

A photograph of a river scene. In the foreground, a wooden boat with a greenish-brown patina is partially submerged in the water. The water is calm, reflecting the surrounding greenery and the sky. Large, leafy trees frame the top and sides of the image, with their branches and leaves hanging over the water. The overall atmosphere is serene and natural.

Gérard Degoutte

Diagnostic, aménagement et gestion des rivières

Hydraulique et morphologie fluviales appliquées

2^e édition

Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Diagnostic, aménagement et gestion des rivières

Hydraulique et morphologie fluviales appliquées

Chez le même éditeur

Aménagement des espaces verts urbains et du paysage rural

J.-L. Larcher, T. Gelgon, 4^e édition, Collection Agriculture d'aujourd'hui, 2012

L'énergie hydraulique

R. Ginocchio, P.-L. Viollet, 2^e édition, Collection EDF R&D, 2012

Eau, environnement et santé publique : introduction à l'hydrologie

R. Vilagines, 3^e édition, 2010

Le risque inondation. Diagnostic et gestion

F. Vinet, Collection Sciences du risque et du danger, série Innovations, 2010

Protection des eaux souterraines. Législation européenne et avancées scientifiques

P. Quevauviller, 2010

L'eau et les espaces verts

J.-R. Tiercelin, 2008

La gestion du risque inondation

B. Ledoux, 2006

Traité d'irrigation

J.-R. Tiercelin, A. Vidal, 2^e édition, 2006

Écologie des eaux courantes

E. Angelier, 2000

Diagnostic, aménagement et gestion des rivières

Hydraulique et morphologie fluviales appliquées

Gérard Degoutte

Expert en hydraulique à Irstea, enseignant en écoles d'ingénieur

Préface de Ghislain de Marsily



www.editions.lavoisier.fr

Couverture : la Vienne à Châtelleraut en rive gauche. Ce peuplier blanc s'est sans doute incliné à son jeune âge et la partie supérieure s'est redressée. Il tient bien grâce à des racines traçantes très longues, horizontales et peu profondes. En l'absence de vent violent ou de forte charge de neige, il peut rester ainsi longtemps (cliché de l'auteur).

Direction éditoriale : Emmanuel Leclerc

Édition : Solène Le Gabellec

Fabrication : Estelle Perez-Le Du

Composition et couverture : Patrick Leleux PAO, Fleury-sur-Orne

Impression et brochage : Sepec, Peronnas

Préface

Cette nouvelle édition de l'ouvrage de Gérard Degoutte, professeur à Agro-ParisTech et chercheur au Cemagref (devenu Irstea), constitue un approfondissement important et une mise à jour opportune de la première édition, parue en 2006. Il s'agit d'un outil d'enseignement exceptionnel pour tous ceux, étudiants ou professionnels, qui veulent comprendre le comportement des fleuves et rivières dans leur milieu naturel ; pour tous ceux, encore, qui veulent savoir comment concevoir, construire ou entretenir les aménagements capables de dompter, au bénéfice de l'homme, l'ardeur impétueuse de ces eaux vivantes, sans entraver du même coup et de façon irrémédiable le fonctionnement naturel des multiples écosystèmes qui leur sont associés ; pour tous ceux, enfin, qui veulent au contraire restaurer le « bon fonctionnement » des dits écosystèmes.

Plusieurs raisons conduisent aujourd'hui à s'intéresser, davantage que par le passé, aux fleuves. Tout d'abord, il faut insister sur l'accroissement continu de la demande en eau : le flux des eaux météoriques sur les continents, estimé à un total de 113 000 km³/an, se concentre principalement dans les rivières en crue, données pour charrier vers les mers 26 000 km³/an. Les écoulements lents par le milieu souterrain et les rivières hors crues sont limités à 10 000 km³/an, tandis que la fusion des glaces polaires s'élève à 3 400 km³/an. Seule l'évapotranspiration surpasse ces flux, estimée à 73 000 km³/an, appelée par les hydrauliciens le « déficit d'écoulement », car elle ne se retrouve pas dans l'eau des rivières, et par les écologistes « l'eau verte », car elle permet le maintien de toute la végétation naturelle et des cultures non irriguées. Les prélèvements de l'homme sur ce

cycle sont actuellement voisins de 5 000 km³/an, sur un total éventuellement utilisable réputé être de 13 500 km³/an. Il faut y ajouter environ 6 500 km³/an d'eau des précipitations utilisée directement par l'agriculture dite pluviale. Les nappes souterraines, là où elles sont présentes, étant la plupart du temps déjà très exploitées, voire par endroit surexploitées par rapport à leur rythme naturel d'alimentation, la seule possibilité d'augmenter significativement les prélèvements pour satisfaire aux besoins croissants de l'humanité est d'aménager et de gérer mieux les rivières, tant en crue qu'en étiage, pour y prélever les ressources nouvelles requises pour nourrir et abreuver les soixante-quinze millions d'individus qui viennent, bon an mal an, chaque année grossir les rangs des habitants de la planète. C'est une exigence sociale prioritaire, qui s'exprime principalement dans les pays en développement. L'aménagement hydroélectrique des Trois-Gorges, en Chine, en est un exemple récent, et d'autres très grands aménagements hydrauliques (barrages, hydroélectricité, transferts à longue distance, périmètres irrigués, etc.), pour un temps abandonnés par les financements internationaux, vont bientôt voir le jour, en Chine mais aussi dans le reste de l'Asie, en Afrique ou en Amérique du Sud. Avec la raréfaction attendue des ressources en eau sous les latitudes méditerranéennes, du fait du changement climatique, de tels aménagements seront sans doute aussi nécessaires dans certains pays développés, dont la France. L'aménagement des fleuves est au cœur du présent ouvrage.

Une deuxième raison de s'intéresser aux fleuves est la protection contre les inondations. L'emprise toujours croissante des civilisations actuelles sur les plaines alluviales, domaine en principe réservé de l'expansion des crues, engendre une demande de protection accrue contre ce risque. Les pertes en vies humaines, en récoltes, les dommages liés aux inondations deviennent de plus en plus nombreux, du fait de la croissance démographique et de l'occupation de l'espace inondable ; ces dommages deviennent aussi plus coûteux, du fait de l'importance des investissements réalisés dans lesdits espaces. Enfin on s'attend à ce que les changements climatiques en cours, dus à l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre, s'accompagnent d'une modification des fréquences des événements hydrologiques extrêmes, bien que les indices actuellement disponibles ne semblent pas être encore en mesure de la déceler. La demande sociale, dans ce domaine-là, est extrêmement forte également. Les inondations dans le sud de la France qu'ont connues récemment les riverains de fleuves que l'on croyait domptés, ou la tempête Xynthia ayant frappé la côte Atlantique en février 2010, montrent à quel point la vigilance s'impose dans ce domaine, vigilance qui exige la connaissance des mécanismes majeurs de l'hydraulique fluviale ou maritime. L'ouvrage traite de façon exhaustive de tous les problèmes liés aux crues.

Une troisième raison de s'intéresser aux fleuves tourne autour de la qualité des eaux et des écosystèmes aquatiques qui y sont associés. La Directive cadre sur

l'eau de la Communauté européenne, publiée en 2000 et transposée en droit français en 2004, en constitue, pour l'Europe, une obligation, avec un délai court fixé à 2015 (avec dérogations possibles pour 2022 ou 2029) pour parvenir à un « bon état écologique des masses d'eau ». Or, tant du point de vue de la cinétique des réactions biogéochimiques se produisant dans les fleuves, que du point de vue du fonctionnement des écosystèmes associés au fleuve, pour la faune comme pour la flore, le régime d'écoulement et la dynamique sédimentaire sont les acteurs principaux qui façonnent les écosystèmes fluviaux et déterminent la qualité des eaux qui y circulent. Dans certaines régions, on élargit maintenant le lit des cours d'eau et on reconstitue des méandres, pour remédier à certains excès du passé et atteindre le « bon état écologique ». La notion récente d'« espace de mobilité des fleuves » en fait partie, et est remarquablement couverte dans cet ouvrage. Le besoin d'une ingénierie écologique des fleuves, capable de préserver ou de restaurer ces écosystèmes, est à nouveau une demande sociale très forte. L'ouvrage y consacre une part très importante. Il faudrait aussi parler du rôle des fleuves et de leur gestion pour la production d'énergie hydraulique, le refroidissement des centrales thermiques, la navigation, les activités récréatives, la pêche et la pisciculture, la beauté des paysages, etc., la liste est longue des domaines où intervient l'ingénierie fluviale que traite cet ouvrage.

Les fleuves sont donc des objets forts complexes, qu'il est nécessaire d'étudier en prenant en compte l'ensemble des points de vue brièvement envisagés ci-dessus, pour en réaliser une bonne gestion. Mais pour savoir gérer, il faut commencer par comprendre. Dans cet esprit, l'ouvrage de Gérard Degoutte fournit tout d'abord les clés physiques et mathématiques de compréhension et de quantification des mécanismes majeurs se produisant dans les fleuves, pour l'écoulement de l'eau dans des systèmes à surface libre, pour le transport des sédiments, et enfin pour la morphogenèse fluviale, c'est-à-dire toutes les évolutions des berges et du tracé du lit du fleuve. Ce livre sait décrire non seulement la complexité mais aussi l'art du métier de l'ingénieur en hydraulique fluviale, qui manie les équations de base de l'hydraulique et du transport par charriage ou en suspension, mais qui sait y associer les règles empiriques de fonctionnement des systèmes naturels, basées sur l'expérience et l'histoire, pour enfin fournir les moyens pratiques de construction ou de restauration des milieux. L'ouvrage fourmille d'enseignements pratiques sur la nature des travaux concrets qu'il faut réaliser pour atteindre tel ou tel objectif, sur les effets d'un aménagement en rivière, sur les moyens concrets d'en mitiger les conséquences indésirables, sur la protection des berges et l'entretien des digues et des cours d'eau, sur le rôle de la végétation, en particulier la reforestation, la végétalisation des berges, sur la lutte contre les inondations, sur l'aménagement de l'espace rural favorisant ou, au contraire, réduisant l'expansion des crues et l'érosion, sur les aménagements propices au maintien de la biodiversité le long du cours d'eau, comme la présence d'une grande variabilité des habitats, ou l'installation des échelles à

poisson. Très bien illustré et reposant sur un grand nombre d'exemples concrets de travaux réalisés en rivière ou sur les bassins versants qu'elles drainent, cet ouvrage constitue ainsi un guide pratique à l'usage des responsables de la gestion et de l'entretien au jour le jour des cours d'eau, comme de ceux de la conception et de la réalisation d'aménagements nouveaux. Enfin il devrait servir de livre de chevet à ceux qui sont en charge de la protection contre les risques d'inondation, pour la conception des moyens de lutte, comme pour l'entretien et le contrôle permanent des digues et autres ouvrages de protection.

Publié une première fois en 2006 et déjà épuisé, cet ouvrage de Gérard Degoutte a ainsi prouvé qu'il venait combler un vide très important en ingénierie moderne des systèmes fluviaux. Il est le fruit d'une longue pratique de l'enseignement de l'hydraulique fluviale tant dans les écoles d'ingénieurs qu'à l'université, et le témoin d'un sens remarquable de la pédagogie, le rendant très agréable à lire ou facile à consulter. Cette nouvelle édition, largement enrichie et tenant compte des résultats scientifiques et des observations les plus récents, renforce encore l'intérêt de cet ouvrage, qui prend place désormais dans les « grands classiques » de la littérature scientifique française.

GHISLAIN DE MARSILY

Professeur émérite à l'université Paris VI et à l'École des mines de Paris
Membre de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies
Associé étranger de l'US National Academy of Engineering

Table des matières

| | |
|----------------------------------|------|
| Préface | V |
| Introduction | XX |
| Liste des notations | XXIV |

Chapitre 1

Hydraulique à surface libre

| | |
|---|---|
| 1. Définitions essentielles : les paramètres géométriques | 2 |
| 2. Définitions essentielles : les paramètres hydrauliques | 3 |
| 2.1. Masse volumique | 3 |
| 2.2. Poids volumique | 3 |
| 2.3. Débit | 3 |
| 2.4. Vitesse en un point de l'écoulement | 3 |
| 2.5. Vitesse moyenne | 4 |
| 2.6. Ligne de courant | 4 |
| 2.7. Tube de courant | 4 |
| 2.8. Pression hydrostatique en un point | 4 |
| 2.9. Charge hydraulique en un point d'un liquide en mouvement | 4 |
| 2.10. Charge moyenne dans une section | 5 |
| 2.11. Ligne piézométrique | 5 |
| 2.12. Ligne de charge moyenne | 6 |
| 2.13. Charge spécifique | 6 |
| 2.14. Poussée sur une paroi du canal | 7 |
| 2.15. Frottement sur une paroi du canal | 7 |
| 2.16. Viscosité d'un liquide | 8 |
| 3. Définition des différents régimes d'écoulement | 8 |
| 3.1. Régime permanent | 8 |

| | |
|---|----|
| 3.2. Régime permanent uniforme | 8 |
| 3.3. Régime permanent varié | 9 |
| 3.4. Régime transitoire | 9 |
| 4. Régime permanent uniforme | 9 |
| 4.1. Rappel de la définition | 9 |
| 4.2. Équation de continuité | 9 |
| 4.3. Équation du régime uniforme | 10 |
| 4.4. Formule de Chézy et formule de Manning-Strickler | 11 |
| 4.4.1. Rugosités composées | 15 |
| 4.4.2. Cas d'un lit majeur | 15 |
| 4.5. Distribution des vitesses dans une section | 16 |
| 5. Régime permanent graduellement varié | 18 |
| 5.1. Présentation du problème considéré | 18 |
| 5.2. Équation de la ligne d'eau ; tirant d'eau normal | 18 |
| 5.3. Tirant d'eau critique | 20 |
| 5.4. Écoulement fluvial, écoulement torrentiel | 20 |
| 5.5. Calcul d'une courbe de remous | 22 |
| 6. Régime permanent rapidement varié | 23 |
| 6.1. Ressaut hydraulique | 24 |
| 6.2. Typologie et longueur du ressaut | 26 |
| 6.3. Position du ressaut | 29 |
| 6.4. Seuil dénoyé ou noyé | 30 |
| 6.4.1. Loi de débit d'un seuil frontal dénoyé | 30 |
| 6.4.2. Loi de débit d'un seuil frontal noyé | 33 |
| 6.4.3. Seuils profilés | 33 |
| 6.4.4. Loi de débit d'un déversoir latéral | 35 |
| 6.4.5. Fonctionnement en crue d'un seuil frontal ou d'un déversoir latéral | 37 |
| 7. Régime transitoire | 38 |
| 7.1. Les deux équations de base | 38 |
| 7.1.1. Conservation de la masse | 38 |
| 7.1.2. Équation dynamique | 39 |
| 7.1.3. Cas particuliers | 43 |
| 7.2. Résolution des équations de Barré de Saint-Venant | 44 |
| 7.3. Problèmes réels rencontrés | 46 |
| 7.4. Propagation de crue dans les chenaux à forte pente et à champ d'inondation réduit | 46 |
| 7.5. Propagation de crue dans les chenaux à très faible pente | 48 |
| 7.6. Conclusion sur la propagation des crues en rivière | 51 |
| 8. Logiciels de calcul en rivières ou canaux | 51 |
| 8.1. Logiciels de calcul 1D permanent | 51 |
| 8.2. Logiciels de calcul 1D transitoire | 53 |
| 8.3. Calculer en permanent ou en transitoire ? | 54 |
| 8.4. Modèle à une, deux ou trois dimensions ? | 55 |

Chapitre 2

Transport solide en hydraulique fluviale

| | |
|---|----|
| 1. Hydraulique fluviale et hydraulique torrentielle | 61 |
| 2. Expérience pour illustrer charriage et suspension | 62 |
| 3. Charriage et suspension | 62 |
| 4. Érosion du fond, dépôt | 66 |
| 5. Notion de capacité de transport solide | 67 |
| 6. Taille des grains | 68 |
| 7. Tri granulométrique, pavage | 71 |
| 8. Contrainte tractrice et début de mise en mouvement d'une particule | 74 |
| 8.1. Calcul de la contrainte tractrice | 74 |
| 8.2. Valeurs limites du paramètre de Shields | 78 |
| 8.3. Notion de contrainte tractrice efficace (cas des rivières à sable) | 80 |
| 8.4. Nature du transport solide | 81 |
| 8.5. Cas des rivières coulant sur des matériaux cohésifs | 82 |
| 9. Estimation du débit solide | 83 |
| 9.1. Formule de Meyer-Peter et Müller (rivières à graviers ou à sables grossiers) | 84 |
| 9.2. Formule d'Engelund et Hansen | 87 |
| 9.3. Tendances récentes : formules adaptées en granulométrie étendue et aux fortes pentes | 88 |
| 9.3.1. Formule de Lefort (2007) | 88 |
| 9.3.2. Formule de Recking (2010) | 89 |
| 9.4. Utilisation des formules de transport solide et limites | 90 |
| 10. Vitesse de début d'entraînement | 93 |

Chapitre 3

Formes naturelles des rivières, ripisylve et évolution des berges

| | |
|--|-----|
| 1. Définitions fondamentales | 95 |
| 1.1. Lit mineur, lit moyen, lit majeur | 95 |
| 1.2. Rive, berge | 96 |
| 1.3. Ripisylve | 97 |
| 1.4. Alluvions et substratum | 99 |
| 2. Rôles de la ripisylve sur la vie des cours d'eau | 100 |
| 3. Relations entre dimensions du cours d'eau et hydrologie | 101 |
| 3.1. Débit dominant | 101 |
| 3.2. Variables de contrôle et variables de réponse | 103 |
| 3.3. Équilibre dynamique | 104 |
| 4. Évolutions dans les courbes | 105 |
| 5. Styles fluviaux | 107 |
| 5.1. Formes en plan | 108 |
| 5.1.1. Torrents | 108 |

| | |
|--|-----|
| 5.1.2. Rivières en tresses | 108 |
| 5.1.3. Rivières divagantes | 110 |
| 5.1.4. Rivières à méandres | 111 |
| 5.1.5. Apport des cartes et des photographies aériennes | 113 |
| 5.2. Profil en long des cours d'eau | 115 |
| 5.2.1. Cas des rivières à méandres : l'alternance seuils-mouilles | 116 |
| 5.2.2. Cas des cours d'eau de montagne : profil en marches | 118 |
| 5.2.3. Cas des rivières en tresses | 121 |
| 5.2.4. Formes du profil en long et dissipation d'énergie | 121 |
| 5.2.5. Évolutions irréversibles du profil en long | 122 |
| 5.2.6. Apport des profils en long anciens | 123 |
| 5.3. Synthèse sur les styles fluviaux et les formes en plan comme en profil | 125 |
| 6. Mécanismes d'évolution des méandres | 126 |
| 7. Mécanismes d'évolution des berges | 129 |
| 7.1. Principes généraux d'évolution des berges | 129 |
| 7.2. Érosion des berges par le courant | 130 |
| 7.3. Glissement des berges | 135 |
| 7.4. Éboulement des berges (ou effondrement) | 137 |
| 7.5. Déformations des berges dues à un enfoncement du lit | 138 |
| 7.6. Relations entre érosion et glissement | 139 |
| 7.7. Autres facteurs aggravants pour la tenue des berges | 140 |
| 7.8. Rôle de la végétation sur la tenue des berges | 140 |
| 7.9. Indices aidant au diagnostic des causes de déformation des berges . . | 147 |
| 7.10. Conclusion sur la déformation des berges | 149 |
| 8. Équations du régime | 150 |

Chapitre 4

Conséquences morphologiques des aménagements

| | |
|--|-----|
| 1. Évolutions du profil en long | 154 |
| 1.1. Prélèvements temporaires dans le lit mineur | 154 |
| 1.2. Prélèvements permanents dans le lit mineur | 155 |
| 1.3. Élargissement du lit | 157 |
| 1.3.1. Élargissement du lit sans modification de la rugosité des berges | 157 |
| 1.3.2. Élargissement du lit avec modification de la rugosité des berges | 158 |
| 1.4. Enlèvement important de la végétation des berges | 159 |
| 1.5. Influence des coupures de méandres | 160 |
| 1.6. Influence des endiguements | 161 |
| 1.7. Rétrécissement local du lit mineur | 163 |
| 1.8. Prélèvements permanents dans le lit majeur | 164 |
| 1.9. Enlèvement des atterrissements | 166 |

| | |
|--|-----|
| 1.10. Influence des barrages | 167 |
| 1.10.1. Influence dans la retenue | 167 |
| 1.10.2. Dévasement des retenues | 169 |
| 1.10.3. Influence en amont de la retenue | 170 |
| 1.10.4. Influence en aval du barrage | 170 |
| 1.11. Influence des seuils (sans dérivation) | 173 |
| 1.12. Seuil de dérivation avec restitution | 179 |
| 1.13. Influence des déversoirs latéraux | 182 |
| 1.13.1. Influence généralisée d'un déversoir latéral | 182 |
| 1.13.2. Influence locale d'un déversoir latéral | 183 |
| 1.14. Influence des reforestations du bassin versant | 185 |
| 1.15. Conclusion morphologique sur les érosions régressive et progressive | 186 |
| 2. Enlèvement des bancs | 188 |
| 3. Évolutions morphologiques du lit majeur | 189 |
| 4. Évolutions du tracé en plan | 190 |
| 4.1. Évolution du style fluvial | 190 |
| 4.2. Évolution du tracé, sans changement du style fluvial | 191 |
| 5. Évolution globale, en plan et en profil | 191 |
| 6. Conséquences environnementales des incisions | 193 |
| 7. Espace de mobilité des rivières actives | 194 |
| 8. Conclusion sur l'évolution des rivières aménagées | 198 |

Chapitre 5

Stratégie et techniques de gestion et de protection des berges

| | |
|--|-----|
| 1. Stratégie de protection ou de non-protection | 201 |
| 1.1. Point de vue morphologique | 202 |
| 1.2. Point de vue écologique | 202 |
| 1.3. Délimitation de la zone menacée | 203 |
| 1.4. Étude économique | 204 |
| 1.5. Conclusion : protéger ou ne pas protéger | 204 |
| 2. Principes généraux de protection des berges | 206 |
| 2.1. Cas des tronçons de rivières rectilignes | 206 |
| 2.2. Cas de glissements de berge généralisés | 208 |
| 3. Techniques végétales de protection des berges | 210 |
| 3.1. Ensemencement | 214 |
| 3.2. Géosynthétiques enherbés | 214 |
| 3.3. Tapis vivant | 216 |
| 3.4. Boutures | 217 |
| 3.5. Plantations | 218 |
| 3.6. Plançons | 218 |
| 3.7. Fascines | 219 |
| 3.8. Tressages | 220 |

| | |
|--|-----|
| 3.9. Fascines d'hélophytes | 221 |
| 3.10. Treillis de branches | 221 |
| 3.11. Épis vivants | 221 |
| 3.12. Peignes | 222 |
| 3.13. Tunage | 222 |
| 3.14. Pieux jointifs | 223 |
| 3.15. Caissons végétalisés | 223 |
| 3.16. Recommandations générales | 224 |
| 4. Matériaux granulaires pour protéger les berges | 225 |
| 4.1. Enrochements | 226 |
| 4.1.1. Norme européenne sur les enrochements | 226 |
| 4.1.2. Trois catégories d'enrochements prévues par la norme | 228 |
| 4.1.3. Deux standards pour encadrer ou non la dimension moyenne | 229 |
| 4.1.4. Fuseaux granulométriques ou blocométriques | 229 |
| 4.1.5. Propriétés physiques des enrochements | 231 |
| 4.2. Gabions | 232 |
| 4.3. Blocs préfabriqués en béton | 236 |
| 5. Calcul des protections de berges minérales | 237 |
| 5.1. Stabilité d'ensemble | 237 |
| 5.2. Résistance des enrochements à la vitesse du courant | 238 |
| 5.3. Résistance des gabions à la vitesse du courant | 240 |
| 5.4. Protection du pied des revêtements de berge | 242 |
| 5.5. Transition granulométrique granulaire | 247 |
| 5.6. Transition assurée par un géotextile | 250 |
| 6. Conception des protections de berges vis-a-vis du glissement | 252 |
| 7. Mise en œuvre des enrochements et des matelas Reno | 253 |
| 7.1. Mise en œuvre des enrochements | 253 |
| 7.2. Mise en œuvre des matelas Reno | 256 |
| 8. Protection indirecte des berges : les épis | 256 |
| 8.1. Points communs aux deux types d'épis (navigation et protection) | 257 |
| 8.2. Régularisation d'un cours d'eau en vue de la navigation | 258 |
| 8.3. Protection des berges par épis | 259 |
| 8.4. Construction des épis | 261 |
| 8.5. Surveillance et entretien des épis | 262 |
| 8.6. Rôle des épis sur la diversité du milieu | 262 |
| 9. Génie civil ou génie biologique ? | 263 |
| 10. Suppression des protections de berge | 265 |

Chapitre 6

Cas des rivières endiguées : la fragilité des digues en terre

| | |
|---|-----|
| 1. Définitions : digues, zones protégées, zones d'expansion des crues | 268 |
| 1.1. Digues | 268 |
| 1.2. Zones protégées et zones d'expansion des crues | 271 |
| 2. Conséquences des ruptures de digues | 272 |

| | |
|--|-----|
| 3. Désordres et ruptures | 274 |
| 3.1. Dignes en terre | 274 |
| 3.2. Dignes en maçonnerie ou en béton | 276 |
| 4. Différents mécanismes de rupture ou de désordre des digues | 277 |
| 4.1. Rupture par surverse (érosion de surface) | 277 |
| 4.2. Érosion interne | 282 |
| 4.2.1. Érosion de conduit | 283 |
| 4.2.2. Suffusion | 283 |
| 4.2.3. Érosion de contact | 284 |
| 4.2.4. Cinétique de l'érosion interne | 284 |
| 4.2.5. Rôle aggravant des terriers | 285 |
| 4.2.6. Rôle aggravant des arbres | 285 |
| 4.2.7. Rôle aggravant des organes traversants | 287 |
| 4.3. Érosion par le courant | 287 |
| 4.4. Glissement en masse | 289 |
| 4.5. Brèches de retour | 289 |
| 4.6. Glissement du talus côté rivière, à la décrue | 290 |
| 4.7. Glissement du talus côté vallée, en crue | 290 |
| 4.8. Glissement du talus côté vallée, en décrue | 291 |
| 5. Désordres d'origine géomorphologique | 291 |
| 6. Faiblesses dues aux points singuliers | 293 |
| 7. Le bilan négatif des digues bordant la rivière | 295 |
| 8. Construction de digues fluviales nouvelles | 295 |
| 9. Confortement des digues existantes | 297 |
| 9.1. Diagnostic préalable | 297 |
| 9.1.1. Connaissances préalables | 297 |
| 9.1.2. Reconnaissances géophysiques | 298 |
| 9.1.3. Reconnaissances géotechniques | 299 |
| 9.2. Amélioration de la résistance des digues à la surverse | 299 |
| 9.2.1. Carapaces | 300 |
| 9.2.2. Autres revêtements | 301 |
| 9.2.3. Écrans internes aux digues | 301 |
| 9.3. Prévention de l'érosion interne | 302 |
| 9.3.1. Érosion interne en tronçon courant | 302 |
| 9.3.2. Érosion interne au droit de singularités | 304 |
| 9.4. Affouillement du pied d'une digue en bord immédiat de la rivière | 304 |
| 9.5. Glissement des talus d'une digue | 305 |
| 9.6. Cas des constructions enchâssées dans les digues | 305 |
| 9.7. Cas des mares en pied des digues côté plaine | 306 |
| 9.8. Traitement des sols à la chaux | 306 |
| 10. Crue de danger, crue de sûreté, crue de protection | 308 |
| 10.1. Crue de danger d'une digue | 308 |
| 10.2. Crue de sûreté d'une zone protégée | 308 |

| | |
|---|-----|
| 10.3. Cas d'un déversoir | 309 |
| 10.4. Crue de protection de la zone protégée | 310 |
| 11. Déversoirs dans les digues | 311 |
| 11.1. Détermination de la cote et de la longueur du déversoir | 311 |
| 11.2. Génie civil | 312 |
| 11.3. Choix du site | 315 |
| 11.4. Avantages d'un déversoir | 315 |
| 11.5. Faut-il toujours un déversoir ? | 316 |
| 12. Entretien des digues | 317 |

Chapitre 7

Les seuils en rivière

| | |
|--|-----|
| 1. Principe général d'un seuil de dérivation | 322 |
| 2. Rôle du seuil de dérivation sur le transport solide ; choix du site | 323 |
| 2.1. Transport solide par charriage | 324 |
| 2.2. Transport solide par suspension | 324 |
| 2.3. Implantation optimale de la prise | 325 |
| 3. Types de seuils | 327 |
| 3.1. Seuils poids en béton ou en maçonnerie | 327 |
| 3.2. Seuils en enrochements | 329 |
| 3.3. Seuils en gabions | 332 |
| 3.4. Seuils mobiles | 334 |
| 3.5. Seuils en bois | 337 |
| 4. Fondations des seuils et dissipation de l'énergie | 337 |
| 4.1. Propriétés mécaniques des terrains de fondation | 337 |
| 4.2. Étanchéité et stabilité de la fondation d'un seuil poids | 338 |
| 4.3. Précautions contre l'affouillement aval | 339 |
| 4.3.1. Cas des seuils sans bassin de protection ni radier aval | 340 |
| 4.3.2. Cas des seuils en béton à parement aval incliné | 341 |
| 4.3.3. Cas des seuils en enrochements | 343 |
| 4.3.4. Cas des seuils verticaux en gabions et à bassin dissipateur | 343 |
| 4.3.5. Cas des seuils en gradins de gabions et à bassin dissipateur | 344 |
| 4.3.6. Conclusion sur les protections aval des seuils | 344 |
| 5. Calcul de stabilité des seuils en enrochements | 346 |
| 6. Calcul de stabilité des seuils poids | 346 |
| 7. Dégravement et vanne de chasse | 347 |
| 8. Protection contre les corps flottants | 349 |
| 9. Passes à poissons | 351 |
| 10. Ouvrage de prise (cas d'un seuil de dérivation) | 356 |
| 10.1. Seuil de prise (ou déversoir latéral) | 356 |
| 10.2. Vannes de prises | 357 |
| 10.3. Organes de dessablage | 357 |

| | |
|---|-----|
| 10.3.1. Décanteur (à purge discontinue) | 358 |
| 10.3.2. Dessableur à purge continue | 359 |
| 10.3.3. Bassin à nettoyage manuel ou mécanique | 359 |
| 10.4. Protection de l'ouvrage de prise contre les crues | 359 |
| 11. Impact des seuils sur les nappes | 360 |
| 12. Problématique des anciens seuils de moulins | 361 |
| 12.1. Faut-il supprimer ou conserver les seuils anciens ? | 363 |
| 12.2. Matériaux et types | 365 |
| 12.3. Mécanismes de dégradation | 368 |
| 12.4. Techniques de réparation des seuils | 370 |
| 12.4.1. Réparation d'un seuil affouillé | 370 |
| 12.4.2. Prévention ou réparation d'un contournement | 371 |
| 12.4.3. Réparation d'un seuil dont la maçonnerie est disloquée | 372 |
| 12.4.4. Intervention en cas de circulation d'eau interne | 373 |
| 12.4.5. Circulation d'eau dans les fondations | 373 |
| 12.4.6. Traitement de la végétation | 374 |
| 12.4.7. Aspects environnementaux et esthétiques | 374 |
| 12.5. Difficultés et risques | 374 |
| 12.6. Conclusion sur la réparation ou la suppression des seuils anciens | 375 |

Chapitre 8

Rôle et actions de l'homme sur les crues

| | |
|--|-----|
| 1. Rôle de l'homme sur les crues | 378 |
| 1.1. Rôle de l'homme au niveau du bassin versant | 378 |
| 1.2. Rôle de l'homme au niveau des lits mineur et majeur | 380 |
| 2. Types de crue et types d'inondation | 381 |
| 2.1. Inondations de plaine par débordement de cours d'eau | 383 |
| 2.1.1. Inondations lentes de plaine | 383 |
| 2.1.2. Inondations rapides de plaine | 384 |
| 2.2. Inondations de plaine par débordement de nappe | 385 |
| 2.3. Inondations torrentielles | 385 |
| 2.4. Inondations par crues éclair | 386 |
| 2.5. Inondations par ruissellement superficiel | 387 |
| 2.6. Conséquences des crues selon leur type | 388 |
| 3. Travaux de réduction de l'aléa crue au niveau du bassin versant | 389 |
| 3.1. Actions diffuses dans le bassin versant | 389 |
| 3.2. Actions concentrées dans le bassin versant : les barrages | 390 |
| 4. Travaux de réduction de l'aléa débordement au niveau du lit | 391 |
| 4.1. Augmentation de la capacité d'écoulement | 391 |
| 4.2. Ralentissement des écoulements dans le lit majeur et le lit mineur | 393 |
| 5. Modification de la vulnérabilité | 395 |
| 6. Conclusion sur les crues | 400 |

Chapitre 9

Gestion, aménagement et entretien des cours d'eau

| | |
|--|-----|
| 1. Objectifs d'aménagement | 409 |
| 1.1. Restaurations diverses à vocation hydraulique ou écologique ou morphologique | 410 |
| 1.2. Typologie d'aménagements par grands types d'objectifs | 413 |
| 2. Travaux de protection contre les crues au droit des enjeux | 413 |
| 2.1. Calibrage | 413 |
| 2.1.1. Conséquences morphologiques d'un calibrage pour le profil en long | 414 |
| 2.1.2. Conséquences morphologiques d'un calibrage pour les berges | 415 |
| 2.1.3. Conséquences d'un calibrage sur les débits de pointe | 416 |
| 2.1.4. Conséquences écologiques et paysagères d'un calibrage | 417 |
| 2.2. Coupures de méandres | 417 |
| 2.3. Curage | 419 |
| 2.3.1. Définitions : curage, vase | 419 |
| 2.3.2. Aspect réglementaire | 420 |
| 2.3.3. Techniques de curage | 421 |
| 2.3.4. Causes de l'envasement | 421 |
| 2.4. Endiguements | 423 |
| 2.5. Restauration de rivière (restauration de la capacité d'écoulement) | 423 |
| 2.6. Entretien de la végétation des berges | 428 |
| 2.7. Entretien des atterrissements | 428 |
| 3. Travaux de protection contre les crues en amont des enjeux | 428 |
| 3.1. Barrages écrêteurs de crue | 428 |
| 3.2. Bassins écrêteurs de crue | 430 |
| 3.3. Recul des digues | 431 |
| 3.4. Transformation d'un espace endigué en zone d'expansion de crues (ZEC) | 432 |
| 3.5. Aménagement du lit majeur en zone rurale | 436 |
| 3.6. Absence d'entretien de la végétation du lit mineur | 438 |
| 4. Gérer la végétation et les embâcles (lits mineur et majeur) | 438 |
| 4.1. Rôles de la végétation des berges | 438 |
| 4.2. Embâcles | 439 |
| 4.2.1. Causes et conséquences des embâcles | 439 |
| 4.2.2. Gestion des embâcles | 441 |
| 4.3. Conciliation des objectifs d'entretien de la végétation | 443 |
| 4.4. Mode de gestion de la végétation selon l'objectif | 444 |
| 5. Gestion des atterrissements | 450 |
| 5.1. Gestion directe dans le lit mineur | 450 |
| 5.2. Actions indirectes en amont | 453 |
| 6. Restauration morphologique | 454 |
| 6.1. Crues artificielles en aval des barrages | 454 |
| 6.2. Recharges sédimentaires | 455 |

| | |
|---|-----|
| 6.3. Renaturation des tracés de cours d'eau | 456 |
| 6.3.1. Reméandremets | 456 |
| 6.3.2. Élargissement de lit | 457 |
| 6.3.3. Remise en eau de bras morts | 457 |
| 6.3.4. Remise à ciel ouvert | 458 |
| 6.3.5. Recours au génie biologique | 459 |
| 6.3.6. Suppression des protections de berge ou des seuils | 460 |
| 7. Espaces de bon fonctionnement pour la rivière | 461 |
| 7.1. Espace de mobilité des rivières actives | 462 |
| 7.2. Espace « rivière-vie-nature » | 463 |
| 7.3. Bandes riveraines en zone agricole (boisées et/ou enherbées) | 463 |
| 7.4. Espace de rétention transitoire de l'eau (ou espace de ralentissement) | 465 |
| 7.5. Conclusion sur les espaces dédiés | 467 |
| 7.6. Perspective dans l'esprit de l'« espace de bon fonctionnement » | 468 |
| 8. Conclusion sur l'aménagement et la gestion du lit | 470 |
| Conclusion | 473 |
| 1. Connaître le milieu..... | 473 |
| 2. ... et les mécanismes naturels..... | 474 |
| 3. ... pour bien étudier l'impact morphologique des actions projetées..... | 475 |
| 4. ... se protéger des crues, mais en arrêtant l'escalade..... | 475 |
| 5. ... sans oublier les crues qui vont dépasser la protection..... | 476 |
| 6. ... et ne pas se tromper sur les objectifs | 477 |
| Bibliographie | 481 |
| Lexique | 491 |
| Index | 539 |

Diagnostic, aménagement et gestion des rivières

Ce manuel pratique aide à comprendre les grands principes régissant la morphologie des cours d'eau et leur dynamique pour mieux concevoir des aménagements qui sauront résister aux crues sans déséquilibrer pour autant les écosystèmes. Le **chapitre 1** donne les définitions, principes de base et résultats d'hydraulique à surface libre. Les **chapitres 2 à 4** approfondissent le diagnostic des rivières en tenant compte du transport solide et de la constante interaction entre l'écoulement, le fond, les berges et le champ d'inondation. Les **chapitres 5 à 9** exposent les différents aménagements et entretiens pour utiliser l'eau ou se protéger des crues.

Cette 2^e édition, entièrement réactualisée et augmentée de nombreux schémas et photos, aborde de nouveaux points : les calculs hydrauliques des déversoirs latéraux, des estimations de débit solide adaptées aux fortes pentes, la morphologie des torrents et les conséquences morphologiques des barrages, la restauration morphologique des rivières, les processus d'érosion par surverse, la conception des zones d'expansion de crues, des procédés de protection de berge ou de traitement des digues, la nouvelle norme sur les enrochements, etc.

Diagnostic, aménagement et gestion des rivières s'adresse aux professionnels en charge de la gestion et de l'aménagement des cours d'eau ou de la police de l'eau : cabinets d'ingénierie, collectivités territoriales, établissements publics, sociétés d'aménagement régional et services déconcentrés et centraux de l'État. Il sera une aide précieuse pour les étudiants en écoles d'ingénieur ou en université et intéressera les chercheurs en mécanique des fluides, géomorphologie ou écologie fluviale.

Gérard Degoutte, ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts, spécialiste de la sécurité des ouvrages hydrauliques et de la prévention des risques liés aux inondations, est chercheur et expert à Irstea et aux ministères de l'Agriculture et de l'Écologie. Il enseigne à l'université et à AgroParisTech.

www.editions.lavoisier.fr



9 782743 014698