé. L'ailante a les mêmes propriétés même si les drageons apparaissent généralement plus près du pied-mère. L'érable negundo se reproduit très abondamment par graines et représente désormais l'une des espèces dominantes de certaines berges et digues. Ces trois arbres peuvent cependant être gérés en peuplement. Leur croissance rapide et leur besoin en lumière font qu'ils restent peu de temps dans la phase de fourré dense, empêchant la surveillance au sol : c'est donc plus l'aspect écologique que l'aspect sécuritaire qui est en jeu. Le robinier est par ailleurs un des arbres les plus mellifères : à ce titre, ses peuplements sont très recherchés par les apiculteurs qui en font un miel monofloral réputé (miel d'acacia).

D'autres espèces herbacées ou arbustives peuvent être localement gênantes comme les topinambours (*Helianthus tuberosus*), la berce du Caucase (*Heracleum mantegazzianum*), le raisin d'Amérique (*Phytolacca americana*), les balsamines (*Impatiens glandulifera*, *Impatiens parviflora*), les asters américains (*Aster lanceolatus*, *Aster novi-belgii*, *Aster salignus*). Berce du Caucase et raisin d'Amérique sont très toxiques et dangereux pour l'homme et les animaux, par simple contact : leur contrôle relève donc de la santé publique autant que de l'écologie dans les secteurs fréquentés par le public.

Les enjeux de biodiversité aquatique

Embâcles

Les embâcles sont en majorité alimentés par la végétation des berges, digues et ségonnaux. Des objets d'origine humaine peuvent s'y ajouter dans les lits mal entretenus, ou en cas de crues violentes provoquant des destructions de constructions et emportant des véhicules. Ils constituent l'un des risques majeurs au niveau des ouvrages (ponts, gués,



seuils, passages busés etc.) dont ils peuvent provoquer le colmatage, et indirectement, la destruction. Durant les crues, ils s'accumulent dans la végétation des berges et digues qui fait office de « peigne », ce qui peut réduire la capacité d'écoulement du lit. Les embâcles sont particulièrement redoutés sur les rivières endiguées, car ils peuvent créer des débordements localisés et donc des brèches. Il convient cependant de relativiser leur inconvénient hydraulique dans le cas de rivières larges.



Figure 4.19. Les débris végétaux accumulés (branches, feuilles) constituent des abris, niches et sites de reproduction pour de nombreuses espèces aquatiques, tout en contribuant à la chaîne alimentaire par des apports réguliers de matière organique (ph. M. Vennetier).

Mais ils jouent un rôle très important comme cache et site de reproduction et comme habitat spécifique pour de nombreux organismes aquatiques (fig. 4.19). Ils contribuent aux apports d'éléments nutritifs dans le cycle biologique de la rivière. La gestion préventive de la végétation des berges et digues, quand elle comprend des ligneux, doit donc tenir compte de l'intérêt de conserver certains végétaux qui peuvent contribuer à la formation d'embâcles de taille limitée, quand elles ne sont pas considérées comme dangereuses pour la sécurité. La gestion curative doit envisager la possibilité de conserver certains embâcles en fonction des enjeux ou de leur position ou de les enlever partiellement, par exemple la partie hors d'eau seulement (on pourra se référer à l'ouvrage de Gérard Degoutte, 2012. *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées*, page 441 et suivantes).

Mais ils jouent un rôle très important comme cache et site de reproduction et comme habitat spécifique pour de nombreux organismes aquatiques (fig. 4.19). Ils contribuent aux apports d'éléments nutritifs dans le cycle biologique de la rivière. La gestion préventive de la végétation des berges et digues, quand elle comprend des ligneux, doit donc tenir compte de l'intérêt de conserver certains végétaux qui peuvent contribuer à la formation d'embâcles de taille limitée, quand elles ne sont pas considérées comme dangereuses pour la sécurité. La gestion curative doit envisager la possibilité de conserver certains embâcles en fonction des enjeux ou de leur position ou de les enlever partiellement, par exemple la partie hors d'eau seulement (on pourra se référer à l'ouvrage de Gérard Degoutte, 2012. *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées*, page 441 et suivantes).

[Apports de matière organique dans la rivière](#)

Dans le même registre, toute matière organique apportée par la végétation riveraine (non seulement les éléments ligneux des embâcles mais tous les apports de feuilles et rameaux et même les résidus d'entretien) est vitale pour la chaîne alimentaire de certains cours d'eau. Attention cependant aux apports massifs en période de faible débit et forte chaleur qui peuvent avoir un effet néfaste (par fermentation et asphyxie).

[Dépollution des eaux de ruissellement et de la rivière](#)

La végétation des bords de cours d'eau, et donc en partie celle des digues, joue un rôle important de dépollution vis-à-vis de nombreuses substances nocives ou surabondantes produites par les activités hu-



maines (agriculture notamment) et leurs installations (stations d'épuration, industries). Les plus courantes sont les nitrates, les phosphates et certains polluants industriels ou leurs dérivés qui ne sont pas entièrement éliminés par les traitements en amont. Les racines de la végétation pompent et recyclent une part importante de ces substances dans les eaux de ruissellement, et dans les nappes connectées aux cours d'eau (qu'elles alimentent ou à partir desquels elles s'alimentent). L'activité biologique des cours d'eau, qui dépend en partie de cette végétation et de ses apports (cf. ci-dessus), contribue par ailleurs à ce travail de dépollution. La végétation herbacée est déjà efficace contre les pollutions agricoles entraînées par le ruissellement, en particulier le phosphore particulaire. La végétation arborée est plus efficace contre la pollution des nappes (Carluer et al. 2011).

[Ombrage des cours d'eau](#)

Dans les régions chaudes, et pour les cours d'eau ou canaux de faible largeur qui peuvent connaître des étiages à très faible débit, l'ombrage joue un rôle important et parfois vital en été pour limiter la hausse de température de l'eau. Une température excessive favorise les proliférations d'algues et accélère l'eutrophisation, au détriment de nombreux organismes aquatiques, ce qui peut se traduire par une forte mortalité. Il y a parfois une antinomie entre le rôle d'ombrage d'une végétation arborée proche de la berge, auquel peut contribuer la végétation des digues sur les petits cours d'eau, et les risques qu'induisent ces arbres lors des crues en termes de turbulences, embâcles, déracinement, etc. La prise en compte du facteur ombrage n'en est pas moins importante à évaluer objectivement.

[Débit des cours d'eau](#)

Dans les cours d'eau où un étiage à très faible débit ou un assèchement temporaire peut être un problème, la présence d'arbres peut y contribuer. Les arbres consomment en effet une très grande quantité d'eau en été, et d'autant plus qu'il fait sec lorsqu'ils ont accès à une ressource en eau comme une nappe ou une berge qui leur permet une activité soutenue de croissance. Le fonctionnement biologique du cours d'eau, et donc sa biodiversité, peuvent en être affectés. Bien que généralement marginal, ce problème pourrait devenir plus récurrent dans certaines régions avec le changement climatique, notamment lorsque ces ressources en eau alimentent aussi des activités humaines (irrigation, eau potable, loisirs) qui peuvent entrer en concurrence avec les besoins du



milieu aquatique et même entre elles. Comme les arbres suivant leur position et l'orientation du lit peuvent aussi contribuer à l'ombrage du cours d'eau, la gestion de la végétation doit intégrer l'ensemble des facteurs évoqués et peut être spatialement variable.

Autres enjeux et aménagement du territoire

Récupération de la biomasse pour l'énergie

Dans le contexte actuel de développement des énergies renouvelables, le broyage d'une quantité significative de végétaux ligneux et d'arbres sur des digues de grandes dimensions pourrait donner lieu à la récupération des résidus ligneux pour la production d'énergie. Bien que marginale en gestion courante, cette production peut être envisagée lors de la remise à niveau de certains ouvrages, ou si on procède à des rotations spatiales de broyage sur plusieurs années. Ce type d'exploitation doit cependant tenir compte des enjeux de biodiversité éventuels de l'ouvrage afin de ne pas contredire les bonnes pratiques mises en œuvre par ailleurs.

Risques d'incendie

Dans les zones soumises au risque d'incendie, la gestion de la végétation des digues doit s'intégrer dans les plans de prévention à l'échelle du territoire (généralement échelle intercommunale). Une digue herbacée représente potentiellement



Figure 4.20. Un tapis herbacé sec ou des débris de broyage sont très inflammables et forment un combustible idéal en période de risque d'incendie, même si le feu n'y développe pas de fortes intensités (ph. C. Tailleux).

une excellente coupure de combustible (pare-feu) dans des milieux plus boisés, surtout si elle s'adosse à un canal ou un cours d'eau. Mais la gestion de la digue doit tenir compte de la végétation des zones voisines et des enjeux humains à proximité. En période estivale, un tapis herbacé sec est très inflammable, en particulier s'il a été fauché peu avant : même si le feu ne peut y prendre une forte puissance, il peut s'y propager rapidement et surtout y démarrer (fig. 4.20). Les zones fortement fréquentées par le public et la proximité de routes ou d'habitations constituent des lieux privilégiés de départ de feu.



Avec le changement climatique, le risque d'incendie ne peut que s'accroître dans les zones qui y sont actuellement soumises, et il pourrait s'étendre dans des zones jusque-là épargnées. Il peut y avoir une contradiction entre le rôle de corridor écologique d'une végétation de digue et de berge voisine, et le rôle de transmission potentielle du feu dans les zones à risques d'incendie. Dans ce contexte, l'entretien des ouvrages au titre de la DFCI devra plutôt s'orienter vers un entretien régulier pour limiter la quantité de combustible, plutôt que de l'entretien à intervalle long, qui implique des travaux lourds, plus coûteux, et potentiellement plus impactants sur l'environnement (ex. : pâturage au lieu de broyeur à marteaux).

Mortalité des arbres en cas de sécheresse

Les arbres et arbustes habitués à avoir de l'eau en abondance et durant une grande partie de l'année sont les plus sensibles à une éventuelle sécheresse exceptionnelle. Anticiper un épisode de sécheresse fait partie des bonnes pratiques de gestion de la végétation des digues. Ce point est d'autant plus important que le changement climatique devrait conduire à une plus grande fréquence des sécheresses intenses, même si la quantité de pluie annuelle ne change pas ou augmente (fig. 4.21).



Si on a le choix dans la conservation des espèces, on peut donc miser en priorité sur les espèces les plus résistantes. Dans tous les cas, il vaut mieux miser sur les arbres les mieux adaptés au climat local que sur des espèces situées

Figure 4.21. Le risque de mortalité des arbres et arbustes avec le changement climatique est réel dans les décennies à venir. Le bois mort constitue cependant un foyer privilégié de biodiversité, qu'il faut préserver autant que le permettent la sécurité des ouvrages et des personnes (ph. M. Vennetier).

en limite de leur aire climatique. Si on a des espèces qui risquent de ne plus être adaptées au climat futur (par exemple chêne blanc dans la zone méditerranéenne à basse altitude, pin sylvestre à basse altitude dans toute la France...), on peut favoriser des espèces plus adaptées au futur. L'adaptation des espèces prenant en compte non seulement le climat mais aussi le type de sol et l'accès permanent ou temporaire à des ressources en eau, on ne peut pas donner de règle générale, chaque cas devant être étudié par une personne compétente (forestier, écologue).



RECOMMANDATIONS DE GESTION CURATIVE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES BOISÉS

On rappelle ici, une fois encore, qu'en dehors de certains ouvrages de grandes dimensions ou d'ouvrages bénéficiant de dispositifs d'étanchéité de type écran interne rigide (palplanches, parois moulées), la présence d'arbres est fortement déconseillée sur les barrages et digues en remblai. Les risques liés aux arbres ne sont pas éliminés si les ouvrages ne disposent que d'une étanchéité amont ou côté rivière, par dalles en béton ou parement bitumineux, qui sont vulnérables aux racines et aux crues. Si le risque lié aux arbres est généralement proportionnel à leur nombre, leur taille et leur âge, il n'y a pas besoin d'un grand nombre d'arbres pour que le risque soit élevé dans certaines situations. De façon générale, on verra dans le cours de ce sous-chapitre que le coût des travaux curatifs est très élevé : il est donc préférable dans tous les cas de ne pas laisser s'installer ou se développer les arbres, plutôt que d'avoir à les éliminer et à renforcer l'ouvrage plus tard.

Entretien curatif de la végétation

Le traitement curatif de la végétation arborée réalisé dans le cadre d'un confortement sera abordé dans la deuxième partie de cette section (p. 144). Il y sera mis, en regard de chaque cas, en fonction de la position et de la taille des arbres, les risques encourus et la technique de génie civil envisagée.

Dans la présente section, nous n'abordons donc que la gestion de la végétation arborée en attente d'un traitement réparateur (p. 138), et le traitement de la végétation arbustive ou herbacée haute (p. 142). Un point est fait malgré tout dans le paragraphe suivant sur le mode d'extraction des arbres, qui est générique pour l'ensemble de ce chapitre.



Le traitement des arbres indésirables comporte très généralement trois phases : (1) couper ces arbres, (2) purger immédiatement ou le plus rapidement possible le remblai, en éliminant la souche et les grosses racines, voire l'ensemble des racines (fig. 4.22), et (3) rétablir par des travaux de génie civil les caractéristiques souhaitées de la partie d'ouvrage concernée : étanchéité, drainage ou résistance mécanique (fig. 4.23).

Il est cependant fréquent qu'il faille maintenir les arbres en vie provisoirement, entiers ou après les avoir coupés ou élagués : en attendant des études qui seraient indispensables pour choisir les techniques de confortement les plus adaptées, parfois les autorisations

administratives indispensables, ou le temps d'obtenir les moyens financiers de la remise en état de l'ouvrage hydraulique. En effet, couper et tuer des arbres poussant sur une digue ou un barrage, lorsque l'ouvrage ne peut tolérer leur présence, permet de limiter certains risques et notamment certaines formes d'érosion externe, résultant du basculement de l'arbre ou de turbulences (fig. 4.24). Mais en contrepartie, cela crée ou accentue les risques d'érosion interne et d'instabilité de talus liés à la décomposition du système racinaire, moins perceptibles mais tout aussi dangereux à terme. Les résineux, qui ne rejettent pas de souche et sont donc tués par une coupe près du sol, posent d'autres problèmes que les feuillus qui rejettent.

On ne connaît pas précisément le temps qu'il faut pour qu'une souche et des racines en décomposition deviennent dangereuses pour un ouvrage hydraulique. Cela dépend d'une combinaison de nombreux facteurs comme la taille de l'ouvrage, le type de matériaux, la taille et l'espèce d'arbre, le type de système racinaire, le climat, l'humidité du



Figure 4.22. Arrachage d'un arbre avec une grande partie de son système racinaire qui a été préalablement dégagé (ph. C. Zanetti).



Figure 4.23. Réfection du talus et de la crête de digue, après élimination des arbres dangereux : régularisation de la pente, apport local et tassage de matériaux (ph. C. Zanetti).



Figure 4.24. Contrôle de la taille des arbres par une coupe régulière (traitement en taillis). (a) les rejets des arbres coupés sont petits par rapport à la souche, ce qui limite les risques d'arrachement. Mais la souche et certaines racines continuent de grossir en diamètre et en profondeur (ph. C. Ripert). (b) Lorsque les rejets ne suffisent pas à nourrir de grosses souches coupées plusieurs fois successivement, ou si on a coupé des arbres déjà gros, le cœur de la souche et certaines racines meurent et se décomposent malgré la survie de la périphérie de la souche (ph. C. Ripert).

site, la présence de pathogènes (champignons, insectes) qui varient avec l'environnement végétal, l'histoire du site, etc. Les expériences réalisées à ce jour sur digue (cf. chapitre 1) montrent qu'au bout de quatre à six années, certaines petites racines peuvent être entièrement décomposées, et certaines grosses racines largement entamées.

Si on a la certitude que les travaux de confortement interviendront seulement quelques années (moins de 5 ans) après la coupe et la mort des arbres, les souches pourront être laissées en place jusqu'à ces travaux pour éviter des frais de remise en état après arrachage, qui seraient inutiles dans ce cas. Au-delà, on prend un risque évident.

Maintien temporaire d'une végétation arborée

Pour le maintien provisoire d'arbres indésirables sur un ouvrage hydraulique, deux limites critiques sont à considérer, qu'elles soient exprimées en hauteur, diamètre ou âge, ou par une combinaison de ces trois paramètres :

- une limite basse au-dessous de laquelle on considère que les arbres ne posent pas encore un problème de sécurité à court terme ou potentiel. Elle impose une surveillance et une gestion anticipatrice afin qu'ils ne dépassent pas cette limite ;
- une limite haute au-dessus de laquelle il n'est pas possible de les garder, même provisoirement, ce qui impose leur élimination immédiate.

Entre ces deux limites, on considérera que les arbres peuvent être conservés et gérés temporairement.

Un certain nombre d'autres facteurs comme l'état sanitaire des arbres,



leur position sur l'ouvrage ou la berge, la menace qu'ils font peser sur des aménagements annexes de l'ouvrage (drains, ouvrages traversants) ou sur le public (routes, sentiers), ou encore leur inclinaison (ou port déséquilibré), doivent aussi être pris en compte pour décider de l'urgence absolue ou non de les couper, ou de s'en débarrasser et d'éliminer la souche.

En attendant les travaux de réfection ou confortement de l'ouvrage, on devra donc à la fois :

- éliminer les arbres de petite taille, qui n'imposent pas encore de travaux lourds de remise en état ou d'arrachage de souche, pour éviter qu'ils n'atteignent une taille critique et limiter les coûts futurs ;
- éliminer les arbres les plus gros et les plus dangereux, s'il y en a, pour limiter les risques immédiats (fig. 4.25) ;
- gérer le reste du peuplement en limitant du mieux possible les risques résiduels.



Figure 4.25. Abattage d'un gros arbre en pied de digue (ph. C. Ripert).

Pour les arbres qui rejettent de souches, la coupe constitue le moyen habituel de diminuer les risques d'érosion externe : elle limite la prise au vent, la pression de l'eau en cas de crue et le poids de l'arbre. Les risques de déracinement ou de déstabilisation des pentes sont donc réduits. Elle maintient en vie au moins partiellement le système racinaire et la souche.

Pour les résineux qui ne rejettent pas, ou quand on souhaite conserver des feuillus d'une taille significative, on peut obtenir un résultat similaire avec un étêtage ou un élagage important. Attention cependant à ne pas traiter trop violemment les résineux, qui ne survivent que s'ils conservent un certain pourcentage de leur surface foliaire, variable avec les espèces : en général au moins 30 %. Les feuillus sont également plus ou moins sensibles à ces élagages, particulièrement quand ils vieillissent, et certains demandent des techniques spécifiques de taille pour garder leur vitalité. Le recours à des spécialistes est nécessaire. Le coût d'un élagage ou d'un étêtage est en général beaucoup plus élevé qu'un simple abattage, ce qui limite leur usage à des cas particuliers, en présence d'enjeux paysagers ou sociaux importants.



Les choix de gestion du peuplement conservé dépendent à la fois de la densité, de la composition et de la taille des arbres.

Les arbres isolés ou à faible densité peuvent être traités au cas par cas, indépendamment les uns des autres : coupe, élagage, conservation en l'état.

Dans les peuplements plus denses, la gestion doit prendre en compte le type de peuplement, l'interaction entre les arbres et l'interaction entre les arbres et le reste de la végétation.

Il est parfois possible de traiter l'intégralité du peuplement en taillis, en coupant tous les arbres s'ils rejettent, quelle que soit leur taille. Cette solution est très simple, mais n'est cependant pas toujours envisageable pour des raisons de coût, d'environnement ou d'acceptation sociale. Elle peut aussi poser un sérieux problème de surveillance dans les années suivantes si on n'a pas les moyens d'entretenir intensément les zones traitées : en cas de peuplement très dense, les rejets vont rapidement couvrir le sol et empêcher l'inspection visuelle pendant plusieurs années. S'il existe une végétation arbustive – en particulier des plantes invasives –, celle-ci peut devenir très vigoureuse grâce à la mise en lumière avec, là encore, une gêne importante et durable à la surveillance. Enfin, une coupe forte favorise la régénération par graines ou drageons des arbres héliophiles, à croissance très rapide, comme les peupliers et les saules. On peut donc accentuer les problèmes futurs.

Si on n'applique pas un traitement systématique, plusieurs options sont possibles :

Si le peuplement est hétérogène, au niveau de sa composition ou des dimensions des arbres, une première contrainte sera de tenir compte des limites inférieures et supérieures de taille ou d'âge définies pour la conservation des individus, et des situations d'urgence induites par d'autres critères (position, état sanitaire, inclinaison...). Cela peut conduire à couper rapidement une grande partie du peuplement, ou au contraire ne représenter qu'une contrainte mineure portant sur quelques individus. S'il reste un choix pour les arbres à couper, on devra tenir compte des espèces. On pourra alors conserver en priorité celles qui ont une croissance lente ou restent de taille limitée. On pourra aussi favoriser les arbres donnant un bois précieux ou de qualité s'ils sont exploitables (érables, frênes, ormes, chênes) aux dépens d'espèces moins valorisables.

Si le peuplement est homogène et monospécifique, on devra tenir compte des mêmes contraintes de taille, d'âge et de position des arbres. Si on n'est pas dans les catégories qui imposent une élimination rapide, on pourra choisir entre différents systèmes de gestion en fonction des



autres contraintes (paysagères, écologiques, physiques, végétation arbustive, plantes invasives) qui peuvent conduire soit à éclaircir le peuplement existant en lui conservant une certaine homogénéité, soit l'irrégulariser progressivement, soit le traiter en taillis par zones successives alternant dans l'espace, de ces deux derniers traitements pouvant avoir un intérêt écologique (cf. p. 123).

Quelques particularités des arbres ne doivent pas être oubliées, quelle que soit la gestion adoptée :

Parmi les feuillus, toutes les espèces ne rejettent pas aussi vigoureusement. La capacité de rejet diminue en général avec l'âge chez toutes les espèces, mais plus chez certaines. Sur les gros arbres et sur les vieux, les rejets ne permettent pas la survie de l'intégralité de la partie souterraine : une partie des racines et de la souche va mourir. On observe fréquemment la décomposition du cœur de la souche, la partie extérieure restant vivante grâce aux rejets qui se développent en périphérie.

Le développement racinaire des souches émettant des rejets peut être limité en éliminant systématiquement, et plusieurs fois par an, toutes les parties aériennes. Cela empêche la photosynthèse et donc la production de bois. Toutefois, un tel « matraquage » se révèle fastidieux si le nombre de souches à traiter régulièrement est élevé. Il faut de nombreuses années pour venir à bout d'une souche vigoureuse pour certaines espèces, qui peuvent survivre en rejetant aussi des racines (peupliers, robiniers).

Les arbres qui ont poussé en peuplement dense ne doivent pas être trop éclaircis sous peine d'être fragilisés. Lorsque le rapport entre le diamètre et la hauteur est faible, ces arbres peuvent plier ou se pencher fortement au premier coup de vent après la coupe. D'autre part, leur système racinaire est moins étendu que celui d'arbres ayant poussé isolés ou à faible densité, et ce système est souvent déséquilibré à cause de la concurrence entre arbres. Le risque de déracinement est donc fort si on les isole.

À l'inverse, les arbres isolés ou en lisière sont naturellement plus résistants au vent, même s'ils présentent une plus grande prise au vent, car leur système racinaire s'est adapté à cette situation en développant des racines traçantes destinées à les haubaner. Là encore, la modification de l'environnement peut être néfaste à leur survie, car s'ils sont particulièrement résistants aux vents venant du côté de la lisière, ils le seront moins à des vents venant d'une autre direction après ouverture du peuplement. La gestion des arbres de lisière en bordure de rivière



ou de canal est à ce titre particulière, notamment quand le système racinaire ne présente aucun développement du côté de l'eau.

Dans certains cas, et afin d'étaler les travaux dans le temps pour des raisons financières, paysagères (attente de la croissance d'arbres plantés ou choisis en substitution hors de l'emprise de la digue ou du barrage), environnementales (conservation ou reconstitution d'habitats de substitution pour les espèces animales présentes) ou sociales (acceptation progressive du nouvel état), on peut réaliser les opérations de génie civil décrites plus loin (Travaux de confortement p. 144) au fur et à mesure des coupes d'arbres lors des éclaircies. Dans ce cas, il est nécessaire de veiller à ce que le dessouchage de certains arbres ne déstabilise pas les arbres maintenus : quand le peuplement est assez dense, les racines des arbres voisins sont imbriquées. Pour certaines espèces qui drageonnent (peupliers, robiniers), les arbres voisins peuvent même avoir des racines communes de grande taille. L'élimination des racines d'une souche qu'on enlève peut alors affaiblir les arbres aux alentours.

Quel que soit le mode de gestion choisi, il est nécessaire d'assurer la traçabilité précise des travaux de coupe et de génie civil réalisés lors de la phase de gestion transitoire du peuplement. Il est notamment important de noter précisément l'emplacement des arbres les plus gros ou les plus dangereux qui ont été coupés, la densité des peuplements initiaux s'ils étaient homogènes et la taille des arbres. L'emplacement des souches doit être repéré (piquetage pérenne ou GPS de précision) si on ne les enlève pas tout de suite. En cas de retard des travaux de reprise et de confortement de l'ouvrage, qui peuvent n'intervenir que longtemps après, il peut devenir impossible de les repérer. Même en cas de confortement, la présence ancienne de très grosses souches, dont il aura été difficile d'extraire intégralement les racines, doit être mémorisée puis surveillée.

Traitement d'une végétation arbustive dense

Une végétation arbustive dense (ou un roncier épais) a pour principal inconvénient de gêner la surveillance visuelle des ouvrages, que ce soit par le couvert qu'elle procure ou en limitant les déplacements (fig. 4.26). Elle peut aussi favoriser l'installation de fousseurs, attirés par la tranquillité que procure cet abri.

Les arbustes communs sur les ouvrages hydrauliques français métropolitains (aubépines, églantier, cornouiller, genêts, viornes, cytises...)



n'ont pas de système racinaire suffisamment développé, ni de racines assez grosses, pour avoir les inconvénients des arbres en termes d'érosion interne ou externe. Ils jouent quand même un rôle globalement positif sur la stabilité des talus d'ouvrages hydrauliques



ou de berges. La plupart sont intéressants écologiquement par leur production de fleurs mellifères et de fruits, et l'abri ou cache qu'ils offrent pour certains oiseaux nicheurs, amphibiens ou reptiles. Par contre, côté rivière, lorsqu'ils forment des bouquets denses et isolés, de quelques mètres de hauteur ou d'envergure, ils peuvent provoquer des tourbillons néfastes et érosifs s'ils sont noyés en période de crue.

Figure 4.26. Fourré arbustif dense mêlé de petits arbres ayant envahi un enrochement sur le talus amont d'une digue. L'entretien est difficile à cause des blocs qui gênent le passage d'un engin et l'emploi d'un broyeur classique (ph. M. Vennetier).

Un simple broyage régulier suffit en général à contenir une végétation arbustive. En partant d'une situation de forte densité sur des surfaces significatives, une fréquence élevée du broyage pendant quelques années permet d'affaiblir ou de faire disparaître suffisamment d'individus pour revenir à une situation acceptable de buissons dispersés sur pelouse herbacée. On peut aussi au départ utiliser un engin de broyage qui travaille le sol superficiellement pour éclater les souches de ces arbustes et leurs racines superficielles, la plupart n'y survivant pas. Il faut dans ce cas faire attention aux impacts potentiels sur la faune, notamment amphibiens et reptiles (cf. p. 119).

Une autre option consiste à travailler sélectivement pour les espèces les plus hautes procurant une ombre assez dense et couper les autres individus. Cela peut permettre par endroits, sur des surfaces limitées en largeur, de former un couvert haut qui facilite l'examen visuel et la circulation en contrôlant la repousse d'espèces moins désirables (notamment certaines invasives).

Si la croissance des arbustes n'est pas trop rapide, et si les contraintes de sécurité le permettent, on peut aussi réaliser des broyages en mosaïque tournante, sur environ 1/3 de la surface chaque année. D'un point de vue écologique, c'est suffisant pour permettre une floraison et une fructification de la plupart des espèces sans qu'à aucun moment la vé-



gétation en devienne trop dense pour l'examen visuel, ou pour abriter des animaux fouisseurs. C'est également suffisant pour limiter l'installation et la croissance de la plupart des arbres qui pourraient se développer dans ces fourrés. Le rythme des rotations est cependant à adapter à chaque cas en fonction de la vitesse de croissance et des espèces.

Comme on l'a vu précédemment pour la gestion des arbres et arbustes, la présence de plantes arbustives invasives, de type renouée du Japon ou buddleia, ou encore de la canne de Provence dans le sud de la France, impose des traitements particuliers. Ces plantes peuvent former des peuplements très denses et parfois assez hauts (plusieurs mètres). On se reportera à des publications spécifiques pour la lutte contre ces espèces : fréquence élevée des coupes ou broyages, bâchage après coupe, utilisation dans certains cas de phytocides bien que cette pratique se heurte à de nombreuses contraintes, notamment à proximité des milieux aquatiques, etc.

Ces plantes étant toutes des héliophiles, les priver de lumière ou les soumettre à une forte concurrence sont le meilleur moyen de limiter leur prolifération et leur développement, à défaut de pouvoir les éliminer. Cette pratique, fréquemment mise en œuvre sur les berges et ségonaux, est rarement applicable à long terme sur les talus de digue, bien qu'elle puisse entrer dans un plan de gestion d'attente ou de transition.

Travaux de confortement

Si une expertise ou une étude relative à un ouvrage hydraulique en remblai vient à montrer que la présence d'arbres – actuelle ou passée – porte significativement atteinte à sa sécurité, il est alors nécessaire de conforter l'ouvrage par génie civil, pour rétablir son niveau de sûreté initial (celui d'avant le développement de la végétation arborée), voire pour l'augmenter.

Le développement non maîtrisé d'arbres de haute tige est, en général, le propre des ouvrages hydrauliques mal entretenus, voire mal conçus (certains aménagements ont, en effet, été plantés à la construction !¹). L'expérience montre que de tels ouvrages souffrent souvent d'autres pathologies (ex. : hétérogénéité des sols du remblai, profil de crête irrégulier, ouvrages traversants sauvages et/ou à l'abandon, érosions non traitées, etc.) que les seules directement imputables à la présence de végétation arborée. Les travaux de confortement nécessaires devront

¹ Cas de la digue de canal hydroélectrique de Cusset à la fin du XIX^e siècle, plantées de robiniers faux acacia.



alors répondre à plusieurs objectifs fonctionnels. Cette dernière situation est classiquement rencontrée dans le parc des ouvrages hydrauliques anciens, au remblai de surcroît souvent hétérogène du fait de techniques de construction initiale plus ou moins rustiques : soit typiquement les digues de protection ou de vieux canaux de navigation ou d'irrigation, et les (petits) barrages d'étang que l'on trouve en grand nombre sur le territoire français.

Dans tous les cas, en préalable à une quelconque intervention lourde de génie civil, une étude de diagnostic approfondi de la digue ou du barrage concerné est indispensable dans le triple objectif :

- de relever toutes les pathologies dont souffre l'ouvrage, qu'elles soient imputables ou non aux arbres ou à leurs racines ;
- d'identifier les scénarios de dégradation, leurs interrelations, leur degré d'avancement et leur vitesse d'évolution ;
- d'élaborer une stratégie de confortement priorisée en fonction de la gravité des désordres et des risques qu'ils engendrent.

Du diagnostic approfondi préalable aux principes de confortement

Digues de protection

Pour les digues de protection, le guide Cemagref (Lino et al. 2000) ¹ a été l'un des premiers ouvrages techniques français à poser les fondements d'une méthodologie de diagnostic approfondi, qui propose un travail en neuf principales étapes rappelées ci-dessous :

- approche historique ;
- géomorphologie fluviale ;
- topographie ;
- étude hydraulique (et hydrologique) ;
- examen visuel détaillé ;
- reconnaissances géophysiques et géotechniques ;
- modélisation : hydraulique (interne) et mécanique ;
- étude des risques liés aux brèches ;
- étude des solutions de confortement.

Plus récemment (2012), le guide international sur les ouvrages hydrauliques ILH ² reprend sur le fond la plupart de ces concepts en les ap-

¹ Ciria 2013. Version électronique en diffusion libre sur simple demande à Irstea.

² Version électronique téléchargeable sur le lien : <http://www.ciria.org/service/ILH> download, ou version papier à commander sur le lien : <http://www.ciria.org/service/ILH>



profondissant, d'après les éléments mondiaux modernes de connaissances et de pratiques.

On retiendra de ces guides techniques que la complexité des interactions qu'entretient une digue avec son environnement impose une approche complète et pluridisciplinaire pour garantir l'exhaustivité de son diagnostic.

En tant qu'élément initiateur de dégradation – voire de défaillance – des digues, la végétation arborée se développant sur les ouvrages ou dans leur environnement proche doit, bien sûr, être intégrée dans les différentes étapes de ce diagnostic :

- lors de l'étude historique, on n'omettra pas de collecter aussi des informations sur l'éventuel état passé de boisement de la digue ou sur les dernières coupes ou interventions d'entretien forestier qui ont eu lieu (date, localisation, modalités...) ;
- dans l'étude géomorphologique, on tient compte des embâcles et de leurs impacts potentiellement défavorables sur la digue (courants agressifs, surélévation locale de la ligne d'eau...). Les embâcles peuvent résulter entre autres : de la chute de grands arbres au port instable qui se seraient développés sur les berges, de l'effet « piège à flottants » constitué par des arbres poussant dans le lit ou dans l'espace entre le pied de digue côté rivière et la berge, du colmatage de barrages perméables constitués d'arbres par des débris végétaux denses, comme peuvent en fournir certaines plantes herbacées ou arbustives qui envahissent les berges et digues et risquent d'être arrachées en masse (canne de Provence, renouée...) ;
- la modélisation hydraulique doit prendre en compte la nature et le stade de développement de la végétation arbustive et arborescente qui influencent la rugosité (coefficient de Strickler) du périmètre mouillé du lit endigué et, par voie de conséquence, les vitesses d'écoulement et la hauteur de la ligne d'eau : par exemple, un lit rugueux, parce que boisé, ralentit le courant lors des crues (effet favorable vis-à-vis du risque d'érosion externe) mais surélève la ligne d'eau (effet défavorable vis-à-vis du risque local de surverse) ;
- l'examen visuel s'attachera à repérer et à caractériser – voire à inventorier – la végétation ligneuse poussant sur la digue ou à sa proximité ; les techniques Lidar aéroportées haute résolution peuvent s'avérer d'un grand secours à ce titre (cf. Vennetier et al. 2010, et encadré ci-dessous) ;



- la nature, la structure, la répartition et l'état de cette végétation font partie des paramètres physiques à prendre en compte, en complément notamment du gradient hydraulique, pour le découpage de la digue en tronçons – découpage permettant de discriminer des parties d'ouvrage homogènes quant à leur exposition aux aléas de dégradation et aux travaux de confortement aptes à les circonscrire (cf. section 5.3.6 de *Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai*, guide final du programme national de recherche Erinoh, tome 2, sous presse) ;
- les solutions de confortement doivent être imaginées de façon à englober le traitement de la végétation ou à en prévenir les effets indésirables par le choix de variantes d'ouvrage adaptées (ex. : paroi moulée plutôt que noyau d'argile) ;
- etc.

Barrages et digues de canal

Pour les barrages et les digues de canal, la démarche de diagnostic approfondi est également pluridisciplinaire, mais un peu moins complexe ou lourde – à hauteur d'ouvrage équivalente – que dans le cas des digues de protection grâce à :

- l'absence de contraintes géomorphologiques imposées par le cours d'eau (ne pas oublier, cependant, qu'il reste des contraintes hydrauliques issues de la retenue ou du bief : vagues dues au vent ou au trafic fluvial, vitesse du courant dans le bief, etc.) ;
- une dimension longitudinale relativement courte (moins de 300 m en général) pour le cas des barrages.

Le lecteur pourra se référer aux ouvrages techniques suivants qui traitent du diagnostic des barrages ou des digues de canal :

- *Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens*¹, coord. G. Degoutte, Cemagref éditions, 1992 ;
- *Vieillessement et réhabilitation des petits barrages en terre*², D. Lautrin, Cemagref éditions, 2003 ;
- *Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai*, D. François coord., Presse des Ponts (sous presse), tome 2.

¹ Version électronique en diffusion libre sur simple demande à Irstea.

² Version électronique en diffusion libre sur simple demande à Irstea.



Le Lidar aéroporté haute résolution : un outil efficace pour contribuer à la caractérisation de la végétation ligneuse

Le Lidar (Light Detection And Ranging) aéroporté permet d'acquérir des données topographiques sous la forme de nuages de points 3D géoréférencés. Cette technique d'acquisition par balayage laser est aujourd'hui utilisée de façon assez courante dans le domaine de l'hydraulique pour étudier la topographie :

- du lit majeur des fleuves et rivières : le système est alors transporté par avion et vise le sol, des bandes de terrain de plusieurs centaines de mètres de largeur sont scannées en un seul passage et les précisions obtenues en X, Y, Z sont décimétriques à pluridécimétriques, avec une densité de l'ordre de 1 à 5 points/m² (ce qui s'avère suffisant pour construire un MNT exploitable, par exemple, dans des modèles hydrauliques de propagation des crues ou des inondations) ;
- des digues de protection contre les inondations où, compte tenu de la relativement faible hauteur de ces ouvrages, une précision plus grande est recherchée : centimétrique à pluricentimétrique, avec une densité sur-sol (avant interception par des éléments hors sol, tels que la végétation) de plusieurs dizaines de points par m². On déploie alors des systèmes héliportés haute résolution, évoluant à basse altitude (100 à 300 m) et à faible vitesse.

Le Lidar aéroporté sert d'abord, comme tout système d'acquisition topographique, à construire un modèle numérique de terrain (MNT) et des modèles numériques d'élévation (MNE) des territoires survolés et à élaborer des plans et profils topographiques des aménagements présents ou de leurs emprises. Il est bien adapté aux ouvrages ou aux infrastructures à long linéaire (voies ferroviaires, lignes électriques...) du fait de son mode de levé en « corridors » et de son haut rendement in situ.

Il se révèle aussi particulièrement intéressant pour le levé des digues de protection (Mériaux et al. 2013 ¹), notamment celles où la présence de végétation arborescente ou arbustive envahissante gêne – et donc rend coûteux – le travail ou la progression des équipes de topographes terrestres en levé traditionnel. À condition de faire appel à une technique à très haute densité (> 50 points/m²), le Lidar permet non seulement de s'affranchir – au moins partiellement – de la « perte » de points résultant de l'iné-

Le volet « végétation ligneuse » est à intégrer dans ces démarches de diagnostic avec le même esprit que dans le cas des digues de protection, vu à la sous-section précédente.



vitale interception par le couvert végétal (i.e. un nombre suffisant de points « arrivent » au sol pour s'assurer de la qualité du futur MNT), mais aussi de caractériser (identification, stratification, hauteurs des arbres, cartographie...) la végétation ligneuse elle-même grâce à un traitement adéquat des points que celle-ci justement intercepte (fig. 4.27 et Venetier et al. 2010²). À l'appui des images aériennes haute résolution, que certains opérateurs proposent en complément du levé laser, le Lidar hélicopté haute densité peut ainsi devenir un outil précieux pour contribuer à une démarche d'inventaire forestier sur digue, nécessaire en préalable à l'élaboration d'un plan de gestion.

Pour être pleinement valorisées, les solutions Lidar haute résolution nécessitent toutefois des compétences spécifiques en traitement et analyse de données, ainsi que des moyens informatiques puissants avec capacités de stockage et de sauvegarde appropriées.



Figure 4.27. Caractérisation en coupe et en plan de la végétation de bord de digue à l'aide des outils Lidar (© Irstea et Fugro, source : projet Flimap digues, ph. P. Mériaux).

- 1 Mériaux P., Auriou L., Maurin J., Boulay A., Lacombe S., Marmu S., 2013. « La télédétection LiDAR hélicoptée haute résolution, un outil efficace pour étudier la topographie et contribuer au diagnostic des digues de protection », colloque CFBR *Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions*, 12-14 juin 2013, Aix-en-Pce.
- 2 Venetier M., Mériaux P., Buset F., Félix H., Lacombe S., 2010. Apport de la télédétection Lidar aéroporté haute définition pour la caractérisation de la végétation des digues. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 191: 36-41.

Principes de confortement vis-à-vis des mécanismes de dégradation ou de rupture (tous ouvrages hydrauliques en remblai)

Le tableau 5 présente de manière simplifiée les options de confortement envisageables face aux quatre principaux mécanismes de dégradation ou de rupture auxquels sont exposés les ouvrages hydrauliques et dans lesquels la présence – actuelle ou passée – de végétation arborée est susceptible d'intervenir.



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

Tableau 5. Options de confortement des ouvrages en fonction des risques créés par la végétation

Par la suite et à l'appui de ce tableau, nous abordons successivement :

- les confortements visant à circonscrire ou prévenir un risque d'érosion interne :
 - rétablissement global de l'étanchéité (p. 151) ;
 - création ou rétablissement du drainage-filtration (p. 155) ;
 - interventions sur arbres épars ou isolés (p. 157) ;
 - interventions sur une conduite ou un puits (p. 162) ;
 - interventions en crue pour les digues (p. 162) ;
- les confortements visant à traiter un mécanisme d'érosion externe (p. 163) ;
- les confortements visant à traiter un mécanisme d'instabilité (p. 164) ;
- les confortements visant à limiter le risque de surverse (p. 165).

Enfin, le cas des ouvrages soumis à étude de dangers est abordé p. 166.



Travaux de rétablissement global de l'étanchéité

Partant du constat que la végétation arborescente a, du fait du développement racinaire, dégradé de façon irréversible l'étanchéité du remblai, le principe de confortement, abordé ici, est de la rétablir. On exclut de ce chapitre l'option de reprise totale du remblai, qui revient à reconstruire l'ouvrage, ce n'en est pas l'objet. Il faut cependant noter que c'est parfois le choix le moins coûteux à efficacité donnée, et en outre on peut en profiter pour reculer une digue trop proche du cours d'eau. On exclut aussi les options d'injections dans le sol par forages (coûteuses, et aux résultats aléatoires). Nous développons donc ci-après les techniques envisageables de confortement consistant à construire dans la digue ou le barrage une partie d'ouvrage à fonction d'étanchéité.

Paroi moulée

Il s'agit d'une paroi plus ou moins étroite, de 15 à 60 cm d'épaisseur, créée depuis la crête de l'ouvrage, à son axe ou vers l'amont (côté retenue ou cours d'eau), et remplie d'un matériau étanche après sa prise (coulis de ciment ou de bentonite-ciment, mélange sol-coulis...). La fonction d'étanchéité devant être prolongée en fondation, la profondeur de la paroi dépasse la hauteur utile de l'ouvrage, idéalement de façon à ce que son extrémité basse puisse s'ancrer dans un horizon étanche. Selon la configuration topographique de l'ouvrage (largeur en crête, hauteur) et la granulométrie du remblai et de sa fondation, différentes techniques s'appliquent, soit à profondeur croissante de traitement : paroi creusée à la pelle mécanique à bras rallongé (jusqu'à 7 m), paroi mince (injections sécantes par fer profilé, foncé dans le sol), soil- ou trench-mixing Solétanche, paroi épaisse creusée à la berlinoise (fig. 4.28).

Figure 4.28. Création d'une paroi moulée épaisse à la berlinoise sur une digue d'aménagement hydroélectrique et un barrage (à gauche) et d'une paroi mince sur une digue de protection en Pologne (à droite) (photos P. Mériaux).





L'avantage de ce type de solution réside dans le fait qu'il ne nécessite pas de déboiser les talus de l'ouvrage. Seule l'emprise nécessaire au passage de l'engin de terrassement en crête doit être dégagée. Après création d'une paroi épaisse, le maintien de certains arbres pourrait même être toléré sur la digue ou le barrage, mais à plusieurs conditions : que leur gestion soit maîtrisée (notamment de façon à permettre la surveillance visuelle et à ne pas risquer l'endommagement de drains, de conduites ou d'ouvrages maçonnés) et qu'ils n'induisent pas d'autres risques (érosion externe, en particulier). Par contre, les parois minces (15-20 cm) ou à base de soil-mixing, du fait de leur faible épaisseur ou de leur constitution, doivent être considérées comme sensibles au risque de dégradation par les systèmes racinaires, au même titre qu'un ouvrage hydraulique en remblai classique.

Au chapitre des inconvénients des parois, on relèvera un coût élevé (de 80 à 400 euros/m²), à épaisseur ou profondeur croissante et, pour les digues de protection, la perturbation des relations nappe-rivière. De plus, la présence d'éventuels ouvrages traversants devant être conservés nécessite des sujétions particulières et délicates de chantier (injections complémentaires...) lors de la construction de la paroi et donc autant de surcoûts.

Rideau de palplanches

C'est une variante à la solution précédente. L'écran étanche est constitué par un rideau de palplanches métalliques battues, vibro-foncées ou véréinées (fig. 4.29). La technique est utilisable dans tous les matériaux fins et jusque dans des graviers. Les remblais comportant des blocs peuvent provoquer des refus. Bien que mince, l'ouvrage terminé présente a priori la même résistance mécanique qu'une paroi moulée épaisse vis-à-vis de la pénétration racinaire.

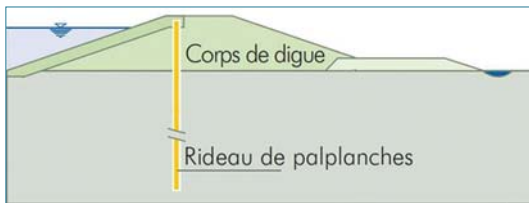


Figure 4.29. Exemple de digue à charge permanente avec étanchéité par palplanches (digue du Rhin) (source EDF, guide Erinoh, François D. coord., sous presse).

Recharge étanche côté cours d'eau ou retenue

Cette solution, classique, fait appel à des techniques relativement simples de terrassement. On apporte et on met en œuvre un massif de matériau étanche compacté (fig. 4.30) contre le talus côté cours d'eau de la digue ou côté retenue du barrage (après vidange).

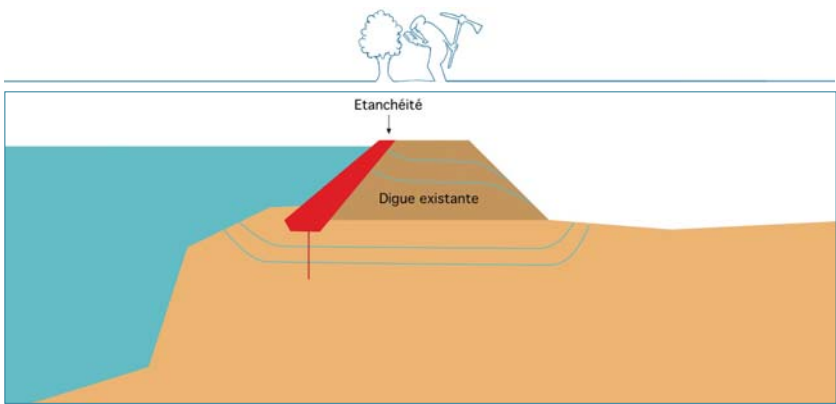


Figure 4.30. Coupe de principe d'une recharge étanche ancrée sur rideau d'étanchéité en fondation (figure R. Tourment, Irstea).

Créée pour une digue de protection, elle nécessite l'abattage des arbres (et leur dessouchage) et le décapage de la terre végétale sur l'ensemble du parement côté cours d'eau, mais aussi d'une bande de pied pour permettre la construction indispensable d'une partie d'ouvrage assurant le raccordement d'étanchéité avec la fondation (sabot étanche, para-fouille en béton, rideau de palplanches de pied, etc.).

Pour les barrages ou les digues de canal, la construction d'une recharge étanche nécessite la vidange totale de la retenue ou du bief afin de permettre la réalisation des travaux. Les éventuels abattages et dessouchages ne concerneront que la partie haute du parement amont, au-dessus du niveau d'exploitation, ou le bord amont de la crête.

De tels travaux de recharge peuvent être avantageusement couplés à des travaux de confortement mécanique (par exemple, protection contre l'érosion externe de la zone de battillage ou de l'ensemble du talus, stabilisation mécanique du parement par adoucissement de la pente). Leur mise en œuvre pour une digue de protection impose, par contre, de disposer d'une emprise minimale en pied côté cours d'eau, étant entendu que les matériaux étanches ont un angle de frottement interne faible qui nécessite une pente suffisamment douce du talus conforté (inférieure à 1/3 sans ouvrage de soutènement).

Après construction de la recharge, aucun arbre ne devra être toléré sur le talus côté retenue ou cours d'eau, ni sur la crête. Bien que proscrits sur le parement aval à moyen terme, certains arbres pourront y être tolérés un temps en partie haute, à condition que leurs dimensions soient raisonnables.

Masque ou perré jointoyé amont (côté cours d'eau ou retenue)

Dans cette solution, la structure d'étanchéité créée sur le parement amont est de type mince ou rigide (fig. 4.31) :



- dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG), protégée ou non sur sa face extérieure (option rarement choisie pour les digues de protection) ;
- masque en béton, béton armé ou béton bitumineux ;
- perré incliné de pierres ou d'enrochements jointoyés ou liés au béton ou au bitume ;
- mur en béton, en pierres ou en enrochements.

Ce type de structure est bien plus coûteux que la recharge en remblai étanche – de l'ordre de 200 à 400 euros/m² – mais présente l'avantage, à condition d'avoir été conçu et dimensionné à cette fin, d'assurer aussi une fonction de protection contre l'érosion externe. L'option « mur » est a priori la plus résistante à l'érosion externe mais est aussi la plus coûteuse, sachant que l'épaisseur de l'ouvrage doit être dimensionnée de façon à ce qu'il supporte la poussée des terres induite par le remblai : elle est à réserver aux cas des digues de protection en milieu urbain ou fortement sollicitées par le cours d'eau, telles que les digues de torrent ou de rivière torrentielle, et où l'on manque d'emprise côté cours d'eau.

Le raccordement avec l'étanchéité de la fondation est assuré par un parafouille en béton, un rideau de palplanches ou un niveau profond de fondation (mur), dont la hauteur devra aussi, si nécessaire, prendre en compte un risque potentiel d'affouillement en pied de parement par le cours d'eau ou le torrent.

La mise en œuvre des travaux impose l'abattage et le dessouchage de tous les arbres et arbustes et le décapage de la terre végétale du parement amont, ainsi que de son pied s'il s'agit d'une digue de protection. Après la construction, toute végétation ligneuse sera à éradiquer sur le masque ou le perré et ce, dès le stade « jeune pousse », en ayant conscience que les ligneux ont tendance à exploiter la moindre rugosité,

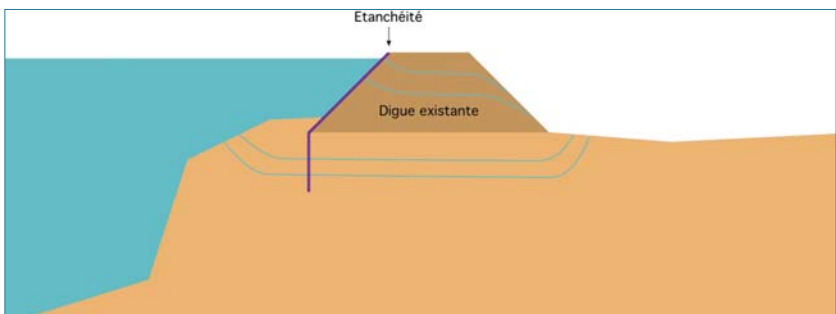


Figure 4.31. Coupe de principe d'une étanchéité mince (masque ou perré jointoyé) créée sur rideau ou parafouille en fondation (figure R. Tourment, Irstea).



ouverture de joint ou fissure à l'air libre pour s'installer et qu'une fois que les racines ont traversé le perré, l'intégrité de celui-ci peut être compromise de façon irréversible (cf. fig. 4.37 et 4.38 p. 161, 1.1 p. 18, 1.7 p. 32 et 3.13 p. 72). Pour prévenir les risques de destruction du haut de perré (et d'un éventuel muret pare-vagues ou garde-corps) par la pénétration



Figure 4.32. Mise en évidence de racines traçantes en sous-face de perré sur la digue du Reyran, suite à la crue de novembre 2011 (ph. G. Degoutte, Irstea/CGAER).

racinaire ou les chutes d'arbre, il convient de supprimer la végétation ligneuse en crête, avec dessouchage et reconstitution de remblai si des arbres existaient antérieurement aux travaux. Sauf dans le cas des murs, il est à recommander de supprimer aussi – a minima à moyen terme – celle du talus aval ou côté val : des cas avérés de développement racinaire en sous-face de perré amont, provenant d'arbres installés sur le talus aval, ont en effet déjà été constatés (fig. 4.32).

Travaux de création ou de rétablissement du drainage-filtration

Le principe du confortement est ici d'empêcher l'amorce d'un processus d'érosion interne, en contrôlant les écoulements internes par l'intermédiaire d'une association d'ouvrages filtrants et drainants. Attention, **écoulements contrôlés ne signifient pas écoulements stoppés** : en conséquence et à la différence des solutions de reconstitution de l'étanchéité décrites dans la sous-section précédente, les fuites ne seront pas épuisées après confortement. Cela peut rendre la solution réhabilitative pour les barrages où des pertes d'eau trop importantes compromettraient la pérennité de l'exploitation.

En cas de défaillance de l'étanchéité d'un ouvrage hydraulique en remblai et de risque avéré d'érosion interne, il n'est pas recommandé de terrasser en déblai sur le talus aval ou côté zone protégée pour créer des tranchées drainantes, car une telle disposition raccourcit les lignes de fuite et donc augmente le gradient hydraulique au droit de chaque drain. Aussi, la solution à privilégier est celle de la **recharge drainante** (et filtrante) qui nécessite toutefois, à la différence des tranchées drainantes, de disposer d'une largeur d'emprise suffisante en pied de parement aval ou côté zone protégée.



La recharge drainante offre plusieurs avantages :

- elle améliore aussi significativement la stabilité mécanique du talus rechargé et répond ainsi à un second objectif de confortement ;
- son coût est avantageux, s'agissant d'une solution tout terrassement, et peut être encore optimisé par l'utilisation de géocomposites drainants ;
- elle permet d'améliorer ou de créer des circulations de service sur l'ouvrage : élargissement de la crête ou création d'une risberme circulaire au milieu du talus.

Dans cette solution, le dispositif filtre doit être conçu et mis en œuvre avec soin car il conditionne l'efficacité de l'ouvrage vis-à-vis du risque d'érosion interne. La vérification des règles de filtre nécessite d'étudier les caractéristiques granulométriques de la couche superficielle du remblai, sous celle de la terre végétale qui, bien sûr, devra être totalement décapée.

À la création de la recharge, tous les arbres du talus aval et de son pied devront être abattus et dessouchés en même temps que le décapage soigneux de la terre végétale. Dans le cas d'un barrage ou d'une digue de canal, il est recommandé a minima lors des travaux d'abaisser la cote du plan d'eau ou du bief surtout si des fuites actives ou des suintements existent. À la fin des travaux, la terre végétale pourra être à nouveau régalerée sur géotextile anti-contaminant, puis ensemencée de gazon.

Une fois la recharge en service, les arbres ne devront pas y être tolérés, idéalement jusqu'à une distance de 5 m du pied aval du nouvel ouvrage et la couverture herbacée devra être régulièrement entretenue par fauchage. L'objectif est ici de permettre une parfaite surveillance visuelle du talus aval reconstitué, pour y détecter d'éventuels débouchés de fuite, et d'empêcher tout début d'envahissement des drains ou des matériaux drainants par les racines.

[Recharge aval intégralement drainante \(fig. 4.33\)](#)

Dans cette solution, la recharge est intégralement constituée de matériau drainant mis en œuvre sur filtre géotextile. L'avantage est que la recharge, grâce à ces matériaux également frottants, contribue très efficacement au renforcement mécanique du talus.

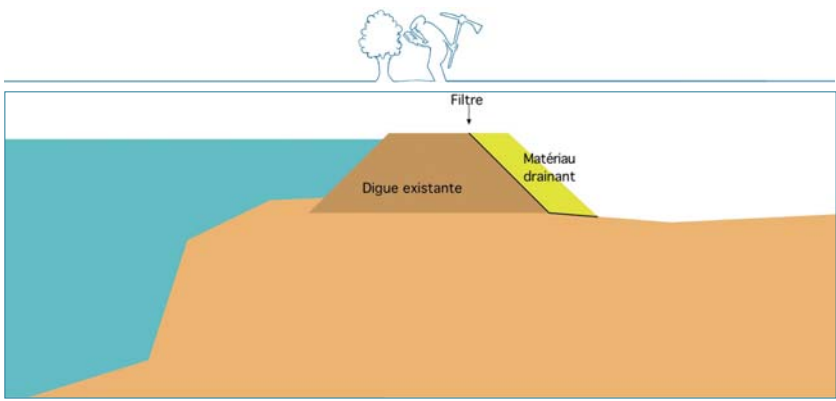


Figure 4.33. Coupe de principe d'une recharge aval drainante posée sur filtre géotextile ou granulaire (figure : R. Tourment, Irstea).

Recharge aval sur drain-filtre ou recharge drainée [fig. 4.34 et 4.35].

Le parti de conception adopté ici est de séparer au moins partiellement la fonction de drain-filtre de celle de renforcement mécanique, par la mise en œuvre de couches drainantes granulaires ou de géocomposites drainants. L'avantage de ce type de solution réside évidemment dans une économie de volume de matériau drainant, et donc de coût. Toutefois, la pente du talus aval est à adoucir plus ou moins par rapport à la solution « recharge intégralement drainante », à objectif de stabilité équivalent du talus et selon les caractéristiques mécaniques du matériau de la recharge.

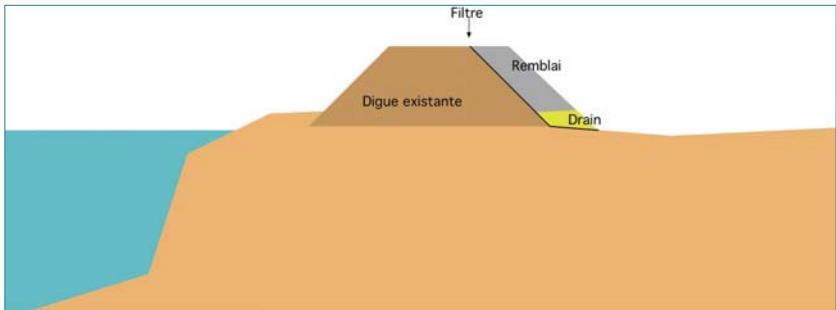


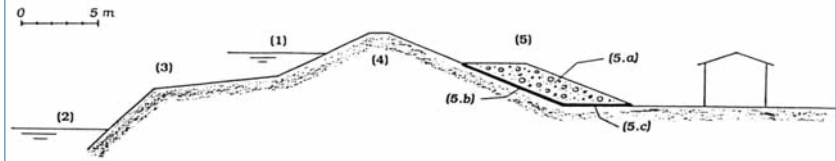
Figure 4.34. Coupe de principe d'une recharge aval posée sur dispositifs filtre et/ou drain (figure R. Tourment, Irstea).

Interventions sur arbres épars

Lorsque le diagnostic approfondi ou l'étude de dangers de l'ouvrage – digue ou barrage – conclut à un état de sûreté satisfaisant du remblai, à l'exception de la présence éparse d'arbres de haute tige en crête ou sur les talus, il est possible de limiter les travaux de confortement aux ligneux incriminés et à leur environnement immédiat.



TRAVAUX DE CONFORTEMENT DE LA DIGUE DE TRINGUETAILLE/CAZENEUVE



(1) Niveau atteint par le Petit Rhône le 08/01/1994

(2) Niveau du Petit Rhône le 24/01/1994

(3) Ségonnal

(4) Digue existante

(5) Recharge drainante réalisée en mars/avril 1994 :

(5a) - Tout-venant de la Crau 0/100 compacté

(5b)/(5c) - Géocomposites drainants :

	(5b) talus	(5c) fondation
Of face inf.	90 μ	110 μ
Of face sup.	140 μ	140 μ
Transmissivité (sous 50 kPa)	$0,5 \cdot 10^{-3}$ m ² /s	10^{-3} m ² /s



Figure 4.35. Recharge aval partielle sur drain-filtre géocomposite créée sur la digue rive gauche du Petit Rhône à Tringuetaille-Cazeneuve suite à la crue du 8 janvier 1994. (a) Coupe schématique (figure P. Mériaux/Irstea). (b) photos des travaux et du confortement terminé (photos P. Mériaux).

L'intervention consiste à :

- abattre les arbres sélectionnés ;
- les dessoucher soigneusement, en allant autant que faire se peut débusquer toutes les grosses racines. Une pelle à chenilles équipée d'un godet, en général, ou d'une dent « Becker » pour des petits arbres sur matériau fin, est adaptée à ce travail (fig. 4.36) ;
- agrandir au large la fouille d'excavation, notamment en adoucissant le fruit de ses talus ;
- disposer soigneusement un géotextile-filtre sur la surface de déblai ;
- apporter un matériau de caractéristiques adaptées (drainant si talus côté aval ou val ou étanche si talus côté retenue ou cours d'eau) et le mettre en œuvre de façon appropriée : terrassement selon la « méthode du remblai excédentaire », compactage par couches au compacteur à main (sauf si le matériau ne se prête pas au compactage), reprofilage du talus au godet de la pelle mécanique et évacuation des déblais excédentaires. On peut parfois se contenter de reprendre et réarranger les matériaux d'origine, dé-



Figure 4.36. Dérivage au godet d'un gros peuplier et de ses racines principales et dent Becker, utilisée plutôt pour des petits arbres, et en matériau fin (photos M. Vennetier).

barrassés des racines, lorsqu'ils ont les propriétés granulométriques désirées ;

- au besoin, régaler une couche de terre végétale sur géotextile-filtre sur l'emprise supérieure.

Avant le chantier, il convient de procéder à un piquetage/marquage – éventuellement contradictoire – des arbres et souches à extraire, ce qui permettra à tous les intervenants de bien apprécier les attendus et l'ampleur de l'opération. Il faut ensuite les repérer grâce à un levé topographique précis et, enfin, de les reporter sur les plans de l'ouvrage. Après le chantier, ce repérage sur plan de chaque arbre extrait, si nécessaire complété par un marquage-terrain adéquat pour les plus gros sujets, permettra de suivre l'efficacité des travaux et d'adapter les consignes de surveillance ultérieure, zone par zone. Une surveillance renforcée est, en effet, à prévoir après les travaux : on s'attachera à repérer l'apparition éventuelle de fuites, de suintements ou de rejets ligneux aux lieux où des arbres étaient présents.

Une telle opération d'extractions peut être réalisée éventuellement – et pour des questions d'acceptabilité sociale – en plusieurs tranches fonctionnelles de travaux, séparées de plusieurs mois voire années : par tronçons pour une digue (en priorité ceux les moins sûrs : profil moins large, gradient plus fort...) ou en commençant par les arbres poussant en pied aval. L'important est de bien tracer/enregistrer/dater les interventions exécutées dans le dossier de l'ouvrage et sur les plans.

S'agissant souvent d'intervenir sur des remblais anciens, hétérogènes et sensibles à l'érosion interne, des précautions de conception et de réalisation s'imposent :



- dans la sélection des arbres et pour les remblais à géométrie étroite, on conseille de limiter le nombre de gros sujets à extraire à un ou deux individu(s) par profil en travers, et par intervention, un « profil en travers » devant être considéré ici avec une « épaisseur » de 5 à 10 mètres rive à rive (barrage) ou amont-aval (digue) ;
- pour les ouvrages à charge permanente, il est impératif de soulager le gradient hydraulique pendant la durée du chantier, en abaissant la cote du plan d'eau, voire en le vidangeant totalement. Cette opération peut être mise à profit pour conduire des examens ou des travaux sur des parties noyées, comme un organe de vidange, ou pour inspecter sans gêne le dispositif de drainage. Après travaux, un protocole prudent de remise en eau est à prévoir, avec surveillance et auscultation renforcées des zones traitées, au cours de la remontée de la cote de la retenue ;
- lorsque les souches des arbres à extraire sont situées à proximité immédiate d'ouvrages ou de parties d'ouvrages rigides (perré d'étanchéité ou de protection, rideau de pieux bois, maçonnerie de tête de prise d'eau ou de vidange, murets, etc.), il faut s'attendre à ce que le dessouchage – malgré toutes les précautions de mise en œuvre – déstructure ceux-ci plus ou moins gravement. Il est alors nécessaire d'anticiper de telles dégradations en prévoyant, dans le cahier des charges des travaux, des sujétions génie civil de reprise/réparation des structures de maçonnerie ou de bois endommagées.

Si l'on est en présence d'arbres épars, mais alignés en pied aval sous la forme d'une haie, la réalisation d'une mini-recharge drainante (voir Travaux de création du drainage p. 155), après élimination des arbres concernés et de leurs souches, constitue une variante intéressante aux interventions ponctuelles décrites ci-dessus.

Cas particulier d'arbres installés sur perré

Deux configurations se rencontrent localement.

Soit les racines des arbres ont commencé à déstructurer le perré : l'ouvrage est très fragilisé et il y a péril à court terme (fig. 4.37). En particulier s'il s'agit d'un perré de protection côté rivière d'une digue, on peut craindre, lors de la prochaine crue, une ruine rapide de l'ouvrage par « effet domino », sous l'action conjuguée des courants tourbillonnaires, des chutes d'arbres et renversements de souches et des érosions induites. Face à une telle situation, le seul remède est la reprise complète du perré, après extraction des arbres et démolition des maçonneries endommagées avant et après dessouchage (avec plan d'eau vidangé ou abaissé pour un



barrage ou une digue de canal). Tant que cette importante opération de génie civil n'est pas exécutée, la coupe sans dessouchage des plus gros arbres dangereux (risque de renversement) est à prévoir, accompagnée d'un processus de surveillance renforcée et, si nécessaire, de l'élaboration d'un plan d'évacuation de la zone protégée ou exposée.



Figure 4.37. Perré non jointoyé en cours de destruction par l'action des arbres et de leurs racines, au bord de la Sarre (ph. P. Mériaux).

Soit il n'y a pas déstructuration du perré qui conserve provisoirement sa fonction (fig. 4.38). Son intégrité est tout de même menacée à plus ou moins long terme car des racines ont assurément traversé l'ouvrage par un ou plusieurs de ses joints. Lors de leur croissance, ces racines et les troncs finiront par déstructurer la maçonnerie (ce qui nous ramène à la situation précédente), et après leur mort fragiliseront la fondation du perré (création de vides après pourrissement). Une solution de traitement



Figure 4.38. Arbres et arbustes installés sur le perré jointoyé de la digue rive droite du Guil à Eyglies (05), sans indice majeur de déstructuration (ph. P. Mériaux).

pourrait¹ être d'abattre les arbres incriminés et de couper/fraiser leur souche au ras du perré (afin de supprimer l'effet de perturbation hydraulique), puis de couper systématiquement tout rejet pendant les mois qui suivent et sur plusieurs années (ce qui stoppera la croissance racinaire, faute de photosynthèse) jusqu'à provoquer la mort de la souche. Si on est à distance du cours d'eau ou du canal, une dévitalisation par badigeonnage ou injection d'un phytocide peut accélérer considérablement la mort de la souche. À l'appui d'un repérage soigné de chaque souche morte, un suivi fin et individualisé de leur pourrissement serait réalisé ensuite, avec, au terme du processus, l'exécution d'injections de coulis de ciment

¹ Le conditionnel est employé ici car nous n'avons pas d'exemples d'intervention de ce type à citer.



en sous-face du perré pour combler les zones de vides (veiller à des faibles pressions d'injection afin de ne pas soulever le perré).

Interventions sur une conduite ou un puits

Les profils de digue ou de barrage qui comportent des ouvrages traversants sont les plus exposés au risque d'érosion interne et, si le remblai est boisé, le risque est aggravé, les racines ayant tendance à coloniser l'interface conduite-remblai et à pénétrer à l'intérieur de l'ouvrage par la moindre faiblesse (cf. Examen des parties d'ouvrages maçonnées et des débouchés de drains comportant des ligneux p. 112 et fig. 4.12b p. 115). Les traitements génie civil et/ou forestiers des paragraphes précédents (p. 151 à 162) peuvent être appliqués selon les situations. Au cas où l'on ne dispose pas du budget suffisant pour traiter à court terme les plus gros arbres se développant près des débouchés de conduite ou de puits, on peut commencer par l'abattage des plus petits (< 10–20 cm de diamètre) – et par leur dévitalisation – de manière à « stabiliser » la situation (éviter que les jeunes arbres d'aujourd'hui ne deviennent les gros arbres de demain), en association avec une surveillance renforcée.

Afin d'orienter les modalités d'intervention, il est nécessaire de retrouver ou de reconstituer les plans des ouvrages traversants et de procéder à leur examen intérieur, au besoin à l'aide de moyens spéciaux. Si l'ouvrage apparaît endommagé, des travaux spécifiques sont à prévoir (ex. : chemisage pour une conduite de vidange, reprises de maçonnerie pour un puits ou une galerie...).

Interventions en crue (digue de protection)

Dans le cas des digues de protection, c'est le plus souvent lors des crues que l'on identifie les zones de fuites, qu'elles soient ou non causées ou aggravées par des souches d'arbres. Une telle situation peut nécessiter des travaux d'urgence, du moins tant que les conditions de sécurité le permettent.

Si ces fuites débouchent en pied de digue ou un peu au-dessus, il est possible de construire en urgence – et localement – une recharge drainante-filtrante « rustique » (cf. p. 155)¹. Trois contraintes sont toutefois à prendre en compte :

¹ Il existe des techniques alternatives visant à construire un cordon de terre entourant au plus près le débouché de la fuite, de façon à diminuer le gradient (Ciria 2013). La présence d'arbres ou de souches peut cependant gêner la confection du cordon étanche.



- les conditions de sécurité de l'opération : si elles ne sont pas garanties pour les exécutants, mieux vaut ne pas intervenir et gérer le risque de rupture de l'ouvrage en procédant à des évacuations préventives des zones exposées par une brèche éventuelle ;
- la présence d'arbres ou de souches au droit ou à proximité des fuites à maîtriser : bien que ceux-ci puissent gêner les opérations de terrassement et soient peut-être à l'origine des désordres, il ne faut surtout pas les dessoucher (et donc ne pas terrasser en déblai dans la digue) car on aggraverait significativement le gradient hydraulique local alors que l'ouvrage est en charge et on risquerait une rupture par érosion interne avant d'avoir eu le temps de créer la recharge. S'il s'agit d'arbres et si on en a le temps, on peut éventuellement les tronçonner (sans les dessoucher) pour faciliter l'évolution de la pelle mécanique ;
- la puissance de la fuite : si elle est importante, il sera peut-être impossible de mettre en œuvre, en première « couche » de la recharge, un géotextile-filtre ou un matériau fin de transition. Commencer alors le remblaiement par un matériau grossier pour casser la puissance de la fuite, puis construire la recharge proprement dite en respectant les conditions de filtre par rapport au matériau fin de la digue.

Bien sûr, une telle recharge locale construite en urgence ne doit avoir qu'un statut provisoire avant que des travaux de confortement plus complets puissent être réalisés dans des conditions sereines et maîtrisées, après la crue.

Érosion externe (talus non protégé de digue)¹

Vis-à-vis du risque d'érosion externe du talus côté cours d'eau, la présence de gros arbres est surtout gênante du fait des perturbations hydrauliques que leur tronc et leur houppier provoquent lors des crues, et des risques d'arrachement ou de chablis qui affectent, en premier lieu, les sujets au port déséquilibré. Ces effets défavorables ne sont hélas pas nécessairement compensés par l'effet favorable d'armature superficielle du sol par le réseau racinaire. La forte pression de l'eau sur un arbre submergé et ses variations permanentes peuvent au contraire provoquer des oscillations qui déstabilisent le talus.

¹ Pour un talus protégé de digue ou de barrage (protection contre le batillage), se reporter aux recommandations de la page 156 – cas du perré, sachant qu'en principe les arbres sont plutôt épars dans cette configuration.



Les interventions de priorité absolue consistent à abattre les gros arbres au port déséquilibré ou malades. S'agissant de travaux exécutés souvent en zone naturelle sensible (proximité du cours d'eau et de sa ripisylve), il est recommandé de procéder à un piquetage contradictoire préalable en présence des intervenants et acteurs, afin de bien expliquer les motivations et objectifs de l'opération d'abattage, et de pouvoir ensuite plus facilement la contrôler. La préparation d'un dossier administratif peut être nécessaire sur certains sites. Le traitement des souches ainsi créées est à prévoir à plus ou moins long terme (instaurer une surveillance renforcée à court terme).

Si l'importance des contraintes hydrauliques impose la création d'une structure de protection sur le talus de la digue, la végétation ligneuse présente devra y être intégralement éliminée (et dessouchée) au préalable. Une façon idéale d'éviter un tel traumatisme serait de (re)construire une digue en retrait du cours d'eau, en abandonnant à l'action naturelle de la rivière celle ancienne de premier rang : ce qui est évidemment loin d'être toujours possible.

Enfin, une éventuelle intervention sur la végétation arborescente d'une berge, en vue de sécuriser une digue, ne se justifie que si le sommet de berge est proche du pied de ladite digue : le guide *Génie végétal en rivière de montagne* (Valé et al. 2013) ¹ suggère une distance inférieure ou égale à 5 m pour la définition de cette « proximité », valeur que nous proposons de reprendre ici. C'est aussi la distance recommandée de façon générale entre le pied de digue et des arbres.

Instabilité de talus

Le premier facteur d'instabilité d'un talus d'ouvrage hydraulique est l'excessivité de sa pente (> 50 %). Le confortement consiste alors soit à l'adoucir, soit – si on ne dispose pas de l'emprise nécessaire – à construire un ouvrage de soutènement. Dans les deux cas, la végétation ligneuse présente doit être éliminée et dessouchée.

La décomposition de nombreuses souches de gros diamètre qui n'auraient pas été purgées lors de la mort des arbres peut aussi provoquer une instabilité de talus (cf. fig. 4.9 p. 111).

¹ Guide téléchargeable gratuitement sur le lien : <http://ouvrage.geni-alp.org/>



Pour le reste, l'instabilité du talus aval d'un barrage ou côté val d'une digue résulte généralement d'écoulements internes et, donc, d'un ou plusieurs défauts d'étanchéité : se reporter aux recommandations de la page 150.

Pour ce qui est du talus côté cours d'eau d'une digue, son instabilité est très souvent reliée à une problématique d'érosion externe : se reporter aux recommandations de la page 163.

Surverse

Vis-à-vis du risque de surverse par-dessus une digue de protection, rappelons l'impact défavorable sur le coefficient de rugosité de la présence d'une végétation ligneuse insuffisamment entretenue dans la section mouillée du cours d'eau en crue (fig. 3.21 p. 82)¹ : cela justifie des travaux d'entretien régulier de la végétation, et si nécessaire, des abat-tages sur les parties de digue concernées.

En outre, la présence de gros arbres en crête de digue ou de petit barrage est un facteur d'insécurité : le déracinement d'un arbre par le vent crée une encoche d'érosion, voire, si la crête est étroite, un point bas dans le profil de l'ouvrage ; ce qui entraîne un risque d'érosion interne, voire de surverse, lors de la prochaine crue, si une réparation n'est pas entreprise. Ce risque est élevé pour les ouvrages hydrauliques étroits, car le trou provoqué par la chute de l'arbre peut occuper une grande partie du volume du remblai. Mais surtout, ce basculement peut aussi se produire alors que l'ouvrage est en limite de surverse au cours d'une crue majeure et provoquer alors une brèche immédiate². De tels déracinements sont favorisés, en cas de crue prolongée, par la saturation du matériau du remblai.

L'abattage des arbres incriminés suffit à supprimer le risque à court terme. Cependant, il est nécessaire d'éliminer rapidement les souches – car elles risquent en pourrissant de provoquer un effondrement localisé – ou de surveiller leur évolution (rejets). Si le risque de surverse est dû à l'existence d'un ou plusieurs points bas sur le profil en long de crête, leur comblement par apport de matériau compacté nécessite l'abattage et le dessouchage préalables et soignés des éventuels arbres présents, ainsi que le décalage de la terre végétale sur l'ensemble de l'emprise des travaux. Enfin, la création ou l'élargissement d'un éva-

¹ Phénomène suspecté lors de la crue de l'Agly (66) de mars 2013.

² Cas avéré d'au moins une brèche ayant eu cette origine en Pologne lors de la crue de l'Oder de 1997 (Mériaux et Tourment 1998).



cuateur de crues ou d'un déversoir impose évidemment de même l'éradication de toute la végétation et des souches sur les emprises d'ouvrage concernées.

Cas des ouvrages hydrauliques soumis à étude de dangers

Le Code de l'environnement prévoit qu'une étude de dangers soit réalisée pour les barrages de classe A et B ainsi que pour les digues de classe A, B et C. Cette étude de dangers explicite les niveaux de risques pris en compte, détaille les mesures aptes à les réduire et précise les risques résiduels une fois mises en œuvre les mesures précitées.

Un guide de lecture à destination des services de contrôle permet de juger de la complétude et de la consistance des études de dangers. Pour les digues, le guide ¹ détaille les attendus en termes de caractérisation de la végétation dans l'analyse fonctionnelle du système endigué.

Une détermination des différents modes de défaillance est effectuée à partir de causes d'origine externe à l'ouvrage (crues, évolutions morphologiques du cours d'eau...) et de causes intrinsèques à l'ouvrage et à sa fondation (défaut de stabilité de la digue et de sa fondation, rupture par érosion interne, rupture par surverse...). Des travaux d'Irstea en cours (thèse de Bambara G. en 2015 et publications qui en découlent, disponibles dans la base documentaire d'Irstea) intègrent les risques liés à la végétation dans des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages dans ces domaines.

À partir des scénarios identifiés comme critiques, une démarche est menée pour réduire les risques. Cette démarche identifie et justifie les mesures retenues en portant une appréciation sur leur efficacité espérée.

Le plan de gestion de la végétation est une des mesures de réduction des risques proposées dans l'étude de dangers, et de ce fait les justificatifs des mesures proposées par ce plan sont apportés dans l'étude de dangers. À ce titre, le plan de gestion de la végétation devient un document réglementaire (opposable) une fois l'étude de dangers réalisée.

¹ Circulaire du 16 avril 2010 relative aux études de dangers des digues de protection contre les inondations fluviales.



chapitre 5

Études de cas



CAS DES DIGUES DU VIDOURLE

Pour en savoir plus : <http://www.vidourle.org/>

Description de l'ouvrage

Nom : Dignes du Vidourle.

Gestionnaire : Syndicat interdépartemental d'aménagement et de mise en valeur du Vidourle et de ses affluents, créé en 1989. A obtenu en 2007 le label EPTB (établissement public territorial de bassin du Vidourle).

Fonction des digues : protection contre les inondations

Hauteur par rapport au TN : de 2 à 6 mètres.

Année ou époque de construction : Aménagement progressif et continu à partir du XIII^e siècle.

Historique et comportement de l'ouvrage

Le Vidourle est un fleuve côtier méditerranéen court (85 km) qui prend sa source dans le massif des Cévennes. Son bassin versant couvre une superficie de 800 km² et est le siège, notamment à l'automne, de précipitations d'orage d'une rare intensité : épisodes « cévenols », 117 mm en 1 heure à la Vacquerie (Hérault) le 23 août 2015, 950 mm en 10 heures environ le 29 septembre 1900 dans le Gard . Les crues du Vidourle ont, de tout temps, été particulièrement violentes et dévastatrices et ont donné naissance localement à une expression, « une vidourlade », signifiant une grosse colère.

Le bas Vidourle formait à l'origine une plaine alluviale en toit, surélevée de quelques mètres par les dépôts en provenance de l'amont, dominant des dépressions latérales. Cette configuration est favorable, lors des crues, à des débordements qui détournent une partie de l'eau vers ces points bas formés d'anciens lits de débordement indépendants du lit principal, courant dans des zones actuellement cultivées ou habitées.

Jusqu'à une époque récente, les digues du Vidourle étaient de simple levées de terre issues pour certaines du Moyen Âge, peu ou sommairement compactées, parfois empierrées au niveau des villages et ouvrages, et souvent hétérogènes en raison d'une histoire mouvementée et de nombreuses réparations et rehaussements.



L'endiguement du bas Vidourle a débuté dès le XIII^e siècle, au départ en rive droite pour gagner des terres agricoles et drainer la plaine inondable. Il s'est poursuivi jusqu'à son aboutissement au XVIII^e siècle, avec l'endiguement en rive gauche et l'aménagement de déversoirs pour tenter de limiter les ruptures des digues : en effet la partie endiguée, d'une capacité de 800 m³/s, ne peut contenir les plus grosses crues qui peuvent dépasser 2 000 m³/s. La digue en rive gauche a été construite plus basse que celle de rive droite pour y focaliser les débordements, à l'origine dans des zones inhabitées. De nouveaux déversoirs ont été aménagés dans les années 1980. Aujourd'hui, l'ensemble du cours endigué du Vidourle présente une section hydraulique relativement constante sous la forme d'un canal trapézoïdal de 40 à 50 m au plafond avec des talus dressés de 3H/2V à 1H/1V, très instables. La profondeur d'eau à l'étiage varie de 4 à 5 m entre les seuils existants. La hauteur des berges est de l'ordre de 5 à 6 m (non compris la digue). Le surcreusement du lit endigué à cause de son étroitesse, et les affaissements de berges qui en résultent, ont conduit par endroits à des talus continus de 8 m de haut en pente forte entre fleuve et crête de digue. Le matériau constitutif des berges, sablo-limoneux et peu cohésif, ne peut que faciliter l'instabilité des berges.

Des seuils et barrages ont été construits sur le cours dès le XV^e siècle pour alimenter les moulins et les puits, créant des points de vulnérabilité des digues lors des crues. L'embouchure du fleuve a subi plusieurs déplacements avec le creusement de canaux de dérivation successifs. Malgré tous les efforts consentis, ces systèmes ont été très régulièrement et dès l'origine débordés et endommagés par les crues même moyennes (tous les 10 ans environ), conduisant à des brèches et à l'inondation de la plaine agricole et de villages. Les digues étaient régulièrement réparées après ces accidents, et les projets successifs d'élargissement par recul des digues, proposés dès le XVIII^e siècle et a priori les seuls à pouvoir résoudre le problème, n'avaient jamais abouti jusqu'à très récemment.

Certaines crues exceptionnelles sont restées dans les mémoires par leur ampleur et le montant des dégâts. La première fut mentionnée en 1336, et a été suivie de nombreuses autres : 15 septembre 1575, 3 juillet 1684, octobre 1689, 1^{er} au 3 octobre 1723, 18 novembre 1745, 6 octobre 1812, 17 septembre 1858, 1891, 26 septembre et 16 octobre 1907, 27 septembre 1933, 4 octobre 1958, septembre 1994, décembre 1995, octobre 1996 et octobre 2001 et enfin le 9 septembre 2002, crue inédite à l'époque moderne avec 2 650 m³/s à Sommières (plus que le débit maximal de la Seine lors de la crue historique de janvier 1910) et une trentaine de brèches. Après



la crue de 1958, de sinistre mémoire, trois barrages écrêteurs d'une capacité totale de 30 millions de m³ ont été construits dans l'amont du bassin versant. Ils n'ont pas empêché la crue de 2002 de dépasser le niveau de la crue centennale calculée en absence d'écrêtement.

Contexte

Les digues du Vidourle protègent des zones agricoles et de nombreux villages. Si certains se sont, dès leur origine, adaptés aux crues récurrentes en s'installant sur des points hauts ou en rehaussant les habitations, leur développement récent n'a pas toujours su intégrer la culture historique du risque, notamment à cause d'une absence de crue majeure entre 1958 et 1994.

Pression administrative et contraintes écologiques

La partie endiguée du Vidourle est presque entièrement classée en site Natura 2000. Elle émerge à deux Znieff et est à la frontière entre deux Zico vers l'embouchure, qui est aussi concernée par un site de la convention Ramsar sur les zones humides, et inscrite à l'inventaire des zones humides de la région Languedoc-Roussillon.

Problématique liée à la végétation : boisement des digues et berges

Le diagnostic de la végétation et de génie civil s'est déroulé en 1997 et s'est appuyé sur :

- une reconnaissance terrestre détaillée de sections représentatives déterminées sur photos aériennes et à partir d'une première inspection rapide. Les hauteurs, diamètre et vitesse de croissance des arbres ont été étudiés, ainsi que la composition et la structure de la végétation ;
- une reconnaissance en bateau de l'ensemble de la partie endiguée car l'inspection depuis la crête de digue était souvent impossible en raison d'une végétation arbustive trop dense et impénétrable, masquant les désordres en pied de digue et de berge.



Selon les sections, le manque d'entretien total ou partiel du cours endigué entre 1950 et 1995 s'est traduit par le développement d'une végétation dense d'arbres et arbustes sur l'ensemble des berges et d'une partie des digues. On constate alors la présence, dans toutes les portions du cours et sur les deux rives, de centaines d'arbres immergés, certains ayant glissé jusqu'au milieu du fleuve (à plus de 15 m de la berge !) et formant parfois une barrière continue d'une berge à l'autre. Cela démontre le recul accéléré et l'instabilité des berges, qui sont confirmés par le grand nombre de désordres observés (affaissements, glissements, fig. 5.1).

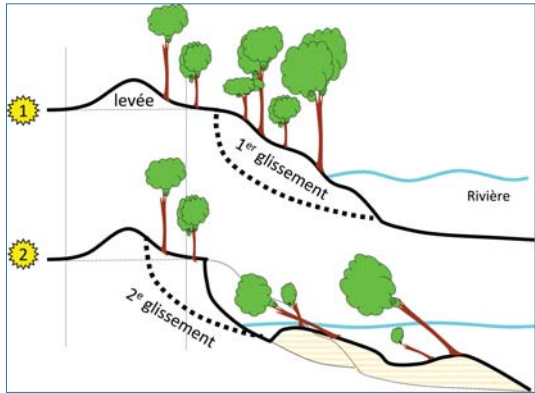


Figure 5.1. Mécanisme de glissement des berges pouvant affecter la digue.

Ces départs d'arbres entiers (fig. 5.2) constituent, en crue, une grave menace d'embâcles au niveau des ponts ou des seuils, suivis de débordements ou de détérioration des ouvrages d'art. Le nombre important d'arbres fortement penchés incitait à penser que le phénomène ne faisait que s'accroître, et que les arbres, trop grands, y contribuaient significativement. La figure 1.21 de ce guide (p. 47) est tirée du rapport de cette inspection initiale. De nombreux terriers étaient également notés dans le corps de digue, protégés par la végétation dense.



Figure 5.2. Glissement d'une berge très raide sur le Vidourle. On note dans l'eau la présence de certains des arbres qui occupaient le talus, et les très grosses racines traversantes d'arbres disparus, emportés par le courant ou maintenant immergés (ph. G. Degoutte).

La composition de la végétation arborée est très constante sur toute la zone. Les arbres dominants et caractéristiques sont l'aulne (*Alnus glutinosa*), le frêne (*Fraxinus angustifolia*), le saule blanc (*Salix alba*), le peuplier blanc (*Populus alba*), l'orme (*Ulmus minor*) et les érables (*Acer*



campestre surtout). S'y ajoutent, de façon dispersée, des espèces méditerranéennes courantes dans le milieu naturel environnant, et quelques espèces plantées, notamment de vieux et gros platanes en alignement sur la crête ou en pied de digue au niveau de zones habitées (fig. 5.3, cf. aussi fig. 1.20 p. 46).



Figure 5.3. Gros platanes en alignement sur le ségonnal d'une digue du Vidourle. Les racines de ces arbres peuvent traverser de part en part les soubassements de la digue, comme illustré par la figure 1.16 (p. 39). Leur déracinement lors d'une crue ou d'une tempête, bien qu'assez peu probable, déstabiliserait le pied du talus (ph. M. Vennetier).

La génération très dominante est celle des arbres de 45 à 60 ans, témoignant de la date d'arrêt des entretiens. Sur les pentes en glissement et sur les digues, se trouve une gamme variée d'âges correspondant à une situation de renouvellement permanent ou de conquête progressive. Les peuplements moyens de berge font entre 13 et 14 m de haut vers 50 ans. Jusqu'à un âge moyen de 15 à 20 ans, les arbres situés en pied de berge peuvent être entièrement immergés en cas de crue, car ils ne dépassent pas la hauteur des digues, surtout s'ils sont inclinés.

Mesures de réduction des risques préconisées

Pour la végétation

D'un point de vue écologique, le maintien sur la berge d'une végétation variée, avec des classes d'âge équilibrées, présentant différents stades d'évolution qui se succèdent dans le temps et dans l'espace, permet d'optimiser la diversité biologique tout en maintenant intégralement les rôles fonctionnels de cette végétation. C'est aussi le système qui permet d'optimiser les moyens humains et financiers, en engendrant chaque année une masse à peu près constante de travaux. Les études de croissance effectuées sur les sections représentatives montrent que les arbres situés sur berges raides atteignent, en moyenne, une taille à considérer comme critique (11 m de hauteur et 30 cm de diamètre) entre 30 ans et 40 ans. On préconise, en conséquence, de renouveler le peu-



plement régulièrement sur une période de 30 ans, en trois passages à 10 ans d'intervalle (intervention sur 1/3 de la population tous les 10 ans pour un âge critique de 30 ans), ce qui aboutit à des peuplements comprenant en permanence trois générations d'arbres espacées de 10 ans (0/10, 10/20 et 20/30 ans). On assure ainsi une bonne couverture du sol et le maintien du paysage. La coupe doit cependant être plus fréquente sur les talus en pente très raide, menacés de glissement.

Les berges restent ainsi végétalisées sur toute leur hauteur, mais en ne comportant que des arbres de petites ou moyennes dimensions et pas trop serrés. À cette fin, un traitement en taillis est bien adapté, sachant que la totalité des espèces feuillues présentes dans la ripisylve rejettent vigoureusement de souche. Le sous-bois doit être dégagé régulièrement dans les zones présentant des désordres avérés ou potentiels (glissements).

En pied de berge, il faut éliminer les arbres trop penchés vers l'intérieur du lit dès qu'ils ont une taille moyenne, en raison des contraintes néfastes qu'ils exercent sur la berge. De même, il faut si possible recéper les arbres situés dans les zones où s'amorce un glissement. Cela limite les contraintes sur le sol, et évite, lorsque le glissement se produit ultérieurement, que les arbres se retrouvent dans le cours d'eau et génèrent des embâcles.

Enfin, la digue proprement dite ne doit pas porter d'arbres, car ils compromettent sa tenue à terme. Afin d'assurer une surveillance facile et rapide de l'ensemble du linéaire, en particulier de pouvoir reconnaître les désordres à titre préventif (terriers, fissures, amorces de glissements) ou curatif après les crues, la crête, les talus des digues et leurs abords immédiats doivent être entretenus continuellement en végétation herbacée (une périodicité annuelle de fauche serait idéale). La mécanisation de ces opérations est possible une fois la crête de digue élargie et aménagée en piste de service.

D'un point de vue génie civil

Le plan de gestion de la végétation n'est qu'un des aspects de la gestion du risque, laquelle en 1997 nécessitait d'urgence des travaux de confortement ou de stabilisation des berges et digues. Sans détailler ces travaux, qui ne sont pas l'objet de ce guide, deux types de solution de confortement ont été proposés et modélisés par le calcul :

- (a) le recul de la digue par rapport à son axe actuel, avec décaissement quand nécessaire d'une risberme adoucissant la pente entre la berge et le pied de digue. C'est la solution la plus durable, déjà préconisée depuis deux siècles. Elle nécessite des acquisitions



foncières et l'impact peut être localement et temporairement lourd sur l'environnement ;

- (b) le battage d'un rideau de palplanches à partir de la crête de digue. Son coût est relativement intéressant par rapport à d'autres méthodes et on remédie, du même coup, aux défauts d'étanchéité des digues, liés aux terriers, aux racines et à la faible compacité des matériaux.

Deux autres solutions envisagées (la création d'un masque stabilisateur et le clouage du talus de berge) ont été abandonnées à cause de leur coût prohibitif.

Par ailleurs, il a été envisagé de construire par endroits des digues de deuxième rang pour protéger les enjeux locaux les plus importants en cas de rupture des digues principales.

Mise en œuvre et retours d'expérience

Des travaux de restauration de la végétation ont été réalisés de 1999 à 2014, par passation de services avec appel d'offres tous les 3 ans, selon le plan de gestion validé par une déclaration d'intérêt général de 2004 et qui est en grande partie conforme aux recommandations ci-dessus. Dans le cadre de deux programmes d'actions de prévention des risques d'inondation (Papi) 2002-2011 puis 2012-2017, des confortements ont été réalisés sur plusieurs kilomètres de berges et digues, par des méthodes de génie civil ou de génie végétal (fig. 5.4), ainsi que le déplacement ou recul de 2 km de digues existantes de premier rang, la création de digues de second rang et l'aménagement de zones d'expansion des crues, l'aménagement de chemins d'entretien, de rampes d'accès, de fossés, etc.



Figure 5.4. Stabilisation d'un talus de berge et digue par génie végétal dans un méandre après un glissement de berge ayant menacé le pied de digue (ph. M. Venetier).



Perspectives

Pour écrêter davantage les crues les plus extrêmes comme celle de 2002, il est prévu la création de neuf bassins de rétention supplémentaires dans les haute et moyenne vallées.

Un contrat de rivière, comprenant 155 fiches-actions, a été lancé en 2012. Pour la période 2013-2018, le budget prévisionnel est de 70 millions d'euros correspondant aux aménagements du Papi, et 80 millions d'euros pour les autres volets du contrat de rivière, soit une enveloppe totale estimée à 150 millions d'euros avec un bilan à mi-parcours.

Un nouveau plan de gestion et restauration de la ripisylve a été préparé en adéquation avec les objectifs du Sdage. Il prévoit la poursuite du programme d'entretien de la végétation par tronçons et des modalités de lutte contre les invasives, et s'accompagne d'un plan de gestion de la continuité écologique terrestre et aquatique (franchissabilité des seuils et autres ouvrages par les poissons). Les objectifs du site Natura 2000 sont bien entendu intégrés.

Est prise en compte par ailleurs, pour des raisons hydrauliques et écologiques, l'amélioration du fonctionnement morphodynamique du lit et du transport solide (gestion des flux de sédiments, réhabilitation de bras morts).



CAS DE LA DIGUE D'EYGLIERS

Description de l'ouvrage

(état au moment du diagnostic de végétation)

Nom : digue rive droite du Guil à Eyglers.

Situation : commune d'Eyglers (05), rive droite du Guil, au pied de Mont-Dauphin et de sa place forte, en amont du pont de la RN 94. Longueur totale de la digue : 800 m environ (dont 625 m en amont du pont de la RN94).

Propriétaire-gestionnaire : commune d'Eyglers.

Fonction : protection contre les crues torrentielles du hameau de Saint-Guillaume, d'une zone d'activités commerciales, de la plaine d'Eyglers et de la gare SNCF.

Cours d'eau : le Guil.

Hauteur maximale par rapport au TN : de l'ordre de 2,5 m.

Année ou époque de construction : construction initiale probablement dans la deuxième moitié du XIX^e siècle. Réparée, partiellement reconstruite ou prolongée à l'aval suite à la crue de 1957.

Constitution de la digue : remblai d'alluvions (probablement issues du Guil, et donc plus ou moins grossières), comportant côté torrent un masque de protection composé de gros galets liés au bitume, pentée à 2/3 (66 %) et fondée sur un mur-parafouille en béton de 2 à 3 m de profondeur¹, pour 1 m d'épaisseur (fig. 5.5). En amont de la culée de l'ancien pont de la route nationale et sur environ 200 m, la structure de protection côté Guil est remplacée par un perré de pierres sèches, qui correspond peut-être à l'ouvrage tel qu'il était sur l'ensemble de son linéaire avant les dégâts de la crue de 1957.

¹ Profondeurs reconnues par une campagne de 7 sondages à la pelle mécanique en mars 2012. Ce mur-parafouille est également appelé « longrine ».

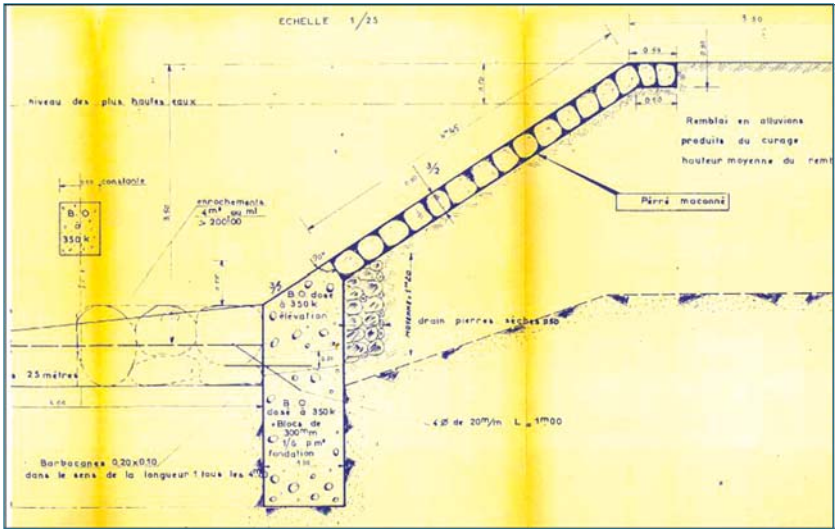


Figure 5.5. Coupe-type des travaux de protection côté Guil (source : ministère de l'Équipement 1959).

Historique et comportement de l'ouvrage

Peu de données historiques concernant la digue. On sait juste que la protection de galets liés au bitume côté Guil a été créée vers 1959 (coupe-type datant de cette année-là), donc postérieurement à la crue catastrophique de 1957, qui avait dû endommager – voire emporter – une partie de la digue. À moins que cette crue ait justifié la prolongation vers l'aval de la digue initiale protégée par un perré de pierres maçonnées, telle qu'elle se présente en amont de la culée de l'ancien pont de la route nationale ?

Problématique liée à la végétation

Peut-être parce que l'ouvrage se situe dans une zone sensible de bord de rivière, la végétation ligneuse a été peu entretenue sur la digue depuis 50 ans et des arbres se sont installés :

- sur le parement côté zone protégée et en son pied ;
- localement sur la crête dans les tronçons où elle n'est pas carrossable (fig. 5.6) ;



Figure 5.6. Peupliers en crête, à l'aplomb du masque en galets liés au bitume (ph. P. Mériaux).



Figure 5.7. Peupliers, saules et genévriers se développant sur perré maçonné, au travers des joints (ph. P. Mériaux).

- au-dessus du mur-parafouille côté torrent : à plusieurs endroits sur le perré de pierres maçonnées avec des racines traversant les joints (fig. 5.7), plus rarement sur le masque de protection en galets liés au bitume ;
- massivement sur la zone d'enrochements et de dépôts torrentiels située entre le parafouille et le Guil (fig. 5.8).

La digue rive droite a fait l'objet d'une étude diagnostic génie civil en 2010 qui a conclu à la grande fragilité de sa fondation du fait de l'incision du Guil depuis 1960 (2 à 3 m)¹ et a préconisé la reprise complète de la protection en enrochements de la berge – ouvrage neuf à fonder sur un profond sabot côté Guil et venant s'appuyer sur le mur-parafouille de pied de digue.



Figure 5.8. Corridor de peupliers quinquagénaires s'étant installés sur les enrochements de protection du parafouille béton. Épis en béton déchaussés par l'incision du Guil (ph. P. Mériaux).

Sauf à remettre en cause les dispositions constructives, la mise en œuvre de ces travaux de protection – déclarés d'intérêt général au titre de l'article L 211-7 du Code de l'Environnement – nécessitait l'éradication totale du corridor arboré des bords du Guil dans la zone, son desouchage et l'évacuation des souches. Une variante de travaux consistait à préserver le corridor et à créer une protection à parement plus raide, nécessitant alors le bétonnage des enrochements.

¹ Les sondages à la pelle mécanique de mars 2012 ont confirmé que la cote de fondation de ce mur-parafouille était maintenant située entre 0,5 m et 1,3 m au-dessus du fond actuel du lit du Guil. Il s'agissait aussi de vérifier l'état de ce mur.



Caractérisation et diagnostic de la végétation arborée

Un diagnostic de la végétation arborée présente a été souhaité, du fait du rôle paysager qu'elle joue, dans l'environnement sensible de la place forte de Mont-Dauphin, protégée au titre des monuments historiques et inscrite au patrimoine mondial de l'Unesco.

Méthodologie de diagnostic mise en œuvre et investigations réalisées

À l'appui des conclusions de l'étude d'avant-projet génie civil de 2010, le diagnostic de la végétation a été effectué en trois phases :

- 2011 (18-11) : reconnaissance visuelle de la végétation ;
- 2012 (21 et 22-03) : sondages à la pelle mécanique visant à examiner le niveau de fondation du mur-parafouille en pied de digue et le développement racinaire du corridor rivulaire ;
- 2012 (printemps) : étude paysagère et rapports de synthèse.

Principaux résultats du diagnostic des risques liés à la végétation

Dans cette étude de cas, nous nous concentrerons sur les tronçons de digue protégés par un masque de galets liés au bitume en amont du pont de la RN 94 (soit 425 ml de digue).

Sur ces tronçons, les principales espèces végétales ligneuses sont : le peuplier noir, le cornouiller, l'érable plane, l'alisier blanc et l'églantier. Les peupliers, qui composent la strate arborée dominante du corridor en bord de Guil, montrent un état sanitaire médiocre. De nombreux sujets sont vieillissants, abîmés, parfois malades ou mourants. Bien que leurs conditions de croissance dans les enrochements soient difficiles, ils ont atteint une hauteur d'une vingtaine de mètres.

Le masque de galets liés au bitume est, quant à lui, plutôt bien conservé, la végétation ligneuse semblant s'en être écartée et le mur-parafouille en béton ayant constitué une barrière assez efficace contre la pénétration racinaire de la ripisylve.



Préconisations de gestion et de travaux, et justification

Si une variante prévoyant la préservation du corridor des peupliers existants semblait physiquement réalisable, elle présentait les inconvénients de l'entretien délicat d'un peuplement forestier vieillissant (c'est-à-dire des peupliers « épargnés ») et de la nécessité de bétonner les enrochements de la berge reconstituée du Guil. D'un coût plus élevé, cette protection aurait été incontestablement plus fragile que celle prévue en solution de base.

Aussi, la solution qui a été recommandée au final par le groupement de prestataires est celle de l'élimination du corridor de peupliers afin de créer un enrochement sec, à pente douce, mais dont les joints seraient garnis de terre pour être plantés, selon une technique récemment testée en France (projet « Genialp » : cf. références bibliographiques en fin de fiche).

Les principales préconisations formulées sont résumées ci-dessous :

- mesures de court terme :
 - abattage des peupliers et de toute la végétation ligneuse du corridor rivulaire ;
 - reconstitution de la protection génie civil du pied digue côté Guil en enrochements libres ;
 - garnissage des joints des enrochements par de la terre et plantation ou bouturage d'arbustes et d'arbrisseaux nobles : saules arbustifs, cornouillers, noisetier, nerpruns, viorne...
 - côté val de la digue (sur les tronçons libres d'emprise), plantation d'une haie d'arbres de haute tige 16/18¹ à 5 m minimum du pied de digue, destinée à prendre le relais d'écran visuel assuré par les sujets actuellement présents sur la digue².
- mesures de moyen terme (10 à 30 ans), par tronçons successifs :
 - abattage et dessouchage des arbres en crête et sur le parement aval de la digue ;
 - reconstitution du profil de la digue et reprise de maçonneries si nécessaire.

La coupe ci-après (fig. 5.9) montre l'état de la digue au bout d'une dizaine d'années lorsque les arbustes des enrochements auront atteint

¹ Classe de circonférences en cm.

² Pour réaliser cette plantation, la commune s'est rendue propriétaire d'une parcelle de terrain de 10 m de largeur en pied de digue côté val (c'est-à-dire côté zone protégée).

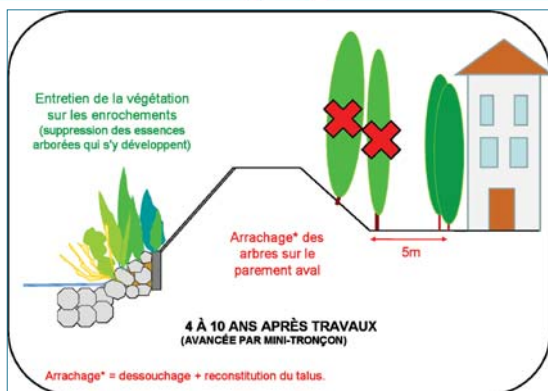


Figure 5.9. Coupe-type de traitement de la végétation, état à moyen terme.

leur développement mature et que les arbres de la haie auront dépassé 8 m de hauteur, permettant les premiers abattages et dessouchages sur la digue elle-même.

Réalisation des travaux

Retours d'expérience

Les travaux ont été réalisés en deux phases :

- lot amont (perré maçonné) : automne 2013 ;
- lot aval (masque de galets liés au bitume) : automne 2014.



Figure 5.10. État immédiatement après travaux (lot aval). Les arbres du parement côté zone protégée de la digue sont conservés. À comparer avec la figure 5.8 (ph. P. Mériaux).

Compte tenu de leur réalisation récente (automne 2014 pour le lot aval), on ne dispose que d'un faible recul pour évaluer l'efficacité des travaux de végétalisation des enrochements et les taux de reprise.

Néanmoins, il a été constaté au printemps 2015 un bon début de reprise du bouturage des saules arbustifs (rameaux 4/6 ayant été prélevés sur place). La crue du 1^{er} mai 2015 a sollicité la protection en enrochements et nécessitera des travaux de reconstitution-entretien du garnissage des joints, de manière à ce que l'enracinement des boutures puisse se poursuivre dans de bonnes conditions. De telles interventions d'entre-



tien sont classiques en génie végétal, s'agissant d'ouvrages utilisant du matériel vivant, particulièrement fragile les premières années. Sur le perré du lot amont (travaux de l'automne 2013), la mise en lumière résultant de l'abattage du corridor rivulaire a favorisé la germination de plantules. Ce qui a nécessité leur éradication.

On retiendra de cet exemple que la concertation entre toutes les parties prenantes a permis de mieux faire partager l'objectif des travaux de confortement de la digue d'Eygliers et d'adapter le projet de façon à limiter au mieux son impact visuel et à préparer le relais d'écran par une végétation arborescente plantée dans la zone protégée. Autre fruit original de cette concertation vertueuse : des mesures compensatoires ont également été prises au profit de colonies de chiroptères qui nichent sous le tablier du pont de la RN 94.

Remerciements

Nous remercions Mme Anne Chouvet, maire d'Eygliers, et M. Jean Morel, précédent maire et porteur du projet, pour leur relecture avertie de la présente fiche.

Références

2010 : Étude d'avant-projet Hydrétudes.

Mars 2012 : Compte rendu Cemagref suite à la visite du 18-11-2011 de la digue rive droite du Guil à Mont-Dauphin, commune d'Eygliers. Version complétée du 01-03-2012.

30 mars 2012 : Confortement de la digue d'Eygliers. Sondages de reconnaissance. Compte rendu Hydrétudes.

Mars 2012 : Étude paysagère du projet de confortement de la digue rive droite du Guil dans la traversée du chenal de Mont-Dauphin. Bureau Akene.

2013 : Guide Génie végétal en rivière de montagne, livrable du projet Genialp. À télécharger gratuitement sur : <http://ouvrage.geni-alp.org/content/t%C3%A9l%C3%A9chargements>



CAS DES DIGUES DE L'ISÈRE

Pour en savoir plus : <http://www.isere-drac-romanche.fr/>

Description de l'ouvrage

Nom : Dignes de l'Isère

Gestionnaire : Association départementale Isère-Drac-Romanche

Fonction : protection contre les inondations

Hauteur par rapport au TN : de 2 à 6 m, largeur 4 mètres en crête, pentes des talus : 2 pour 3

Année ou époque de construction : depuis le XVI^e siècle, exhaussement et élargissement, terrassements à sec 1950-1970

Historique et comportement de l'ouvrage

L'histoire des digues de l'Isère est représentative de nombreux ouvrages bordant les principaux fleuves et rivières de France.

À l'origine, l'Isère est une rivière à tresses ou méandres serpenteant sur toute la largeur de sa vallée, reconfigurant son cours à chaque crue. Aux XVI^e et XVII^e siècles, pour gagner des terres agricoles et stabiliser les berges, de petits endiguements locaux sont mis en place. Ils sont constitués d'épis favorisant l'atterrissement, de coffres en bois remplis de pierres ou de troncs d'arbres. Il faut attendre la fin du XVIII^e siècle pour que se généralisent des digues protégées par des enrochements (projet Cunit), mais celles-ci ne résistent pas aux grandes crues de cette époque, et la nécessité d'un aménagement d'ensemble se fait alors sentir.

Entre 1807 et 1936, plusieurs projets successifs, appuyés parfois par des lois, prévoient un aménagement cohérent de l'ensemble de la vallée : rehaussement concerté des digues ou leur déplacement pour élargir le lit, préservation de zones d'expansion des crues ou création de casiers endigués jouant ce rôle, rectification du lit, creusement de canaux de drainage à l'extérieur de l'endiguement, curage du lit mineur ou aménagements facilitant son curage naturel, etc. Mais la multiplicité des



acteurs non coordonnés (plus de 30 syndicats indépendants), le manque de crédits ainsi que les guerres ou l'instabilité politique ne permettent à aucun de ces projets d'aboutir, ni même pour certains de voir un début de mise en œuvre. Longtemps incomplet, mis à mal par le colmatage du lit ou le manque d'entretien, le système de digues et canaux est régulièrement endommagé et débordé par les crues exceptionnelles qui se répètent, conduisant à des réparations de fortune, des rehaussements ponctuels et des abandons temporaires. On retrouve la trace de ces nombreuses retouches dans l'hétérogénéité du corps des digues actuelles.

En 1936, le département de l'Isère, les communes riveraines et les syndicats sont regroupés au sein d'un organisme plus important : l'Association départementale des collectivités intéressées à l'aménagement des plaines de l'Isère, du Drac, et de la Romanche. À la suite d'une crue catastrophique en 1940, un énième grand projet concerté voit le jour, qui, comme certains précédents, tient compte de l'effet d'écrêtement des crues par des zones d'expansion en amont (projet Schneider). Mais il subira le même sort, et s'arrêtera faute de crédits avant d'être entièrement réalisé. Les travaux qui suivront durant plusieurs décennies, au gré des financements, ne respecteront pas toujours les plans de réalisation, notamment en élargissant les digues du côté lit mineur au lieu de les étendre côté val, conduisant à des problèmes d'érosion du pied de ces talus, qui perdurent. De gros investissements seront consentis pour la défense de la ville de Grenoble et de ses faubourgs. Mais parallèlement, l'entretien de la végétation des digues sera négligé à partir de 1970, aboutissant à l'installation de véritables forêts sur les parements et à leurs abords (fig. 5.11).

De 1987 à nos jours, l'entretien et la surveillance des digues retrouvent une activité soutenue : des travaux de réparation sont régulièrement engagés. Un schéma global d'aménagement, initié en 1992, associe ralentissement dynamique, renforcement de la stabilité des ouvrages, requalification environnementale, paysagère et piscicole, gestion du transport solide et recalibrages ponctuels. Avec un investissement de 100 millions d'euros répartis sur dix ans pour la seule partie située en amont de Grenoble, il a été finalisé en 2007. Dans ce cadre, un plan de gestion de la végétation, conçu avec



Figure 5.11. L'abandon de l'entretien courant des digues après 1970 avait conduit au développement d'une forêt luxuriante sur une grande partie des talus (ph. C. Ripert).



l'aide d'Irstea, est mis en œuvre dès 2003 et pour 10 ans, de façon à maîtriser les boisements implantés sur les talus de digue. Il a été réactualisé en 2015 pour poursuivre le travail engagé.

Contexte

Si les digues protègent en majorité des terres agricoles et quelques hameaux, l'un de leurs principaux enjeux est l'agglomération grenobloise, son université et ses zones industrielles qui abritent des installations classées sensibles (sites « Seveso »). L'enjeu à Grenoble est aussi la confluence de l'Isère avec le Drac, autre rivière tumultueuse aux crues ravageuses, dont le cours a été progressivement détourné depuis le XVII^e siècle (Lesdiguières) pour qu'il ne se jette plus à angle droit dans l'Isère en pleine ville, ce qui posait dans le passé de graves problèmes hydrauliques.

Pression administrative et contraintes écologiques

Les digues sont généralement cataloguées en « espace boisé classé » et incluses dans des « espaces naturels sensibles » locaux ou départementaux.

On note la présence de plantes classées comme la petite massette ou l'ail rocambole, et de castors.

Problématique liée à la végétation : digue boisée

En 2003, 60 % des digues de l'Isère étaient boisées, avec présence de très grands arbres (15 à 30 m de haut, jusqu'à 80 cm de diamètre). Les espèces dominantes étaient les peupliers (blanc et noir), les saules en pied d'ouvrage côté rivière et sur le ségonnal, le frêne, les érables, les chênes et les ormes, le robinier pseudo-acacia. Le noisetier et d'autres arbustes formaient un sous-étage, souvent dense, gênant l'inspection visuelle des talus et de la berge. Des espèces invasives, notamment la renouée du Japon et le buddleia, étaient présentes, en densité variable, sur 40 % de ce linéaire.



Méthodologie de diagnostic mise en œuvre et investigations réalisées

L'état des lieux a été réalisé initialement entre 2000 et 2003.

Il se compose :

- d'une carte détaillée de la végétation (voir fig. 4.1 p. 103), classée en différents types selon la hauteur et la densité des différents étages (arbres, sous-étage, végétation herbacée). Cette carte a été reportée sur un SIG, intégré dans le système de gestion globale des ouvrages (SIRS digues, cf. début du chapitre 4 p. 97) ;



Figure 5.12. Cette souche d'un peuplier de 30 ans illustre l'ampleur que peut prendre rapidement le système racinaire d'un arbre dans des conditions favorables (ph. C. Ripert).

- d'une étude de la vitesse de croissance de cette végétation suivant les espèces, leur position sur le ségonnal ou sur la digue, et la composition du sol. Ce travail permet d'estimer le temps de passage entre deux entretiens ou coupes et l'urgence de certaines interventions ;
- d'une étude de l'enracinement des arbres dans les digues, réalisée en extrayant l'intégralité du système racinaire (fig. 5.12) de nombreux arbres de toutes tailles et espèces afin d'évaluer les risques pour l'ouvrage en fonction de sa composition, taille, forme et structure interne ;
- d'une étude de la vitesse de décomposition des racines après la mort des arbres, à l'aide d'un dispositif expérimental implanté sur la digue et prévu pour être suivi pendant 15 ans.

Principaux résultats du diagnostic des risques liés à la végétation

Les systèmes racinaires des arbres occupent une partie importante du volume des ouvrages, et souvent de grosses racines les traversent de part en part. Les racines colonisent préférentiellement les matériaux riches et fins (limoneux) et négligent les matériaux grossiers et perméables. Ils sont donc très variables dans leur forme et leur profondeur suivant la structure et la composition des remblais, qui ne sont pas du tout homogènes en raison de l'histoire de ces ouvrages. Un diagnostic est donc difficile sans sondage mais le risque est toujours présent : éro-



sion externe par déracinement, ou par décomposition de grosses souches, et érosion interne en cas de décomposition des racines.

Les arbres poussent très rapidement (0,5 à 1 m par an en hauteur, de 1 à 3 cm/an en diamètre), et laisser faire la végétation fait augmenter le risque exponentiellement.

Tuer les arbres sans éliminer les souches et les grosses racines fait courir un risque élevé aux ouvrages.

Consciente de cette situation, l'AD Isère-Drac-Romanche est passée d'un entretien au coup par coup de la végétation à une gestion raisonnée, planifiée et basée sur des consignes de sylviculture compatibles avec la sécurisation des digues.

Mesures de réduction des risques mises en œuvre

Le principe

Le premier plan de gestion de « rattrapage » sur 10 ans (2004-2014) est basé sur le principe que le couvert forestier ne peut être totalement éradiqué, car il faudrait alors entièrement purger les remblais des racines ou les élargir, ce qui est financièrement impossible. L'objectif est donc de diminuer la densité du boisement, de rajeunir ce dernier pour éviter les gros massifs racinaires et limiter le risque de chute d'arbre (fig. 5.13), de garder vivantes les racines pour éviter leur pourrissement et enfin de gagner de la visibilité sur les talus. La végétation arborée doit aussi être en partie conservée pour des raisons environnementales (rôle de corridor biologique) et sociales (rôle paysager et d'accueil du public dans l'agglomération de Grenoble et ses abords), et parfois pour limiter l'expansion des plantes invasives (fig. 5.14). Les 220 km concernés sont traités en dix tranches annuelles de 20 km, soit 700 ke à 800 ke. On ne traite jamais des secteurs de plus de 500 m linéaires d'un seul tenant pour des questions paysagères. La priorisation des secteurs est basée sur la combinaison du type de végétation et des autres contraintes : état de la digue ou de la berge, enjeux à protéger. La réfection ou l'élargissement des digues se fait progressivement suivant un plan qui tient compte des urgences, au gré des imprévus et des financements.



La mise en œuvre

Selon la position de la végétation

Sur la digue : on conserve le boisement existant en limitant les préjudices à l'ouvrage : gestion de type jardinatoire avec des coupes d'éclaircies tous les 5 à 10 ans.

Sur le ségonnal (entre le pied de digue et la berge) : on peut conserver des essences arborées mais on diminue la densité et on limite la hauteur.

Sur la berge : les grands arbres sont éliminés pour limiter les embâcles ; seule une végétation souple et basse est autorisée.

Selon le secteur concerné

En milieu rural où il y a peu d'enjeux environnementaux et compte tenu du linéaire d'intervention limité à 500 m : on effectue une coupe rase sur le corps de digue et en pied. Les petites souches sont broyées car leur développement racinaire est faible et le pourrissement des racines sans conséquence. Les grosses souches sont conservées et rejetées. Chaque année, le sous-étage est tondu ou broyé, excepté les cépées d'arbres qui rejettent, afin de les maintenir en vie. Dix ans après le premier passage, on recoupe les cépées sur la digue. En berge, on repasse tous les 5 ans, de façon à éviter la croissance d'arbres pouvant alimenter les embâcles lors des crues.

En milieu périurbain où l'enjeu environnemental et paysager est plus fort : on effectue une coupe jardinatoire tous les 5 ans, le but étant de conserver un couvert boisé clair mais plus ou moins continu.

La première année, on procède au débroussaillage, à l'abattage des arbres malades, penchés, isolés, ou inadaptés (acacias, peupliers hybrides). On abat également les arbres trop minces pour leur taille et un tiers des arbres restants (les plus âgés). On conserve les très grands arbres sains car en cas de coupe, ils sont trop âgés pour rejeter. La cinquième année, on prélève encore 30 % des arbres. Entre-temps, les arbres prélevés la première année ont rejeté et assurent la continuité paysagère. Le dernier tiers des arbres est coupé 5 ans plus tard.

L'objectif est ensuite de repasser tous les 5 ans pour couper les rejets les plus âgés tout en maintenant le sous-bois propre pour faciliter l'inspection visuelle des talus.



Figure 5.13. Exploitation des arbres dans un secteur fortement boisé. Dans les zones critiques pour la sécurité, les souches des plus gros arbres ont été arrachées et le remblai reconstitué (ph. C. Ripert).



Figure 5.14. Après recépage complet ou élimination des plus gros individus lorsqu'on souhaite conserver un couvert forestier (zones urbaines, limitation des invasives), ne reste qu'un taillis éclairci de petits arbres beaucoup moins sensibles au renversement, ce qui limite à court terme le risque d'érosion externe. Les souches conservées continuent cependant de grossir et, à long terme, l'élimination progressive de la végétation ligneuse avec reconstitution ou confortement de la digue (fig. 5.16) sera souvent nécessaire si d'autres mesures de génie civil n'ont pas été prises (parois moulées ou parements étanches en zone urbaine par exemple) (ph. C. Ripert).

Perspectives

Le plan de gestion a été mis à jour et prolongé pour 10 années supplémentaires (2015-2025) dans le même esprit mais avec beaucoup moins d'investissement et plus d'entretien à faire sur la végétation.

Retours d'expérience

Le premier plan de gestion a été mis en œuvre à partir de 2004. Entre 2004 et 2007, s'est déroulée une phase d'organisation et de démarrage, sur le plan interne et au niveau des entreprises chargées des travaux. L'activité a culminé lors d'une deuxième phase entre 2008 et 2014 car, en plus des secteurs où il fallait intervenir pour la première fois (fig. 5.15 gauche), un entretien était devenu nécessaire, après 4 à 5 ans, sur les premiers secteurs traités (fig. 5.15 droite).

En 2015, une nouvelle phase est ouverte. Bénéficiant d'une situation désormais plus conforme aux impératifs de sécurité, et l'essentiel des investissements de mise à niveau de la végétation étant réalisé, les futures interventions consisteront à préserver ces acquis et à réparer les désordres provoqués par la végétation dans les corps de digue (fig. 5.16).



Figure 5.15. Remise en état de talus de digue par coupe rase (à gauche) et débroussaillage d'entretien (à droite) (photos J.-F. Gomez, AD Isère).

Après avoir atteint des montants annuels supérieurs à 600 k€ entre 2008 et 2011, les dépenses de gestion de la végétation sont réduites de moitié depuis 2015. Le nouveau plan de gestion prévoit annuellement 2,4 ha de surfaces coupées contre 4,8 ha lors du premier, le nombre d'arbres isolés devant être abattus passant de 603 sujets/an à 290 sujets/an.

S'il fallait retenir une donnée représentative des résultats obtenus avec le premier plan de gestion de la végétation, c'est l'écart de la surface fauchée entre 2005 et 2013. Elle s'est accrue de 70 hectares, soit une augmentation de 57 % et autant de surfaces boisées en moins à traiter ou à entretenir. Le coût de la fauche (350 €/ha) est sans commune mesure avec celui du déboisement (15 000 €/ha minimum), ce dernier ayant constitué un réel effort en termes d'investissement.



Figure 5.16. Travaux de stabilisation d'un talus contre les glissements (à gauche) et végétalisation du massif drainant (à droite), après déboisement du pied de talus et de ses abords (photos J.-F. Gomez, AD Isère).



CAS DE LA DIGUE DE CUSSET

Description de l'ouvrage : Digue de canal

Nom : Digue de Cusset

Propriétaire-gestionnaire : EDF

Fonction : digue d'aménagement hydroélectrique (canal d'aménée)

Cours d'eau : le Rhône

Hauteur par rapport au TN : 3 à 11 m

Année de construction : 1895 à 1897

Constitution : remblai de 15 km de longueur

Historique et comportement de l'ouvrage

Dès la première mise en eau (1897), sont apparus des problèmes localisés de fuites soutenues qui ont nécessité des traitements spécifiques d'étanchéité. Diverses dégradations par érosion et un léger relèvement de la cote d'exploitation du plan d'eau ont progressivement conduit à installer, dans la première moitié du XX^e siècle, un revêtement maçonné (dalles béton de 10 cm à 20 cm d'épaisseur) en sommet de parement côté canal de l'ensemble de la digue, sur au minimum le dernier mètre cinquante du talus (cote 179,5 à 181 NGF). De 1932 à 1974, plusieurs campagnes d'injection dans le remblai ne parviennent pas à venir à bout des fuites en dépit de consommation élevée (38 000 m³ de coulis pour 3 268 ml traités). En 1994, l'apparition de fuites chargées de particules au PK 7 amène l'exploitant à faire réaliser des travaux de confortement d'urgence sur 350 ml et à confier à EDF-CNEH une étude de diagnostic approfondi de l'ensemble de la digue. Cette étude a conduit à un renforcement substantiel du dispositif d'auscultation et au déploiement d'une batterie complète de sondages et prospections de reconnaissance. Le mécanisme de dégradation identifié par l'étude de diagnostic est celui de l'érosion interne qui concerne un linéaire bien supérieur



aux seuls alentours du PK 7. La solution de confortement recommandée est la paroi mince d'étanchéité : dès 1995, 814 ml sont traités ainsi à titre exploratoire vers le PK 7, puis progressivement jusqu'en 1999, 4 237 ml de paroi sont réalisés, répartis en 8 tronçons de 100 à 1 292 m de longueur. La profondeur de la paroi varie de 7,5 à 12 m suivant les tronçons traités. Dans la foulée de ces travaux, en 1997 et 1998, une importante remise à niveau du pied aval de la digue a été effectuée [recharge drainante de pied de digue au droit des parois, création ou réhabilitation de 10 dispositifs de mesure des débits de fuite ; création ou réhabilitation de contre-canal, et de la piste de service en pied aval].

Problématique liée à la végétation : digue fortement boisée

Digue fortement végétalisée avec présence de grands arbres et d'un taillis sur souches, parfois très anciens : les robiniers, plantés à la construction de l'ouvrage, ont donc des souches de plus d'une centaine d'années ; de nombreuses souches mortes sont visibles. Peupliers, robinier, frêne et chêne sont les espèces dominantes.

Méthodologie de diagnostic mise en œuvre et investigations réalisées

Lors d'une première phase conduite en juillet 2007, puis en septembre 2008, 35 arbres au total ont été dessouchés sur les parements aval et amont. Les enracinements ont été étudiés et caractérisés en fonction de nombreux paramètres (espèces, matériaux de la digue, accès à l'eau, taille des enracinements, directions principales des racines, dimensions et états des racines...).

Principaux résultats du diagnostic des risques liés à la végétation

Ce diagnostic a révélé que les souches avaient des volumes bien plus importants que ne le laissait supposer la partie aérienne des arbres, qui avaient été coupés plusieurs fois dans le passé. Ces souches étaient donc âgées et présentaient des racines en cours de décomposition, parfois à un stade avancé. Certaines grosses et longues racines de peupliers et robiniers s'orientaient en direction du canal, traversant une partie du remblai.



Préconisations de gestion et/ou de travaux formulés, et justification

Six zones ont été définies en fonction du risque induit par la végétation arborescente implantée sur l'ouvrage prenant en compte la position des arbres sur la digue, le diamètre à la base des souches et la hauteur des arbres (fig. 5.17) :

- Zone 1 : Parement amont
- Zone 2 : Crête
- Zone 3 : Haut de parement aval
- Zone 4 : Milieu de parement aval
- Zone 5 : Bas de parement aval
- Zone 6 : Pied de digue

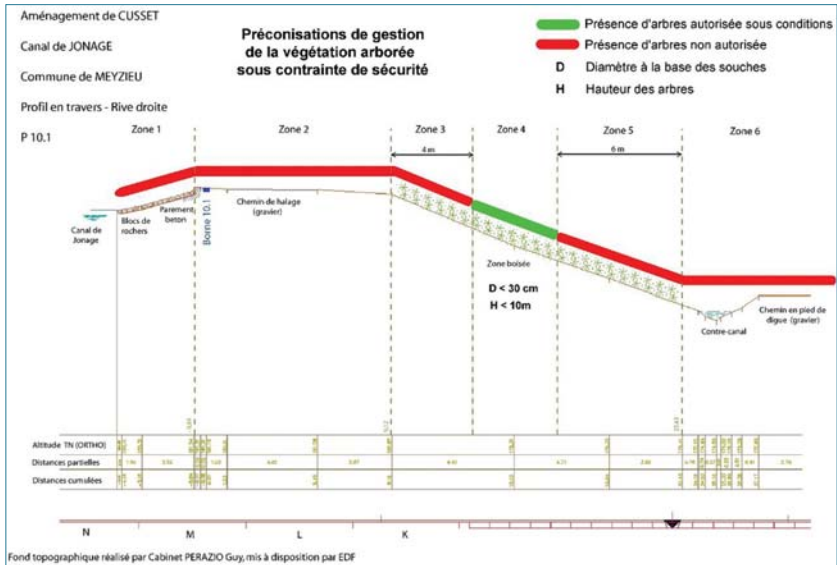


Figure 5.17. Gestion de la végétation arborescente sur la digue.

- Sur les zones 1, 2, 3, 5 et 6 : présence d'arbres non autorisée
Pour les grosses souches ayant été recepées plusieurs fois, leur extraction est recommandée, afin d'éviter toute dégradation de la structure et des propriétés du remblai. Si cela n'est toutefois pas envisageable, il est recommandé de procéder à l'abattage des rejets au ras du sol. Les arbres dont le diamètre à la base est inférieur à 30 cm doivent être simplement abattus.
- Sur la zone 4 : présence d'arbres autorisée sous conditions
Il est possible de maintenir la présence d'un boisement clair sur la digue (fonctions écologique, sociale et paysagère) en limitant la dimension des arbres et en assurant un débroussaillage régulier du sous-bois pour ne pas entraver la visibilité du talus. Les conditions : (1) suppression des grosses souches anciennes (diamètre > 30 cm) afin de réduire le risque de déstructuration du remblai après décomposition et (2) limitation de la hauteur des arbres à 10 m, ce qui réduit les problèmes de stabilité.



Mesures de réduction des risques mises en œuvre

Description des travaux réalisés

Préconisation pour le dessouchage et la reconstitution du talus après dessouchage ponctuel (zones 3 et 5) :

- couper l'arbre à environ 60-100 cm du collet ;
- dégager le réseau racinaire traçant situé dans les 30 premiers cm ;
- désolidariser les racines pivotantes ou obliques par pression et à-coup sur le bout de tronc restant ;
- extraire la souche par traction (l'élinguer si besoin) ;
- extraire les grandes racines de gros diamètre (supérieur à 10 cm) lorsqu'elles ont été cassées ;
- nettoyer la fosse (enlever les restes de racines) ;
- tasser la fosse au godet ;
- poser un géotextile filtre ;
- remblayer par apport de matériaux ou par les matériaux retirés selon la dimension de la souche extraite (en respectent la stratigraphie – couche de sol en surface) ;
- tasser la zone remblayée ;
- ensemencement (herbacées).

Chantier (fig. 5.18 à 5.20)

Les travaux de dessouchage ont été conduits à partir d'octobre 2009, hors de période de reproduction de la faune et la flore. Le chantier a été stoppé par la présence d'une espèce protégée identifiée sur le site. Des mesures d'évitement et de préservation ont été mises en place pour la reprise du chantier. Un travail important de communication a été réalisé par le gestionnaire afin d'expliquer aux riverains et usagers de la digue, les objectifs des travaux et de la remise en conformité de l'état de la digue.

Dispositions de gestion adoptées

Afin d'assurer une surveillance et une sûreté optimales de l'ouvrage, le gestionnaire a pris le parti de traiter l'ensemble du talus côté parement aval. La roselière présente en parement amont a été conservée et un mode d'entretien permettant sa régénération a été mis en place.



Retours d'expérience

Comportement de l'ouvrage depuis les travaux

Suite aux opérations de traitement de la végétation ligneuse dangereuse en 2009, le comportement de la digue est resté stable. Cependant, afin d'augmenter la sûreté de la digue, celle-ci a fait l'objet de travaux spécifiques, à partir de 2012, visant à garantir et pérenniser l'ouvrage, ainsi que la sécurité des zones urbaines et naturelles qui l'entourent. La réalisation d'une paroi mince, la réfection du système de drainage et filtration, l'installation d'une fibre optique permettant une meilleure surveillance de l'ouvrage, ainsi que le renforcement de certaines parties du parement amont, ont été effectués entre 2012 et 2015.



Figure 5-18. Avant les travaux de gestion de la végétation (ph. C. Zanetti).

Mesures environnementales complémentaires

Afin de préserver la biodiversité importante aux abords de la digue, de nombreuses mesures d'évitement, d'atténuation ou de compensation ont été mises en œuvre, dont des captures de sauvegarde d'espèces telles que la grenouille agile, le triton palmé, le lézard des murailles, l'agrion de mercurie, ainsi que la création de 250 m² de mares recréant l'habitat des amphibiens transférés, qui feront l'objet d'un programme de suivi et de gestion des espèces et habitats protégés.



Figure 5.19. Pendant travaux de dessouchage (ph. C. Zanetti).



Figure 5.20. Après travaux de dessouchage (ph. EDF).



Perspectives

Grâce à ces travaux conséquents, la digue de Cusset fait partie intégrante de l'Anneau bleu, dont l'objectif est de mettre en valeur la richesse écologique du site, de permettre l'accès au plus grand nombre à un environnement de qualité tout en préservant les activités économiques.

L'eau est l'élément fédérateur des espaces de l'Anneau bleu : énergie hydroélectrique, réserve d'eau potable, protection des zones urbaines contre les crues du Rhône, loisirs et sports liés à l'eau, et richesse écologique des milieux aquatiques.



CAS DE LA DIGUE DU ROBINET

Description de l'ouvrage

(état au moment du diagnostic de végétation)

Nom : Digue du Robinet

Propriétaire-gestionnaire : Compagnie nationale du Rhône et Électricité de France

Fonction : Retenue d'aménagement hydroélectrique

Cours d'eau : le Rhône

Hauteur par rapport au TN : 3 à 5 m (600 m linéaire)

Année ou époque de construction : 1948-1952, probablement sur une ancienne levée du canal de Pierrelatte (ou canal d'Orange, ou canal de Conti).

Constitution : remblai homogène en gravier, couche de limon de la fondation superficielle sensible à l'érosion interne.

Historique et comportement de l'ouvrage

Digue rive gauche de la retenue du barrage de Donzère, profil en travers le plus étroit vers P1.2, soumise à une charge hydraulique transitoire de relativement faible amplitude (2 m entre niveau normal des eaux et plus hautes eaux 1 000 ans). Incident février-mars 2006 : fontis sur talus côté contre-canal. Campagnes d'investigation en 2009 (géophysique, géotechnique et évaluation du risque d'érosion interne).

Contexte

- volonté d'épargner certains arbres par mesures d'évitement vis-à-vis de l'impact environnemental et paysager ;
- volonté d'épargner les arbres de la platelle pour l'utilisation des lieux par la mairie (fêtes du Rhône qui se déroulent en été) ;



- pression administrative = risques induits par les arbres (chute sur les piétons) ;
- site classé en zone Natura 2000 ;
- ouvrage en proximité du pont classé du Robinet et du site remarquables des falaises du défilé de Donzère ;
- ouvrage de l'aménagement de Donzère-Mondragon nécessitant un renforcement et un entretien pour éviter les débordements du canal et participer à la protection inondation de la centrale nucléaire du Tricastin contre les crues extrêmes du Rhône.

Problématique liée à la végétation : digue boisée

Caractérisation de la végétation arborée : présence de nombreux arbres matures sur l'ouvrage et en pied de digue, essentiellement des peupliers et robiniers.

Méthodologie de diagnostic mise en œuvre et investigations réalisées

En octobre 2010, 33 arbres ont été dessouchés au moyen de pelles mécaniques, sur les parements amont et aval. Les enracinements ont été étudiés et caractérisés en fonction de nombreux paramètres (espèces, matériaux de la digue, accès à l'eau, taille des enracinements, direction principale, dimensions et états des racines...). Des souches en cours de décomposition ont pu être observées.

Principaux résultats du diagnostic des risques liés à la végétation

La différence de structure racinaire a été observée selon les matériaux. Dans les matériaux grossiers, de grosses racines traçantes et de gros pivots sont présents, tandis que dans les matériaux fins, des racines plus nombreuses et plus fines avec petits pivots se développent. Les vitesses de croissance des arbres dépendent très fortement des espèces végétales : à âge égal (30 ans environ) et dans des conditions de développement identiques, les peupliers font en moyenne 50 cm de diamètre au collet tandis que les robiniers atteignent 25 cm de diamètre seulement. Les volumes d'encombrement racinaire maximum des peupliers sont de 15 m³ contre seulement 5 m³ pour les robiniers.



Nous avons pu observer que les enrochements de protection côté Rhône étaient déstructurés par le développement des peupliers au contact de l'eau, dont les racines désolidarisent les blocs.

Les souches pourries génèrent différents types de risques, tels que le risque d'effondrement local au droit des souches décomposées, risque de formation de galerie interne à la racine (conservation de l'écorce), risque de formation de galeries dans les matériaux fins cohésifs.

Préconisations de gestion ou de travaux formulées, et justification

- éviter la présence d'arbres de grande taille, vieux, malades ou creux à cause des racines en décomposition mais surtout du risque de chute de branches ou troncs sur les passants ;
- éradication progressive des arbres implantés sur les zones à risques :
 - sur enrochements côté canal (arrachement = désolidarisation des blocs de protection + embâcles en aval) ;
 - sur la limite TN/remblai côté contre-canal (zone à surveiller) ;
 - éradication progressive (sur 10 ans) des gros arbres du remblai (diamètre collet > 80 cm puis > 40 cm) ;
- entretien régulier des joints du perré en béton au niveau de la rive concave : la végétation herbacée favorise l'apparition de jeunes pousses d'essences arborées conduisant à la dégradation des joints et à la déstructuration des dalles du perré.

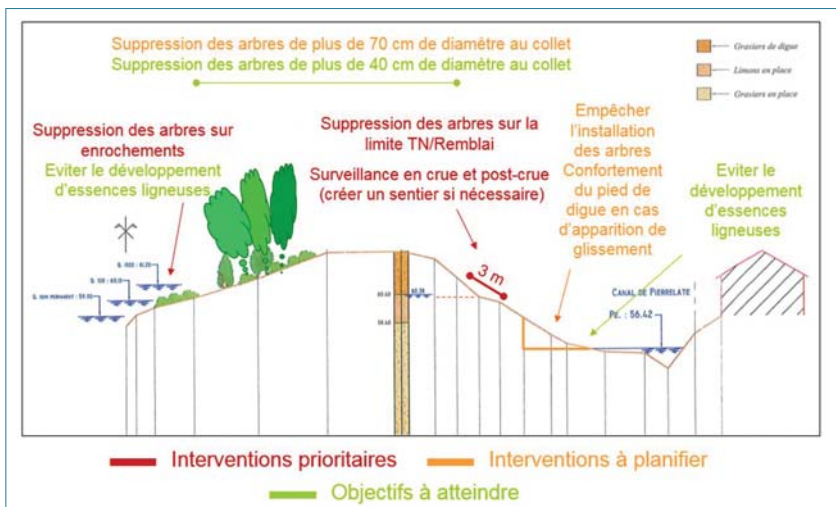


Figure 5.21. Schéma illustrant les préconisations de gestion au droit du secteur le plus étroit (profil 1.2).



Mesures de réduction des risques mises en œuvre

Description des travaux réalisés

Dans le cadre de la mise en conformité de la digue du Robinet (protection inondation de la centrale nucléaire du Tricastin en cas de crue extrême du Rhône), il a finalement été procédé à la mise en sûreté de la digue pour une crue décennale (NE + 2 m).

Chantier (fig. 5.22 à 5.24)

Les travaux de renforcement de la digue ont débuté en octobre 2013. L'extraction de la totalité des souches présentes dans le remblai a été nécessaire afin de pouvoir le consolider selon les règles de l'art.

Le protocole de dessouchage mécanique a été validé avant la phase travaux, lors de planches tests. Des essais de carottage à proximité des dalles bétons se sont avérés non satisfaisants car ne permettant aucune visibilité des racines restées en place ; par ailleurs cette technique engendre de fortes probabilités d'apparition de rejets et/ou drageons.

Suite aux opérations d'extraction, la digue a été reprofilée, les limons actuels remplacés par des matériaux permettant de stabiliser les talus. Un géotextile filtrant afin d'éviter les érosions internes de la digue a été posé sous les remblais. Le parement côté Rhône a été reconstitué par un nouvel enrochement plus épais.

Dispositions de gestion adoptées

Depuis la finalisation des travaux en 2014, les talus de la digue confortée sont désormais gérés en prairie herbacée.

De grands arbres, implantés sur la platelle au bord du Rhône, ont été préservés afin de conserver un espace de verdure et d'ombrage, notamment pour le déroulement des fêtes du Rhône en été. Des gradins ont été aménagés pour ces occasions.

Les arbres du parking près du pont du Robinet, sans incidence sur la sécurité hydraulique de la digue, ont également été préservés pour des exigences d'intégration paysagère.



Retours d'expérience

Comportement de l'ouvrage depuis les travaux

Un phénomène de percolation a été observé au pied du parement aval (au niveau du contre-canal) pendant les travaux. L'origine de cette percolation n'a pas été identifiée avec certitude. Celle-ci pouvait être liée aux dessouchages ou bien au décolmatage du talus amont (du fait de la réfection des enrochements côté fleuve), ou encore existait au préalable des travaux et aurait été mise en évidence suite au terrassement du talus aval. Le pied de digue y a été conforté par géotextile et enrochements.



Figure 5.22. Avant diagnostic de la végétation (ph. C. Zanetti).



Figure 5.23. Pendant les travaux de dessouchage (ph. C. Zanetti).

Perspectives

L'association « Rhône Source de Vie » fêtera ses 20 ans en juillet 2015 sur les abords du Rhône au pied de la digue du Robinet



Figure 5.24. Actuellement, après la réalisation du confortement de la digue (ph. CNR/EDF).



CAS DU BARRAGE DE MONTJOUX

Description de l'ouvrage

(état au moment du diagnostic de végétation)

Nom : barrage ou étang de Montjoux.

Situation : commune de Saint-Jean-de-Bournay (38).

Propriétaire-gestionnaire : conseil départemental de l'Isère, qui a fait l'acquisition de l'étang, puis de son barrage, en plusieurs actes de 2002 à 2007.

Fonction : écologique (espace naturel sensible du département de l'Isère) et alimentation d'un moulin privé.

Cours d'eau : la Gervonde.

Hauteur maximale par rapport au TN : de l'ordre de 7 m (volume : 257 000 m³ /classe C).

Année ou époque de construction : XVI^e siècle ? existence avérée au XVII^e siècle, avec une vocation initiale industrielle (moulins, scieries, tanneries de Saint-Jean-de-Bournay, ville située à environ 1 km à l'aval).

Constitution du barrage : remblai de 310 m de longueur réputé homogène de limons et limons sableux, englobant des passées plus grossières et reposant sur une fondation de graves sableuses ou limoneuses, avec une couche de terre riche en matière organique à l'interface remblai/fondation (d'après un diagnostic géotechnique de 2012 et les 7 sondages carottés réalisés dans ce cadre) ; crête large (8 m environ) empruntée anciennement par une voie communale ; fruits des parements : 2 amont/1,5 aval.



Figure 5.25 a et b. Peupliers au sommet du parement amont avant (2007), puis en cours d'abattage (2009) (photos (a) Géo+Environnement et (b) Cemagref/Irstea).



Historique et comportement de l'ouvrage

Dans la deuxième moitié du XX^e siècle, l'étang prend une vocation piscicole avant d'être progressivement acquis par le conseil départemental de l'Isère dans le cadre de sa politique d'espaces naturels sensibles. Dès l'acquisition du barrage au début des années 2000, le conseil départemental s'est inquiété de sa sécurité, en premier lieu : l'état et la fonctionnalité des organes de vidange et la capacité d'évacuation des crues de la Gervonde. Par arrêté préfectoral du 16-11-2009, l'ouvrage est classé C au sens du décret du 11-12-2007 et fait l'objet de prescriptions en vue de sa mise en sécurité (création d'un évacuateur de crues, réfection du parement aval et sécurisation ou reprise des bondes). Jusqu'en 2012 où, à l'occasion de leur réalisation, 7 forages carottés seront instrumentés en piézomètres, le barrage n'est équipé d'aucun appareil d'auscultation. Les seuls traits connus de son comportement sont la présence de quelques venues d'eau vers le pied aval. L'existence de circulations d'eau dans le remblai sera confirmée au cours de l'hiver 2009-2010 lors du terrassement sur le parement aval des fouilles du coursier de l'évacuateur de crues vers la rive gauche (fig. 5.28).

Problématique liée à la végétation

Une végétation arborée composée de gros et vieux peupliers s'était développée au sommet du parement amont (fig. 5.25) et parallèlement la protection anti-batillage initiale, formée d'un perré en dalles, avait disparu ou était en voie de dislocation. Des basculements d'arbres dans



Figure 5.26. Parement amont après les travaux de reprise de la protection anti-batillage (2010) (ph. Cemagref/Irstea).



Figure 5.27. Taillis dense sur le parement aval du barrage (ph. Cemagref/Irstea).



l'étang étaient régulièrement observés, laissant des trous dans la protection. Fin 2009, cette végétation a été intégralement éliminée à l'occasion des travaux de reprise du parement amont et de la protection anti-batillage (fig. 5.26).

Quant au parement aval, il est boisé d'un taillis de noisetiers à frênes et érables, avec quelques arbres de franc-pied.

Caractérisation et diagnostic de la végétation arborée

Méthodologie de diagnostic mise en œuvre et investigations réalisées (dessouchages, mesures, sondages à la pelle...)

Le diagnostic du barrage a été effectué en trois phases, dont les deux dernières se sont intéressées de façon approfondie à la problématique de la végétation arborée :

- 2002-2003 : évacuation des crues et diagnostic du parement aval (bureau d'études spécialisé) ;
- 2007-2008 : expertise du parement amont et des organes de vidange (bureau d'études spécialisé), associant un examen visuel et des reconnaissances effectuées plan d'eau abaissé (vidange partielle) et une visite subaquatique. À cette occasion, une étude de l'enracinement de 3 peupliers est réalisée, par l'intermédiaire de 4 sondages à la mini-pelle mécanique ;
- 2010-2012 : expertise de la végétation ligneuse du parement aval (Irstea pour le compte du CD 38). L'idée a été ici de profiter de la création des fouilles du nouvel évacuateur (mi-février 2010) pour procéder à des arrachages contrôlés d'arbres du parement aval afin de caractériser leurs systèmes racinaires. Par la suite et à l'appui d'un examen approfondi de ce parement et des documents de diagnostic disponibles, Irstea a élaboré une note de recommandations à destination du conseil départemental. Parmi celles-ci figurait la réalisation à court terme d'une campagne de sondages géotechniques que le conseil départemental confia en 2011-2012 à un bureau d'études spécialisé en géotechnique. Enfin, fort des résultats de ces études et reconnaissances, le CD38 élaborait mi-2012 un « protocole de gestion de la végétation arborée du parement aval », soumis au service de contrôle de la sécurité des barrages (Dreal).



Figure 5.28. Déracinements d'arbres sur le parement aval et appréciation du développement racinaire dans les fouilles du futur évacuateur de crues (février 2010) (photos Cemagref/Irstea).

Principaux résultats du diagnostic des risques liés à la végétation

La nécessité de reconstruire une protection anti-batillage sur le parement amont a imposé en 2009 l'éradication complète des peupliers qui s'étaient installés là et dont les racines contribuaient à la dégradation. Nous nous intéressons donc, dans la suite de cette fiche, **exclusivement à la problématique de la végétation du parement aval.**

Vis-à-vis du parement aval, la note Irstea 2010 pointe les risques d'érosion interne susceptibles d'être induits par le pourrissement des racines des arbres du taillis. D'après les quelques prélèvements de sols effectués à l'époque (c'est-à-dire avant la campagne de sondages géotechniques de 2012), on sait que les matériaux du remblai sont limoneux, donc cohésifs et sensibles à une érosion interne de conduit. De plus, leur courbe granulométrique présente une discontinuité granulométrique (carence en éléments de diamètre compris entre 0,5 et 8 mm) qui en rend la fraction fine potentiellement érodable. Enfin, des circulations internes d'eau sont avérées.

Ces éléments concourent donc à estimer le risque racinaire comme important et à le maîtriser par des mesures appropriées.



Préconisations de gestion et/ou de travaux formulées, et justification (parement aval)

Dans sa note de 2010, Irstea formule des recommandations de court à long terme dont les principales sont résumées ci-dessous :

- mesures d'application immédiate relevant pour l'essentiel de dispositions de surveillance et d'entretien :
 - débroussaillage régulier annuel, *a minima* en partie inférieure du parement aval ;
 - visites régulières de surveillance, avec compte rendu ;
 - création d'un sentier permettant un cheminement aisé en pied aval ;
 - établissement d'une consigne de vidange rapide en cas d'anomalies (apparition ou évolution de fuites...) ;
- mesures de moyen terme :
 - étude de diagnostic approfondie s'appuyant sur une campagne de reconnaissances géotechniques ;
 - abattage et dessouchage des plus gros arbres (penchés ou malades) et reconstitution du talus aval ;
 - travaux visant à améliorer l'accès pédestre et la visibilité du parement aval ;
 - étude simplifiée d'onde de rupture du barrage et d'analyse des enjeux à l'aval ;
- mesures de long terme : seules des orientations sont esquissées à ce stade, en attente des résultats du diagnostic et des reconnaissances géotechniques approfondies.

Mesures de réduction des risques mises en œuvre (parement aval)

Description des études et travaux réalisés

À partir de 2012 puis 2014, le CD 38 met en place les mesures de surveillance renforcée du barrage (tourné mensuelle d'examen visuel selon un parcours formalisé, relevé mensuel des piézomètres et des drains, consignation de ces informations dans le registre journal et dans un rapport annuel remis à la Dreal) dont les principes avaient été esquissés par Irstea en 2010. Par ailleurs, il a fait conduire en 2011-2012



une étude de diagnostic géotechnique approfondie, également recommandée par Irstea.

Cette étude-diagnostic confirme les risques d'érosion interne (de conduit et régressive en pied aval) et préconise la création d'un blocage de pied filtre-drain.

Après déboisement et dessouchage sur une bande de 4 m de largeur, ces travaux de génie civil sont réalisés en 2013 et 2014, selon le profil-type de la figure 5.29 sur l'ensemble du pied aval du barrage, hors évacuateur de crues (source CD 38/Géo+) :

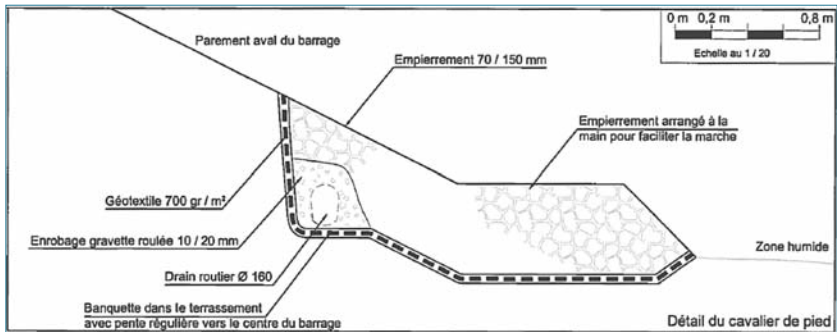


Figure 5.29. Profil en coupe du système de blocage et filtre-drain en pied d'ouvrage (source : CD 38 et Géo+).

Le cheminement pédestre pour la surveillance est maintenant facilité grâce au cavalier de pied et les débits de drainage sont collectés et jaugés (fig. 5.30).

Dispositions de gestion entérinées par le maître d'ouvrage

Celles-ci ont fait l'objet d'une note du CD 38 (2012), proposant les mesures suivantes pour ce qui est de la gestion de la végétation arborée du parement aval et de sa surveillance :

- nettoyage annuel du sous-bois : ramassage et évacuation du bois mort, fauche des zones en ronciers ;
- création d'un cheminement de surveillance en pied aval et tournées d'examen visuel ;
- gestion en taillis fureté dense (sous-bois sombre), à rotation courte (3 ans) de façon à limiter le diamètre maximum des brins de cépée à 10 cm.



Figure 5.30. Chantier de construction du cavalier de pied filtre-drain (septembre 2013). En bas, ouvrage réalisé, avec exutoire des collecteurs de drainage (photos conseil départemental de l'Isère).

Dispositions de gestion acceptées par le service de contrôle Dreal

La Dreal a validé globalement la stratégie de gestion proposée par le CD 38 en insistant sur la mise en œuvre des dispositions de surveillance et d'auscultation et en attirant l'attention sur la nécessité de maîtriser les dimensions des souches, dans le cadre de la gestion en taillis fureté, par leur extraction au bout de quelques cycles de recépage.

Retour d'expériences. Perspectives

L'importante opération de bûcheronnage et de dessouchage réalisée lors de la création du cavalier de pied a permis de supprimer une grande partie des gros arbres et souches du parement aval (fig. 5.30). Concernant les taillis, une opération de recépage conformément au « protocole de gestion de la végétation arborée du parement » aura lieu en 2016 à l'occasion de la visite technique approfondie (VTA).

Aucune anomalie n'a pour l'heure été constatée dans les relevés d'auscultation (piézométrie et débit des drains) et la surveillance visuelle mensuels.



Remerciements

La présente fiche a bénéficié de la relecture et des compléments du service Développement durable du conseil départemental de l'Isère (Corinne Ribault).

Références

Janvier 2003 : Évacuateur de crues AVP. Diagnostic du parement aval, bureau d'études Géo+, pour le compte du CD 38.

Mars 2008 : Étang de Monjoux. Expertise du parement amont et auscultation des organes de vidanges, bureau d'études Géo+Environnement.

Compte rendu Cemagref de la visite du 15-12-2009 du barrage de l'étang de Monjoux pendant la première phase des travaux (reprise du parement amont) : aspects liés à la végétation arborée.

Compte rendu Cemagref de la visite du 17-02-2010 du barrage de l'étang de Monjoux pendant la deuxième phase des travaux (aménagement du déversoir de crues) : aspects liés à la végétation arborée implantée sur le parement aval.

Juillet 2010 : Note de recommandations pour la sécurisation du barrage de Monjoux vis-à-vis du développement de la végétation ligneuse sur le parement aval, Cemagref/Irstea.

Février 2012 : Digue-barrage de l'étang de Montjoux. Diagnostic géotechnique, bureau d'études IMSRN pour le compte du CD 38.

Été 2012 : Étang de Monjoux, espace naturel sensible. Protocole de gestion de la végétation arborée du parement aval, conseil départemental de l'Isère.



Remerciements,
conclusion,
bibliographie
et annexes



REMERCIEMENTS

Les auteurs sont tout particulièrement reconnaissants à Gérard Degoutte, membre du Comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques (CTPBOH), qui a fait une relecture complète et très détaillée du manuscrit et formulé de nombreuses suggestions.

Ils remercient aussi les nombreux autres relecteurs qui ont contribué à la qualité de cet ouvrage et à sa justesse par leurs corrections, ajouts et suggestions de fond comme de forme, et qui ont fourni pour certains des illustrations :

Michel Pinhas, Jean-François Gomez (Association Départementale Isère-Drac-Romanche)

Hervé Laydier, Alain Demangeat, Rémi Taisant, Romain Brusson et Agnès Parizotto (Compagnie Nationale du Rhône CNR)

Éric Brevet (Électricité de France EDF)

Michel Gommeaux (VNF/DT Bassin de la Seine)

Erwan Le Barbu (Dreal Franche-Comté)

Bruno Patouillet, Samuel Busson, Samuel Pauvert, Anne Brune, David Criado et Annick Mievre (Dreal Paca)

André Evette (Irstea Grenoble)

Corinne Ribault (conseil départemental de l'Isère)

Anne Chouvet et Jean Morel (commune d'Eygliers)

Ce guide n'aurait pu voir le jour sans les travaux de recherche-développement qui ont été financés ou soutenus depuis 1996 par :

- de nombreuses institutions ou collectivités publiques : le ministère chargé de l'Écologie, la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, l'Union européenne, l'Irex, la Fédération de recherche Eccorev, le Labex OT-Med, les Dreal Paca et Franche-Comté, Chambéry Métropole, le conseil départemental de l'Isère, les DDT des Pyrénées-Orientales, de l'Aude et de la Nièvre, et Irstea.
- et des gestionnaires de digues ou de barrages : AD Isère-Drac-Romanche, CNR, EDF, le syndicat mixte d'aménagement de la vallée de la Durance, l'établissement public territorial de bassin du Viourle, le Symadrem.



Enfin, de nombreux collègues, ingénieurs, techniciens, étudiants et stagiaires ont réalisé :

- soit un travail colossal de mesures sur le terrain, notamment lors de la cartographie de végétation et encore plus pour les mesures sur l'enracinement des arbres et la conception des plans de gestion de certains ouvrages ;
- soit un travail de relecture et d'analyse de documents ou la fourniture d'illustrations.

Sans doute non exhaustives, les deux listes ci-dessous donnent une idée de l'ampleur de la tâche accomplie durant les quelque 20 années d'études qui ont conduit à cet ouvrage. Que d'éventuels oubliés nous pardonnent :

- parmi les principaux contributeurs : Ripert Christian, Chandioix Olivier et Estève Roland d'Irstea, qui ont participé à certaines études en tant qu'acteurs principaux et comme contributeurs systématiques pendant de longues années ;
- autres participants (terrain, rapports ou relecture, dans l'ordre alphabétique) : Alibert Nathalie, Argelies Laure, Auriou Lucie, Bambara Gisèle, Baillon Sophie, Bédécarrats Alain, Ben-Manaa Ramzi, Bernard Alain, Blanc Geoffrey, Boutry Marika, Brugier Maxime, Busset Florian, Chatillon Thierry, Curt Corinne, Clément Arnaud, Doirat Gaylord, Dufour Simon, Evette André, Ferrat Sophie, Fiorese David, Folton Cyril, Gremaux Yves, Guibal Frédéric, Jérôme Jennifer, Lachouette Damien, Lacombe Sylvain, Le Louet Vincent, Martin Willy, Mary Benjamin, Morin Xavier, Moundy Pierre-Jean, N'Diaye Boubacar Aminata, Nunes Guillaume, Payerne Joël, Piana Caroline, Provansal Mireille, Renault Isabelle, Royet Paul, Tourette Sébastien, Tourment Rémy, Vanden-Eede Aurélie, Vanloot Pierre.

Nous remercions, enfin, le conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, qui a subventionné les travaux d'édition du présent ouvrage.



CONCLUSION

Bien qu'il fasse la synthèse de quelque 20 ans d'expériences et d'échanges entre chercheurs, ingénieurs et gestionnaires, cet ouvrage ne saurait être utilisé sans discernement, ni précautions : chaque rivière est unique et chaque digue ou barrage particuliers, en raison de leur histoire et des conditions locales de climat, de régime hydraulique, de végétation, de sol, d'enjeux humains ou économiques... Certains points particuliers n'ont pas été traités en détail, comme la gestion des plantes invasives, faute de recul à propos des expériences en cours sur de nombreuses digues et berges et du fait de la complexité de cette problématique. D'autres, comme l'enracinement des arbres, commencent à être bien maîtrisés mais chaque nouvelle étude soulève des questions parfois inattendues et apporte de nouvelles connaissances.

Le guide est donc un point de départ et demande à être sans cesse amélioré et complété : il est important que les gestionnaires, et ceux qui les conseillent dans leurs études et travaux, poursuivent les échanges et constituent une large base de données et d'expertise des retours d'expérience sur sa mise en œuvre et sur les autres avancées qui ne manqueront pas de se produire à l'échelle de la France, mais aussi en relation avec l'Europe et le reste du monde.

De ce point de vue, les six études de cas qui sont présentées au chapitre 5 n'ont aucune prétention d'exhaustivité, ni de représentativité. Elles témoignent simplement de la diversité des problèmes posés par la gestion de la végétation sur des digues et barrages français et illustrent concrètement certains des principes et solutions développés dans le guide. Elles doivent inciter à poursuivre le travail de partage des expériences qui est amorcé ici.



BIBLIOGRAPHIE

On trouvera ci-après une liste de publications citées dans ce guide ou complémentaires de celui-ci, triées par auteur principal puis par date.

La plupart de ces ouvrages, chapitres d'ouvrages et articles, produits par les ingénieurs et chercheurs d'Irstea ou avec leur contribution, sont disponibles et téléchargeables librement sur le site de documentation d'Irstea à l'adresse suivante :

http://cemadoc.cemagref.fr/exl-php/cadcgp.php?NOM=cadic__anonyme&PASSE=&FROM_LOGIN=1&CMD=CHERCHE&query=1&MODELE=portail%2Fportailv2.html&TABLE=PUB_DOC&SOURCE=SearchServer_3.0&NOMFONDS=Exlibris+WEB&SELF=&URL_REQUETE=

Un lien est fourni pour quelques autres publications disponibles sur d'autres sites.

- Auriau L., Mériaux P., Lacombe S., Marmu S., Maurin J., Boulay A., 2012. "The airborne high-resolution LiDAR as an efficient tool for topographical survey and detection of surface anomalies on flood protection dike". In : *Comprehensive Flood Risk Management : Research for Policy and Practice*, Klijn F., Schweckendiek T. CRC Press, Londres, Rotterdam, NLD, p. 435-443.
- Bambara G., 2015. *Évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence d'une végétation arborescente*. Thèse de doctorat, Irstea, université Aix-Marseille.
- Bonin L., Évette A., Frossard P.A., Prunier P., Roman D., Valé N., 2013. *Génie végétal en rivière de montagne : connaissances et retours d'expériences sur l'utilisation d'espèces et de techniques végétales : végétalisation de berges et ouvrages bois*. GeniAlp, 321 p. http://ouvrage.geni-alp.org/sites/default/files/pdf/GeniAlp_Ouvrage_Complet.pdf
- Carluer, N., Fontaine, A., Lauvernet, C., Munoz Carpena, R., 2011. *Guide de dimensionnement des zones tampons enherbées ou boisées pour réduire la contamination des cours d'eau par les produits phytosanitaires*. Irstea, 72 p.
- Ciria, French Ministry of Ecology, Usace, 2013. *The International Levee Handbook*, Ciria, London. Téléchargement libre sur : http://www.ciria.org/Resources/Free_publications/ILH.aspx
- Degoutte G. (coord.), 1992. *Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens*. Cemagref éditions.
- Degoutte G., 2012. *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières (2e éd.) : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées*. Lavoisier, 542 p. <http://www.lavoisier.fr/livre/environnement/diagnostic-amenagement-et-gestion-des-rivieres-2-ed/degoutte/descriptif-9782743014698>
- Évette A., Zanetti C., Cavallé P., Dommanget F., Mériaux P., Vennetier M., 2014. « La gestion paradoxale des ripisylves des cours d'eau de piedmont alpin endigués », *Revue de Géographie Alpine – Journal of Alpine Research* 12. Lien : <http://rga.revues.org/2212>



- Fauchard C., Mériaux P., 2004. *Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues*, Cemagref éditions, Antony.
- François D. (coord.), à paraître 2015. *Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai*. Guide final du projet national Erinoh, thème Recommandations/tome 2, Presse des Ponts.
- Girard H., Mériaux P., 2010. *Ouvrages de stockage d'eau à usage agricole : petits barrages en terre et bassins*. 138 p., CD-Rom Groupama/Cemagref.
- Hersch-Burdick R., Van Hemert H., Pohl R., Wielputz M., Auger N., Blackburn T., Costa R., Harder L., Holden K., Jones H., et al., 2013. Chapter 4 "Operation and maintenance". In Ciria, French Ministry of Ecology, Usac, 2013. *The International Levee Handbook*, Ciria, Londres. http://www.ciria.org/Resources/Free_publications/ILH.aspx
- Lautrin D., 2003. *Vieillessement et réhabilitation des petits barrages en terre*. Cemagref éditions.
- Lino M., Mériaux P., Royet P., 2000. *Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne*. Cemagref éditions, Antony.
- Mériaux P., Tourment R., 1998. *Mission en Pologne (Université d'Agriculture de Wroclaw – Institut du Génie de l'Environnement) du 12 au 14 novembre 1998 : Compte rendu succinct*. 8 p. hors annexes. Rapport Cemagref de mission à l'étranger.
- Mériaux P., Royet P., Folton C., 2004. *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations : guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires*. Cemagref éditions, Antony.
- Mériaux P., Tourment R., Wolff M., 2005. « Le patrimoine de digues de protection contre les inondations en France d'après la base de données nationales des ouvrages », *Ingénierie EAT*, (n°spécial) :15-21.
- Mériaux P., Vennetier M., Aigouy S., Hoonakker M., Zylberblat M., 2006. « Diagnostic et gestion de la végétation sur les digues et barrages en remblai / Diagnosis and Management of Plant Growth on Embankment Dams and Dykes », Q. 86 - R. 68, Vol. III, 2^e Congrès des grands barrages, Barcelone, juin 2006.
- Mériaux P., Monier T., Tourment R., Mallet T., Palma Lopes S., Maurin J., Pinhas M., 2012. « L'auscultation des digues de protection contre les inondations : un concept encore à inventer ». *Colloque CFBR : Auscultation des barrages et des digues – Pratiques et perspectives*. Chambéry (FRA), 27-28 novembre 2012.
- Mériaux P., Auriou L., Maurin J., Boulay A., Lacombe S., Marmu S., 2013 « La télédétection LiDAR hélicoptère haute résolution, un outil efficace pour étudier la topographie et contribuer au diagnostic des digues de protection ». *Colloque CFBR Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions*, 12-14 juin 2013, Aix-en-Provence, p. 335-344. https://books.google.fr/books?id=YvXAAgAAQBAJ&pg=PA344&lpg=PA344&dq=Colloque+CFBR+%C2%AB+Digues+maritimes+et+fluviales+de+protection+contre+les+submersions+%C2%BB&source=bl&ots=KSReY5MJfS&sig=_Hc7G35JoD07VFolhG4UFttciV&hl=en&sa=X&ei=xOKDVbamG8bdUffjKgn&ved=0CCIQ6AEwAA#v=onepage&q=Colloque%20CFBR%20%C2%AB%20Digues%20maritimes%20et%20fluviales%20de%20protection%20contre%20les%20submersions%20%C2%BB&f=false
- Royet P., 2006. *La surveillance et l'entretien des petits barrages*. Cemagref édition, Antony, 84 p.



- Valé N., Évette A., Liébault F., Zanetti C., Espinasse F., Barré J.-B., Mériaux P., Vennetier M., Cavallé P., Lannes C., 2013. « Principes d'aménagement des cours d'eau ». In : Bonin L., Évette A., et al. (éds), *Génie végétal en rivière de montagne – Connaissances et retours d'expériences sur l'utilisation d'espèces et de techniques végétales : végétalisation de berges et ouvrages bois*. GeniAlp, Grenoble, p. 19-62. http://ouvrage.geni-alp.org/sites/default/files/pdf/GeniAlp_Ouvrage_Complet.pdf
- Vennetier M., Chandioix O., Ripert C., Mériaux P., 2003. « Bases de la gestion de la végétation des berges et digues sous contraintes de sécurité ». *Forêt Méditerranéenne* XXIV(3) :263-274. <http://www.foret-mediterraneenne.org/fr/>
- Vennetier M., Ripert C., Chandioix O., Meriaux P., Doirat G., 2004. « Gestion de la végétation des digues et des berges sous contrainte de sécurité ». *Ingénieries EAT*, num. spé. 2004 Ingénierie écologique :25-36.
- Vennetier M., Mériaux P., Busset F., Félix H., Lacombe S., 2010. « Apport de la télédétection LiDAR aéroporté haute définition pour la caractérisation de la végétation des digues », *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 191 :36-41.
- Vennetier M., Zanetti C., Mériaux P., Mary B., 2014. "Tree root architecture : new insights from a comprehensive study on dikes", *Plant and Soil* 21.
- Zanetti C., 2010. *Caractérisation du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues*. Thèse de doctorat en géographie. Cemagref Aix-en-Provence, Université de Provence Aix-Marseille 1, Aix-en-Provence, 197 p.
- Zanetti C., Guibal F., Brugier M., Vennetier M., Mériaux P., Provansal M., 2010. « Caractérisation de la croissance racinaire d'essences ligneuses implantées sur des digues fluviales », *Edytem* 11 :115-122
- Zanetti C., Mériaux P., Vennetier M., Royet P., 2010. « Colonisation par les arbres des petits barrages ou digues de canaux en terre : diagnostic et consignes d'entretien au travers d'études de cas ». *Colloque CFBR-AFEID Sécurité des barrages et nouvelle réglementation française. Partage des méthodes et expériences*, 9 novembre 2010, Lyon.
- Zanetti C., Mériaux P., Vennetier M., Royet P., 2012. « Colonisation par les arbres des barrages en remblai : diagnostic et consignes d'entretien ». In : 24th International Congress on Large Dams, Kyoto, JPN, 6-8 June 2012, vol. I, CIGB - Icold, Kyoto, JPN, p. 147-163.
- Zanetti C., Vennetier M., Mériaux P., Royet P., Dufour S., Provansal M., 2008. « L'enracinement des arbres dans les digues en remblai : étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages ». *Ingénieries EAT* 53 :49-67.
- Zanetti C., Vennetier M., Mériaux P., 2013. « Développement et décomposition des systèmes racinaires : risques induits pour les digues et solutions de gestion ». In : P. Royet et S. Bonelli (éds), *Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions*, 2e colloque national Digues2013. Hermès Lavoisier, Paris, Aix-en-Provence, FRA, p. 536-540.
- Zanetti C., Vennetier M., Mériaux P., Provansal M., 2014. "Plasticity of tree root system structure in contrasting soil materials and environmental conditions", *Plant and Soil* 16.



ANNEXE 1

LES ESPÈCES VÉGÉTALES LIGNEUSES LES PLUS PRÉSENTES EN FRANCE SUR LES DIGUES ET BARRAGES ET DANS LEUR ENVIRONNEMENT PROCHE (LISTE NON EXHAUSTIVE)

Arbres (ordre alphabétique)

(en fond coloré : essences les plus utilisées)

Nom français et nom latin	Milieu	Fréquence sur les ouvrages	Remarques
Ailante <i>Ailanthus altissima</i>	Méso	Variable	Espèce invasive, localement abondante
Aulne glutineux <i>Alnus glutinosa</i>	Hygro	Fréquent	Surtout en alignement à proximité de la ligne d'eau
Bouleau <i>Betula pubescens</i>	Méso	Faible	Durée de vie faible
Chêne pédonculé <i>Quercus robur</i>	Méso	Moyenne	Peut atteindre de grandes dimensions
Chêne pubescent <i>Quercus pubescens</i>	Méso	Rare hors région méditerranéenne	Localement abondant en région méditerranéenne, arbre de taille moyenne
Chêne vert <i>Quercus ilex</i>	Xéro	Rare hors région méditerranéenne	Croissance lente, taille le plus souvent réduite
Érable champêtre <i>Acer campestre</i>	Méso	Fréquent	Taille moyenne
Érable negundo <i>Acer negundo</i>	Méso	Faible à Fréquente	Espèce invasive, localement abondante
Grands érables <i>Acer spp</i>	Méso	Moyenne	Régions fraîches ou humides
Frêne commun <i>Fraxinus excelsior</i>	Méso	Fréquent	Croissance potentiellement rapide
Hêtre commun <i>Fagus sylvatica</i>	Méso	Rare	Région fraîches ou humides, montagnes
Mélèze <i>Larix decidua</i>	Méso à Xéro	Rare	Localement abondant en montagne
Noyer <i>Juglans</i>	Méso	Rare	Localement plus fréquent
Ormes <i>Ulmus spp</i>	Méso	Fréquent	Atteint rarement des grandes tailles à cause de la graphiose qui le tue
Peuplier blanc <i>Populus alba</i>	Hygro	Fréquent	Croissance rapide, atteint de grandes dimensions
Peuplier noir <i>Populus nigra</i>	Hygro à méso	Fréquent	Espèce pionnière, croissance potentiellement rapide, peut se contenter de milieux secs
Pin d'Alep <i>Pinus halepensis</i>	Xéro	Rare sauf localement	Localement abondant ou même envahissant en région méditerranéenne
Pin sylvestre <i>Pinus sylvestris</i>	Méso à xéro	Moyenne	Région fraîches, montagnes
Platane commun <i>Platanus acerifolia</i>	Hygro à méso	Fréquent surtout pour les canaux	Grandes dimensions, souches très puissantes, a souvent été planté
Robinier faux-acacia <i>Robinia pseudoacacia</i>	Méso	Fréquent	Essence envahissante, a souvent été planté
Saule blanc <i>Salix alba</i>	Hygro	Fréquent	Espèce pionnière, se trouve surtout à proximité de l'eau en pied de digue



Arbustes

Nom français et nom latin	Milieu	Fréquence sur les ouvrages	Remarques
Amorpha <i>Amorpha fruticosa</i>	Hydro à méso	Variable	Espèce invasive, localement très abondante
Aubépine <i>Crataegus</i>	Méso	Fréquent	Très mellifère
Buddleia <i>Buddleja davidii</i>	Hygro à méso	Variable	Espèce invasive, localement très abondante
Cornouiller <i>Cornus</i>	Méso	Fréquent	
Genêt <i>Cytisus scoparius</i>	Méso	Variable	Peut être envahissant par endroits
Noisetier <i>Corylus avellana</i>	Méso	Moyenne	
Renoué du Japon <i>Fallopia japonica</i>	Hygro à méso	Variable	Espèce invasive, localement très abondante
Ronce <i>Rubus spp</i>	Méso	Fréquent	Forme des fourrés impénétrables, très mellifère
Saule laurier <i>Salix pendrata</i>	Hygro	Moyenne	
Saule pourpre <i>Salix purpurea</i>	Hygro	Moyenne	Espèce pionnière
Sorbier <i>Sorbus</i>	Méso	Moyenne	
Sureau <i>Sambucus nigra</i>	Méso	Moyenne	
Troène <i>Ligustrum vulgare</i>	Méso	Moyenne	
Viorne <i>Viburnum spp</i>	Méso à xéro	Moyenne	

Essences herbacées rigides

Nom français et nom latin	Milieu	Fréquence sur les ouvrages	Remarques
Canne de Provence <i>Arundo donax</i>	Hygro à méso	Faible à forte	Espèce invasive, localement très abondante
Roseau <i>Phragmites australis</i>	Hygro	Faible à forte	Espèce envahissante, localement très abondante au contact de l'eau



ANNEXE 2

ESPÈCES PROTÉGÉES : PROCÉDURE DE DEMANDE DE DÉROGATION

Les conditions dans lesquelles peuvent être délivrées les dérogations aux mesures de protection sont définies dans la partie réglementaire du Code de l'environnement. Le décret du 4 janvier 2007 (modifiant le Code de l'environnement, articles R411-1 à 16), l'arrêté du 19 février 2007 et la circulaire du 21 janvier 2008, confirment que, comme précédemment :

Cas général

Les dérogations définies au 4^o de l'article L.411-2 sont accordées par le préfet du département du lieu de l'opération après avis du CNPN (Conseil national de protection de la nature).

Cas particuliers

Les dérogations sont accordées par le (ou les) ministre(s), après avis du CNPN :

- pour 38 espèces particulièrement menacées d'extinction en France en raison de la faiblesse de leurs effectifs et dont les aires de répartition excèdent le territoire d'un département (dont la liste est fixée par l'arrêté du 9 juillet 1999) ;
- pour les personnes morales sous la tutelle ou le contrôle de l'État, dont les attributions s'exercent au plan national.

Les autorisations de transport sont accordées, selon les cas, par le préfet du lieu de départ ou du lieu de destination.

Les dérogations sont accordées par le préfet sans avis du CNPN pour certaines autorisations liées à la faune sauvage captive ou à la naturalisation.

Dans la pratique, l'instruction des demandes de dérogation se déroule donc ainsi :

- dépôt d'un dossier spécifique en préfecture, ainsi que 4 exemplaires papier et une version numérique en Dreal ;

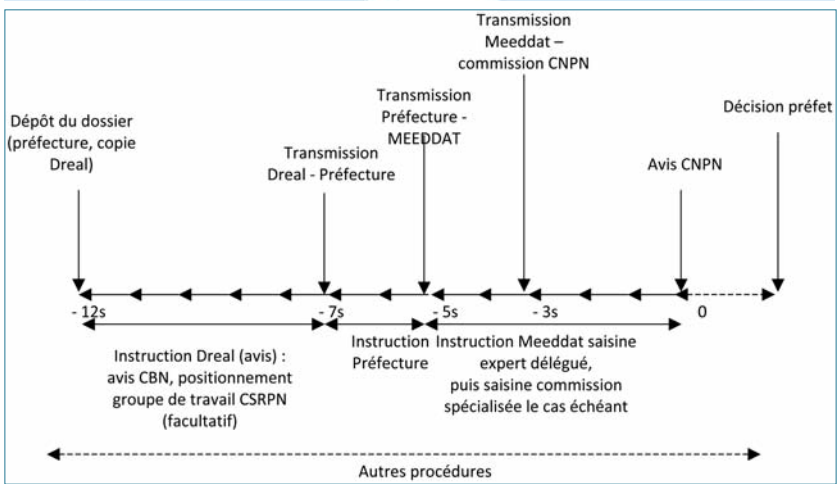


- la préfecture saisit la Dreal pour instruction ;
- la Dreal peut solliciter toute observation d'expert qui lui semblerait nécessaire. Dans le cas des espèces végétales, la Dreal saisit systématiquement le Conservatoire botanique pour avis. Par ailleurs, un groupe de travail du CSRPN (Conseil scientifique régional du patrimoine naturel) peut également être sollicité pour certains dossiers ;
- la Dreal transmet le dossier au Meeddat avec son avis pour saisine du CNPN sous couvert du préfet de département ;
- selon son appréciation de l'importance des enjeux, le président de la commission faune ou de la commission flore décide s'il :
 - donne son avis directement en tant qu'expert délégué du CNPN,
 - soumet le dossier pour avis à la commission faune ou flore du CNPN. Dans ce cas le pétitionnaire est invité à présenter son dossier devant les membres de la commission, en présence de la Dreal. Il est également possible, dans certains cas, que le dossier soit soumis pour avis au comité permanent du CNPN.
- le Meeddat transmet l'avis au préfet (copie Dreal), sur la base duquel il prendra sa décision d'autorisation ou de refus.

Les dérogations doivent être obtenues avant la réalisation des opérations dont il s'agit ; il est donc indispensable d'anticiper et de prévoir la réalisation des études (avec phase d'inventaires aux périodes les plus appropriées), la demande de dérogation et l'obtention de l'autorisation dans le calendrier de réalisation de l'opération. Cette procédure est à mener le plus tôt possible, et peut être conduite en parallèle des autres procédures d'autorisation (ICPE, loi sur l'eau, DUP...), dans un souci de cohérence d'ensemble (du projet et des mesures).

Éléments de calendrier

Le dossier doit être déposé au minimum 12 semaines avant la date des commissions faune et/ou flore du CNPN, qui se réunissent généralement 3 fois par an pour la commission flore et 4 fois par an pour la commission faune, et dont le calendrier est *fixé en début d'année*.



Le contenu du dossier de demande

L'arrêté du 19 février 2007 fixe les formes de la demande qui doit comprendre la description, en fonction de la nature de l'opération projetée (cf. 4° du L411-2) :

- du programme d'activité dans lequel s'inscrit la demande, de sa finalité et de son objectif ;
- des espèces (nom scientifique et nom commun) concernées ;
- du nombre et du sexe des spécimens de chacune des espèces faisant l'objet de la demande ;
- de la période ou des dates d'intervention ;
- des lieux d'intervention ;
- s'il y a lieu, des mesures d'atténuation ou de compensation mises en œuvre, ayant des conséquences bénéfiques pour les espèces concernées ;
- de la qualification des personnes amenées à intervenir ;
- du protocole des interventions : modalités techniques, modalités d'enregistrement des données obtenues ;
- des modalités de compte rendu des interventions.



Les formulaires Cerfa

Les formulaires Cerfa relatifs aux différents cas de dérogation à la protection des espèces sont disponibles sur le site internet du Meeddat : <http://www.ecologie.gouv.fr/-Protection-de-la-nature-.html>.

L'expérience montre que certains cas concrets ont parfois du mal à rentrer strictement dans les cases des formulaires Cerfa. Il est dans ce cas recommandé de prendre contact avec la Dreal pour choisir le ou les formulaire(s) les plus appropriés.

Il est souvent utile, voire indispensable dans certains cas, de compléter le formulaire Cerfa par un dossier explicatif.

Cas des dérogations prévues à l'article L411-2 c

Le régime général reste l'interdiction et les dérogations doivent demeurer exceptionnelles et limitées. Il est conseillé aux maîtres d'ouvrage de prendre contact le plus en amont possible avec la Dreal, pour les accompagner dans la prise en compte des espèces protégées, avant le dépôt d'un dossier ayant fait l'objet d'une pré-validation au plus tard 12 semaines avant la date de la commission. Il est par ailleurs très important que les maîtres d'ouvrage fassent appel à des bureaux d'études spécialisés en écologie.

Le contenu du dossier de demande de dérogation est détaillé en annexe 5 de l'article. Il doit en particulier comprendre, en complément du (ou des) formulaires Cerfa :

- une justification et une présentation du projet : le demandeur doit démontrer qu'il est dans un des cinq cas de dérogation prévus par les textes, qu'il a mis en œuvre tous les moyens pour éviter de demander une dérogation et présenter de façon concise les principales caractéristiques du projet ;
- une description de l'impact du projet sur la ou les espèces protégées concernées : cette partie doit être appuyée sur des inventaires de terrain, et analyser la situation des différentes espèces protégées concernées ;
- les mesures d'atténuation et/ou de compensation, leur description détaillée, leur coût et les garanties de leur réalisation ;
- une conclusion sur le maintien dans un état de conservation favorable des populations des espèces concernées après application des mesures.



Il est important que le dossier soit présenté dans sa globalité, afin de donner une vue d'ensemble des impacts et de permettre d'apprécier les effets cumulatifs. Il est conseillé de présenter simultanément les projets connexes même s'ils relèvent de maîtres d'ouvrage différents (par exemple projet d'aménagement et sa voie d'accès), et de présenter les éventuelles relations avec des projets voisins.

L'autorisation

L'arrêté du 19 février 2007 fixe les formes de la décision ou de l'arrêté préfectoral qui doit comporter :

- en cas de refus, la motivation de celui-ci ;
- en cas d'autorisation et, en tant que de besoin, en fonction de la nature de l'opération projetée, les conditions de celle-ci, notamment :
 - indications relatives à l'identité du bénéficiaire ;
 - nom scientifique et nom commun des espèces concernées ;
 - nombre et sexe des spécimens sur lesquels porte l'autorisation ;
 - période ou dates d'intervention ;
 - lieux d'intervention ;
 - s'il y a lieu, mesures d'atténuation ou de compensation mises en œuvre, ayant des conséquences bénéfiques pour les espèces concernées ;
 - qualification des personnes amenées à intervenir ;
 - description du protocole des interventions ;
 - modalités de compte rendu des interventions ;
 - durée de validité de l'autorisation ;
 - conditions particulières qui peuvent être imposées en application de l'article R411-11 du Code de l'environnement. Pour les opérations d'inventaire de populations d'espèces animales ou végétales, l'autorisation peut être conditionnée au versement des données recueillies à des bases de données et selon un format déterminé.

Ainsi, le titulaire de l'autorisation devra appliquer les prescriptions de cette décision, et notamment tenir la Dreal régulièrement informée de l'état d'avancement des travaux et de la mise en place des mesures d'atténuation et d'accompagnement, soit au travers de réunions de comité de suivi si celui-ci est prévu dans l'autorisation, soit par la production de bilans réguliers. Des visites de terrain peuvent également être programmées.



En particulier, dans le cadre d'un projet d'aménagement, les résultats des audits ainsi qu'un bilan de la phase chantier doivent être transmis, puis les bilans des suivis environnementaux en phase d'exploitation (1 an, 3 ans, 5 ans). Des bilans réguliers sur la mise en œuvre des mesures d'atténuation et de compensation doivent également être adressés à l'Administration (opérations de déplacement, mesures foncières, rapports annuels si des opérations de gestion sont prévues).



ANNEXE 3 : GLOSSAIRE

- Aléa** Événement *a priori* imprévisible dont les conséquences sont dommageables à une activité, à un territoire, à l'occupation de son sol, à des infrastructures, à des ouvrages, c'est-à-dire à des fonctions qu'il doit assurer. On distingue les aléas d'origine naturelle (par exemple : avalanche, crue, inondation, séisme...) et ceux d'origine technologique affectant des ouvrages construits par l'Homme (par exemple : rupture ou ruine d'une digue ou d'un barrage).
- Anomalie** Défaut, dégradation de la structure. Événement qui indique un comportement ou une situation anormale ou inattendue, évolution temporelle et/ou spatiale anormale de l'événement (exemple : augmentation ou baisse anormale d'un débit de drainage).
- Auscultation** : Suivi dans le temps à une fréquence définie, à l'aide d'instruments de mesure, de divers paramètres indicatifs du comportement de l'ouvrage, de sa fondation et de son environnement, sur une longue période de la vie de l'ouvrage.
- Mesures d'auscultation** : Dispositifs et instruments de mesure permettant le relevé de différentes grandeurs mécaniques, hydrologiques, hydrogéologiques et topographiques, à un instant donné et dont le suivi dans le temps, à une fréquence définie, constitue une action de surveillance.
- Désordre** Élément traduisant un fonctionnement anormal ou une dégradation d'une fonction d'un ouvrage ou de l'un de ses composants ou parties. On peut distinguer le terme « désordre » (ex. : examen d'une fuite) de celui « d'indice de désordre » (ex. : zone de végétation hygrophile pouvant traduire la présence d'une fuite).
- Diagnostic** En génie civil : étude visant à évaluer l'état (c'est-à-dire l'aptitude à remplir ses fonctions) d'un ouvrage (vis-à-vis de tous les mécanismes de vieillissement, de dégradation, de défaillance ou de rupture) et à définir les mesures nécessaires (auscultation, maintenance, réparation, confortement...) pour améliorer ou pérenniser un état satisfaisant.
- Embâcle** Accumulation de matériaux, naturels ou non (troncs et branches d'arbres, débris de végétation, déchets divers) dans le lit d'un cours d'eau, pouvant former un barrage na-



turel ou colmater des ouvrages (ponts, buses), rehaussant la ligne d'eau. La rupture brusque d'un embâcle forme une vague de débâcle.

Érosion interne : Action de détachement et de transport de particules d'un sol par l'action mécanique d'une circulation interne d'eau. Elle se traduit par la formation de vides à l'intérieur d'un sol (remblai d'ouvrage hydraulique ou sa fondation) due à l'action d'arrachement ou de dissolution résultant des eaux d'infiltration (d'après le glossaire du *Dictionnaire technique des barrages*, CIGB 1994).

Érosion externe : Action de détachement et de transport de particules d'un sol par l'action mécanique d'un fluide (eau, vent) qui s'écoule en surface de l'ouvrage (ruissellement, batillage, vagues, surverse, courants de rivière...), ou enlèvement en masse de matériaux par l'action d'un arrachement (renversement d'un arbre) ou d'un glissement, sur une partie externe meuble de l'ouvrage hydraulique ou de sa fondation (fondation amont immergée, talus côté retenue ou côté rivière, crête, talus aval ou côté terre, fondation aval).

Examen visuel : Synonyme de surveillance ou d'inspection visuelles.

Fondation(s) Terrain naturel en place sur lequel repose un ouvrage hydraulique ou dans lequel il s'encastre (d'après le glossaire du *Dictionnaire technique des barrages*, CIGB 1994).

Fontis Le fontis correspond à un effondrement brutal mais localisé se manifestant sous la forme d'un entonnoir ou d'un cratère. Il est le plus souvent provoqué par la rupture progressive du toit d'une cavité, une cloche remontant plus ou moins lentement vers la surface jusqu'au développement brutal d'un cratère. Les fontis présentent souvent une géométrie pseudo-circulaire dont le diamètre et la profondeur du cône peuvent aller jusqu'à plusieurs mètres.

Gradient hydraulique : Quotient de la différence de charge hydraulique entre deux points d'un milieu poreux saturé, sur une même ligne de courant, par la distance les séparant sur cette ligne de courant.

Levée Équivalent de digue dans le cas des digues de protection contre les inondations.

Maintenance : Ensemble des opérations visant à maintenir un ouvrage ou un dispositif en état de fonctionnement ; ces opérations comprennent tout ou partie les actions suivantes : surveillance, auscultation, travaux d'entretien programmé ou fortuit, réparation courante...



- Parement amont/aval : Pour les barrages, côté amont (ou retenue) et aval de l'ouvrage. Pour les digues, amont = côté fleuve, rivière, torrent ou canal, aval = côté terre ou zone protégée ou val.
- Pathologie Mécanisme d'endommagement augmentant la vulnérabilité de l'ouvrage ou de l'un de ses composants vis-à-vis d'un aléa. État de mauvais fonctionnement d'un ouvrage.
- Reconnaissance : Déploiement de méthodes, de moyens matériels et humains *in situ* dans le cadre d'une démarche d'investigation et d'analyse d'un ouvrage, ou d'évaluation d'un site (ex. forage de reconnaissance géotechnique dans le cadre d'un diagnostic d'ouvrage).
- Risque Formellement, produit d'un aléa par la vulnérabilité d'une structure (ex : ouvrage) ou d'un territoire (ex : quartier en zone inondable) potentiellement impacté par les conséquences de l'occurrence de l'aléa. Notion permettant de prioriser les interventions dans le cadre d'un diagnostic, en fonction de la vulnérabilité. Souvent employé en synonyme d'aléa.
- Rupture Destruction partielle ou totale d'un ouvrage. Il est nécessaire de distinguer :
- * la brèche : ouverture totale (sur toute la hauteur) ou partielle (sur une partie de la hauteur) du corps de la digue ou du barrage, entraînant un lâcher d'eau dans la zone protégée ou dans la zone aval ;
 - * la rupture : défaillance (souvent au sens mécanique) d'un composant, par exemple rupture d'une vanne, rupture d'un talus (glissement).
- Ségonnal / Ségonnaux (basse vallée du Rhône et val de Durance) : terres comprises entre le pied de digue côté cours d'eau et la berge de lit mineur (d'après *Les noms de lieux en France*, André Pégorier, IGN 2006). Synonyme : Franc-bord (Val de Loire).
- Site Natura 2000 : Le réseau Natura 2000 est un ensemble de sites naturels européens, terrestres et marins, identifiés pour la rareté ou la fragilité des espèces sauvages, animales ou végétales, et de leurs habitats. Natura 2000 concilie préservation de la nature et préoccupations socioéconomiques (source ministère du Développement durable).
- Surveillance : Surveillance en général : terme regroupant la surveillance visuelle, la surveillance à l'aide d'instruments de mesures sur courte période (monitoring) et longue période



(auscultation). Indique qu'un ouvrage fait l'objet d'un suivi soit périodique ou continu, soit visuel ou à l'aide de capteurs et d'instruments de mesure.

Végétation ligneuse : Comprend les arbres et les arbustes de toutes tailles ainsi que certaines lianes, formant des tissus rigides à base de cellulose et de lignine.

Végétation arborée : Végétation comprenant des arbres potentiellement de grande taille (> 7 m de hauteur).

Vieillessement : Dégradation avec le temps des propriétés d'un ouvrage ou d'une fonction d'un ou plusieurs de ses composants qui se traduit par une dérive des mesures d'auscultation – supposées fiables (instruments étalonnés et vérifiés) – concernant ce(s) composant(s). Par exemple, l'augmentation du débit de fuite local à niveau de retenue constant pour un barrage ou une digue de canal peut être liée un vieillissement local de la fonction d'étanchéité du corps d'ouvrage ou de sa fondation.

Vulnérabilité : Pour un ouvrage : Sensibilité d'un ouvrage à une sollicitation (à un aléa). La sensibilité de cet ouvrage peut être accrue par la présence d'anomalies ou d'une fragilité structurelle de l'ouvrage

Znieff Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique ou floristique. Une Znieff ne constitue pas une mesure de protection réglementaire mais un inventaire. Celui-ci correspond au recensement d'espaces naturels terrestres remarquables et repose sur la présence d'espèces ou d'associations d'espèces à fort intérêt patrimonial. Il est utilisé pour les études d'impact et l'évaluation environnementale.

Zico Zone d'importance communautaire pour les oiseaux. Définie en fonction de critères internationaux, une Zico doit pouvoir être l'habitat d'une espèce internationalement reconnue comme étant en danger, ou d'un grand nombre ou d'une concentration d'oiseaux migrateurs, d'oiseaux côtiers ou d'oiseaux de mer, ou d'un grand nombre d'espèces au biotope restreint.

Certaines de ces définitions sont issues ou inspirées du glossaire du guide à paraître en 2015 *Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai* (coord. Daniel François), livrable du projet national Erinoh et à la rédaction duquel l'un des auteurs du présent ouvrage a contribué.



Michel Venetier est ingénieur forestier et docteur en écologie, affecté depuis 1995 dans l'unité de recherche « Écosystèmes méditerranéens et risques » (Emax) d'Irstea Aix-en-Provence. En coopération avec l'unité de recherche « Ouvrages hydrauliques et hydrologie » (Ohax), il travaille depuis 1996 sur la

végétation des digues et berges. L'objectif est de concilier la sécurité des ouvrages et les fonctions environnementales et sociales de cette végétation, par une connaissance approfondie des enjeux et une gestion appropriée. Il a dirigé durant 10 ans les recherches sur le développement racinaire des arbres dans les ouvrages hydrauliques. Ses autres travaux concernent l'impact des fortes perturbations comme le changement climatique, les incendies et l'urbanisation sur l'environnement forestier et celui des rivières. Il est auteur de plusieurs guides techniques et d'ouvrages grand public dans les domaines de la forêt et de l'environnement, de nombreux articles scientifiques et techniques, ainsi que d'une vingtaine de rapports d'étude ou d'expertise sur la gestion de la végétation de digues.



Patrice Mériaux est ingénieur chercheur, ayant quelque 30 années d'expérience dans le génie civil et l'ingénierie des risques, en régions de plaine comme de montagne. Il est membre du Comité français des Barrages et des Réservoirs depuis

2003. Affecté en 1993 à l'unité de recherche « Ouvrages hydrauliques et hydrologie » d'Irstea Aix-en-Provence (Ohax), dont il a été le responsable de 2001 à 2009, il est devenu l'un des experts de l'institut dans le domaine de la sécurité des digues et des barrages. Ses activités scientifiques se concentrent sur le développement et l'amélioration des méthodes de diagnostic pour ces ouvrages. Il est, à ce titre, le coauteur de plusieurs guides techniques, dont deux ont été traduits en anglais, et de nombreux articles et rapports d'expertise.



Caroline Zanetti est docteur en géographie, avec une spécialisation en géomorphologie fluviale. De 2007 à 2012, au sein d'Irstea, elle a réalisé une thèse puis des travaux sur la croissance des systèmes racinaires ligneux dans les ouvrages en remblai, et sur la gestion

de leur végétation arborée. À ce titre, elle a conduit une dizaine de chantiers expérimentaux et contribué à autant de diagnostics de digues ou barrages boisés. Depuis décembre 2012, elle a fondé sa propre société de conseils en gestion de la végétation auprès des propriétaires d'ouvrages hydrauliques : ARBEAUSOLutions. Son projet innovant de création d'entreprise a été primé en 2013 au concours annuel organisé par l'association « Accede Provence entrepreneurs ».

Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai

Michel Venetier – Patrice Mériaux – Caroline Zanetti

En France, plus de 10 000 km de digues fluviales et de canaux, et plusieurs milliers de petits barrages sont concernés par l'entretien et la maîtrise de la végétation qui s'y développe. Végétation qui en constitue un attrait fort, mais qui en même temps entraîne des risques de détérioration.

Ce livre comble un manque en termes d'informations, de méthodologies et d'accompagnement des gestionnaires et des bureaux d'études sur la gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai. Il apporte des méthodes opérationnelles aux professionnels du domaine pour leur permettre d'établir un diagnostic approfondi d'un ouvrage boisé ou embroussaillé, et d'élaborer un véritable plan de gestion ou un programme de travaux de confortement, garants de la sécurité des ouvrages.

Au croisement de plusieurs compétences – écologie, génie civil et hydraulique –, ce guide apporte les connaissances plurielles et la synthèse d'une recherche pluridisciplinaire, tout en s'appuyant sur un important retour d'expérience issu de cas réels.

Le temps de préparation de cet ouvrage – 5 ans – révèle la difficulté de cette tâche : elle est l'aboutissement d'un travail considérable, près de 20 ans d'études, et de nombreux échanges avec les gestionnaires et les administrations, pour aboutir à un manuel cohérent, clair et facile d'emploi que la profession pourra aisément s'approprier. Tel est le souhait qui a résolument guidé ses auteurs.

Publié avec l'aide de la Région
Provence-Alpes-Côte d'Azur

Région



Provence-Alpes-Côte d'Azur

isbn 975-10-94074-01-5
sept 2015