



eau
seine
NORMANDIE

MANUEL DE RESTAURATION HYDROMORPHOLOGIQUE DES COURS D'EAU

ENSEMBLE
DONNONS
VIE À L'EAU

Agence de l'eau



Philippe Adam et Nicolas Debais

65-67, cours de la Liberté – 69003 LYON
Tél. : 04 78 14 06 06 – Fax : 04 78 14 06 07
E-mail : biotec@biotec.fr



Jean-René MALAVOI
Ingénieur Conseil

207, rue de l'Église – 01600 PARCIEUX
Tél. : 04 37 92 97 04 – Fax : 04 37 92 97 04
E-mail : jr.malavoi@wanadoo.fr

DÉCEMBRE 2007

**DIRECTION DE L'EAU,
DES MILIEUX AQUATIQUES
ET DE L'AGRICULTURE
(DEMAA)
SERVICE EAUX DE SURFACE**

**51, rue Salvador Allende
92027 Nanterre Cedex**





RÉSUMÉ

Depuis 2000, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) donne des objectifs de résultats ambitieux en terme d'état ou de potentiel écologique des rivières, et en terme de continuité écologique. Or l'état des lieux du bassin réalisé en 2004 a mis en évidence que pour un grand nombre de masses d'eaux de surface, le principal obstacle au bon état écologique est un problème de qualité physique des rivières (berges et lit mineur) et donc de qualité des habitats.

Pourtant, sur le terrain, les objectifs et pratiques dites d'entretien sont encore souvent d'ordre hydraulique (limiter les débordements ou l'érosion des berges, etc.) et paysager. Même si elles répondent à une demande sociale, ces pratiques ont souvent un impact négatif sur les habitats et les espèces, et dégradent ainsi l'état écologique global des cours d'eau.

Aujourd'hui, encore trop peu de maîtres d'ouvrage se lancent dans des projets ambitieux de restauration morphologique des cours d'eau anthropisés. Les raisons sont diverses : coût financier important malgré les aides publiques, demande sociale émergente (pas toujours compatible avec le bon état écologique), méconnaissance du fonctionnement des rivières et manque de compétences techniques pour initier et suivre des travaux.

Dans le cadre de son 9^e programme d'intervention (2007-2012), l'Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) s'est engagée à ce que chaque opération sur les cours d'eau financée contribue directement à l'amélioration de l'état écologique du cours d'eau considéré. Les chargés d'opérations de l'AESN, les Cellules d'Assistance Technique à l'Entretien des Rivières (CATER) et certains acteurs locaux font déjà un travail important en la matière, au plus près du terrain. Mais il leur manque toujours des outils, des documents pour appuyer leurs argumentaires.

C'est pourquoi l'AESN a souhaité mettre à leur disposition un manuel à la fois technique et communiquant, de restauration hydromorphologique des cours d'eau.

Ce manuel n'a pas été conçu comme un livre de recettes ou de solutions techniques « clés en main ». Ce n'est pas non plus un énième manuel sur les

méthodes de gestion de la ripisylve ou les techniques de protection végétale des berges. C'est avant tout un ouvrage destiné à alimenter la réflexion et à présenter le champ des possibles, les contraintes à ne pas négliger, les principales règles de dimensionnement à respecter, les pièges à éviter. Il doit amener le lecteur à se poser les bonnes questions face à une situation donnée, par exemple :

- *A quel type de cours d'eau ai-je affaire ?*
- *Quelles interventions humaines a-t-il subies ?*
- *Quels sont les dysfonctionnements induits ?*
- *La situation est-elle réversible ?*
- *Que puis-je espérer recréer à partir de cette situation ?*
- *Quel est le type d'intervention possible parmi les différentes techniques de restauration existantes ?*
- *Le cours d'eau peut-il se restaurer lui-même ?*
- *Quels effets bénéfiques puis-je attendre des mesures proposées ?*
- *Quels risques ai-je de ne pas atteindre les objectifs de restauration ?*
- *Quelle est la période la plus favorable pour engager des travaux de restauration ?*
- *Quels sont les indicateurs de suivi de la réalisation proposée à mettre en place ?*

Ce manuel vise, chapitre après chapitre, à fournir au lecteur des **bases pragmatiques, techniques et scientifiques** lui permettant de déterminer quelle pourrait être la meilleure solution de restauration fonctionnelle pour **son** cours d'eau (ou tronçon de cours d'eau), dans son contexte physique et socio-politique particulier. Il s'adresse donc particulièrement à un public de techniciens, mais aussi de décideurs et gestionnaires désireux d'en savoir plus sur les concepts d'altération, de préservation et de restauration du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau.

Ce manuel vise également à montrer que le choix de telle ou telle opération de restauration n'est pas le fruit du hasard mais qu'il doit reposer sur l'analyse la plus fine possible des potentialités du tronçon de cours d'eau concerné en confrontation avec l'analyse des dysfonctionnements subis.

TABLE DES



Première partie

Postulats et principes généraux des opérations de restauration

5

Contexte et objectifs

6

Pourquoi ce manuel

6

Limites du manuel

6

Bases de la restauration biologique et fonctionnelle des cours d'eau

9

Typologie géodynamique fonctionnelle des cours d'eau

9

Concepts généraux de restauration et niveaux d'ambition

13

Evaluation a priori de l'efficacité probable d'un projet de restauration

17

Etudes préalables et éléments de suivi

19

Contenu de l'étude préalable

19

Contenu de l'étude de suivi

20

Etapes clés d'une opération de restauration de cours d'eau

21



Deuxième partie

les principaux dysfonctionnements à l'origine des opérations de restauration

23

Les principales interventions humaines et leurs dysfonctionnements associés

24

Couverture et enterrement de cours d'eau

25

Déplacement de cours d'eau

26

Rescindement de méandres - Rectification

27

Recalibrage

28

Suppression de la ripisylve

30

Protection des berges

33

Endiguement et merlons de curage

34

Seuils / ouvrages transversaux

36

Etangs implantés sur un cours d'eau

39

Extractions de granulats

40

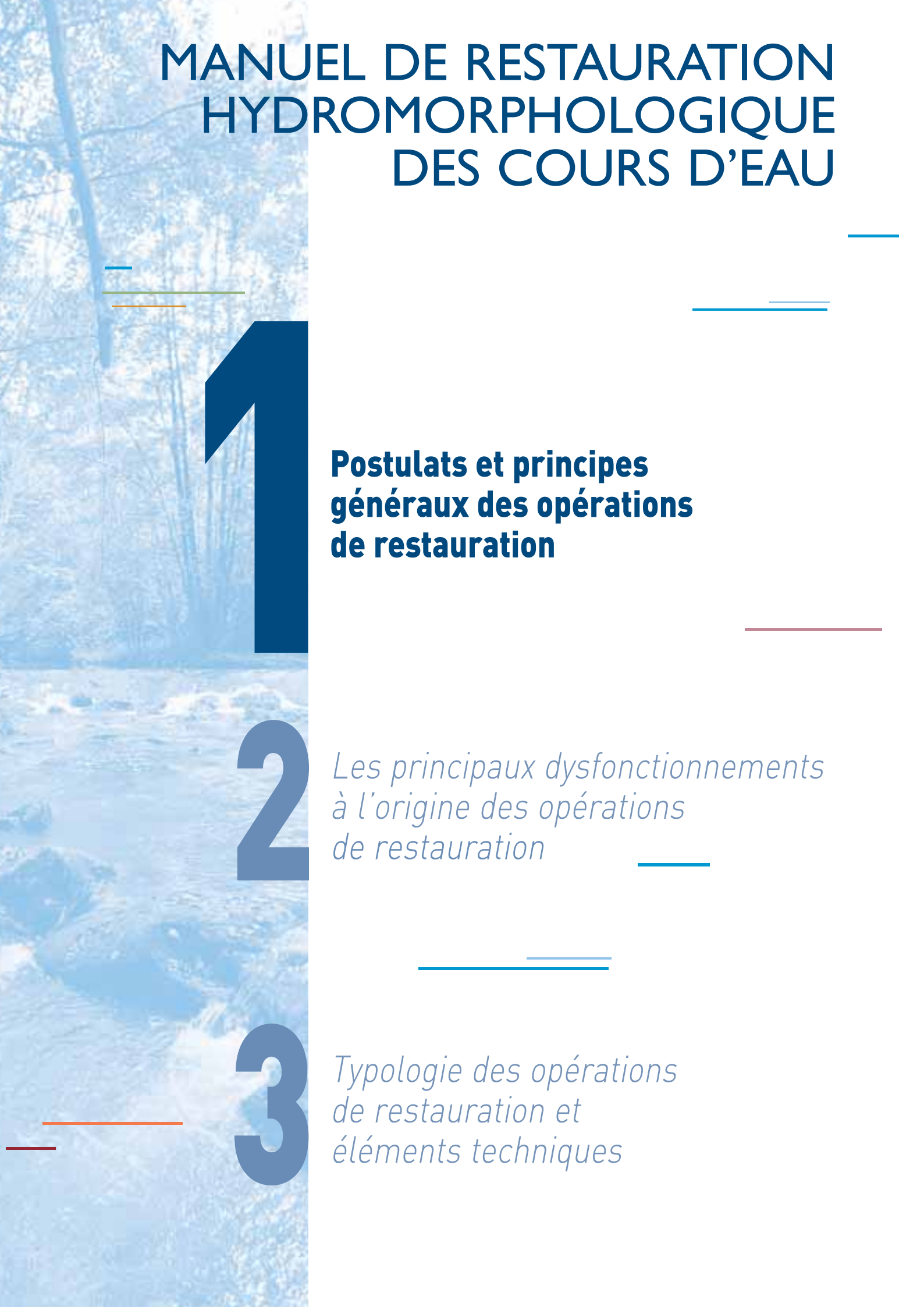
MATIÈRES

Cas particuliers	42
Spécificités des cours d'eau en milieu urbain	43
Spécificités des grands cours d'eau navigués	44
Spécificités des cours d'eau en milieu estuarien	48
Tableaux de synthèse des familles de travaux de restauration par type de dysfonctionnement et par niveau d'ambition	51
Conclusion	56
Bibliographie	58



Typologie des opérations de restauration et éléments techniques

→ Petits aménagements piscicoles (fiche 1)	3
→ Création d'une ripisylve (fiche 2)	7
→ Epis (fiche 3)	11
→ Bancs et risbermes alternés (fiche 4)	19
→ Reconstitution du matelas alluvial (fiche 5)	23
→ Seuils et rampes (fiche 6)	27
→ Reconnexion d'annexes hydrauliques (hors suppression de digues) (fiche 7)	31
→ Arasement/dérasement de seuils (fiche 8)	43
→ Suppression des contraintes latérales (fiche 9)	49
→ Remise à ciel ouvert de cours d'eau (fiche 10)	55
→ Modification de la géométrie du lit mineur/moyen (augmentation limitée de l'emprise) (fiche 11)	61
→ Diversification de berges sur grands cours d'eau navigués (fiche 12)	67
→ Suppression des digues, élargissement de l'intra-digues (fiche 13)	75
→ Suppression d'étangs (fiche 14)	81
→ Reméandrage ou recréation de cours d'eau (fiche 15)	85
Travaux en limite des opérations de restauration	93
Mesures de limitation des impacts lors des opérations de restauration	99



MANUEL DE RESTAURATION HYDROMORPHOLOGIQUE DES COURS D'EAU

1

**Postulats et principes
généraux des opérations
de restauration**

2

*Les principaux dysfonctionnements
à l'origine des opérations
de restauration*

3

*Typologie des opérations
de restauration et
éléments techniques*



Contexte et objectifs

🌊 Pourquoi ce manuel

Depuis 2000, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) donne des objectifs de résultats ambitieux en terme d'état ou de potentiel écologique des rivières, et en terme de continuité écologique. Or l'état des lieux du bassin réalisé en 2004 a mis en évidence que pour un grand nombre de masses d'eaux de surface, le principal obstacle au bon état écologique est un problème de qualité physique des rivières (berges et lit mineur) et donc de qualité des habitats.

La Circulaire DCE n° 2005-12 du 28 juillet 2005 confirme cette analyse (ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables, MEDAD) :

« La DCE ne prévoit pas que soit évalué un "état hydromorphologique" à l'image de ce qui est prévu pour l'état chimique et l'état écologique. Cependant, les éléments biologiques sont liés, à la fois aux éléments physico-chimiques et aux éléments hydromorphologiques et, dans les états des lieux des districts, les caractéristiques physiques sont souvent signalées comme limitantes pour l'atteinte du bon état écologique. »

Pourtant, sur le terrain, les objectifs et pratiques dites d'entretien sont encore souvent d'ordre hydraulique (limiter les débordements ou l'érosion des berges, etc.) et paysager. Si elles répondent à une demande sociale, ces pratiques ont souvent un impact négatif sur les habitats et les espèces, et dégradent ainsi l'état écologique global des cours d'eau.

Rappelons qu'un cours d'eau en bon état permet de répondre à une multitude de fonctions et d'usages : qualité de l'eau, qualité paysagère et intérêt récréatif, qualité écologique, bon fonctionnement hydraulique (rétention des crues), etc.

Ce bon fonctionnement hydromorphologique peut être caractérisé par une grande diversité de faciès, des berges naturelles, des bancs alluviaux mobiles, une ripisylve variée, des annexes hydrauliques et, surtout, une dynamique fluviale la plus libre possible (figure 1, p. 7).

Une dynamique fluviale libre est constitutive d'une diversité d'habitats indispensable à la faune et la

flore aquatiques et rivulaires. C'est par elle notamment que s'allient le « physique » et le « biologique » (figure 2, p. 8).

Aujourd'hui, encore trop peu de maîtres d'ouvrage se lancent dans des projets ambitieux de restauration morphologique des cours d'eau anthropisés. Les raisons sont diverses : coûts financiers importants malgré les aides publiques, demande sociale émergente (pas toujours compatible avec le bon état écologique), méconnaissance du fonctionnement des rivières et manque de compétences techniques pour initier et suivre des travaux.

Dans le cadre du 9^e programme d'intervention de l'Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) (2007-2012), l'ensemble des travaux financés devra contribuer à l'amélioration de l'état écologique des rivières. Pour atteindre les objectifs de bon état et de bon potentiel, la sensibilisation et l'information des maîtres d'ouvrage sont des leviers essentiels permettant de susciter des dynamiques locales de reconquête écologique des rivières, à moyen et long terme. Les chargés d'opération de l'AESN, les Cellules d'Assistance Technique à l'Entretien des Rivières (CATER) et certains acteurs locaux font déjà un travail important en la matière, au plus près du terrain. Mais il leur manque toujours des outils, des documents pour appuyer leurs argumentaires.

C'est pourquoi l'AESN a souhaité mettre à leur disposition un manuel à la fois technique et communiquant, de restauration hydromorphologique des cours d'eau.

🌊 Limites du manuel

Ce manuel n'a pas été conçu comme un livre de recettes ou de solutions techniques « clés en main ». Ce n'est pas non plus un énième manuel sur les méthodes de gestion de la ripisylve ou les techniques de protection végétale des berges. C'est avant tout un ouvrage destiné à alimenter la réflexion et à présenter le champ des possibles, les contraintes à ne pas négliger, les principales règles de dimensionnement à respecter, les pièges à éviter. Il doit amener le lecteur à se poser les bonnes questions face à une situation donnée :

A quel type de cours d'eau ai-je affaire ? Quelles interventions humaines a-t-il subies ? Quels sont les



Figure 1 : Quelques illustrations d'un bon fonctionnement hydromorphologique. a) Des faciès d'écoulement diversifiés. b) Des berges naturelles. c) Des bancs alluviaux mobiles. d) Une ripisylve fournie et variée. e) Un corridor fluvial boisé. f) Des annexes hydrauliques. ≈

dysfonctionnements induits ? La situation est-elle réversible ? Que puis-je espérer recréer à partir de cette situation ? Quel est le type d'intervention possible parmi les différentes techniques de restauration existantes ? Le cours d'eau peut-il se restaurer lui-même ? Quels effets bénéfiques puis-je attendre des mesures proposées ? Quels risques ai-je de ne pas atteindre les objectifs de restauration ? Quelle est la période la plus favorable pour engager des travaux de restauration ? Quels sont les indicateurs de suivi de la réalisation proposée à mettre en place, etc. ?

Ce manuel vise, chapitre après chapitre, à fournir au lecteur des **bases pragmatiques, techniques et scientifiques** lui permettant de déterminer quelle pourrait être la meilleure solution de restauration fonctionnelle pour son cours d'eau (ou tronçon de cours d'eau), dans son contexte physique et socio-politique particulier. Il s'adresse donc particulièrement à un public de techniciens, mais aussi de décideurs et gestionnaires désireux d'en savoir plus sur les concepts d'altération, de préservation et de restauration du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau.



Figure 2 : Exemples de substrats en tant qu'habitat des biocénoses aquatiques. a) Truites. b) Couleuvre à collier. c) Hirondelle de rivage. d) Buisson de saules. e) Invertébrés (*Perla marginata*). f) Invertébrés (*Stenophylax* sp.). ≈

Ce manuel vise également à montrer que le choix de telle ou telle opération de restauration n'est pas le fruit du hasard mais qu'il doit reposer sur l'analyse la plus fine possible des potentialités du tronçon de cours d'eau concerné en confrontation avec l'analyse des dysfonctionnements subis.

Pour cette raison, le manuel est articulé en trois parties qui s'enchaînent selon une logique opérationnelle :

- la première partie pose les bases conceptuelles de la « **restauration biologique et fonctionnelle** » des cours d'eau ;
- la seconde partie détaille les principaux dysfonctionnements identifiés sur les cours d'eau et les orientations de restauration qui peuvent leur être associées ;
- la troisième partie présente les aspects techniques de la restauration, notamment au moyen de « fiches ».

Certaines altérations des cours d'eau sont issues d'une gestion anthropique des débits, avec l'exploitation hydroélectrique, des prélèvements pour l'agriculture, etc. Le présent manuel ne traite volontairement pas de la gestion hydrologique des rivières, qui pourrait néanmoins, si elle était optimisée, améliorer le fonctionnement global de l'hydrosystème.

Le présent manuel, sur la base de la connaissance à la fois du type de cours d'eau considéré et des altérations subies, définit des orientations d'aménagement et de gestion en terme de restauration physique, biologique et fonctionnelle. Mais ces propositions doivent bien sûr être affinées, concrétisées et développées de cas en cas pour être parfaitement opérationnelles. Ce manuel ne comprend ainsi pas les éléments techniques d'un cahier des charges de travaux aptes à constituer un dossier de consultation des entreprises (listes des plantes mélanges grainiers, caractéristiques précises des matériaux à mettre en œuvre, mode opératoire détaillé des travaux, etc.).

Les fiches techniques (3^e partie) s'appuient sur un certain nombre assez restreint d'exemples du bassin Seine-Normandie ainsi que sur quelques cas isolés hors bassin. Ces exemples servent d'appui technique dans le développement de la réflexion, mais le présent manuel n'a pas pour but de présenter un véritable « retour d'expériences » des travaux de restauration menés sur le bassin Seine-Normandie et pas non plus la prétention de montrer forcément les exemples les plus démonstratifs et réussis du bassin. Le choix des cas concrets s'est fait de manière à respecter une certaine diversité typologique des cours d'eau du bassin, répartition géographique et illustration de différentes « techniques » de restauration. Ce manuel a ainsi vocation à être utilisé sur l'ensemble du territoire métropolitain, hors torrents de montagne absents du bassin Seine-Normandie.

Hormis dans la présentation de cas concrets réalisés, aucune fourchette de coûts n'est donnée, car

les paramètres expliquant leur variabilité sont complexes (contexte local, accessibilité, concurrence interentreprises, contraintes hydrologiques, coût du foncier, etc.) et les exemples sont encore trop peu nombreux pour généraliser des fourchettes de prix par technique de restauration proposée.

D'autre part, le lecteur désirant en savoir plus est systématiquement renvoyé vers des références bibliographiques complémentaires ou plus détaillées.

Bases de la restauration biologique et fonctionnelle des cours d'eau

Typologie géodynamique fonctionnelle des cours d'eau

La deuxième partie du présent manuel détaillera les différentes interventions humaines ayant pu être réalisées sur les cours d'eau et les dysfonctionnements qui leur sont généralement associés. On verra par la suite que la possibilité de les résorber, voire de les supprimer, est en grande partie fonction du **type** de cours d'eau considéré. Nous avons souhaité élaborer une typologie particulière de cours d'eau, adaptée à la problématique de restauration : **la typologie géodynamique fonctionnelle** (Malavoi, Biotec, 2006).

Cette typologie a pour objet de déterminer l'intensité de l'activité géodynamique actuelle ou potentielle d'un cours d'eau (ou d'un tronçon de cours d'eau).

De celle-ci dépendent en grande partie :

- les caractéristiques géomorphologiques du cours d'eau : géométrie, substrats, intensité actuelle ou potentielle des processus d'érosion latérale, verticale et de transport solide ;
- les caractéristiques écologiques globales ;
- mais surtout, dans l'objectif qui est le nôtre aujourd'hui, **les capacités d'ajustement géomorphologique** suite à des travaux de restauration.

NOTRE POSTULAT EST LE SUIVANT :

- plus un cours d'eau est puissant ;
- plus ses berges sont facilement érodables ;
- plus les apports solides sont importants ;
- ➔ meilleure est la garantie de réponse positive du système ;
- ➔ plus rapides sont les résultats ;
- ➔ plus grande est la pérennité des bénéfices écologiques de la restauration ;
- ➔ moindre est le coût, puisque le cours d'eau effectue lui-même une partie du travail de restauration.





↑ Figure 5 : Exemples visuels de divers degrés d'érodabilité de berges. ≈

géodynamique relativement importante si leurs berges sont non ou peu cohésives et s'ils reçoivent de l'amont une certaine quantité d'alluvions grossières qui, par leur dépôt sous forme de bancs, activent les processus d'érosion sur les berges opposées.

A l'inverse, des cours d'eau plus puissants (40-50 W/m²) mais coulant dans une plaine alluviale composée de sédiments plus cohésifs (limons, sables limoneux, argiles) seront probablement moins actifs, surtout si les apports solides provenant de l'amont sont modestes.

Il n'existe pas à ce jour de méthode normalisée de détermination de l'érodabilité des berges. Nous proposons néanmoins ci-après quelques éléments méthodologiques accompagnés d'exemples visuels permettant une première approche de ce paramètre (**matériel nécessaire** : pelle – décimètre – échelle visuelle) :

- si possible, enlèvement localisé au droit du point d'analyse de la végétation pour bien visualiser la coupe de la berge ;
- décapage du talus de pied de berge (il y a généralement un talus d'éboulis). C'est en effet le **pied de berge qui est la partie la plus sensible à l'érosion** ; il est donc important de connaître sa nature. Par exemple, une berge de 3 mètres de hauteur de nature limoneuse ou limono-argileuse sera faiblement érodable. Si une berge de même hauteur est limoneuse sur 2,5 mètres et sableuse à la base sur 0,5 mètre, elle sera moyennement à fortement érodable ;

- si la berge n'est pas déjà subverticale, creusement d'une coupe subverticale sur environ 50 cm de largeur ;
- prise de photos et si possible établissement d'un croquis coté de la coupe (granulométrie visuelle simplifiée et épaisseurs des différentes strates sédimentaires : argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs, roche). Placer si possible un repère visuel sur la photo.

● Les apports solides

Outre leur rôle d'activation des processus d'érosion latérale (effet défecteur de l'écoulement), les apports de charge sédimentaire grossière en provenance de l'amont sont extrêmement importants en termes de création du substrat alluvial indispensable à de nombreux organismes composant les biocénoses aquatiques.

Là encore, aucune méthodologie n'a été développée à ce jour pour classer de manière simple l'intensité des apports solides sur un cours d'eau.

La méthodologie que nous utilisons actuellement est basée sur l'analyse des photographies aériennes de l'Institut Géographique National (IGN) et notamment la « BDOrtho » au pixel 0,5 mètre. Elle n'est présentée ici qu'à titre indicatif et mériterait un approfondissement pour être utilisable de manière normalisée :

- sont cartographiés de manière simplifiée (un point) les bancs alluviaux visibles sur l'orthophotographie ;



Figure 6 : Exemples de localisation et de cartographie simplifiées des bancs alluviaux visibles (source : BDOrtho IGN, in Malavoi *et al.*, 2006).

- le résultat peut ensuite être présenté sur une carte synthétique permettant de distinguer les rivières en fonction de la densité des zones de stockages alluviaux, par exemple par le biais d'un critère : nombre de bancs/km de rivière.

NOTA

Trois « bémols » empêchent cette méthode de refléter exactement le transport solide des cours d'eau :

- le débit lors des prises de vue de l'IGN qui, s'il est élevé, peut masquer la présence de bancs alluviaux ;
- la présence de végétation riveraine qui masque parfois le cours d'eau ;
- la présence de remous de seuils ou barrages, pouvant eux aussi masquer des bancs existants mais qui sont alors submergés.

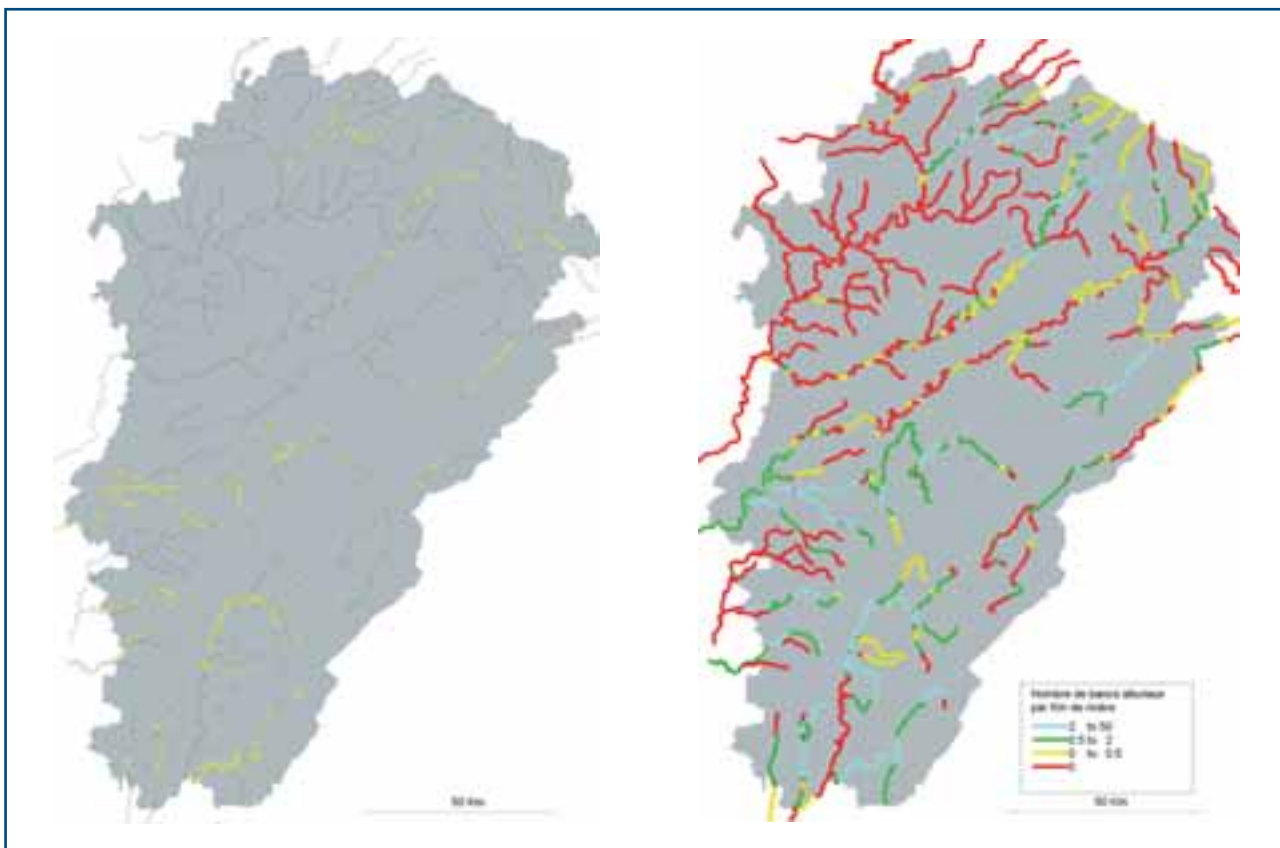


Figure 7 : Exemple de cartographie de la densité kilométrique des bancs alluviaux exondés sur les rivières de Franche-Comté (Malavoi *et al.*, 2006).

Nota : les limites de classes sont arbitraires et n'ont pas fait l'objet d'une normalisation.

■ Proposition de typologie

Compte tenu de ces observations, il nous semble important de caractériser les cours d'eau, notamment dans un objectif **d'évaluation de l'efficacité de travaux de restauration**, par :

- leur puissance spécifique - W ;
- l'érodabilité potentielle naturelle de leurs berges (abstraction faite des protections éventuelles existantes) - B ;
- leurs apports solides potentiels - A.

Sur la base de ces 3 variables, il est possible de proposer une typologie simple, qui pourrait être mise en œuvre à l'échelle du bassin ou renseignée au fur et à

mesure dans le cadre d'études ponctuelles, préalables aux travaux de **restauration**.

Ainsi, par exemple pour le type W4B3A3 (à forte puissance spécifique, apports solides et érodabilité des berges moyens), le cours d'eau sera probablement très réactif et les travaux de restauration qui pourraient y être réalisés efficaces et avec des résultats positifs rapides.

A l'inverse un type W1B2A1 (à très faible puissance, érodabilité des berges faible et apports solides nuls) sera plus difficile à restaurer, avec des travaux qui seront assez chers car très aboutis dès le départ, du fait que la dynamique propre du cours d'eau ne pourra pas y contribuer.

	1	2	3	4
Puissance - W	< 10 W/m ²	10-30 W/m ²	30-100 W/m ²	> 100 W/m ²
Erodabilité des berges - B	Nulle	Faible	Moyenne	Forte
Potentiel d'apports solides - A	Nul	Faible	Moyen	Fort

🌊 Concepts généraux de restauration et niveaux d'ambition

Une opération de restauration hydromorphologique peut être menée « passivement » (en réduisant les « forces de dégradation ») ou « activement » (par des interventions plus lourdes).

Le concept de **restauration passive** fait référence à la typologie géodynamique des cours d'eau présentée plus haut. Plus un cours d'eau sera puissant, avec des berges facilement érodables et des apports solides encore importants, plus sa restauration sera facile, peu coûteuse et avec des effets rapides. La simple suppression des forces de dégradation (enrochements de protection de berges, barrages) suffira généralement pour que le cours d'eau se réajuste rapidement, tant du point de vue physique qu'écologique (à condition toutefois pour ce dernier point, que la qualité physico-chimique de l'eau soit correcte).

La **restauration active** sera nécessaire sur les cours d'eau peu puissants, peu actifs et à faibles apports solides. Elle nécessitera des travaux plus coûteux et donnera a priori des résultats moins spectaculaires.

■ Niveaux d'ambition des travaux de restauration

On peut définir trois grandes catégories d'actions sur un cours d'eau visant à préserver ou à restaurer un bon fonctionnement morphologique et écologique :

- si le fonctionnement morpho-écologique est encore bon :
→ préservation : catégorie P.
Il s'agira le plus souvent d'opérations de sensibilisation, de protection ou de maîtrise foncière

de secteurs menacés par une pression anthropique latente. Ceci peut se concrétiser par des arrêtés de biotopes, l'achat de terres sur un espace alluvial élargi ou en secteur de mobilité potentielle d'un cours d'eau, des contrats d'exploitation extensive de terres riveraines avec des agriculteurs, la définition de zones « tampon », etc.).

- si le fonctionnement morpho-écologique est légèrement dégradé mais encore correct :

→ limitation des dysfonctionnements futurs : catégorie L.

Une opération de restauration n'est peut-être pas nécessaire mais il semble important de mettre en œuvre des actions qui bloquent les dysfonctionnements en cours de manifestation : seuils de fond pour stabiliser une incision qui commence à se manifester, espace de mobilité pour éviter une accentuation d'une incision encore modérée, meilleure gestion des débits à la sortie d'un barrage, meilleure gestion de la qualité de l'eau, etc.

- si l'état est dégradé :
→ restauration : catégorie R.

Dans la catégorie R, on peut alors distinguer 3 niveaux d'objectifs de restauration (qui correspondent aussi à 3 niveaux d'ambition) :

- niveau R1 ; objectif de restauration d'un compartiment de l'hydrosystème, **souvent piscicole**, dans un contexte où l'on ne peut réaliser une véritable opération de restauration fonctionnelle. Il s'agit généralement de mettre en place des structures de diversification des écoulements et des habitats : déflecteurs, petits seuils, caches, frayères, etc. Ce niveau d'ambition ne nécessite

pas une grande emprise latérale. Il peut être mis en œuvre dans l'emprise actuelle du lit mineur ou légèrement augmentée. Il devrait être réservé aux zones urbaines ou périurbaines, où les contraintes foncières sont importantes mais on constate qu'il est fréquemment mis en œuvre en zone rurale, pour des raisons foncières aussi et probablement par manque d'ambition... (voir figure 8, ci-dessous) ;

- **niveau R2** ; objectif de restauration fonctionnelle plus globale. L'amélioration de tous les compartiments aquatiques et rivulaires est visée : transport solide, habitat aquatique, nappe alluviale, ripisylve. Ce niveau nécessite une emprise foncière plus

importante (de 2 à 10 fois la largeur naturelle du lit mineur). Il peut être atteint par exemple par un reméandrage léger pour un cours d'eau rectifié, par un écartement des digues pour un cours d'eau fortement endigué, par la « remise » à ciel ouvert d'un lit de cours d'eau mis sous tuyau ou couvert, etc. (voir figure 9, ci-contre) ;

- **niveau R3** ; niveau R2 + espace de mobilité ou de fonctionnalité. Restauration fonctionnelle complète de l'hydrosystème, y compris de la dynamique d'érosion et du corridor fluvial. L'emprise nécessaire pour que ce niveau d'ambition soit pertinent est au minimum de l'ordre de 10 fois la largeur du lit mineur avant restauration.



Figure 8 : Différents exemples d'aménagements essentiellement piscicoles : en haut à gauche risberme en enrochements sur la Bienne (39), en haut à droite agencement de blocs sur la Savoureuse (90), au centre amas de blocs et radier artificiel sur le Druegon (25), en bas à gauche caches artificielles sur un petit ruisseau affluent de l'Allondon (Suisse, canton de Genève) et en bas à droite aménagements piscicoles sur l'Arve (74). ≡

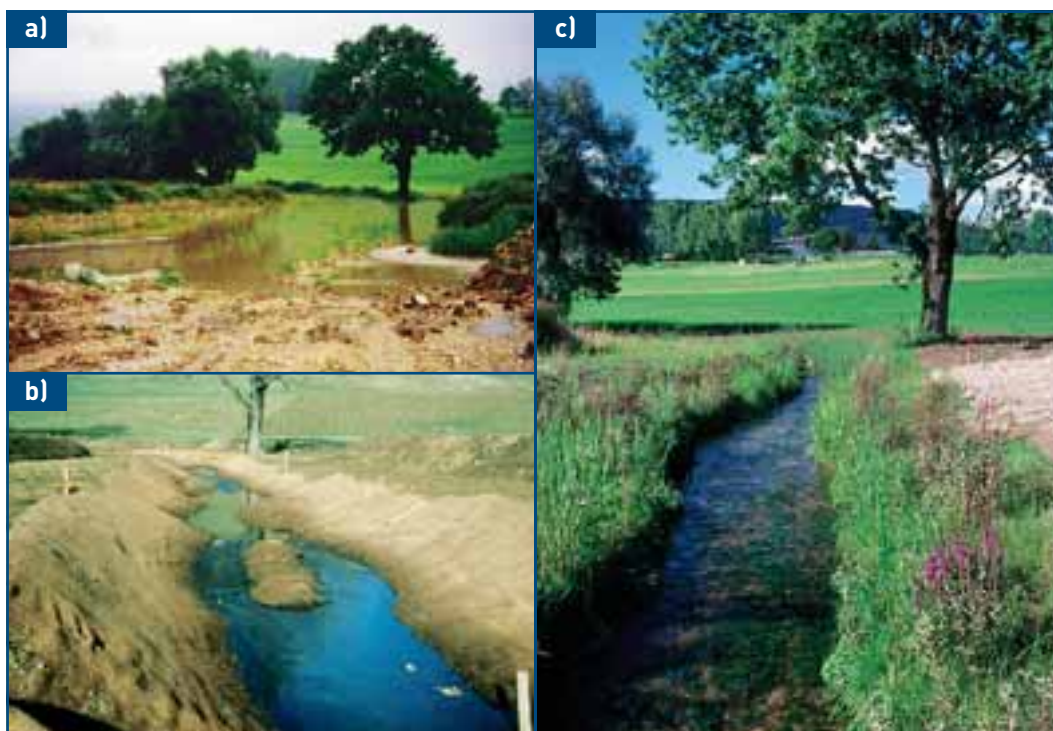


Figure 9 : Remise à ciel ouvert (décorrection) d'un petit cours d'eau dans le Jura suisse (la Golatte) avec cependant une emprise limitée ; a) et b) lors des terrassements ; c) 6 mois après les travaux. ≈

Figure 10 : Exemples de restaurations fonctionnelles de niveau R3 : en haut à gauche la Vurpillière (25), à droite le Bief de Nanchez (39), en bas, milieux diversifiés « retrouvés » sur le Colostre (04). ≈



Si le cours d'eau est actif ou potentiellement actif, cette emprise sera un véritable **espace de mobilité** qui lui permettra d'éroder ses berges et de retrouver une dynamique fluviale naturelle. Si le cours d'eau n'est pas potentiellement actif (faible puissance, berges cohésives, peu d'alluvions en transit), cette emprise sera plutôt un **espace de fonctionnalité**.

Dans un tel espace de fonctionnalité, on laissera s'installer une végétation alluviale naturelle (corridor fluvial) ou on créera de toutes pièces une diversité de milieux biologiques annexes au cours d'eau (zones humides, mares, bocages, haies, secteurs pionniers, etc.) (voir figure 10, p. 15).

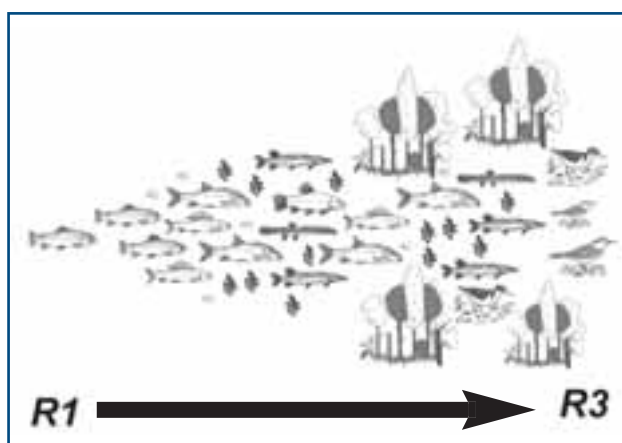


Figure 11 : Illustration schématique d'un gradient continu des fonctionnalités entre R1 et R3, dont les limites entre les classes sont fictives (figure Malavoi-Biotec). ≈

ATTENTION : cette catégorisation des niveaux de restauration correspond à un gradient continu allant de la restauration d'un nombre limité de fonctionnalités (R1) à un nombre maximal de fonctionnalités (R3). La limite entre ces « classes » est donc fictive.

D'autre part, il arrive parfois qu'un projet d'aménagement ait un objectif initial autre que la restauration des milieux aquatiques mais comporte néanmoins une démarche d'amélioration d'un milieu déjà dégradé.

Par exemple, en présence d'un lit endigué ou recalibré, on peut rechercher une augmentation de la protection contre les inondations en élargissant le lit mineur ou en le surcreusant et intégrer dans un tel projet une démarche technique se rapprochant des opérations de restauration susmentionnées, pouvant aller de R1 à R3 : recréation d'un chenal d'étiage ou de chenaux secondaires, mise en place de structures de diversification des écoulements, plantation de végétaux rivulaires adaptés, création d'un espace de mobilité intradigues, etc.



Figure 12 : Exemple d'élargissement hydraulique d'un cours d'eau (la Morges en traversée de ville en Suisse) et réaménagement du lit sous forme de petits seuils, végétalisation partielle des berges, etc. Restauration assimilable à un niveau R1. A gauche état initial, à droite deux puis sept ans après les travaux. ≈



Evaluation a priori de l'efficience probable d'un projet de restauration

La méthode proposée ici permet d'évaluer de manière sommaire mais rapide l'efficience hydro-morphologique probable d'un projet de restauration. Elle permet d'identifier a priori les opérations qui pourraient présenter les meilleurs taux de réussite.

■ **Evaluation du score d'efficience probable**

Le principe que nous proposons de retenir consiste à évaluer un « score d'efficience probable » de la restauration envisagée, sur la base :

- de la valeur des trois variables typologiques majeures présentées plus haut : puissance, érodabilité des berges, apports solides (score géodynamique)

bilité des berges, apports solides (score géodynamique)

- de l'emprise foncière disponible pour réaliser la restauration ;
- de la qualité de l'eau.

Les valeurs permettant d'apprécier ce score sont très empiriques et ne sont pas validées scientifiquement. Par exemple, chacune des variables a ici le même poids dans la « note ».

Notons aussi que la présence de réservoirs biologiques en amont, en aval ou au droit de la zone à restaurer ainsi que la connexion entre les différents habitats nécessaires au cycle de vie de la faune aquatique sont probablement aussi importants que la qualité de l'eau. Nous avons cependant privilégié ce dernier critère dans le score pour limiter le nombre de variables.

NOTA

Ces paramètres sont évalués sur la base des caractéristiques moyennes du cours d'eau pour le tronçon géomorphologique homogène² concerné :

- la **puissance spécifique** est évaluée en utilisant la largeur moyenne naturelle à pleins bords et le débit moyen journalier de fréquence biennale ;
- les **apports solides** sont évalués en tenant compte de la présence éventuelle de sites de piégeage en amont du secteur à restaurer (barrages, anciennes fosses d'extractions, zones où des curages sont réalisés régulièrement, etc.) ;
- l'**érodabilité des berges** est évaluée en faisant abstraction des protections existantes. Il s'agit donc de l'érodabilité potentielle des berges naturelles ;
- l'**emprise disponible** est évaluée selon une analyse rapide du contexte socio-politique du projet. Doit-on obligatoirement limiter les aménagements au strict gabarit actuel du cours d'eau ? Peut-on se permettre d'élargir l'espace alluvial d'un facteur allant de 1 à 3 fois la largeur du lit (L), de 3 à 10 × L, ou avec une emprise dépassant 10 × L ?
- la **qualité de l'eau** est évaluée selon la classification et la cartographie simplifiée de 5 à 4 classes des Agences de l'Eau : – *qualité mauvaise* – *qualité médiocre* – *qualité passable* – *bonne et très bonne qualité*.

Note	0	2.5	5	10
Paramètre				
Puissance spécifique	< 10 W/m ²	10-30 W/m ²	30-100 W/m ²	> 100 W/m ²
Erodabilité des berges	Nulle	Faible	Moyenne	Forte
Potentiel d'apports solides	Nul	Faible	Moyen	Fort
Emprise disponible	1 largeur de lit	1 à 3 L	3 à 10 L	> 10 L
Qualité de l'eau	Mauvaise	Médiocre	Passable	Bonne

Score d'efficience probable des travaux : mini = 0, maxi = 50

 **Figure 13** : Variables permettant d'évaluer un « score d'efficience probable » de la restauration envisagée. 

2. Nous distinguons habituellement sur les cours d'eau 6 entités emboîtées présentant, chacune à leur échelle, une homogénéité des processus géomorphologiques et des processus écologiques qui leurs sont corrélés (Malavoi, 2000).

- * secteur (quelques milliers de fois la largeur du lit (L))
 - * unité (quelques milliers de fois L)
 - * tronçon (plusieurs centaines de fois L)
 - * sous-tronçon (quelques centaines de fois L)
 - * segment (une centaine de fois L)
 - * faciès (quelques dizaines de fois L)

Parmi ces entités spatiales, celle représentée par le **tronçon géomorphologique homogène** nous semble la plus pertinente pour décrire et gérer un cours d'eau.

Variable de contrôle essentielle des processus géodynamiques, des phénomènes d'inondation, voire des pressions socio-économiques, c'est la largeur du fond de vallée alluvial (Fz et Fyz des cartes géologiques au 1:50 000) qui nous guide principalement dans la discrimination des **tronçons homogènes**. Sont ajoutés comme paramètres discriminants complémentaires : les confluences majeures et les changements notables de pente de la vallée. Un **tronçon homogène** tel qu'identifié par les critères exposés ci-dessus, doit en théorie, selon les lois de la géomorphologie fluviale, présenter des **caractéristiques géomorphologiques homogènes** : géométrie (largeur, profondeur), pente, sinuosité, style fluvial, etc.

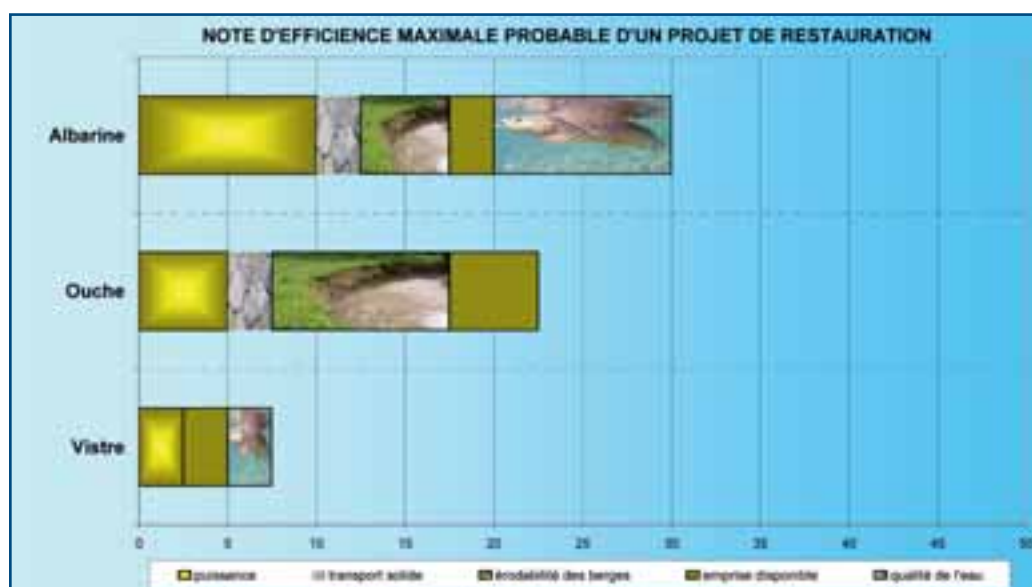


Figure 14 : A titre d'exemple, classement de 3 opérations de cours d'eau en fonction de leur score d'efficacité (sur 50). ≈

L'axe des abscisses de la figure ci-dessus donne l'efficacité probable d'une opération de restauration, qui peut également indirectement se traduire par le rapport coûts/efficacité des travaux envisagés.

En effet, sur un cours d'eau à score très bas (faible puissance, faible transport solide et érodabilité des berges, qualité d'eau médiocre et minimum d'espace pour réaliser les travaux), le projet devra nécessairement être très abouti et très construit dès le départ pour atteindre un minimum de résultats positifs, ce qui influe évidemment directement sur les coûts de réalisation des travaux de restauration (agencement de blocs, risbermes végétalisées, caches artificielles, radiers et mouilles artificiels, etc.). A l'inverse, un cours d'eau puissant, à berges très érodables et encore abondamment fourni en charge alluviale ne nécessitera que peu de travaux pour que les résultats soient rapidement positifs. L'essentiel du coût sera lié à la suppression des contraintes et à la maîtrise foncière (concept de restauration passive énoncé précédemment).



ATTENTION



Cette approche ne doit pas amener à ne financer que les opérations présentant les meilleurs scores. Tous les cours d'eau dégradés méritent une restauration. La prise de décision finale reposera donc sur des critères complémentaires au seul score d'efficacité probable, tels que l'existence d'approches globales de gestion (Sage³, contrat de rivière), la présence de fortes volontés locales, etc.



■ Détermination de la longueur minimale pertinente

Dans le même esprit, il est important de vérifier si le linéaire concerné par le projet est pertinent par rapport à la taille du cours d'eau, par rapport au niveau d'objectif et enfin par rapport au niveau d'ambition souhaité.

Ainsi, une restauration de 100 m de rivière, qu'elle soit de niveau R1 ou R3, n'a que peu d'intérêt d'un point de vue biologique, sauf très localement, pour un cours d'eau dont la largeur est supérieure à 10 m. Par contre, pour un cours d'eau dont la largeur est de 2 m, une telle restauration peut produire des effets positifs significatifs à l'échelle d'un tronçon.

Nous proposons donc une grille sommaire d'évaluation de la pertinence d'une opération de restauration de cours d'eau sur la base de la proportionnalité linéaire restauré/ largeur du cours d'eau :

- **linéaire inférieur à environ 20 fois la largeur** : effet généralement uniquement local. Opération qui peut avoir éventuellement un intérêt en traversée urbaine couplé à un objectif paysager ; peut se justifier aussi pour des opérations pilotes destinées à devenir des « vitrines » locales de ce qui peut se faire en matière de restauration (objectif de sensibilisation) ; peut se justifier enfin pour la restauration d'un habitat particulier d'une espèce patrimoniale (zone de reproduction notamment), qui peut se traduire par un effet positif bien au-delà du simple secteur restauré ;
- **linéaire compris entre 20 et 100 fois la largeur du cours d'eau** : l'effet reste local mais on se rapproche de dimensions pertinentes à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau ;
- **linéaire supérieur à 100 fois la largeur** : on atteint des dimensions significatives vis-à-vis de la restauration de tronçons de cours d'eau.

3. Sage : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

Etudes préalables et éléments de suivi

Tout projet de restauration doit être précédé d'une **étude préalable** permettant de connaître le contexte hydromorphologique, écologique, sociologique et foncier du tronçon de cours d'eau concerné. **C'est une condition indispensable pour l'obtention d'aides de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (ce qui est également le cas pour les autres Agences de l'eau).**

Il devra aussi faire l'objet d'un suivi après travaux sur une durée d'au moins 6 ans. Ce suivi doit être dimensionné et budgétisé dans le projet global.

NOTA

Une étude préalable peut aussi avoir pour conclusion qu'il n'est pas nécessaire ou pas urgent de restaurer ; un dysfonctionnement pouvant s'atténuer ou « s'autocicatriser » naturellement avec le temps, particulièrement sur les cours d'eau à **score géodynamique élevé**.



Contenu de l'étude préalable

Une étude préalable à un projet de restauration devrait a minima contenir les éléments suivants :

- **analyse du fonctionnement géodynamique et écologique du tronçon géomorphologique homogène concerné ;**
- **appréciation de l'état de dégradation de ce fonctionnement** sur le linéaire directement touché par les travaux de restauration ;
- **évaluation du contexte socio-politique et foncier** (évaluation de la demande locale ou collective de restauration, des disponibilités foncières envisageables, etc.) ;
- **évaluation a priori de l'efficacité des travaux** (appréciation du score d'efficacité probable) ;
- **identification des objectifs et du niveau d'ambition de l'opération de restauration envisagée.**

NOTA

Lorsque certains types de travaux de restauration nécessitent des études préalables complémentaires ou plus détaillées, celles-ci sont présentées dans la fiche technique correspondante (3^e partie).



■ **Fonctionnement géodynamique et écologique à l'échelle du tronçon géomorphologique homogène**

Il s'agit de déterminer les caractéristiques géomorphologiques et écologiques « moyennes » du tronçon homogène (soit sur quelques kilomètres à quelques

dizaines de kilomètres selon le rang de Strahler⁴) dans lequel se situe le site à restaurer :

- **caractéristiques géomorphologiques globales :** largeur du fond de vallée, pente de la vallée et du lit mineur, style fluvial, granulométrie des alluvions transportées, évaluation de l'intensité du transport solide et du potentiel d'apports, caractéristiques hydrologiques, identification des altérations majeures (barrages, endiguements, etc.) ;
- **caractéristiques écologiques globales :** qualité des biocénoses aquatiques et terrestres, peuplement piscicole, qualité physico-chimique, état général du corridor fluvial (notamment connexions rivière/lit majeur + annexes hydrauliques), continuité écologique amont-aval, présence de réservoirs biologiques, etc.

■ **Fonctionnement géodynamique et écologique à l'échelle du secteur à restaurer**

Il s'agit là de déterminer l'état de dégradation des caractéristiques hydromorphologiques et écologiques du site devant faire l'objet des travaux de restauration :

- **état de dégradation des caractéristiques géomorphologiques** (travaux hydrauliques réalisés, leur emprise, leur époque de réalisation et leurs impacts sur les caractéristiques hydrodynamiques, sur le tracé en plan, sur les faciès naturels, etc.) ;
- **typologie géodynamique minimale** (puissance spécifique, érodabilité des berges, potentiel d'apports solides) ;
- **état de modification du régime hydrologique ;**
- **état de la qualité de l'eau ;**
- **état de dégradation du fonctionnement écologique** (écart par rapport à la référence historique ou typologique si les données existent).

■ **Evaluation du contexte socio-politique et foncier**

La demande de restauration est généralement issue d'organismes divers : syndicats de rivières, fédérations de pêche, associations variées, etc., et souvent dans le cadre d'études plus globales de type *Contrats de rivière* ou *Sages*. Il est donc nécessaire de prévoir un investissement important en temps et en moyens de sensibilisation/communication pour que les riverains, les « politiques » et les divers partenaires de la gestion du cours d'eau adhèrent au projet de restauration.

Une étude de préévaluation des disponibilités foncières semble un préalable indispensable pour cerner au mieux le niveau d'ambition envisageable pour le

⁴ La classification d'un réseau hydrographique selon les rangs de Strahler détermine la structure de ce réseau en affectant à chaque tronçon (rivière principale et affluents) un rang selon le degré de confluence. Ainsi, une rivière ne recevant aucun affluent (à l'amont d'un bassin) est de rang 1, une rivière qui ne reçoit que des affluents de rang 1 est de rang 2, et ainsi de suite.

projet. Cette étude devrait idéalement être complétée par une étude sociologique minimale qui permettrait d'évaluer le contexte socio-politique local et les moyens à mettre en œuvre pour que le projet puisse être soutenu.

NOTA

Cette phase est aussi l'occasion de déterminer la procédure administrative qui sera nécessaire à la mise en œuvre d'un projet de restauration : Déclaration d'Utilité Publique (DUP), Déclaration d'Intérêt Général (DIG), Loi sur l'Eau, Natura 2000, etc. 

■ Evaluation a priori de l'efficacité probable d'un projet de restauration

Appréciation du score d'efficacité probable (*voir chapitre « Evaluation du score d'efficacité probable », p. 17*).

Contenu de l'étude de suivi

L'objectif d'un suivi des travaux de restauration est double :

- analyser l'ensemble des impacts positifs (ou négatifs) immédiats ou à plus long terme des travaux réalisés ;
- proposer des mesures correctives en cas de résultats peu probants voire négatifs.

Il s'agit donc de répondre à deux types de questions :

- quels sont les processus géodynamiques et les caractéristiques géomorphologiques qui ont été restaurés suite à la réalisation des travaux (taux d'érosion latérale, transport solide, stabilisation du fond du lit, diversification des écoulements, etc.) ?
- cette restauration hydromorphologique s'est-elle traduite par une amélioration notable du fonctionnement écologique des lits mineur, moyen et majeur ?

Pour répondre à ces deux questions, un certain nombre de mesures doivent être réalisées :

- des mesures « *géomorphologiques* » qui permettront de quantifier :
 - les taux d'érosion latérale, l'évolution du profil en long, les phénomènes d'alluvionnement, les relations avec la nappe alluviale, la diversification des écoulements (faciès) ;
- des mesures « *écologiques* » qui apporteront des éléments concernant l'amélioration :
 - du fonctionnement du lit mineur (état des biocénoses aquatiques, amélioration de la qualité physico-chimique) ;
 - du fonctionnement du lit moyen (qualité écologique des bancs alluviaux) ;

- du fonctionnement du lit majeur (plaine alluviale proche et annexes hydrauliques).

Le protocole ci-après n'est qu'une proposition. Il présente ce qui nous semble être un suivi minimal sur une durée de 6 ans.

NOTA

Lorsque certains types de travaux de restauration nécessitent des études de suivi complémentaires, celles-ci sont présentées dans la fiche technique correspondante (3^e partie). 

■ Suivi géomorphologique

Le pas de temps du suivi géomorphologique sera au minimum de **3 ans, après une campagne initiale avant travaux** (soit 3 campagnes sur 6 ans : état initial, état n+3, état n+6). Toutefois, si une crue de fréquence supérieure à 5 ans se produit dans l'intervalle, une campagne exceptionnelle pourra être réalisée dans l'intervalle.

L'emprise du suivi correspondra à la zone restaurée augmentée d'une longueur minimale équivalente à $10 \times$ la largeur du lit en amont (sauf en cas de dérasement de seuil où l'on visera $50 \times$ la largeur du lit) et de $50 \times$ la largeur en aval (ordres de grandeur empiriques qui devraient permettre une bonne appréciation de l'évolution géomorphologique du secteur concerné) :

- cartographie des faciès d'écoulement ;
- lever d'un profil en long : ligne d'eau d'étiage + 1 point en fond de lit (point le plus bas du lit sur un profil en travers), avec une densité des points relevés égale à 1 point/largeur de lit ;
- lever de profils en travers (densité des profils relevés égale à 1 profil/3 largeurs de lit mineur) ;
- mesures granulométriques : 1 échantillon/5 largeurs de lit mineur, si possible sur des faciès tels que *radier* ou *plat*.

■ Suivi écologique

Le pas de temps du suivi écologique sera au minimum de **3 ans, après une campagne initiale avant travaux** :

- **lit mineur** : pêches électriques (méthode De Lury, pêche par ambiance, etc.), inventaires hydrobiologiques (protocole DCE) ;
- **lit moyen** (bancs alluviaux non ou peu végétalisés) : inventaire faunistique et floristique des bancs alluviaux ;
- **lit majeur** (si concerné par les travaux) : cartographie de l'occupation des sols du corridor alluvial (dans l'espace de mobilité et de fonctionnalité), inventaire floristique et faunistique des milieux terrestres, inventaire floristique et faunistique des annexes hydrauliques restaurées (partie en eau et partie terrestre).

Etapes clés d'une opération de restauration de cours d'eau

La définition de mesures de restauration adaptées dépend essentiellement des dysfonctionnements identifiés (voir 2^e partie) et des caractéristiques géomorphologiques du cours d'eau considéré.

Il est donc important de respecter un certain nombre d'étapes clés lors du montage d'une opération de restauration de cours d'eau.

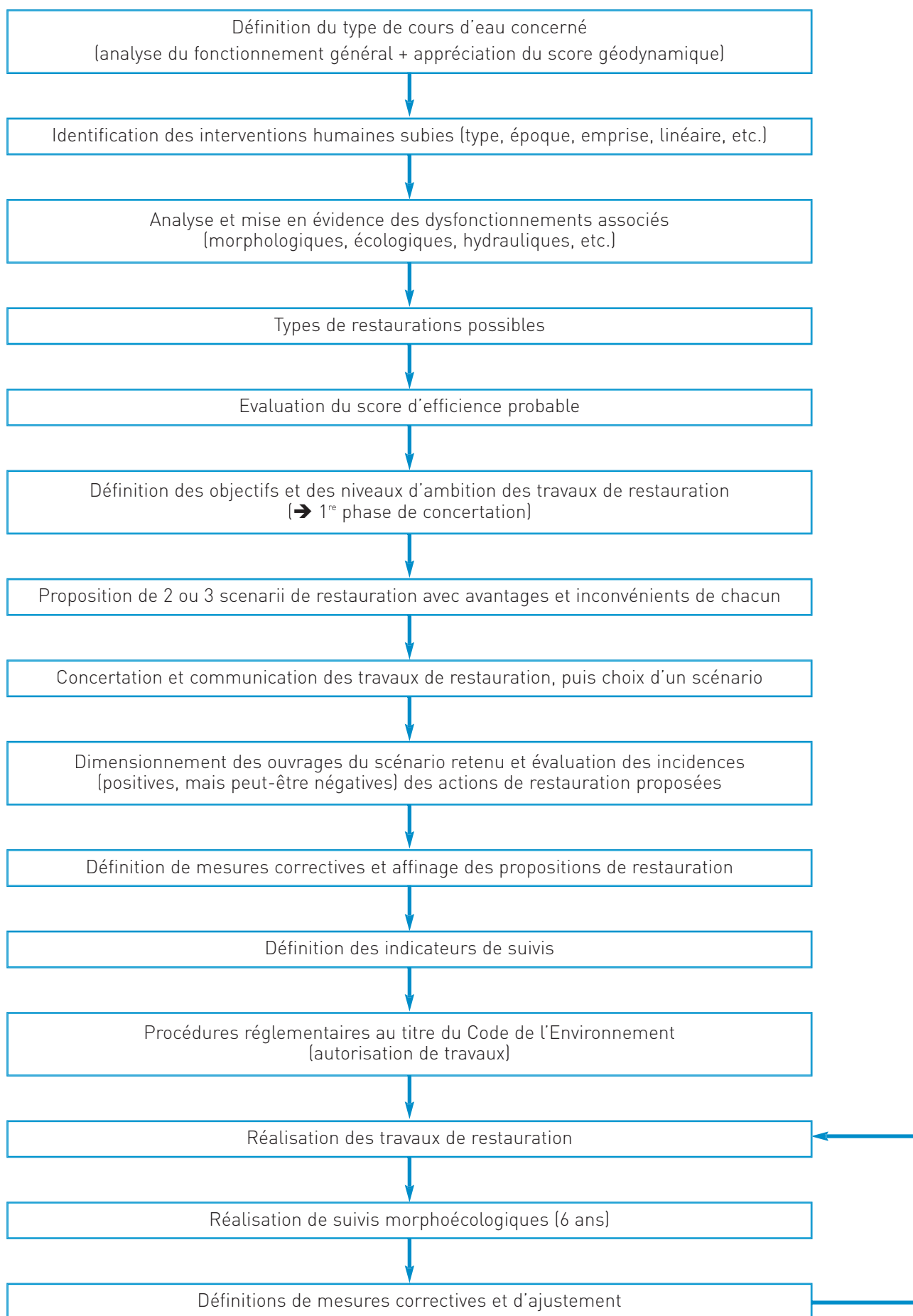
Ces étapes sont présentées figure 15 p. 22 de manière synthétique.



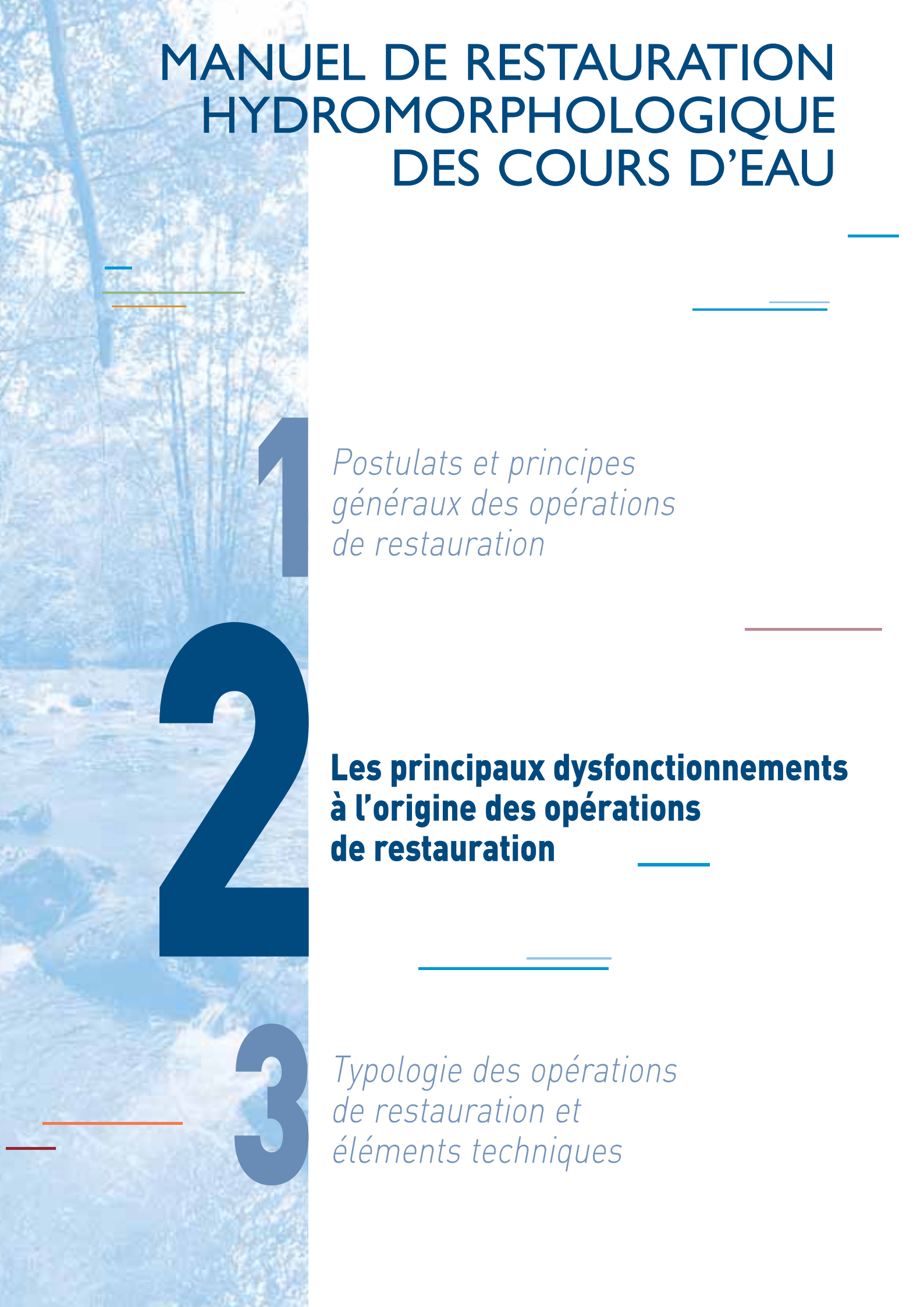
POUR EN SAVOIR PLUS

Plusieurs manuels techniques de « restauration hydromorphologique » ont vu le jour ces dernières années, notamment chez nos amis anglo-saxons. Nous en citons trois qui nous paraissent les plus complets :

- **Un australien (592 p. en 2 volumes) :** Rutherford I.D., Marsh K.J., Marsh N. (2000) : A Rehabilitation Manual for Australian Streams. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Land and Water Resources Research and Development Corporation. Canberra.
- **Un américain (637 p.) :** Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG) (1998, rev. 2001) : Stream Corridor Restoration : Principles, Processes, and Practices. 15 Federal agencies of the US government).
- **Un anglais disponible sur le web (<http://www.therrc.co.uk/>) :** River Restoration Center (2002) : Manual of River Restoration Techniques. RRC.



↑ **Figure 15** : Etapes clés dans le montage d'une opération de restauration de cours d'eau. ≈



MANUEL DE RESTAURATION HYDROMORPHOLOGIQUE DES COURS D'EAU

1

*Postulats et principes
généraux des opérations
de restauration*

2

**Les principaux dysfonctionnements
à l'origine des opérations
de restauration**

3

*Typologie des opérations
de restauration et
éléments techniques*



Les principales interventions humaines et leurs dysfonctionnements associés

Des milliers de kilomètres de cours d'eau français ont vu depuis plusieurs décennies (parfois plusieurs siècles) leurs caractéristiques géomorphologiques (géométrie, substrats, etc.) et géodynamiques (processus) fortement altérées par des interventions humaines diverses :

- **chenalisations excessives** (recalibrages, rectifications, endiguements, etc.), se traduisant notamment par une banalisation des caractéristiques abiotiques des milieux aquatiques ;
- **extractions de matériaux**, avec leurs effets bien connus que sont les incisions du lit mineur, la disparition du substrat alluvial et l'affaissement de la nappe d'accompagnement ;
- **implantations de barrages et de seuils**, avec des effets nombreux et variés tels que le piégeage des alluvions, la création de longs plans d'eau en amont en lieu et place des faciès d'écoulement naturels, l'augmentation du réchauffement de l'eau en été, l'aggravation des effets de l'eutrophication, etc.

Or, les caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau conditionnent l'état et le fonctionnement écologique des milieux aquatiques. C'est pourquoi la restauration physique des cours d'eau est l'une des priorités de la Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE).

Chaque type d'intervention humaine a induit une grande variété d'altérations et de dysfonctionnements morpho-écologiques selon le type de cours d'eau touché, le linéaire affecté, l'ancienneté et l'ampleur des travaux. De plus, de nombreuses interventions ont été « multiples » : rectification + recalibrage + endiguement, etc. Les travaux de restauration nécessaires pour tenter de retrouver un fonctionnement plus naturel seront donc fréquemment, eux aussi, multiples et complexes.

Tout projet de restauration sur un tronçon de cours d'eau donné nécessitera donc une analyse :

- du ou des types d'interventions humaines réalisées ;
- du ou des types de dysfonctionnements observés ;

ce qui amènera à la proposition :

- d'un ou plusieurs types de scénarii de restauration.

Cette deuxième partie présente les principaux types d'interventions humaines ayant pu être réalisés sur les cours d'eau, les dysfonctionnements morpho-écologiques induits et enfin les principes généraux de restauration pouvant être proposés.

La « liste » d'interventions humaines qui suit n'a pas la prétention d'être exhaustive, mais elle couvre, à notre avis, la plupart des actions anthropiques recensées sur les cours d'eau français :

- couverture et enterrement de cours d'eau ;
- déplacement de cours d'eau ;
- rescindement de méandres - rectification ;
- recalibrage ;
- suppression de la ripisylve ;
- protection des berges ;
- endiguements et merlons de curage ;
- seuils et ouvrages transversaux ;
- étangs implantés sur un cours d'eau ;
- extractions de granulats.

NOTA

Les dysfonctionnements présentés ci-après et les principes de restauration qui en dépendent sont identifiés à l'échelle du cours d'eau ou d'un tronçon de cours d'eau, donc avec une approche locale.

La restauration hydromorphologique d'un cours d'eau, même ambitieuse et bien réalisée, peut se révéler infructueuse si subsistent, à l'échelle plus globale du **bassin versant**, des dysfonctionnements fortement perturbants :

- forte quantité de matières en suspension générée par l'érosion de sols agricoles et pouvant colmater durablement les fonds alluviaux des cours d'eau ;
- faiblesse des débits d'étiage due à un drainage extrême des terrains, à des ouvrages de dérivation ou de rétention ;
- mauvaise qualité d'eau, etc.

La mise en œuvre de projets de restauration doit donc être précédée d'une analyse générale du fonctionnement du bassin versant et du corridor alluvial. La mise en œuvre de mesures correctrices ou réductrices (par exemple bandes végétalisées le long des cours d'eau pour bloquer les fines) au niveau du bassin et du corridor fluvial doit, si ce n'est précéder, au moins être réalisée simultanément avec les restaurations hydromorphologiques proprement dites. 

Couverture et enterrement de cours d'eau

■ Contexte

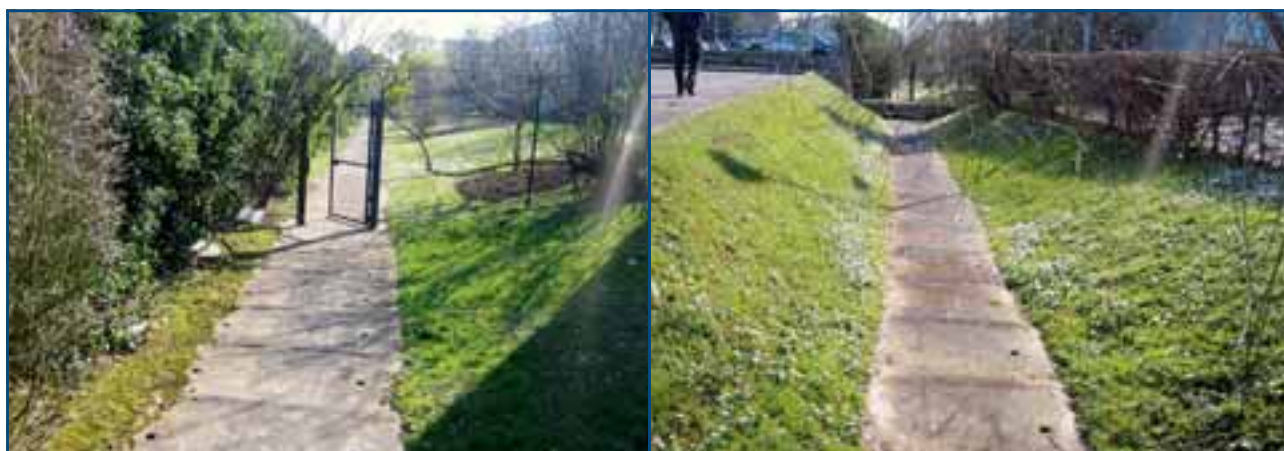
De très nombreux cours d'eau français ont été fortement chenalisés, endigués, rescindés, recalibrés, etc. (voir § suivants). Cette chenalisation a parfois été poussée à l'extrême, notamment en milieu urbain ou périurbain, avec la couverture ou

la mise sous tuyau complète du cours d'eau sur des linéaires pouvant être très importants. Ces actions ont occasionnellement été conduites en milieu rural dans le but de « gagner » des terrains agricoles et de favoriser l'intensification de l'agriculture.

Les cours d'eau touchés par ce type d'intervention ont donc complètement disparu des cartes... et de la surface de la Terre.



↑ **Figure 16** : Exemples de couverture de cours d'eau. A gauche, la Bièvre (couverte sur plus de 10 km) et à droite l'Orgeval (couvert sur 900 m). En pointillés bleus le tracé souterrain probable (source : Géoportail, IGN). 



↑ **Figure 17** : La Bièvre à Fresnes, sous des dalles de béton.... 



← **Figure 18** : Couverture complète d'un cours d'eau, ici la « Rigole de Guyancourt » dans le département des Yvelines. 

■ Principaux dysfonctionnements identifiés

La couverture complète de cours d'eau est sans conteste **l'intervention humaine la plus traumatisante** pour le milieu naturel puisqu'elle se traduit par la disparition totale de ce dernier.

Il s'agit alors à la fois d'une disparition complète des habitats, des faciès, de la ripisylve, des relations entre la nappe et les berges, etc., mais également d'une discontinuité écologique majeure sur le réseau fluvial.

Il existe peu de données précises dans la littérature mais on peut admettre qu'un linéaire de plus de 25-30 mètres de couverture de cours d'eau constitue une altération déjà très lourde, notamment vis à vis du franchissement par les poissons. Outre l'absence de lumière, qui pose un grave problème pour de nombreuses espèces piscicoles, ce sont souvent les conditions hydrauliques extrêmes qui empêchent la franchissabilité des portions de cours d'eau enterrées (fortes vitesses, faibles profondeurs en étiage, fond souvent lisse (béton)).

Indépendamment de l'aspect « franchissabilité », l'ampleur du traumatisme engendré par la couverture d'un cours est dépendante de plusieurs facteurs dont la longueur touchée, la structure du lit à l'intérieur du voûtage (granulométrie « naturelle » du fond du lit en opposition avec du béton lisse, par exemple), la présence ou non de surfaces exondées à l'intérieur d'un voûtage (bancs de graviers, berges), etc.

■ Principes de restauration

● Niveau R3

La méthode la plus radicale consiste à découvrir totalement le cours d'eau et à le « recréer » intégralement dans son thalweg naturel en respectant sa morphologie d'origine (tracé en plan, profils en long et en travers).

● Niveau R2

Si l'emprise foncière de l'ancien tracé n'est pas disponible, un moindre niveau d'ambition sera visé. On pourra « découvrir » le cours d'eau et lui redonner des berges naturelles (adoucissement de pentes, végétalisation, etc.), recréer un lit d'étiage avec une morphologie plus adéquate (mise en place de substrats favorables, création de caches, de déflecteurs, etc.).

● Niveau R1

Si pour diverses raisons techniques et financières, la découverte n'est pas envisageable, on recherchera néanmoins à mettre en œuvre des mesures de limitation des impacts, tels que la création de puits de lumière sur le linéaire couvert (pour autant que ce dernier ne soit pas trop long), la mise en place d'un substrat alluvial en fond de lit, la création de surfaces exondées à l'intérieur du voûtage, la mise en place d'éléments physiques (cailloux, blocs, rondins, déflecteurs, etc.) de diversification des faciès et de facilitation du franchissement par les poissons.

🌊 Déplacement de cours d'eau

■ Contexte

Un certain nombre de cours d'eau ont été volontairement déplacés de leur position initiale naturelle vers l'un ou l'autre côté du fond de vallée. Ces déplacements sont souvent très anciens (plusieurs siècles). L'objectif était principalement de gagner des terres cultivables ou d'améliorer leur exploitabilité en libérant une partie des espaces agricoles de la présence d'un cours d'eau. Ce type d'intervention reste toutefois limité aux petits et moyens cours d'eau (jusqu'à une dizaine de mètres de largeur environ).

Notons que le déplacement d'un cours d'eau a souvent été couplé à d'autres interventions telles que :

- la rectification et le recalibrage du nouveau lit mineur ;
- la protection des berges contre l'érosion ;
- la suppression de la ripisylve (systématique sur au moins l'une des deux berges) ;
- l'endiguement.

Les impacts sont donc souvent multiples.



Figure 19 : Exemple de déplacement complet de cours d'eau : l'Armanche (10). Notez que les anciens méandres sont visibles sur la carte (illustration du haut) car ils ont servi de base à la délimitation de la frontière communale. Ils ne sont quasiment plus identifiables sur le terrain (illustration du bas) (source : Géoportail, IGN). 🌊

■ Principaux dysfonctionnements identifiés

Le déplacement complet d'un cours d'eau se traduit généralement par les dysfonctionnements hydromorphologiques et écologiques suivants :

- modification des relations nappe/rivière : le cours d'eau, souvent déplacé en position topographique plus élevée que naturellement, a tendance à ali-

menter la nappe en permanence, d'où des étiages plus prononcés ;

- si le nouveau cours d'eau est rectiligne et surcalibré, s'ajoutent les dysfonctionnements liés à la rectification et au recalibrage.

■ Principes de restauration

● Niveau R3

La méthode idéale consiste à réinstaller le cours d'eau dans son talweg naturel en respectant sa morphologie d'origine (tracé en plan, profils en long et en travers),

● Niveau R2

Si l'emprise foncière de l'ancien tracé n'est pas disponible ou pour d'autres raisons techniques, un moindre niveau d'ambition sera visé. Les principaux types de restauration envisageables sont alors :

- une augmentation minimale de l'emprise du cours d'eau ;
- la recréation d'un tracé un peu plus sinueux si celui-ci est trop rectiligne ;
- la mise en place de bancs alluviaux alternés ;
- la recréation de ripisylve.

● Niveau R1

Même type de travaux que pour la plupart des projets de niveau R1, quel que soit le type d'altération, à savoir principalement des ouvrages de diversification du lit et des faciès.

🌊 Rescindement de méandres - Rectification

■ Contexte

De très nombreux cours d'eau naturellement sinueux ou méandriformes ont été artificiellement rectifiés sur de longues distances, généralement pour en augmenter la débitance (notamment grâce à l'augmentation de la pente) et réduire ainsi la fréquence de submersion des terrains riverains. On a aussi fréquemment utilisé le rescindement de méandres pour linéariser les parcelles agricoles afin d'en faciliter la culture (cas des petits cours d'eau lors d'opérations de remembrement). On a enfin pratiqué des rescindements pour améliorer la navigabilité des grands cours d'eau.

Notons que le rescindement/rectification d'un cours d'eau a souvent été couplé à d'autres interventions telles que :

- le surcalibrage du nouveau lit ;
- la protection des berges contre l'érosion ;

🐟 NOTA

Lorsque les anciens tracés naturels ne sont plus visibles (rescindements très anciens) ou lorsque la linéarisation du tracé a été plus modeste (quelques ondulations subsistent) on parle plutôt de **rectification**.



- la suppression de la ripisylve ;
- l'endiguement plus ou moins « rustique ».

Les impacts sont donc souvent multiples.



Figure 20 : Exemple de cours d'eau ayant subi des interventions multiples : surcalibrage, rescindement, endiguement, curage, etc. 🌊



Figure 21 : Exemples de rescindements de méandres à vocation principalement agricole : en haut l'Orain (39), en bas l'Aire (Suisse). 🌊

🐟 Nota : les bosquets encore présents indiquent le tracé des anciens méandres. 🐟



Figure 22 : Exemples de rescindements de méandres à vocation de navigation. La Seine (source : Géoportail, IGN).

■ Principaux dysfonctionnements identifiés

La rectification d'un cours d'eau, notamment lorsqu'elle est poussée à l'extrême comme dans le cas des rescindements, se traduit par des dysfonctionnements hydromorphologiques et écologiques caractéristiques :

- homogénéisation des faciès d'écoulement, des variables hydrodynamiques (vitesses, profondeurs) et des substrats → **forte banalisation des habitats aquatiques** ;
- perte de fréquence et de durée de submersion du lit majeur et des annexes hydrauliques ;
- incision du lit mineur suite à l'augmentation de la pente → **abaissement de la nappe d'accompagnement, déstabilisation des ouvrages de génie civil (ponts, digues, protections de berges). Souvent, déconnexion des annexes hydrauliques** ou des anciennes sinuosités rescindées (du fait de l'incision mais souvent aussi en raison de protections latérales et de digues réalisées en même temps que les rescindements).
- aggravation des inondations en aval.

🐟 NOTA

On a souvent tenté de maîtriser cette incision galopante par la construction de seuils perpendiculaires au cours d'eau, qui ont eux-mêmes généré de nouveaux dysfonctionnements (voir impacts des seuils).



■ Principes de restauration

● Niveau R3

Pour résorber la plupart des dysfonctionnements générés par le rescindement des méandres d'un cours d'eau, la méthode la plus ambitieuse consiste

à recréer un cours d'eau sinueux ou méandriforme. Selon le score géodynamique du cours d'eau, ce reméandrage sera complet et réalisé artificiellement au moyen d'engins de chantier ou partiel avec une simple initiation des méandres après suppression des protections de berges s'il en existe. A ce niveau d'ambition, on tentera de reconquérir un espace de mobilité sur les cours d'eau dynamiques et un espace de fonctionnalité, avec forêt alluviale et zones humides sur les cours d'eau moins actifs.

● Niveau R2

Si l'emprise foncière disponible est insuffisante (cours d'eau périurbains, présence de gravières en lit majeur comme sur la Seine par exemple) ou pour d'autres raisons techniques, un moindre niveau d'ambition sera visé.

Les principaux types de restauration envisageables sont alors :

- l'augmentation de l'emprise du cours d'eau ;
- la recréation d'un tracé plus sinueux ;
- la mise en place de bancs alluviaux alternés ;
- la recréation de ripisylve ;
- parfois la création de seuils et rampes pour limiter les effets de l'incision.

● Niveau R1

Même type de travaux que pour la plupart des projets de niveau R1, quel que soit le type d'altération, à savoir principalement des ouvrages de diversification du lit et des faciès.

🌊 Recalibrage

■ Contexte

Le recalibrage des cours d'eau est probablement l'un des types d'intervention les plus fréquemment réalisé en France. Ce type de travaux hydrauliques a été mis en œuvre très anciennement dans les zones urbaines et périurbaines, souvent accompagné d'endiguements étroits, pour réduire la fréquence des inondations. Il a été utilisé de manière quasi systématique dans les zones rurales, particulièrement au cours des années 1950 à 1980, pour diminuer la fréquence de submersion des terres agricoles, notamment celles exploitées en maïs, céréale très peu résistante à la submersion. La notice de la figure présentée ci-après est un exemple typique de dossier de justification de travaux hydrauliques dans les années 1960. Le second paragraphe explique le pourquoi de la généralisation de la méthode [cf. figure 23, p. 29].

Le principe du **recalibrage** consiste à augmenter la débitance du lit mineur en augmentant la section d'écoulement par élargissement du lit, approfondissement ou les deux. Rappelons que **la capacité d'écoulement d'un cours d'eau naturel avant débordement dans le lit majeur correspond sensiblement à la crue journalière de fréquence 1 à 2 ans.**

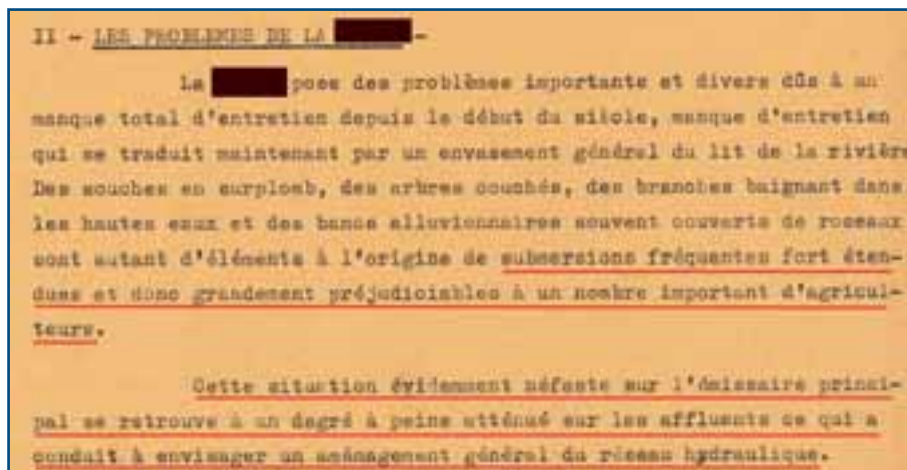


Figure 23 : Extrait d'une notice technique de justification de travaux de recalibrage (source DDAF 01). ≡

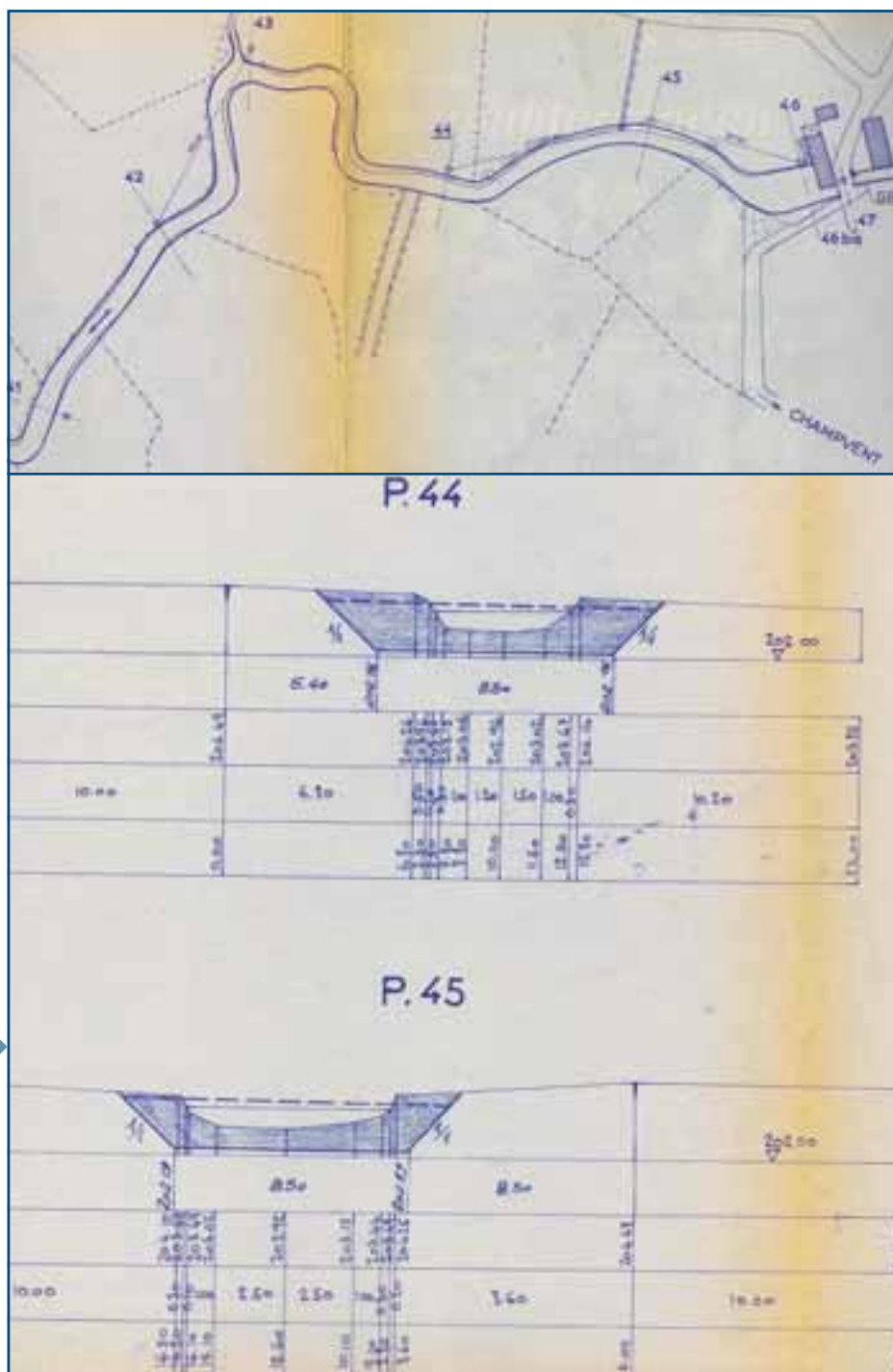


Figure 24 : Exemple de projet de recalibrage généralisé d'un cours d'eau. En blanc le profil initial, en gris le profil à créer (source DDAF 01). ≡

En concertation avec les acteurs du monde agricole qui proposaient un « débit de projet » (égal à Q5ans, Q10ans ou Q50ans), l'ingénieur hydraulicien calculait le profil type à donner au cours d'eau pour garantir ce projet de débit sans débordement.

Notons que le recalibrage d'un cours d'eau a souvent été couplé à d'autres interventions telles que :

- la rectification du lit mineur ;
- la protection des berges contre l'érosion ;
- la suppression de la ripisylve (systématique sur au moins l'une des deux berges) ;
- l'endiguement « rustique » (merlon réalisé avec les déblais du recalibrage).

Les impacts sont donc souvent multiples [cf. figure 24, p. 29].

■ Principaux dysfonctionnements identifiés

Les impacts hydromorphologiques et écologiques du recalibrage sont bien connus :

- **détérioration des habitats aquatiques et semi-aquatiques (berges) :** les faciès d'écoulement, donc les habitats aquatiques, deviennent très homogènes et de faible capacité d'accueil. En effet, le surélargissement du lit mineur, principe technique « de base » de ce type d'intervention, se traduit systématiquement par un étalement de la lame d'eau à l'étiage avec des profondeurs qui deviennent limitantes pour une grande partie des biocénoses aquatiques et notamment les poissons ;
- **réchauffement de l'eau et aggravation des effets de l'eutrophisation :** cet étalement de la lame d'eau augmente la vitesse de réchauffement de l'eau en été, ce qui peut se traduire par des conditions létales pour les biocénoses et aggraver les effets de l'eutrophisation si celle-ci est présente ;
- **modification des relations nappe/rivière :** le cours d'eau souvent surcreusé a tendance à drainer la nappe en permanence, d'où la réduction des zones humides du lit majeur ;
- **réduction des connexions avec les annexes hydrauliques :** la plus faible fréquence de débordement, but de l'opération, se traduit par des problèmes de reproduction pour les espèces se reproduisant en lit majeur (prairies inondées ou annexes hydrauliques) ;
- **augmentation des contraintes hydrauliques en crue :** le recalibrage se traduit par des vitesses et des hauteurs d'eau en crue bien supérieures aux valeurs naturelles et généralement limitantes pour les biocénoses aquatiques qui ont des difficultés à trouver des refuges hydrauliques ;
- si, de plus, le nouveau cours d'eau est rectiligne et endigué, s'ajoutent les dysfonctionnements liés à la rectification et à l'endiguement.

■ Principes de restauration

● Niveau R3

La méthode la plus ambitieuse consiste à redonner au cours d'eau sa géométrie hydraulique naturelle.

Selon le score géodynamique du cours d'eau, les techniques seront très différentes :

Score élevé

- réinitiation des processus d'érosion latérale pour favoriser un auto-ajustement.

Score faible

- apports de matériaux alluvionnaires si ceux-ci font défaut ;
- recréation d'un nouveau cours d'eau.

● Niveau R2

Si l'emprise foncière disponible est insuffisante ou pour d'autres raisons techniques, un moindre niveau d'ambition sera visé.

Les principaux types de restauration envisageables sont alors :

- la réduction de la largeur du lit mineur ;
- la recréation d'un talweg d'étiage sinueux ;
- la mise en place de bancs alluviaux alternés ;
- la diversification des berges ;
- la création de ripisylve.

● Niveau R1

Même type de travaux que pour la plupart des projets de niveau R1, quel que soit le type d'altération, à savoir principalement des ouvrages de diversification du lit et des faciès.

🌊 Suppression de la ripisylve

■ Contexte

Il est fréquent que la végétation des berges des cours d'eau soit partiellement ou intégralement supprimée lors de la réalisation de travaux de chenalisation. Mais la suppression totale ou partielle de la ripisylve peut aussi être simplement due à des interventions plus ou moins fréquentes des riverains (notamment dans les zones agricoles) ou des organismes gestionnaires (syndicats, collectivités locales, etc.) [cf. figure 25, p. 31].

■ Principaux dysfonctionnements identifiés

Afin de décrire les principaux impacts physiques et écologiques de la suppression des ripisylves, nous détaillons les fonctions majeures que celles-ci assurent, et donc les carences fonctionnelles lorsqu'elles sont supprimées :

- **Située à l'interface entre les milieux terrestres et aquatiques, la végétation rivulaire joue un rôle très important au sein des écosystèmes d'eau courante.** Les formations végétales riveraines sont essentielles pour beaucoup d'organismes vivants, notamment les mammifères, amphibiens, oiseaux, poissons, etc. En effet, la faune trouve dans cette mosaïque végétale des conditions favorables pour se cacher, se nourrir et se reproduire. La végétation rivulaire joue également un rôle de « corridor »,



↑ **Figure 25 :** Exemple de portions de cours d'eau sans ripisylve : la Veyle (01). ≡

exprimé par un cordon assurant une continuité entre des milieux souvent fragmentés, facilitant les échanges et les déplacements entre les différentes communautés animales.

- **Les racines des arbres, les troncs tombés dans l'eau, les débris végétaux (ou embâcles) créent une diversité d'habitats favorable à la faune aquatique**, en faisant office successivement de lieux de cache, de supports de ponte ou de source de nourriture pour de nombreux poissons et invertébrés.
- **La végétation des berges, en procurant de l'ombre au-dessus des eaux, permet également de maintenir une température des eaux fraîche**, ceci à la fois pour les bords du fleuve et surtout pour des milieux annexes tels que mares, bras morts, dépression marécageuse, etc. Une température des eaux élevée due à un excès de lumière diminue la solubilité de l'oxygène dans l'eau, ce qui risque de provoquer une augmentation des affections virales ou bactériennes, indirectement une hausse de la mortalité des poissons.
D'autre part, à long terme, un surcroît de lumière peut être source de surdéveloppement d'algues aquatiques et d'eutrophisation du milieu, néfaste à la vie des organismes vivants.
- **Les formations végétales riveraines assurent un apport constant en matière organique** (végétale et animale), assurant l'échelle trophique (feuilles mortes, insectes tombant des arbres, etc.). De plus, beaucoup d'insectes ont besoin des tiges de la végétation riveraine pour se développer (éphémères, libellules, etc.).
- **Les formations végétales riveraines participent à l'élimination de pollutions diffuses**, en réduisant la teneur des eaux en nitrates et phosphates et en diminuant la concentration en pesticides.
- **Indépendamment de ces fonctions écologiques vitales pour le maintien de la biodiversité, la végétation rivulaire joue d'autres rôles ou procure d'autres avantages**, tels que le maintien des sols en place face à l'érosion, une fonction régulatrice du cycle hydrologique, un effet brise-vent ou encore des fonctions paysagères ou récréatives.

Le maintien des sols en place par une végétation adaptée des berges s'opère principalement par les deux effets mécaniques suivants :

- **Stabilisation du sol efficace en profondeur** grâce à la combinaison et l'interaction de végétaux, au développement racinaire à la fois dense, profond et traçant.



↑ **Figure 26 :** En haut, racines d'aulne glutineux (*Alnus glutinosa*), espèce végétale particulièrement adaptée aux bordures de cours d'eau. En bas, embâcles formés par des cultivars de peupliers (*Populus x nigra*) facilement déchaussés en raison de leur faible développement racinaire d'une part et de leur port élevé d'autre part, favorisant une grande prise. ≡

- **Protection du sol en surface**, par la densité des tiges aériennes produites et la souplesse de ces dernières face aux contraintes hydrauliques.



Figure 27 : Effet de « peigne » de la végétation buissonnante adaptée (en haut), favorisant le piégeage des particules en transport par les eaux et végétaux hélophytiques couchés sous l'effet des contraintes hydrauliques (en bas). ≡

ATTENTION

La végétalisation des bancs sédimentaires a pour effet de limiter la fréquence de mise en mouvement des alluvions. Cet effet, bien que naturel, peut devenir problématique lorsque le régime hydrologique de crue est modifié ou lorsque une période de faible hydraulité dure plus de 5 ans. Dans ce cas la sur-végétalisation peut induire une accentuation de l'incision locale et le piégeage des alluvions un déficit sédimentaire à l'aval. La végétalisation des bancs alluviaux est donc un processus à surveiller avec attention. 

- **L'eau, de par sa nature, a toujours été un élément de modelage des formes du paysage.** Par sa présence, elle rend les sites plus attrayants, augmente la valeur récréative de ces secteurs et contribue globalement à la richesse économique et culturelle d'une région. La végétation rivulaire tient évidemment une place prépondérante dans la perception du paysage des milieux humides.



Figure 28 : La végétation rivulaire et aquatique tient évidemment une place prépondérante dans la perception des paysages fluviaux. ≡

Lorsque l'absence de végétation riveraine se cumule avec une chenalisation, une incision du lit ou encore une retenue de seuil, les effets négatifs de ces interventions sont amplifiés.

■ Principes de restauration

Les principes de restauration de la végétation riveraine seront fonction des raisons de son élimination.

Ainsi, si la suppression de la végétation riveraine s'est faite lors d'opérations de chenalisation, les travaux de restauration s'accompagneront nécessairement de travaux de « récréation » de formations végétales riveraines, ceci de manière « directe » (plantation de végétaux, techniques du génie végétal) ou « indirecte » en créant des conditions de croissance favorables au développement spontané de la végétation indigène adaptée (mise en place de déflecteurs, création de bancs de graviers, terrassement de berges en pente très douce, etc.).

En fonction du niveau d'ambition choisi et en relation avec d'autres types de travaux de restauration, on pourra :

- **Niveau R2 et R3** : travailler sur un espace élargi où l'on favorisera au maximum le développement de conditions de croissance favorables plutôt que d'implanter directement les bons végétaux. Le but est de « recréer » un véritable corridor fluvial. Plus la puissance du cours d'eau sera prépondérante, plus la restauration même selon des objectifs de « végétalisation » sera passive ;
- **Niveau R1** : il n'y a pas d'autres alternatives que de procéder à des plantations simples ou à la mise en place de protections de berge végétales pour le développement de formations végétales adaptées.

Protection des berges

Contexte

Afin de préserver le maximum d'espace pour l'agriculture et l'urbanisation dans les plaines alluviales, des milliers de kilomètres de berges de cours d'eau ont été protégés contre les processus d'érosion, le plus souvent au moyen de techniques dites « lourdes » à base de perrés, de murs de béton, d'enrochements, d'épis, de palplanches, de gabions, etc. [cf. figure 32].

Principaux dysfonctionnements identifiés

Blocage de la dynamique latérale

Un hydrosystème fluvial naturel est caractérisé par une diversité géomorphologique dont le moteur est, notamment dans un cours d'eau à méandres, l'érosion des berges et la migration latérale du chenal vif. Ces processus d'érosion, de transport de sédiments, de dépôt, de recoupement de méandres, ont pour effet de créer, détruire, recréer, dans une courte échelle de temps, une

diversité de milieux dont la grande richesse écologique tient justement à leur fréquence de régénération. Le blocage des processus géodynamiques par des protections de berges, qu'elles soient minérales ou végétales, se traduit donc par un appauvrissement général de la qualité fonctionnelle du corridor fluvial.

L'absence de processus d'érosion latérale entraîne de surcroît une baisse de la « production » de sédiments grossiers par manque de reprise du stock alluvial disponible sur les berges. Or, l'équilibre débit liquide/débit solide est un élément essentiel de la dynamique fluviale. Cet effet est d'autant plus sensible sur les cours d'eau à dynamique active et coulant dans des alluvions non cohésives.

Enfin, il est couramment admis aujourd'hui que les protections de berge favorisent l'incision du lit, au moins localement.



Figure 29 : a) Perrés en milieu urbain. b) Enrochement de berge en secteur agricole. c) Murs en traversée urbaine. d) Palplanches en protection de berge de rivière naviguée. e) Palissade en rondins de bois. f) Technique des « tunages-bois » en protection de berges de voies navigables. g) Sans commentaire !

● Appauvrissement de la qualité écologique des rives

Les protections de berges se traduisent généralement par une simplification des caractéristiques écologiques des rives. Outre la perte d'habitat rivulaire (sauf parfois dans le cas d'enrochements libres dégradés que peuvent affectionner certaines espèces de poissons, mais là encore on ne considère qu'un compartiment de la biodiversité), les protections de berges « lourdes » remplacent par un système simple l'**écotone de rive** naturellement beaucoup plus complexe et favorable à une forte augmentation de la biodiversité : systèmes racinaires des arbres de la ripisylve, hélophytes de pied de berge, sous-berges, etc.

Les techniques de protection de berge par **génie végétal** réduisent notablement ce type d'impact.

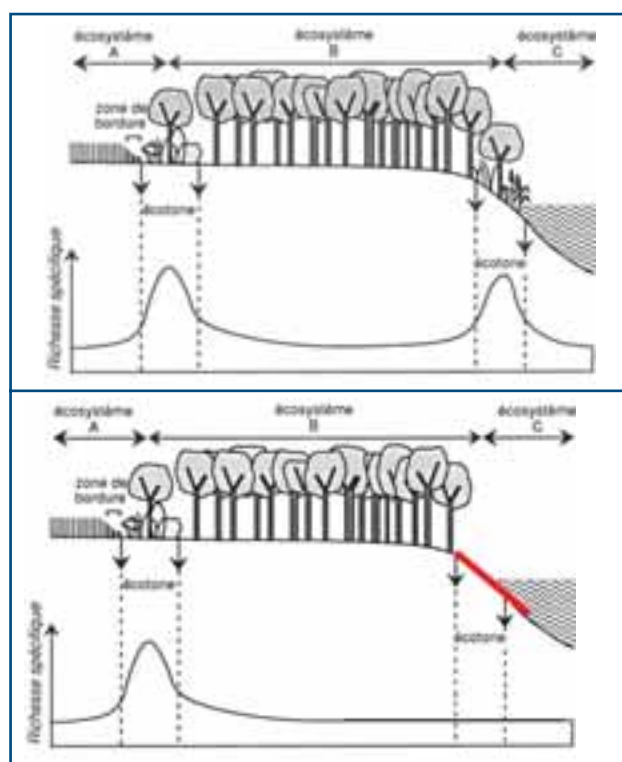


Figure 30 : Exemple de réduction de la richesse spécifique au niveau de l'écotone « rive » suite à une protection de berge (d'après Amoros et al., 1993).

● Aggravation des autres impacts liés à la chenalisation

Les protections de berges artificielles ont souvent été mises en place à l'occasion d'autres types d'interventions (rectification du lit, rescindement de méandres, recalibrage, endiguement, suppression de la ripisylve, etc.). Les impacts induits par ces protections viennent donc **aggraver les impacts liés à ces autres interventions**.

■ Principes de restauration

● Niveau R3

La seule méthode adaptée à un tel niveau d'ambition est l'élimination complète des protections de

berge existantes afin de garantir un espace de liberté au cours d'eau et le retour à un écotone rivulaire naturel.

● Niveau R2

La solution à rechercher sera également la suppression des protections de berge existantes et le report de nouvelles protections, si possibles végétales à une certaine distance du cours d'eau. Si les protections actuelles sont composées d'enrochements, les blocs pourront être réutilisés de manière indirecte pour réaliser des épis, des caches, des risbermes, etc. L'espace du cours d'eau sera ainsi élargi mais néanmoins contenu dans une emprise délimitée en raison d'enjeux identifiés comme devant être protégés.

● Niveau R1

Si, du fait de la présence d'enjeux forts, la présence d'ouvrages de protection de berge est indispensable, on peut prévoir le remplacement des protections « lourdes » par des techniques plus douces issues du génie végétal, ou l'adjonction d'ouvrages de diversification des faciès et du lit.

🌊 Endiguement et merlons de curage

■ Contexte

De très nombreux cours d'eau français ont été endigués, parfois sur de très longues distances. **En zone urbanisée**, l'endiguement étroit des cours d'eau, souvent très ancien, avait pour objectif de réduire la fréquence des inondations dommageables aux personnes et aux biens dans des zones à forte concentration humaine. **En zone rurale**, l'endiguement des cours d'eau répond à un objectif complémentaire : outre la protection des villages et hameaux situés dans le lit majeur inondable, parfois très loin du cours d'eau, il vise aussi la réduction de la fréquence de submersion des terrains cultivés.

Le principe de l'endiguement est simple : on érige le long du cours d'eau, dans la zone où se situent les enjeux à protéger, des structures linéaires plus ou moins sophistiquées (du simple remblai de terre ou de graviers issus de curages jusqu'à des constructions de génie civil de plusieurs mètres de haut). L'endiguement peut être uni- ou bilatéral, large ou étroit, de faible ou de forte hauteur selon les sites, les enjeux, les moyens techniques et financiers des collectivités.

🐟 NOTA

Les produits de curage des rivières sont très souvent redéposés en cordons (merlons) le long des cours d'eau. À terme, ces cordons finissent par former de véritables digues (c'est d'ailleurs souvent l'un des objectifs secondaires de cette méthode...). Le linéaire de cours d'eau soumis à ce type de « pseudo-endiguement » est probablement extrêmement important et beaucoup de travaux de restauration pourraient déjà consister à supprimer ces merlons de curage.



Figure 31 : A gauche, endiguement en béton sur les deux berges en zone urbanisée. A droite : ancien merlon de curage en bordure de la Scie (76). ≈



Figure 32 : A gauche, vue aérienne d'un système à double endiguement en zone rurale (protection des cultures). Etroit pour les crues fréquentes et large pour les crues plus rares. A droite, exemple de digue en enrochements + remblai (la rivière est à gauche). ≈



Figure 33 : Exemples d'endiguements. A gauche, rectification + endiguement étroit rive gauche : l'Aisne. A droite, tracé en plan « naturel » + endiguement large : la Marne. Noter que la digue a été rompue au sud de Larzicourt (source : Géoportail, IGN). ≈

L'endiguement d'un cours d'eau a souvent été couplé à d'autres interventions telles que :

- la rectification du lit mineur ;
- la protection des berges contre l'érosion ;
- la suppression de la ripisylve.

Les impacts sont donc souvent multiples.

■ Principaux dysfonctionnements identifiés

L'endiguement d'un cours d'eau se traduit généralement par des dysfonctionnements hydromorphologiques et écologiques dans le lit mineur mais surtout au sein du lit majeur :

● **Déconnexion entre le lit mineur et le lit majeur et ses annexes hydrauliques**

Ces déconnexions ont des caractéristiques très variables selon les cours d'eau, la largeur de la zone intra-digues, la hauteur des digues, etc. :

- elles peuvent être **permanentes** : plus aucune connexion n'existe quel que soit le niveau atteint par les crues ;
- elles peuvent être **temporaires** ou se traduire « seulement » par une moindre fréquence de connexion : par exemple, les connexions qui avaient lieu au moins une fois par an ou une fois tous les 2 ans, ne se font plus que tous les 5 ans, tous les 10 ans, etc.

Selon l'intensité de ces « déconnexions », les impacts sur les milieux naturels sont plus ou moins importants et plus ou moins réversibles. D'une manière générale la déconnexion du lit majeur de son lit mineur se traduit par :

- un appauvrissement des milieux naturels du lit majeur lié à une absence de submersion fréquente ;
- un appauvrissement des biocénoses terrestres associées ;
- un appauvrissement de certains compartiments des biocénoses aquatiques dont une partie du cycle de développement est lié à ces connexions (notamment la reproduction pour certaines espèces de poissons).

● **Incision du lit mineur suite à l'augmentation des débits dans la zone intra-digues, particulièrement si l'endiguement est étroit.**

→ **Abaissement de la nappe d'accompagnement, déstabilisation des ouvrages de génie civil** (ponts, digues, protections de berges).

● **Aggravation des inondations en aval.**

● **Si le cours d'eau est rectifié et recalibré, s'ajoutent les dysfonctionnements liés à la rectification et au recalibrage.**

NOTA

Il est évident que l'endiguement « large » (exemple de la Marne sur la figure 33, p. 35) est bien moins dommageable que l'endiguement étroit. 

■ Principes de restauration

● **Niveau R3**

Pour résorber la plupart des dysfonctionnements générés par l'endiguement, la méthode la plus efficace consiste à supprimer les digues. A ce niveau d'ambition, on tentera de reconquérir un espace de

mobilité sur les cours d'eau dynamiques et un espace de fonctionnalité, avec forêt alluviale et zones humides sur les cours d'eau moins actifs.

● **Niveau R2**

Si l'emprise foncière disponible est insuffisante ou pour d'autres raisons techniques ou sécuritaires (risque d'inondation de zones à enjeux forts), un moindre niveau d'ambition sera visé.

Les principaux types de restauration envisageables sont alors :

- une augmentation minimale de la zone intra-digues ;
- un abaissement de certaines digues au droit de zones à moindre enjeu.

● **Niveau R1**

Mise en place de systèmes de connexions lit mineur/annexes hydrauliques (buses à clapet, etc.) ou de mesures de diversification des berges.

Seuils / ouvrages transversaux

■ Contexte

La plupart des cours d'eau français sont parsemés de nombreux seuils (hauteur de chute inférieure à 5 m) résultant d'anciens usages énergétiques (forges, moulins) ou agricoles (irrigation). Ces ouvrages n'ont pour la plupart plus de vocation économique « active ». Ils génèrent par contre des impacts importants sur les caractéristiques abiotiques (hydromorphologie, physico-chimie de l'eau, etc.) et biologiques (entraves à la circulation des espèces, dérive typologique, etc.) des hydrosystèmes. Ils peuvent cependant, rarement, présenter des intérêts : maintien d'une lame d'eau en étiage, maintien d'un niveau de nappe pour l'alimentation en eau potable ou l'irrigation, stabilisation du fond du lit, etc.

Ce type d'action anthropique a un effet immédiat sur l'**homogénéisation des faciès d'écoulement, donc des habitats aquatiques**. Des dizaines de milliers de kilomètres de cours d'eau sont aujourd'hui sous l'influence directe de seuils.

Notons que les seuils sont souvent associés à d'autres interventions telles que :

- la rectification du lit mineur ;
- le recalibrage ;
- la protection des berges contre l'érosion ;
- la suppression de la ripisylve.

Les impacts sont donc souvent multiples (cf. figures 34 et 35, p. 37).



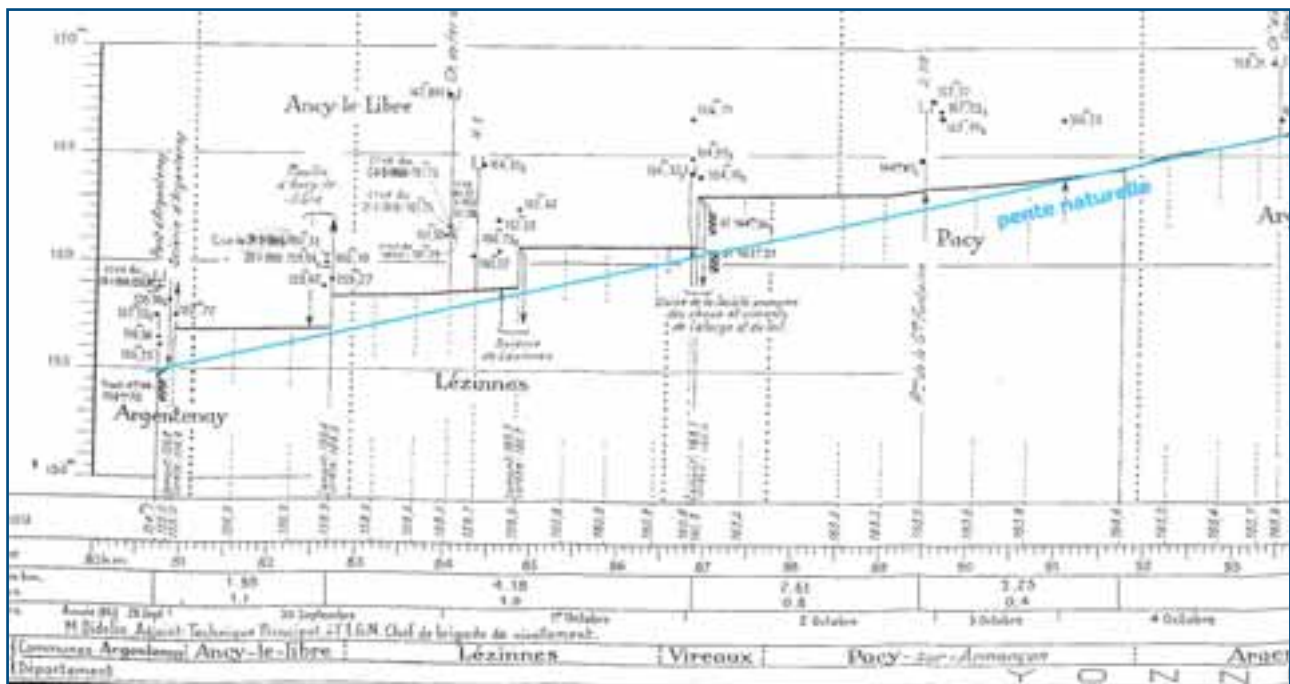


Figure 34 : Exemple de profil en long fortement altéré par la présence de seuils. L'Armançon (89) (source : IGN). ≡

Nota : ce type de profils est disponible sur la plupart des cours d'eau français à la cartothèque nationale de l'IGN. ≡

Figure 35 : a) et b) Exemples de seuils. c) Portion naturelle relictuelle présentant des faciès d'écoulement et des milieux diversifiés (bancs alluviaux diversément végétalisés). d) Vue « classique » de la retenue générée par l'ouvrage : un faciès lentique homogène sur plusieurs centaines de mètres. ≡



■ Principaux dysfonctionnements identifiés

Les impacts hydromorphologiques et écologiques liés à la présence de seuils ont fait l'objet d'une étude récente (Area, Malavoi, 2003). Quel que soit leur objectif initial (dérivation pour la force hydraulique ou l'irrigation, stabilisation du fond), les seuils en rivière, ont des impacts physiques et écologiques extrêmement importants.

Ces impacts peuvent être déclinés en 3 grandes catégories :

- les seuils modifient les **flux** liquides, solides, biologiques : modification plus ou moins importante des hydrogrammes, blocage de la charge solide, difficulté de franchissement par les poissons et rupture de la continuité écologique pour les biocénoses aquatiques ;
- ils ont un effet « **retenue** » : ils se traduisent à leur amont par un remous à l'origine de faciès d'écoulement lenticulaires et profonds en lieu et place des séquences naturelles de faciès d'écoulement (radiers, plats, mouilles etc.). Outre ces altérations drastiques des habitats aquatiques, ces retenues favorisent le réchauffement de l'eau en étiage et aggravent les effets de l'eutrophisation ;
- ils ont un effet « **point dur** » : en réduisant notamment les processus naturels d'érosion latérale dans l'emprise de la retenue. Ils sont un point de blocage local de la dynamique fluviale qui perturbe les processus d'équilibre géodynamique ;
- si, de plus, la portion soumise à l'effet retenue est rectiligne, endiguée ou recalibrée, s'ajoutent les dysfonctionnements liés à la rectification, à l'endiguement et au recalibrage.

■ Principes de restauration

Le bilan globalement négatif de l'impact des seuils amène à conclure que dans la plupart des situations, et en l'absence d'intérêt économique ou d'intérêt majeur sur le plan du patrimoine ou du paysage, la meilleure solution pour aller dans le sens des objectifs de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE), consiste à supprimer le seuil (**dérasement**) ou au moins à en réduire considérablement la hauteur (**arase**). Des précautions doivent cependant être prises pour éviter les impacts potentiellement négatifs face à des enjeux humains d'une telle opération : érosion régressive, reprise de l'érosion latérale en amont, apports solides importants en aval.

● Niveau R3

On propose à ce niveau d'ambition un **dérasement complet de l'ouvrage** (il est néanmoins possible de conserver un radier de fond pour limiter les risques d'érosion régressive).

● Avantages et inconvénients du dérasement d'ouvrages

Avantages :

- restauration définitive maximale de la **franchissabilité** (à la fois d'un point de vue écologique par les

poissons et d'un point de vue humain par les canoës) : sans danger, sans entretien ;

- restauration d'un **écoulement naturel** : faciès d'écoulement naturels, habitats piscicoles naturels, habitats naturels du lit moyen (bancs alluviaux, saulaies basses et végétation pionnière des bancs de graviers) ;
- réduction des effets de l'eutrophisation liés à la présence de plans d'eau profonds et à faibles vitesses ;
- réduction de l'envasement et amélioration du transit des alluvions grossières.

Dans certains cas de cours d'eau ayant été déplacés, la solution optimale comporte non seulement la suppression des ouvrages, mais aussi la restauration du lit du cours d'eau dans son tracé naturel en fond de vallée (restauration totale du site).

Seuls les ouvrages dont les effets positifs seraient avérés et ne pourraient être égalés par des techniques alternatives, devraient faire l'objet d'un maintien en l'état.

Inconvénients :

Les inconvénients du dérasement d'un ouvrage peuvent être listés de manière quasi exhaustive. Ceux décrits ci-après ne concernent que les aspects physiques et écologiques et non les aspects sociologiques :

- Erosion régressive dans les sédiments déposés dans le plan d'eau.

Le dérasement total d'un seuil va se traduire par une érosion régressive dans le remous solide du plan d'eau mais pas au-delà, sauf si un processus d'érosion régressive (lié à une autre cause) existe en aval du seuil à araser. ATTENTION : ce remous solide s'étend souvent, selon l'ancienneté de l'ouvrage et l'intensité du transport solide du cours d'eau, très au-delà du remous liquide.

- Erosion latérale en amont dans l'ancien plan d'eau. L'abaissement du plan d'eau peut se traduire par la reprise des processus d'érosion latérale du fait notamment de la réapparition des circulations d'eau entre la nappe et la rivière en période de crue, mécanisme naturel mais qui fragilise les berges (effet notamment des vidanges de nappe à la décrue). Des mesures pourront donc être prises pour bloquer l'érosion si des enjeux socio-économiques majeurs sont menacés (protections de berges en techniques végétales). Au cas par cas, il sera envisageable d'acquiescer les terrains érodables en amont.

- Cas des cours d'eau ayant subi une chenalisation (recalibrage, rectification).

Sur les cours d'eau ayant été fortement recalibrés (largeur et profondeur multipliées par 2 ou 3), la disparition du seuil se traduira par une médiocre qualité d'habitat (faible profondeur) et de paysage (bief généralement envasé).

Des travaux connexes au dérasement devront donc être entrepris immédiatement pour recréer des conditions fonctionnelles et paysagères intéressantes pour la faune et la flore aquatique et agréables pour les riverains et promeneurs (restauration du cours d'eau en amont, réduction de la section par des

épis déflecteurs des risbermes végétalisées, etc.). Sur les cours d'eau à forte puissance, ces interventions ne seront probablement pas nécessaires.

- Équilibre écologique mis en place depuis l'installation du seuil.

Dans certains cas, la présence de seuil depuis des décennies, voire des siècles, a pu contribuer au développement de zones humides en amont (effets sur la nappe). Le dérasement de l'ouvrage aura la plupart du temps pour effet une vidange de ces zones humides. Il faudra donc, dans ce type de cas, faire un bilan écologique préalable à l'éventuel arasement, permettant de vérifier si la « perte » d'une zone intéressante sera compensée par un « gain » écologique sur d'autres aspects. De même, sur certains cours d'eau incisés (suite à des travaux, des extractions, des endiguements), le dérasement réduira sans doute la fréquence de submersion des terrains avoisinants, d'où une probable réduction de la fonctionnalité de certaines zones inondables, comme frayères à brochets par exemple.

- Risque de mortalité d'une partie de la ripisylve de l'ancienne retenue dont les racines seront exondées (gérable par recépage/abattage).
- Remplacement d'un paysage de « plan d'eau » par un paysage de cours d'eau naturel :
 - habitudes des riverains difficiles à changer : ces plans d'eau existent depuis des décennies voire des siècles ;
 - risque de « filet d'eau » en étiage sévère.

● Niveau R2

Si pour des raisons économiques ou techniques, l'arasement total n'est pas envisageable, un moindre niveau d'ambition sera visé.

Les principaux types de restauration sont alors :

- un arasement partiel de l'ouvrage pour gagner un peu de linéaire à écoulement naturel ;
- la création d'îlots, de risbermes ou de bancs dans la retenue du seuil (avec peu d'effets hydrauliques car peu de vitesses. Essentiellement un effet « récif ») ;
- la diversification des berges de la retenue ou la création d'une ripisylve plus diversifiée.

● Niveau R1

Même type de travaux que pour la plupart des projets de niveau R1, quel que soit le type d'altération, mais vu l'absence des courants dans la retenue d'un seuil, les effets seront très limités.

🌊 Étangs implantés sur un cours d'eau

■ Contexte

Il arrive fréquemment que des étangs aient été créés directement sur un cours d'eau, notamment dans un objectif halieutique. Leur ligne d'eau a généralement été calée par un ouvrage (digue perpendiculaire à la vallée + seuil ou vannage) situé à l'extrémité aval du plan d'eau. Ce type d'intervention est donc un cas particulier et aggravé du contexte de seuil.



Figure 36 : Exemple d'étang implanté directement sur un cours d'eau (la Bièvre) (source : Géoportail, IGN).

■ Principaux dysfonctionnements observés

Les étangs positionnés sur un cours d'eau ont les mêmes types d'impacts morphoécologiques que ceux décrits pour les seuils « classiques », mais généralement accentués :

- **modification des flux liquides, solides et biologiques** ; la charge solide est ici totalement bloquée mais la fraction fine peut être brutalement relarguée lors des vidanges (impacts directs sur les biocénoses aquatiques vivant en aval et colmatage des substrats grossiers) ;
- **l'effet « retenue » est également aggravé**, notamment dans ses aspects biologiques. On identifie généralement un dysfonctionnement du compartiment piscicole du fait d'une « pollution » du cours d'eau par des espèces cyprinicoles caractéristiques des zones extrêmement lenticques et favorisées ici par l'homme à des fins halieutiques. Dans le même esprit, la qualité de l'eau est également altérée du fait des effets de réchauffement ;
- **l'effet « point dur » est également aggravé**, puisque le cours d'eau n'a plus aucune capacité d'ajustement géomorphologique, tout processus d'érosion étant bloqué.

■ Principes de restauration

Si les dysfonctionnements induits par la présence d'étangs sont assez proches de ceux que l'on observe pour les seuils, les principes de restauration sont parfois plus complexes du fait d'un **surcreusement de l'étang** dans le lit majeur (non systématique).

● Niveau R3

La première solution à proposer est la suppression de l'ouvrage (digue, seuil, barrage, etc.), puis si possible le remblaiement de l'ancienne retenue si celle-

ci a été excavée et la recreation d'un nouveau cours d'eau dans cette emprise.

Si cette première solution n'est pas envisageable, une deuxième variante consiste à recréer un nouveau cours d'eau qui court-circuitera totalement le plan d'eau, celui-ci pouvant alors être conservé sous forme de bras mort ou de zone humide. Une telle solution n'est pas toujours réalisable pour des raisons foncières mais aussi et surtout topographiques. Il est en effet important, pour des raisons hydrauliques et géodynamiques, que le nouveau cours d'eau soit réalisé dans son talweg en fond de vallée et non en situation perchée. Si l'étang occupe lui-même ce fond de vallée (ce qui est généralement le cas), la mise en œuvre de cette technique ne sera pas envisageable.

● Niveau R2

Si aucune de ces deux solutions n'est envisageable, on pourra travailler sur les déblais/remblais des sédiments de la retenue pour créer un chenal préférentiel d'écoulement, augmenter la diversité des profondeurs d'eau, augmenter la diversité des formations végétales présentes, etc. Il est également envisageable de fractionner un plan d'eau en plus petits éléments, de manière à limiter les dysfonctionnements précités.

Pour favoriser un cheminement préférentiel des écoulements, on pourra également mettre en place de longs épis dans le plan d'eau ou des secteurs complets de remblais sous forme de risbermes.

● Niveau R1

La seule solution envisageable pour ce niveau d'ambition consiste à diversifier les berges du plan d'eau avec des plantations rivulaires adaptées.

🌊 Extractions de granulats

■ Contexte

● Extractions en lit mineur

Les alluvions du lit mineur de la plupart des cours d'eau moyens à grands ont été intensément exploitées entre 1945 et le milieu des années 1990 (septembre 1994 : arrêté ministériel interdisant définitivement l'exploitation des alluvions dans les lit mineurs des cours d'eau). Il est à noter que sur plusieurs grands cours d'eau, tels que la Dordogne, la Loire, etc., les extractions en lit mineur avaient déjà été interdites avant cette date.

L'objectif de l'immédiat après-guerre était la reconstruction des villes détruites et cette tâche nécessitait une grande quantité d'alluvions fluviales pour la confection du béton. Par la suite, outre l'essor immobilier lié à la croissance démographique, les années 1960 à 1990 ont été marquées par le développement de grandes infrastructures routières et autoroutières qui ont nécessité des millions de mètres cubes de remblais, eux aussi souvent consti-

tués d'alluvions fluviales. Par exemple, sur la Loire à l'aval de sa confluence avec l'Allier, c'est environ 300 mètres cubes par mètre linéaire de cours d'eau qui ont été exploités ! (Malaval 1993).

Aujourd'hui, la plupart des cours d'eau exploités au cours de la seconde moitié du 20^e siècle sont encore **fortement déficitaires en sédiments grossiers**.

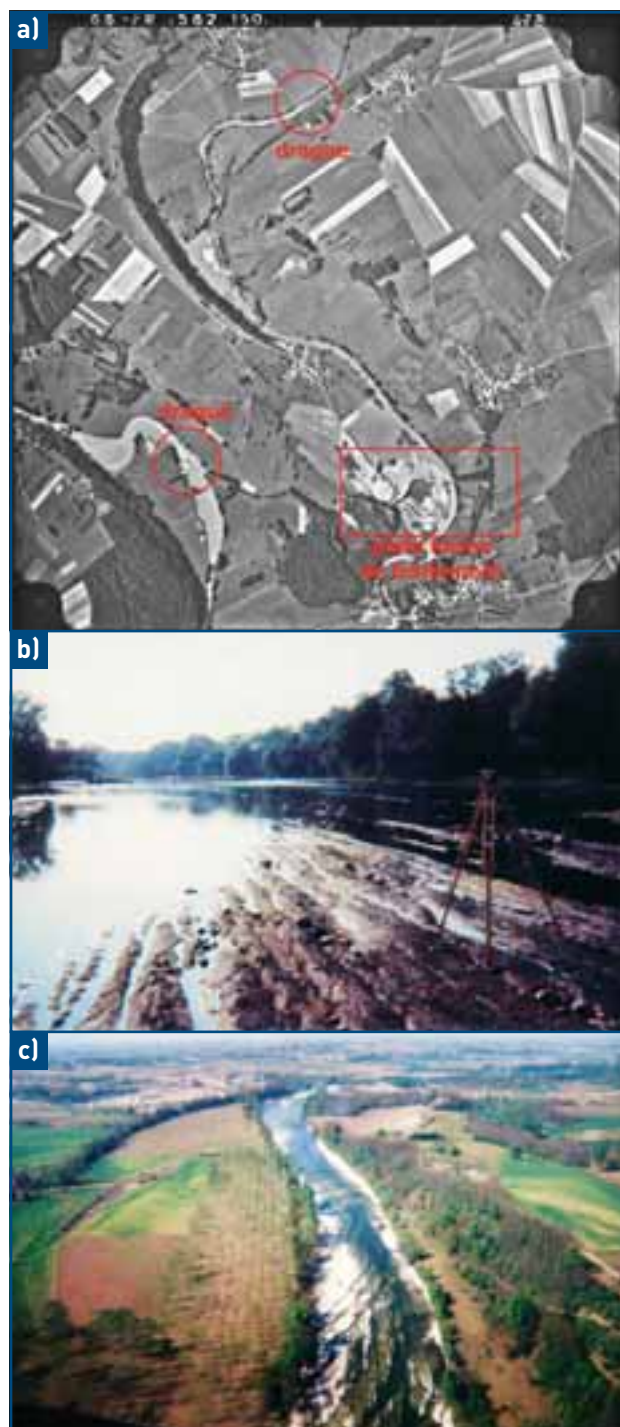


Figure 37 : a) Extractions alluvionnaires en lit mineur par drague flottante. Noter les sur-élargissements liés à l'extraction en profondeur et en largeur. b) Résultats : incision généralisée du lit et absence d'alluvions sur le fond du lit mineur (la photo de gauche montre les traces de « dents » des pelleteuses dans les marnes). c) On exploitait souvent jusqu'au substratum avec l'apparition de la roche mère sur de nombreux cours d'eau. ≡

Notons que les extractions en lit mineur de cours d'eau ont souvent été associées à d'autres interventions telles que :

- le surcalibrage du lit mineur (voir photo aérienne p. 40) ;
- la protection des berges contre l'érosion et l'endiguement plus ou moins « rustique » (mise en tas ou en merlons des rebus trop grossiers d'exploitation) pour protéger les plateformes de traitement.

Les impacts sont donc souvent multiples.

● *Extractions en lit majeur*

Dès le début des années 1980, les impacts des gravières en lit mineur ayant été identifiés, il a été suggéré aux extracteurs de matériaux de ne plus exploiter dans le lit mineur des cours d'eau et de se déplacer vers le lit majeur. Pour ne pas avoir à construire de nouvelles plateformes de traitement, les exploitants se sont souvent installés à proximité immédiate des anciens sites d'extraction en lit mineur. La présence d'extraction en lit majeur est donc un bon indice de présence d'anciennes exploitations en lit mineur.



↑ **Figure 38 :** Exemples d'extractions en lit majeur. On observe que le lit mineur a souvent été rectifié et endigué (source : Géoportail, IGN). ≡

Notons que les extractions en lit majeur de cours d'eau ont souvent été associées à d'autres interventions telles que :

- la rectification du lit mineur et le rescindement de méandres pour augmenter les surfaces exploitables et réduire les contraintes d'extraction (voir ci-dessus) ;
- la protection des berges contre l'érosion et l'endiguement plus ou moins « rustique » pour protéger les zones d'extraction et les plates-formes de traitement.

■ Principaux dysfonctionnements identifiés

● *Extractions en lit mineur : une incision généralisée et rapide des lits fluviaux*

Depuis l'effondrement du Pont Wilson à Tours (1978), de nombreuses études ont été consacrées à l'évaluation des impacts hydromorphologiques et écologiques causés par l'incision des cours d'eau liée aux extractions. Les principaux impacts reconnus sont :

- L'abaissement de la nappe phréatique alluviale et ses effets indirects comme l'assèchement des écosystèmes riverains et la réduction d'une ressource en eau potable de qualité.
- **La déconnexion entre le lit mineur, le lit majeur et ses annexes hydrauliques :**
 - elle peut être **permanente** : plus aucune connexion n'existe quel que soit le niveau atteint par les crues ;
 - elle peut être **temporaire** ou se traduire « seulement » par une moindre fréquence de connexion : par exemple, les connexions qui avaient lieu au moins une fois par an ou une fois tous les 2 ans, ne se font plus que tous les 5 ans, tous les 10 ans, etc.

Selon l'intensité de ces « déconnexions », les impacts sur les milieux naturels sont plus ou moins importants et plus ou moins réversibles. D'une manière générale la déconnexion du lit majeur de son lit mineur se traduit par :

- un appauvrissement des milieux naturels du lit majeur lié à une absence de submersion fréquente ;
- un processus accéléré de maturation des formations végétales riveraines, avec la fixation des sols et des atterrissements originellement mobiles ;
- un appauvrissement des biocénoses terrestres associées ;
- un appauvrissement de certains compartiments des biocénoses aquatiques dont une partie du cycle de développement est lié à ces connexions (notamment la reproduction pour certaines espèces de poissons).
- La modification de la nature des fonds (mise à nu du substratum notamment), avec des répercussions majeures sur les biocénoses benthiques et le peuplement piscicole (baisse drastique de la diversité des habitats).
- L'érosion accrue des berges et leur déstabilisation, le cours d'eau cherchant à compenser le déficit de charge solide par une augmentation de la sinuosité (réduction d'énergie) et une recharge latérale.
- Le déchaussement d'ouvrages d'art (ponts, digues, etc.).
- *Extractions en lit majeur : elles rendent l'incision irréversible*
- **L'impact direct des extractions en lit majeur** est la disparition immédiate et définitive (contrairement à l'agriculture par exemple) des milieux naturels humides de la plaine alluviale. Les bras morts, noues,

prairies humides et autres annexes hydrauliques sont irrémédiablement remplacées par des bassins d'extractions de plusieurs milliers de mètres cubes.

- **Pour ce qui concerne les impacts indirects des extractions en lit majeur**, le plus grave est de rendre irréversible le processus d'enfoncement du lit mineur car la recharge du cours d'eau par l'érosion latérale est impossible : le concept d'espace de mobilité est inapplicable.

■ Principes de restauration

● Niveau R3

La plupart des cours d'eau à dynamique active, qui ont souvent été les plus exploités par les extractions en lit mineur, ont plus que jamais aujourd'hui besoin de se recharger en sédiments par érosion latérale afin d'équilibrer leur « balance morphodynamique ». C'est le concept d'espace de liberté ou de mobilité. Ce concept qui est à mettre en œuvre le plus rapidement possible sur les cours d'eau actifs (voir le score géodynamique), rencontre malheureusement de très fortes réticences sociologiques (peur généralisée des inondations, des érosions, etc.).

● Niveau R2

Si l'emprise foncière disponible est insuffisante (notamment en cas de gravières en lit majeur) ou pour d'autres raisons techniques, un moindre niveau d'ambition sera visé.



Figure 39 : Exemple de mitage du lit majeur par les exploitations de granulats, qui grèvent de manière irréversible les possibilités de recharge alluviale par érosion latérale. La mise en œuvre du concept d'espace de mobilité est impossible (la Moselle). ≈

Les principaux types de restauration envisageables sont alors :

- aménagement écologique des gravières en fin d'exploitation pour leur donner une fonctionnalité proche de celles des annexes hydrauliques naturelles ;
- éventuellement favoriser la reconnexion des annexes hydrauliques.

● Niveau R1

- Apport d'alluvions et blocage éventuel par des structures transversales (mini-seuils).
- Mise en place de structures transversales s'il existe encore des apports solides provenant de l'amont avec de longs épis ou des mini-seuils. Attention toutefois à ne pas reproduire les dysfonctionnements générés par les seuils.

Cas particuliers

Afin de faciliter la réflexion des Maîtres d'ouvrage et des concepteurs dans leur démarche de restauration fonctionnelle, il nous est paru utile de détailler au sein du présent chapitre, trois « cas particuliers » de cours d'eau du bassin Seine-Normandie.

Les deux premiers chapitres sont consacrés à deux grands types de « pressions anthropiques » particulièrement fréquentes sur les cours d'eau du bassin et qui induisent des contraintes fortes vis à vis de la restauration :

- les cours d'eau soumis à une pression urbaine (spécificités des cours d'eau en milieu urbain) ;
- les cours d'eau soumis à une pression liée à la navigation (spécificités des grands cours d'eau navigués).

Un troisième chapitre a été proposé pour faciliter les démarches de réflexion sur les cours d'eau estuariens (spécificités des cours d'eau en milieu estuarien).

N'ont pas été traités spécifiquement les très petits cours d'eau de tête de bassin car, malgré leur petite taille, ils peuvent a priori faire l'objet des mêmes principes de restauration que les plus grands cours d'eau (les « lois » hydrauliques et géomorphologiques sont généralement proportionnelles à la taille du cours d'eau). N'ont pas non plus été traités les cours d'eau dits « temporaires ». Pour ces derniers, il peut néanmoins être intéressant de s'interroger sur le caractère naturel ou non de leur fonctionnement intermittent (drainage intensif du bassin, excès de prélèvements d'eau, etc.). La détermination de causes « non naturelles » peut éventuellement amener à proposer des principes de restauration spécifiques (rebouchage de drains par exemple).

🌊 Spécificités des cours d'eau en milieu urbain

■ Présentation générale

Les cours d'eau coulant en milieu urbanisé sont fréquents dans le bassin Seine-Normandie, particulièrement en Ile-de-France. Ils présentent des altérations hydromorphologiques et écologiques typiques, liées au cumul des interventions hydrauliques réalisées au cours des siècles. Ils présentent aussi des contraintes majeures vis-à-vis des possibilités de restauration.

■ Types d'altérations hydromorphologiques spécifiques

Ce ne sont pas tant les interventions hydrauliques réalisées sur les cours d'eau urbains qui sont particulières mais surtout le **cumul systématique des interventions**.

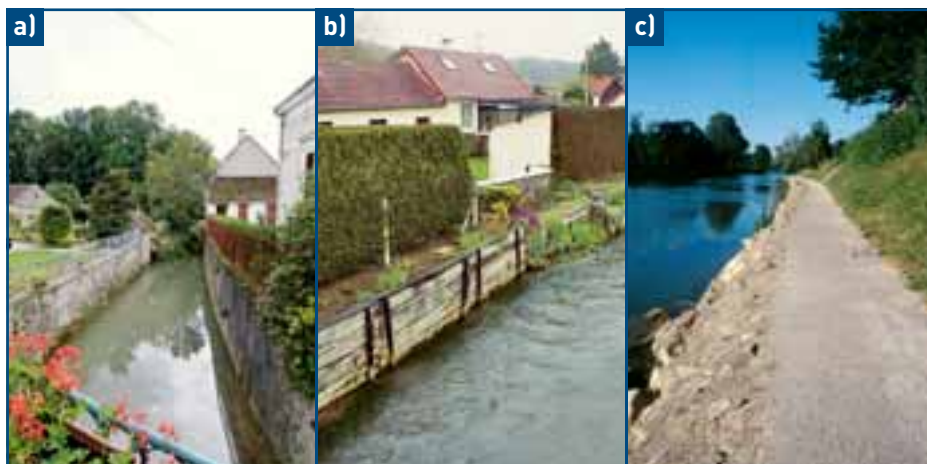
De nombreux cours d'eau urbains ou périurbains ont été très anciennement aménagés pour permettre le

développement économique en limitant les risques liés aux cours d'eau : inondations, érosions de berges. Un cumul d'interventions hydrauliques a généralement été nécessaire pour atteindre, au moins partiellement, cet objectif économique :

- la rectification du tracé, pour augmenter la débitance du lit mineur et « gagner » de l'espace constructible ;
- le recalibrage du lit pour augmenter encore la débitance ;
- la mise en place de digues pour réduire la fréquence de débordement ;
- la protection systématique des berges avec des techniques « lourdes », souvent surmontées d'une voie de communication (parfois sur les deux rives). Les murs de quais maçonnés sont particulièrement fréquents dans les traversées des centres urbains ;
- la présence régulière de seuils/barrages, initialement destinés à alimenter les moulins des villes.



↑ **Figure 40** : Quatre exemples de cours d'eau en traversée urbaine ou périurbaine. Le tracé est généralement rectiligne et les berges longées par des routes ou des chemins, donc protégées contre l'érosion (source : Géoportail, IGN). 🌊



← **Figure 41** : Quelques vues de rivières en milieu urbain. Surcalibrage du lit, rectitude du tracé, endiguement étroit, berges artificielles, édification de seuils et succession de plans d'eau :
a) Murs et succession de plan d'eau.
b) Tracé rectifié et protections de berges artificielles.
c) Chemin en bordure de cours d'eau et berge artificielle. 🌊

■ Contraintes de restauration spécifiques

● Contraintes foncières

Deux cas de figure se présentent : traversée urbaine (les deux cartes à gauche sur la figure 43, p. 43) ou périurbaine (ainsi que parcs urbains) (les deux cartes à droite).

Dans le premier cas, aucun gain d'emprise n'est envisageable et le niveau d'ambition sera limité à du R1 strict.

Dans le second cas, une négociation est peut être envisageable pour gagner quelques largeurs de lit et viser un niveau d'ambition de type R2.

● Contraintes hydrauliques

Là encore la dichotomie précédente peut s'appliquer. En traversée urbaine sensu stricto, il faudra évidemment éviter tout type de restauration risquant d'augmenter la fréquence des débordements.

Ainsi, par exemple la mise en place de bancs alternés risquant de se végétaliser nécessitera probablement une surveillance et une gestion de la végétation pour éviter que celle-ci ne croisse de manière trop importante. De même, les structures de diversification de l'habitat piscicole devront se limiter à des dimensions, des formes et des densités ne générant pas de rehausse notable de la ligne d'eau en crue.

Néanmoins, des solutions « amont » peuvent être recherchées pour compenser la réalisation de projets de restauration aggravant légèrement le risque inondation (amélioration de la rétention en lit majeur).

En zone périurbaine ou dans la traversée de parcs urbains, une plus grande latitude d'action sera envisageable.

■ Etudes préalables et études d'avant projet spécifiques

Pour les raisons évoquées ci-dessus, les études d'avant-projet devront nécessairement s'accompagner d'une **modélisation hydraulique** afin de vérifier l'absence d'effet hydraulique négatif des aménagements prévus.

NOTA

Le degré de précision de l'étude hydraulique doit être adapté aux risques probables générés par les travaux. Pas besoin d'un modèle hydraulique complexe pour évaluer le risque lié à 3 petits épis submersibles...



Spécificités des grands cours d'eau navigués

■ Présentation générale et contraintes particulières

La plupart des grands cours d'eau du bassin Seine-Normandie ont été aménagés pour la navigation : la Seine, la Marne, l'Oise, l'Yonne, l'Armançon, le Loing, etc.

Les Voies Navigables de France (VNF), qui gèrent environ 80 % des voies navigables de France, ont en gestion quelques 3 800 km de canaux et 2 900 km de fleuves aménagés pour la navigation en France. Certaines parties du réseau français sont gérées par des régions ou sont restées sous la direction directe de l'Etat français alors que certains tronçons sont gérés dans le cadre de concessions avec des syndicats mixtes ou des ports maritimes, tel l'estuaire de la Seine qui est géré par le Port autonome de Rouen. L'aménagement des cours d'eau à des fins de navigation comprend plusieurs types de travaux hydrauliques.

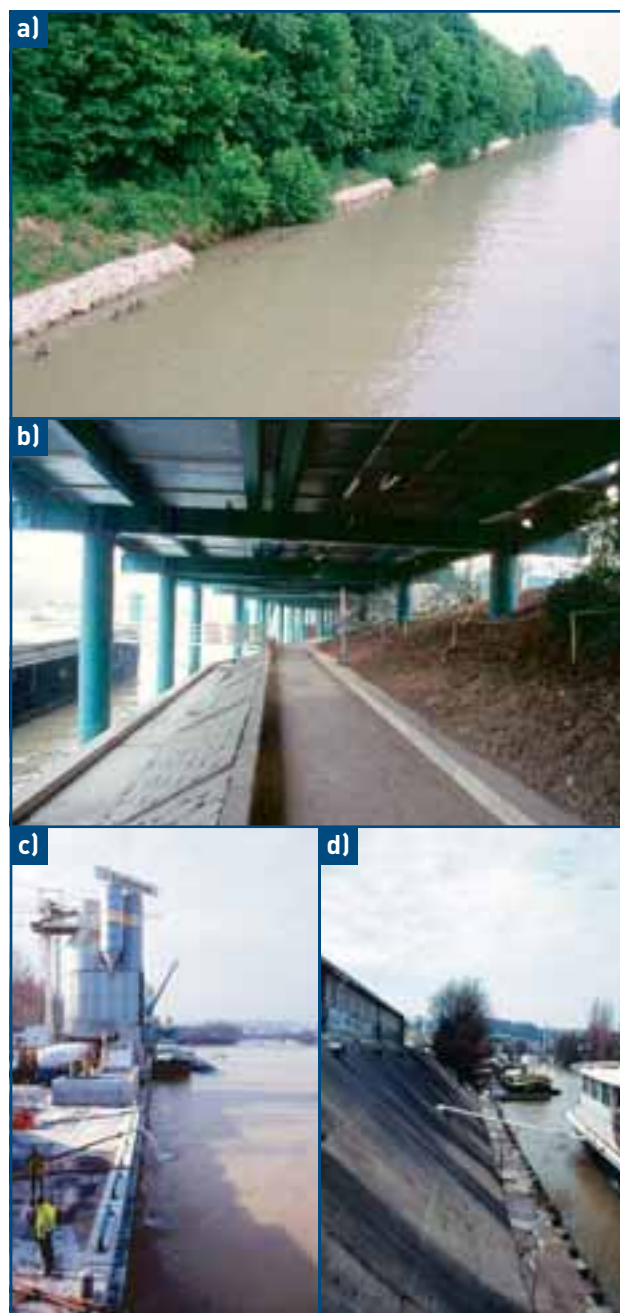


Figure 42 : Quelques exemples d'aménagements et d'usages particuliers des voies navigables : **a)** Canal de dérivation de la Marne et berges artificielles. **b)** Infrastructures routières et berges minéralisées en bordure de Seine naviguée. **c)** Quai de chargement en bordure de Seine. **d)** Bateaux « logement » et berge artificielle en bordure de Seine. 

ques aussi divers que la création de canaux artificiels en parallèle aux cours d'eau « naturels », des ouvrages de prise d'eau et de régulation, la mise en place de barrages, d'écluses, l'approfondissement du lit et la rectification de méandres si la navigation est réalisée sur le cours d'eau lui-même, l'édification de berges minéralisées pour des quais ou pontons de chargement, le développement de lieux d'accostage, d'infrastructures routières en bordure de cours d'eau ainsi que de manière plus marginale l'édification de ponts – ou tunnels-canaux.

La mise en place de barrages et d'écluses puis l'approfondissement du chenal destinés à la mise en navigabilité des cours d'eau induit le développement d'une succession de plans d'eau (biefs) en lieu et place de profils en long naturels. Cette anthropisation du milieu fluvial produit donc notamment les dysfonctionnements liés aux seuils (voir chapitres précédents).

Indépendamment des ouvrages liés à la gestion et à la régulation de niveaux des eaux suffisants pour permettre une navigabilité optimale, les voies navigables sont aménagées sur d'importants linéaires en protection des berges pour limiter les effets érosifs provoqués par le « batillage » induit par le passage des bateaux.

Pour mémoire, lors du passage d'un bateau, il se produit schématiquement deux effets :

- **un abaissement brusque du plan d'eau au droit de la proue du bateau**, qui a tendance à « sucer » les matériaux constitutifs de la berge (cf. figure 43 ci-contre) ;
- **une vague de retour à l'arrière du bateau** (vague de poupe), qui a tendance à « arracher » les matériaux constitutifs de la berge (cf. figure 44, p. 46).

REMARQUE

La présente description du batillage est schématisée et ne prend pas en compte tous les effets indirects secondaires tels que les contre-courants, remous dus aux hélices des bateaux, bourrelets de proue, etc.



Le batillage est lié à la géométrie de la carène des navires ; il n'est pas fonction de la taille des navires, mais de leur « finesse », ou de leur aptitude à se déplacer avec un minimum de dépense d'énergie.

Il est à noter que la vitesse des bateaux, parfois excessive, accentue le phénomène de batillage et ses effets.

Le batillage a pour conséquence la formation de berges érodées de profil vertical, avec en pied une plage ou une plate-forme sous-fluviale dénommée « risberme ».

Si le « batillage » apparaît comme la contrainte principale sur les berges pour les grands cours d'eau navigués, d'autres facteurs en présence peuvent « dynamiser » les pressions sur les berges ou les dispositifs d'aménagement réalisés.



Figure 43 : Abaissement du plan d'eau au droit de la proue d'un bateau en boucle de Seine aval. 

Il peut s'agir de crues qui seront plus pénalisantes par le phénomène de submersion prolongée des végétaux riverains qu'elles entraînent que par des contraintes hydrauliques fortes. Il peut également s'agir de faune « inadaptée » telle que des lapins, des ragondins, des rats musqués, etc., qui vont participer à un minage des berges, etc.

Pour répondre à ces différentes contraintes hydrodynamiques et sollicitations, les berges des voies navigables ont été (et sont) aménagées avec toutes formes de techniques, telles que des palplanches métalliques, des enrochements, des parpaings béton, des perrés, des gabions, etc., pour les techniques dites « lourdes », puis de plus en plus fréquemment aujourd'hui avec des techniques végétales ou semi-végétales.



Figure 44 : Vague de retour au droit de la poupe d'un bateau en boucle de Seine aval. ≡

Dans ce sens, les voies navigables sont donc également génératrices des dysfonctionnements identifiés plus haut en relation avec la chenalisation, la modification de la nature des berges, la suppression ou l'altération des formations végétales riveraines.

La restauration des berges de grands cours d'eau navigués fait donc appel à la compréhension d'une pluralité de contraintes qu'il faut décrypter et analyser de manière fine, notamment :

- analyse des effets du batillage (type de navigation, à grand gabarit – petit gabarit, fréquence du trafic fluvial et répartition annuelle) ;
- analyse du comportement et de la gestion hydraulique du tronçon de cours d'eau considéré en rapport avec la navigation (cote du niveau normal de navigation (NNN), cote des plus hautes eaux navigables (PHEN), cotes de crues, etc.) ;
- analyse de la végétation existante en amont, en aval et au droit du site à restaurer ;
- analyse des protections de berges existantes (type de protections, état de dégradation, etc.) ;
- analyse et repérage d'autres formes de contraintes d'aménagement (usages et enjeux particuliers, présence de faune particulière et inadaptée, etc.).

Un diagnostic préalable est donc impératif pour la définition de mesures de diversification ou de restauration pérennes et adaptées. L'objectif n'est pas non plus de surdimensionner les aménagements avec une méconnaissance des phénomènes hydro-mécaniques.

De ce fait, la précision du diagnostic préalable liée à l'expérience du concepteur est la garantie de dispositifs et mesures de restauration adaptés aux contraintes particulières du site travaillé.

■ Principes de restauration

De manière générale, en présence de seuil ou de barrage destiné au maintien de niveaux d'eau suffisants, l'arasement ou le dérasement de l'ouvrage à des fins de restauration écologique part du principe que la fonction initiale de l'ouvrage n'est plus existante et que l'ouvrage peut être en partie ou totalement supprimé. Sur les grands cours d'eau navigués, la problématique de restauration est quelque peu différente puisque l'on considère que la navigation demeure et donc les contraintes qui lui sont associées également. Dans ce contexte, les possibilités de restauration de grands cours d'eau navigués vont s'intéresser essentiellement à la revalorisation des berges ou à l'amélioration de la continuité écologique (passes à poissons, gestion des vannages, etc.) et non à la restauration de profils en long naturels.

Les possibilités de revalorisation écologique de berges très anthropisées sur de grands cours d'eau navigués sont directement liées à l'emprise foncière réservée aux aménagements et donc indirectement liées au niveau d'ambition des travaux :

• emprise limitée (niveaux d'ambition R1 et R2) :

en cas de contraintes de batillage, aucun aménagement 100 % végétal pour la valorisation des berges ne paraît réaliste si la pente du talus réservée aux aménagements est plus raide que 3 Horizontal/1 Vertical (3H/1V). En effet, plus un profil de berge est raide, plus il « s'oppose » à la forte énergie développée par les contraintes de batillage (cf. figure 45, p. 47) ;

• emprise élargie (niveau d'ambition R3) :

si l'emprise est élargie, l'action de restauration la plus adéquate sera représentée par l'évacuation des résidus d'anciens dispositifs de protection (palplanches, blocs d'enrochement ou de béton, pieux, déchets, remblais, etc.) et par la possibilité de laisser s'exprimer la dynamique érosive. Les processus d'érosion dus à des contraintes de batillage étant transversaux et non longitudinaux, lorsque l'emprise est suffisamment large (il est difficile de donner les dimensions « types », mais un ordre de grandeur d'au-moins 20 mètres en présence de fortes contraintes de batillage paraît suffisant), il y a « équilibre » entre la formation d'une plage sous-fluviale et de pied de berge, le développement d'un front d'érosion et la végétation riveraine adaptée (cf. figure 46, p. 47).

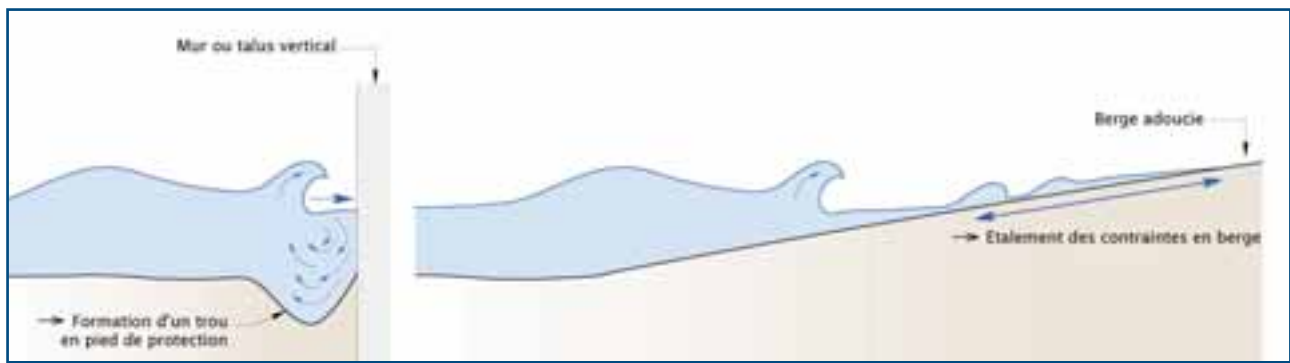


Figure 45 : Effets érosifs dus au batillage et pente de berge ; plus le profil est adouci, plus sa stabilisation par des techniques douces sera « facile ».

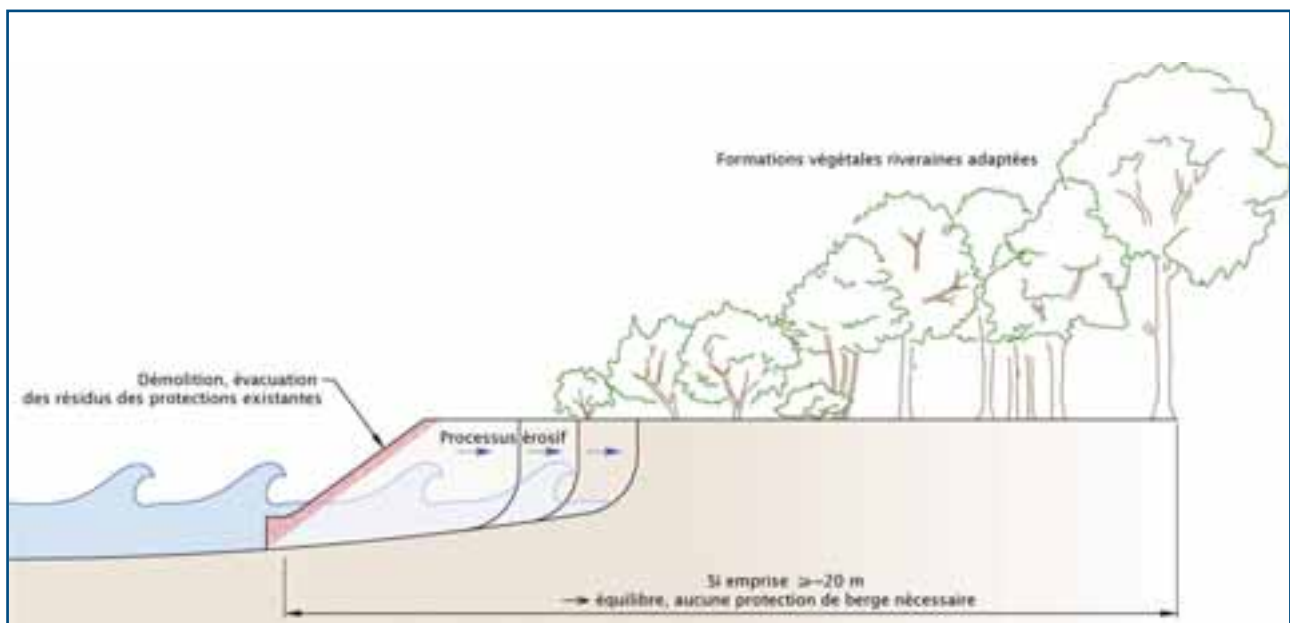


Figure 46 : Si l'emprise est élargie, en présence de contraintes de batillage, aucun dispositif de protection de berge n'est nécessaire.



POUR EN SAVOIR PLUS

Plusieurs études ou « guides techniques » existent déjà sur le thème de la végétalisation des berges de grands cours d'eau et des voies navigables ; le lecteur pourra ainsi se reporter notamment sur :

- VNF (mai 2003). Guide des techniques végétales. Département de l'eau et l'environnement.
- VNF (2005). Restauration et aménagement de berges sur les Voies Navigables d'Ile-de-France. Monter et réussir son projet, guide méthodologique. VNF direction interrégionale du bassin de la Seine et Agence de l'Eau Seine-Normandie.
- Adam P., Debiais N., Gerber F., Lachat B. (à paraître). Le génie végétal, un manuel technique au service de l'aménagement et la restauration des milieux aquatiques. Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables. La documentation Française.

Spécificité des cours d'eau en milieu estuarien

■ Présentation générale

Le bassin Seine-Normandie comporte une multitude de fleuves côtiers. Lorsque la mer ou l'océan « envahit » une partie du linéaire de l'embouchure du cours d'eau, on parle d'estuaire. Un estuaire est donc concerné par les phénomènes de marées, avec le flot (courant montant) et le jusant (courant descendant ou vidange) qui leurs sont associés.

Ce va-et-vient continu de la mer (ou de l'océan) dans le cours d'eau (marnage) entraîne la formation de berges à très faible pente et de nature souvent vaseuse sur lesquelles se développe une végétation spécifique très particulière. Lieux de transition entre le milieu marin et le milieu terrestre, les estuaires constituent généralement des biotopes extrêmement riches, non seulement du point de vue de la flore mais également du point de vue de la faune.

Cependant, à ce jour, il existe très peu sur le bassin Seine-Normandie d'estuaires répondant à des conditions totalement naturelles. Les berges de l'estuaire de la Seine ont été très durement aménagées et le fond du lit surcreusé pour permettre la navigation à grand gabarit. La plupart des exutoires des petites rivières côtières (en particulier ceux de Haute-Normandie par rapport à ceux de Basse-Normandie) ont été aménagés de buses et de clapets destinés à l'aménagement du front de mer et les marais saumâtres ont souvent été asséchés pour la mise en valeur économique de l'espace alluvial ; c'est notamment le cas de l'embouchure de la Saône, de la Scie, de l'Yères, etc.

Ces aménagements ont donc engendré des dysfonctionnements majeurs et multiples liés notamment à la modification des flux (liquides et sédimentaires) dans les estuaires, à la modification drastique des échanges entre les milieux marins et terrestres, à des perturbations graves dans la libre circulation des poissons migrateurs, à la disparition ou l'altération des formations végétales riveraines, à la disparition des milieux humides annexes au cours d'eau, etc.

■ Principes de restauration

La restauration des estuaires est encore marginale et pour l'instant essentiellement limitée à la « décorrection » de berges très anthropisées pour produire des profils à plus faible pente et végétalisés avec des essences adaptées.

Un projet d'élimination des buses (et clapets) sur la Saône est en cours, à savoir un projet de « réestuariation ».

Dans le présent document, on se limitera ainsi à la « décorrection » puis la végétalisation de berges d'estuaires en terme de restauration.

■ Végétalisation de berges d'estuaires

● Généralités

Sur la façade atlantique, la marée a pour effet d'engendrer un marnage important des niveaux d'eau, ceci deux fois par jour (sur la Seine aval, ce marnage atteint environ 3,5 mètres lors d'une marée de coefficient 100). Ce flux et reflux quotidien a pour conséquence de gorger d'eau et inversement de ressuyer le substrat des berges de manière rapide et régulière. Ceci provoque, dans la portion de la berge soumise aux marées, le lessivage des matériaux fins de la berge en direction du centre du cours d'eau.

Les variations rapides des niveaux d'eau induisent des pressions interstitielles dans les sols constitutifs des berges, pressions interstitielles favorisant des ruptures et des glissements.

Le flot, avec l'énergie qui le caractérise, est un élément particulièrement actif de cette mécanique de destruction des berges d'estuaires par leur base, avec des ruptures circulaires généralisées et un entraînement des matériaux fins, pouvant conduire à terme à la déstabilisation des terrains limitrophes.

Si des phénomènes tels que les crues ont une action longitudinale sur les cours d'eau, les marées (et le flot/jusant qui leur est associé) sont responsables d'un type d'érosion des berges plutôt « transversal ». Ces conditions très particulières ne permettent pas à n'importe quel type de végétal de se développer très

bas en berge, en particulier pas aux essences ligneuses que l'on a l'habitude de rencontrer en bordure de l'eau, telles que saules (*Salix* sp.), aulnes (*Alnus glutinosa*), etc. La frange de marnage touchée par les marées régulières favorise le développement d'une série végétale bien spécifique sur la berge, de type hélophytique, en relation directe avec les niveaux d'eau atteints par la marée [cf. figure 48, p. 49].

↓ **Figure 47** : Clapet et busage sur l'exutoire de la Scie (76). ≡





Figure 48 : Exemple d'érosion en berge sableuse de Loire marnante en amont de Nantes, Ile Lorideau lors du reflux de la marée et étalement naturel de la végétation sur berge. ≡

Les limites altitudinales d'implantation végétale sont ainsi définies par la capacité des végétaux à résister aux effets de submersion, en fonction des coefficients de marées ; capacité propre à chaque espèce végétale. Ces limites altitudinales sont ainsi grossièrement les suivantes (figure 52 ci-après), quelque soit l'estuaire français concerné :

- la limite inférieure de toute implantation végétale (herbacées type héléocharis) se situe entre 0 et 1.0 NGF. La végétation (non hydrophytique) ne des-

cend pas sous la cote du 0 NGF, alors que les marées en Seine aval par exemple, peuvent atteindre facilement - 0.5 NGF ;

- la limite inférieure de l'implantation de la végétation courante hélophytique (type phalaris, phragmites, agrostis, carex, etc.) ne se situe pas au-dessous de la cote 1.5 NGF ;
- la limite inférieure de toute implantation végétale ligneuse ne descend pas au-dessous de la cote 2.5 NGF.

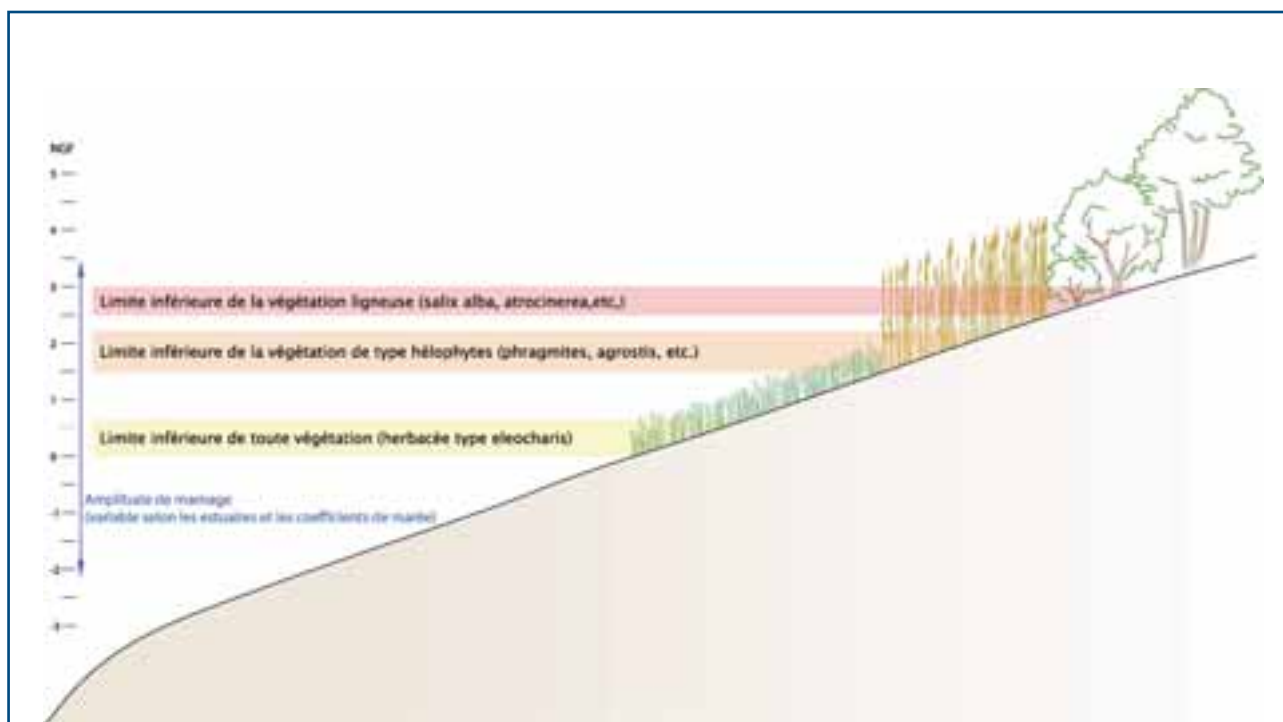


Figure 49 : Implantation végétale en bordure d'estuaire en fonction des cotes atteintes par la marée. ≡

● Niveaux d'ambition

Comme pour les grands cours d'eau navigués, la valorisation écologique de berges très anthropisées d'estuaires est directement liée à l'emprise réservée et donc indirectement au niveau d'ambition des travaux :

● emprise limitée (niveaux d'ambition R1 et R2) :

- en cas de contraintes de marées, aucun aménagement 100 % végétal ne paraît réaliste si la pente de berge réservée aux aménagements est plus raide que 5 Horizontal/1 Vertical (5H/1V). Si le profil réalisé est plus raide, le ressuyage rapide des sols lors du jusant va provoquer la formation de ravines profondes en berge (cf. figure 50, ci-après) ;

- la « revégétalisation » de berges d'estuaires doit se calquer sur les cotes altitudinales des niveaux d'eaux (cote de marées) vues ci-dessus ;

- **emprise élargie (niveau d'ambition R3) :** comme pour les contraintes de battillage liées à la navigation, si l'emprise est élargie, l'action de restauration la plus adéquate sera représentée par l'évacuation des résidus d'anciens dispositifs de protection (palplanches, blocs d'enrochements, pieux, remblais, etc.) et par la possibilité de laisser s'exprimer la dynamique érosive. Il est difficile de donner des dimensions « types », mais si l'emprise dépasse 30 mètres de largeur, il y a formation d'un équilibre entre le « ravinement », le lessivage des substrats terreux et le développement de formations végétales adaptées (figure 51, ci-après).



Figure 50 : Exemple de formation de « ravines » en berge dues à un profil trop raide en présence de contraintes de marées (ici la Garonne en ville de Bordeaux avec des ouvrages de renforcements de berge en palplanches). ≈

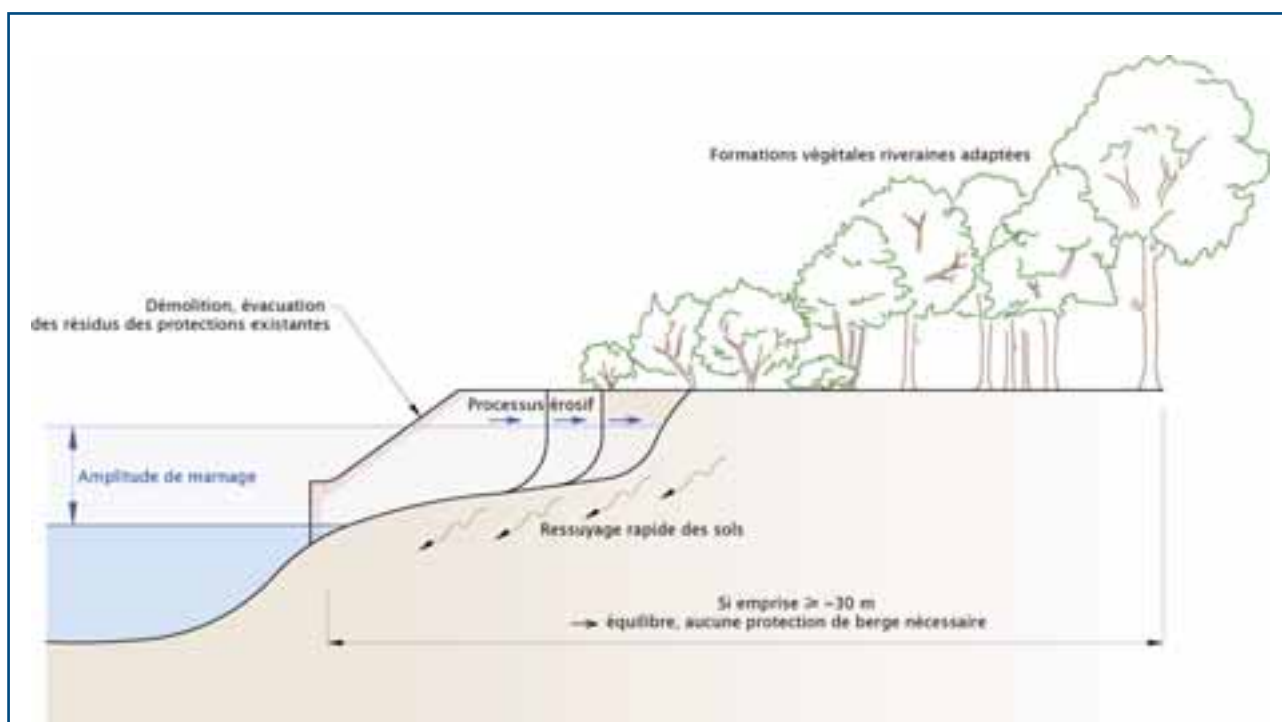


Figure 51 : Si l'emprise est élargie, aucune protection de berge n'est nécessaire en présence de contraintes de marée. ≈

Tableaux de synthèse des familles de travaux de restauration par type de dysfonctionnement et par niveau d'ambition

Les tableaux ci-après présentent de manière synthétique les orientations de réflexion dans la définition de travaux de restauration par niveau d'ambition (R1 à R3), sur la base du type de dysfonctionnement observé, qui est souvent multiple. Ces tableaux font des renvois aux fiches techniques détaillées en

3^e partie du document. Ils constituent une base de réflexion mais n'ont pas la prétention d'être exhaustifs. De plus, lorsque les dysfonctionnements sont multiples, il est nécessaire d'être particulièrement prudent dans la définition de mesures de restauration, d'où le besoin d'études préalables rigoureuses.

Type de dysfonctionnement	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Remarques et précautions à prendre
Métamorphose fluviale liée à l'incision du lit mineur	R1	Action à l'échelle globale indispensable. On peut en partie freiner la métamorphose « tressage – méandrage » par un entretien systématique de la végétation du lit moyen (bande active) pour éviter une fermeture trop rapide du milieu alluvial	
	R2		
	R3		
Disparition des substrats liée à l'incision du lit mineur	R1	Apport de matériaux (fiche 5) + structures de blocage (fiches 3 et 6)	– Utiliser des alluvions de nature pétrographique et de granulométrie équivalente à celles que l'on devrait trouver sur le site à restaurer. – Régaler les alluvions pour ne pas trop réduire la section d'écoulement. – Plus le score physique est élevé, moins l'apport de matériaux sera nécessaire. – Attention à l'aggravation du déficit aval.
	R2	Apport de matériaux (fiche 5) + structures de blocage (fiches 3 et 6)	
	R3	Apport éventuel de matériaux (fiche 5) + structures de blocage (fiches 3 et 6) + espace de liberté	
Abaissement de la nappe lié à l'incision du lit mineur (cf. lit majeur)	R1	Mise en place de seuils (fiche 6)	– Attention aux impacts liés à la présence de seuils. – Plus le score physique est élevé, moins la hauteur des seuils sera importante.
	R2	Mise en place de seuils (fiche 6)	
	R3	Mise en place de seuils (fiche 6) + espace de liberté	

↑ **Figure 52** : Dysfonctionnement au sein du lit mineur ; incision. ≡

Type de dysfonctionnement	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Remarques et précautions à prendre
Homogénéisation des faciès d'écoulement liée à la présence de seuils ou barrages	R1	Arasement partiel (fiche 8) + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue (fiches 1 et 2)	– Si le score physique est faible, la réalisation de travaux de restauration est indispensable pour éviter une qualité écologique et paysagère médiocre. – Vérifier l'absence de risque d'érosion régressive ou l'absence d'enjeux pouvant être menacés.
	R2	Arasement partiel plus poussé (fiche 8) + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue (fiches 1 et 2)	
	R3	Arasement total (fiche 8) + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue (fiches 1 et 2)	

↑ **Figure 53** : Dysfonctionnement au sein du lit mineur ; modification drastique des caractéristiques de l'écoulement et de la nature des berges. Homogénéisation des faciès d'écoulement liée à la présence de seuils ou de barrages. ≡

Type de dysfonctionnement	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Remarques et précautions à prendre
Homogénéisation des faciès d'écoulement liée à une chenalisation	R1	Diversification minimale des écoulements (déflecteurs (fiche 3), risbermes (fiche 4), amas de blocs, structures diverses (fiche 1), etc.)	- Plus le score physique est élevé et plus la restauration pourra être passive. Le dimensionnement et le positionnement des structures de diversification de l'écoulement doivent tenir compte de paramètres géomorphologiques : quel est le type d'habitat ou de séquence de faciès naturels sur le tronçon concerné ? Quelles doivent être la taille, la forme, la nature des structures pour résister à la puissance hydraulique du cours d'eau ? et de paramètres écologiques : quels types de faciès ou d'habitat veut-on recréer ? sous berges, abris hydrauliques, caches contre les prédateurs, zones de frai, zone de repos, etc. ? Eventuellement quelle espèce ou quel stade de développement veut-on favoriser ? Alevins, juvéniles, adultes ?
	R2	Travaux plus aboutis de restauration piscicole (fiche 1), plantations de végétaux aquatiques (fiche 2), reprofilage des berges (fiche 11), reméandrage partiel (fiche 15)	
	R3	Restauration complète des conditions géomorphologiques (tracé en plan d'équilibre, géométrie du lit et des berges, substrat) (fiche 15)	

↑ **Figure 54** : Dysfonctionnement au sein du lit mineur ; homogénéisation des faciès liée à une chenalisation. ≈

Type de dysfonctionnement	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Remarques et précautions à prendre
Réduction de la profondeur d'eau à l'étiage	R1	Réduction de la largeur du lit d'étiage par toute structure hydraulique permettant de concentrer l'écoulement d'étiage dans un lit mieux dimensionné, garantissant à minima des profondeurs de l'ordre de 30-40 cm (fiches 3, 4 et 11)	- Plus le score physique est élevé et plus la restauration pourra être passive Le dimensionnement et le positionnement des structures hydrauliques doivent tenir compte de paramètres géomorphologiques : quelle est la profondeur moyenne visée et pour quel débit (étiage sévère, étiage moyen, module, etc.) ? Quel est l'objectif : simple réhausse de la lame d'eau, réhausse concomitante de la nappe d'accompagnement, etc. ? Quelles doivent être la taille, la forme, la nature des structures pour résister à la puissance hydraulique du cours d'eau ? et de paramètres écologiques : s'agit-il d'une recherche de l'amélioration de l'habitat ? D'une amélioration de la franchissabilité d'un secteur par différentes espèces, etc. ?
	R2	Reconstruction d'un lit d'étiage et d'un lit moyen (bancs alluviaux ou risbermes artificielles (fiches 4 et 11)), écartement des digues si elles sont trop près du cours d'eau (fiche 13), reméandrage (fiche 15)	
	R3	Idem R2 + espace de fonctionnalité (fiches 4, 11, 13 et 15)	

↑ **Figure 55** : Dysfonctionnement au sein du lit mineur ; réduction de la profondeur d'eau à l'étiage. ≈

Type de dysfonctionnement	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Remarques et précautions à prendre
Modification de la nature des berges	R1	Mise en place de caches et abris le long des berges : agencements particuliers d'enrochements libres, troncs d'arbres, sous-berges artificielles, etc. (fiche 1)	- Nécessité d'un travail important de sensibilisation locale au droit du site de suppression des protections de berges (peur généralisée des érosions latérales). - Eventuellement gestion foncière de la zone susceptible d'être à nouveau soumise à des processus d'érosion. - Sur les rivières à faible ou modeste puissance et à berges basses (< 1,5 m), la plantation de végétaux riverains, même en sommet de berges, peut réduire fortement les processus d'érosion latérale par ailleurs intéressants pour la restauration d'un fonctionnement plus naturel du cours d'eau.
	R2	Recréation de berges naturelles, plantations de végétaux adaptés, sous-berges artificielles en attendant que le système racinaire naturel se développe (fiches 2, 9 et 12)	
	R3	Idem R2 + espace de fonctionnalité (fiches 2, 9 et 12)	

↑ **Figure 56** : Dysfonctionnement au sein du lit mineur ; modification de la nature des berges. ≈

Type de dysfonctionnement	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Remarques et précautions à prendre
Végétation riveraine absente, très clairsemée ou inadaptée	R1	Plantations simples (fiche 2)	- Sur les rivières à faible ou modeste puissance et à berges basses (< 1,5 m), la plantation de végétaux riverains, même en sommet de berge, peut réduire fortement les processus d'érosion latérale par ailleurs intéressants pour la restauration d'un fonctionnement plus naturel du cours d'eau. - Plus la puissance du cours d'eau est élevée, plus pourront être favorisées les bonnes conditions de croissance par des ouvrages indirects (fiche 3) plutôt que de planter tout de suite les bons végétaux.
	R2	Plantations plus étendues dans les limites de l'emprise foncière disponible (fiches 2 et 12)	
	R3	Plantations plus étendues de manière à recréer un corridor fluvial (fiches 2 et 12)	

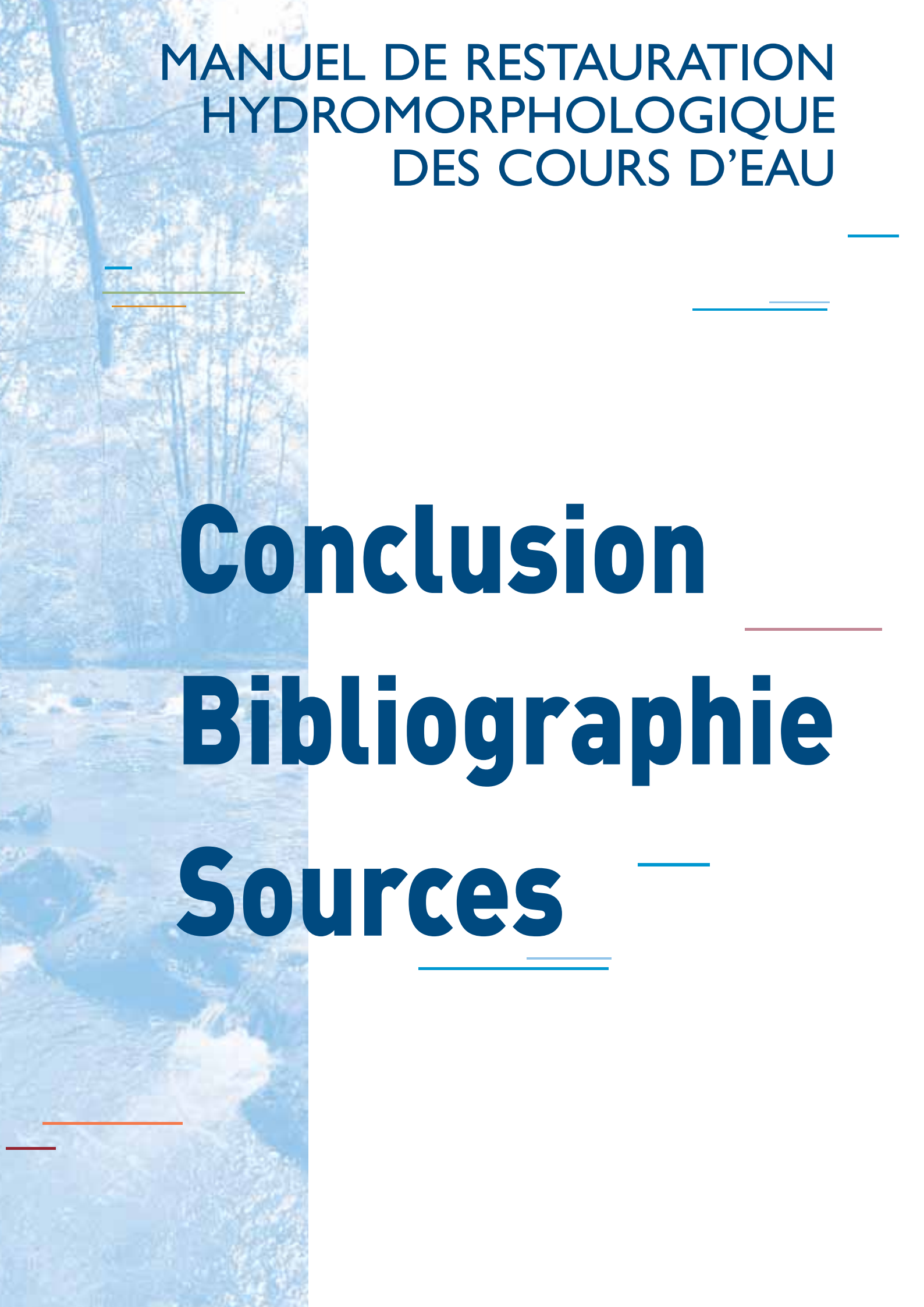
↑ **Figure 57** : Dysfonctionnement au sein du lit mineur ; modification drastique des formations végétales riveraines. ≈

Type de dysfonctionnement	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Remarques et précautions à prendre
Déconnexion lit mineur/ lit majeur (cause : incision du lit mineur)	R1	- Mêmes traitements locaux et globaux que ceux destinés à juguler l'incision du lit mineur (fiches 3, 5 et 6). - Reconnexion des annexes hydrauliques perchées (curages, nettoyage) (fiche 7).	
	R2	Idem R1	
	R3	Idem R1	

↑ **Figure 58** : Dysfonctionnement au sein du lit majeur ; déconnexion lit mineur/lit majeur liée à une incision du lit mineur. ≈

Type de dysfonctionnement	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Remarques et précautions à prendre
Déconnexion lit mineur/ lit majeur (cause : présence de digues)	R1	Abaissement localisé des digues pour augmenter la fréquence de connexion ; mise en place de clapets (exemple Rhin) (fiche 13)	– Nécessité d'une étude hydraulique pour vérification que l'opération n'aggrave pas les inondations de secteurs à enjeux forts (zones urbanisées).
	R2	Ecartement des digues aux limites foncières disponibles (fiche 13)	
	R3	Ecartement des digues aux limites d'un espace de mobilité ou de fonctionnalité, voire suppression totale (fiche 13)	

 **Figure 59** : Dysfonctionnement au sein du lit majeur ; déconnexion lit mineur/lit majeur liée à la présence de digues. 



MANUEL DE RESTAURATION HYDROMORPHOLOGIQUE DES COURS D'EAU

Conclusion

Bibliographie

Sources



CONCLUSION

Il apparaît au fil des enquêtes menées sur le territoire national (Malavoi, Biotec, 2006 et 2007) que les restaurations hydromorphologiques de rivières déjà réalisées en France et les projets en cours de formalisation sont encore peu nombreux, d'ambition généralement modérée (souvent R1, parfois R2, très rarement R3) et d'extension spatiale modeste (quelques dizaines à quelques centaines de mètres).

Le cas du bassin Seine-Normandie n'échappe pas à ce constat, mais un peu partout on peut observer la naissance d'une prise de conscience et donc d'une dynamique de progrès, souvent issue d'une demande sociale émergente, notamment en zone périurbaine et urbaine.

Encore trop peu de maîtres d'ouvrage publics sont encore aujourd'hui tentés par une démarche de restauration :

- parce qu'ils sont souvent relativement satisfaits de l'état actuel de leur cours d'eau (peu de débordements, peu d'érosion, paysage rectiligne ou simplifié qui « fait propre », etc.) ;
- parce qu'ils ne voient pas l'intérêt de remettre en question des aménagements hydrauliques souvent récents (30-40 ans), qui avaient été bien argumentés d'un point de vue technique à l'époque par les services de l'Etat, qui en étaient les prescripteurs et souvent les maîtres d'œuvre (réduction des inondations, notamment dans les terres agricoles) ;
- parce que cela coûte cher *politiquement* de vouloir revenir à un état plus naturel, assimilé souvent à de la « friche » et qui se traduirait notamment par une perte de « confort » pour les riverains immédiats, particulièrement les agriculteurs ;
- parce que cela coûte cher *financièrement*, même si des subventions importantes peuvent être apportées (d'autant que certains syndicats n'ont pas encore fini de payer les intérêts des emprunts liés aux travaux des années 60 !)

Consciente de ces points de blocage, l'Agence de l'eau Seine-Normandie, met en œuvre une politique ambitieuse en matière d'incitation à la restauration hydromorphologique des cours d'eau.

Ainsi le 9^e programme (2007-2012) favorise l'émergence de travaux sur les cours d'eau où l'état hydro-

morphologique est considéré comme le principal facteur limitant pour l'atteinte du bon état écologique (objectif de la Directive Cadre sur l'Eau), en attribuant des aides à un taux de 60 % (majoration de 20 %).

D'autre part l'Agence finance à 50 % des postes qualifiés pour contribuer à l'animation dans les syndicats ou les associations (ASA, FPPMA, etc.), et soutient la création de CATER (Cellules d'Assistance Technique à l'Entretien des Rivières) départementales. Cette présence sur le terrain permet d'une part d'améliorer la compréhension qu'ont les élus et les populations riveraines du fonctionnement global de leur cours d'eau, et d'autre part de l'intérêt qu'ils auraient sur le moyen et long terme à revoir leur gestion dudit cours d'eau, si possible à l'échelle du bassin versant, pour aboutir in fine à un projet de restauration écologique.

Par ailleurs l'Agence souhaite mettre en œuvre toute une politique de sensibilisation et d'information en organisant des colloques, des sessions de formations, des journées d'échanges techniques, des appels à projets.

Enfin l'Agence produit des outils d'aide à la décision, comme ce manuel de restauration, destiné aux techniciens et chargés d'études qui définissent et mettent en œuvre des projets de restauration. Ce dernier document n'a pas l'ambition de l'exhaustivité et ne présente pas de recettes toutes faites, mais il constitue un état de l'art des techniques actuelles, permet de se poser les bonnes questions et propose les pistes pour y répondre sur le terrain de façon pragmatique.

Les argumentaires sont encore trop souvent justifiés par des objectifs uniquement piscicoles. Il faut absolument défendre la biodiversité en général en s'appuyant sur la diversité physique, elle-même source de diversité biologique (défendre une opération de restauration sous l'angle d'une espèce cible, de surcroît souvent animale, est une mauvaise option). Il ne faut pas hésiter à défendre un concept à vocation essentiellement écologique (actuellement encore peu « vendeur » mais qui tend à le devenir de plus en plus), même si des améliorations peuvent être également attendues sur la qualité de l'eau, la réduction des inondations en aval, le paysage, etc.



Il est bien sûr utopique aujourd'hui d'imaginer restaurer rapidement (10-15 ans) les milliers de kilomètres de cours d'eau altérés du bassin Seine-Normandie. Mais l'Agence et ses partenaires publics se doivent d'accompagner les édiles et opérateurs locaux, dans un long processus de prise de conscience, qui petit à petit débouchera sur des travaux de restauration de plus en plus ambitieux.

Même si la recherche de niveaux d'ambition élevés (R3) sur des linéaires importants (plusieurs kilomètres) doit être une priorité, il est également nécessaire de consacrer encore les cinq à dix prochaines années à des **projets pilotes de restauration** sur de petits linéaires, qui auraient pour vocation majeure, outre l'amélioration réelle de l'état écologique des cours d'eau concernés, de servir de « vitrines » à ce qui pourrait être fait au cours des vingt années à venir en matière de restauration hydromorphologique.

Ces « vitrines » devraient :

- **être réparties sur l'ensemble du territoire** pour que de nombreux élus et gestionnaires puissent y avoir accès facilement ;
- **faire l'objet de suivis**, pour affiner les techniques et surtout démontrer scientifiquement le gain écologique produit (ainsi que les gains annexes) ;
- **être conçues comme supports de communication** et servir de base de réflexion à des journées de sensibilisation, de discussion, de colloques et, si possible, être présentées à d'autres élus par ceux du secteur concerné, convaincus du bien-fondé des démarches de restauration entreprises.

Le présent manuel en français, et notamment ses chapitres préliminaires, doivent, nous l'espérons, donner à la fois les arguments pour convaincre et les techniques pour réussir.



BIBLIOGRAPHIE

- ADAM P.**, 2002, *Etude sur les possibilités d'utilisation des techniques douces appliquées à la protection et la réhabilitation des berges de la Seine entre Rouen et Tancarville*, DIREN de Haute-Normandie. **[Génie végétal]**
- ADAM P.**, 2005, *Commune du Landin : travaux de protection du chemin de halage en rive gauche de la Seine en privilégiant les techniques du génie végétal. Rapport de synthèse destiné à la communication*, Conseil Général de l'Eure. **[Génie végétal]**
- ADAM P., DEBIAIS N., GERBER F., LACHAT B.**, A paraître, *Le génie végétal, un manuel technique au service de l'aménagement et la restauration des milieux aquatiques*. Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables. La documentation Française. **[Génie végétal]**
- ADAM P., MALAVOI J.-R., DEBIAIS N.**, 2006, *Retour d'expérience d'opérations de restauration de cours d'eau et de leurs annexes, menées sur le bassin RMC, rapport et annexes*, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse. **[Restauration]**
- ADAM P., FROSSARD P.-A., LACHAT B., MARCAUD R.**, 1994, *Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales*, ministère de l'environnement. **[Génie végétal]**
- ALLION Y., OUVRAY S.**, 1998, *Gestion de la végétation des fonds de vallée ; guide méthodologique*, Agence de l'Eau Loire-Bretagne. **[Entretien]**
- AMOROS C., PETTS G.E.** (OUVRAGE COLLECTIF SOUS LA DIRECTION DE), 1993, *Hydrosystèmes fluviaux*, Masson, Collection d'Ecologie n° 24. **[Ecologie, géomorphologie]**
- BAUTISTA S., ALLOZA J.A., VALLEJO V.R.**, 2004, *Conceptual framework, criteria and methodology for the evaluation of restoration projects. The REACTION approach*, CEE Energy, Environment and Sustainable Development Program, 1998-2002. **[Restauration]**
- BINDER W.**, 1979, *Grundzüge der Gewässerpflege. -Schriftenr. Bayer, Landesamt f. Wasserwirtschaft, H. 10, München*. **[Restauration]**
- BOYER M.**, 1998, *La gestion des boisements de rivières : fascicules 1 et 2*, Bassin Rhône-Méditerranée-Corse. **[Entretien]**
- BRAVARD J.-P., GILVEAR J.**, 1993, *Dynamique fluviale* in C. AMOROS et PETTS G.E. (ed), *Hydrosystèmes fluviaux*, PARIS, Masson, coll. Ecologie, 24. **[Géomorphologie]**
- BROOKES A.**, 1988, *River channelisation*, Wiley. **[Géomorphologie]**
- CALANDRE P., JACONO D.**, 2006, *Protection et gestion des rivières du secteur Seine Aval : Bassin Seine-Normandie*, Agence de l'eau Seine-Normandie. **[Ecologie]**
- CARSIGNOL J. ET AL.**, 2005, *Aménagements et mesures pour la petite faune, guide technique*. SETRA, ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer. **[Faune]**
- CAUDRON D., JOLIMAÎTRE J.-F., WEIL S.**, 2002, *Gestion des cours d'eau de Basse-Normandie*, Cellule d'Assistance Technique à l'Entretien des Rivières (CATER) de Basse-Normandie. **[Entretien]**
- CHANCEREL**, 2003, *Le brochet, biologie et gestion*, CSP, Coll. « Mise au point ». **[Aménagements piscicoles]**
- COMITÉ DES PAYS DE LA LOIRE**, 2004, *Gestion des plantes exotiques envahissantes en cours d'eau et zones humides. Guide technique*, Comité des Pays de la Loire. **[Botanique]**
- CONSEIL SUPÉRIEUR DE LA PÊCHE**, 2005, *Restauration physique des cours d'eau dans le nord-est de la France. Plaquette Gesteau*, CSP. **[Restauration]**
- COWX I.G., WELCOMME R.L.**, 1998, *Rehabilitation of Rivers for Fish*, FAO. **[Restauration piscicole]**
- DEGOUTTE G.**, 2006, *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : hydraulique et morphologie fluviales appliquées*, Lavoisier éd. **[Géomorphologie]**
- DUPIEUX**, 2004, *Elaboration d'un protocole commun de description et de suivi des Annexes Fluviales du programme Loire nature*, Programme Loire nature, mission scientifique. **[Suivi scientifique]**
- FAVRE E.**, 2007, *Les anciens bras fluviaux. Lônes, boires, noues...*, Conservatoire Rhône-Alpes des Espaces naturels. **[Restauration]**
- FEDERAL INTERAGENCY STREAM RESTORATION WORKING GROUP (FISRWG)**, 1998, rev. 2001, *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*, 15 Federal Agencies of the US Government. **[Restauration]**



- FISCHENICH J.C.**, 2003, *Technical Consideration for Evaluating Riverine/Riparian Restoration Projects*, Env. Laboratory. US Army Engineer Research Center. **[Restauration]**
- FOISIL C., DURBEC A., FOUGEIROL D., MICHELOT J.-L., MORAND A.**, 2002, *Les zones humides et la ressource en eau ; guide technique interagences. Etudes sur l'Eau n° 89*, Agence de l'Eau Seine-Normandie. **[Zones humides]**
- FROSSARD P.-A., JUND S., LACHAT B., PAILLARD C.**, 2000, *Guide de gestion de la végétation des bords de cours d'eau*, Agence de l'Eau Rhin-Meuse. **[Entretien]**
- FROSSARD P.-A., LACHAT B., PALTRINIERI L.**, 1998, *D'avantage d'espace pour nos cours d'eau, pour l'homme et la nature. Contributions à la protection de la nature en Suisse, n° 20*, Pro Natura. **[Ecologie / Restauration]**
- GLITZ D.**, 1983, *Künstliche Gerinne. Die Altarme von Morgen, Garten und Landschaft. 2.* **[Restauration]**
- GRAIE**, 1999, *La gestion intégrée des rivières, volumes 1 à 3*, Agences de l'Eau. **[Ecologie]**
- GROSS F., LEPETIT J., NAVROT C.**, 1994, *L'entretien régulier des rivières*, Agence de l'Eau Adour-Garonne. **[Entretien]**
- HANDBUCH WASSER 2**, 1995, *Naturnahe Umgestaltung von Fliessgewässern*, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. **[Restauration]**
- HANDBUCH WASSERBAU**, 1992, *Naturnahe Umgestaltung von Fliessgewässern*, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. **[Restauration]**
- LARINIER M., COURRET D., GOMEZ P.**, 2006, *Guide technique pour la conception des passes naturelles*, GHAAPPE RA 06.05 VI. **[Passes à poissons]**
- LARINIER M., CROZE O.**, 2001, *Libre circulation des poissons migrateurs et seuils en rivière. Guide technique n° 4*, SDAGE Bassin Rhône-Méditerranée-Corse. **[Passes à poissons]**
- LARINIER M., PORCHER J.-P., TRAVADE F. ET GOSSET C.**, 2000, *Passes à poissons; expertise, conception des ouvrages de franchissement*, CSP. Collection « Mise au point ». **[Poissons]**
- LE GAL A., HAURY J., LAFONTAINE L., HUBAUD M.-O.**, 2000, *Entretien des cours d'eau – Rôles de la ripisylve et impacts reconnus de l'entretien des cours d'eau : synthèse bibliographique*, DIREN Bretagne. **[Entretien]**
- LEBRETON M.**, 2004, *Retour d'expériences des travaux de restauration réalisés sur des émissaires agricoles du bassin Rhin-Meuse*, Agence de l'Eau Rhin-Meuse. **[Restauration]**
- LEDARD M., GROSS F., HAURY J., LAFONTAINE L., HUBAUD M.-O., VIGNERON T., DUBOS C., LABAT J.-J., AUBRY M., NIOCHE-SEIGNEURET F., VIENNE L., CRAIPEAU F.**, 2001, *Restauration et entretien des cours d'eau en Bretagne. Guide technique*, DIREN Bretagne et Rivière-Environnement (sarl). **[Entretien]**
- LENORMAND M.**, 1999, *Les petits aménagements piscicoles. Guide technique*, Agence de l'Eau Adour-Garonne. **[Poissons]**
- MALAVOI J.-R.**, 1989, *Typologie des faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques des cours d'eau à haute énergie*, Bulletin Français de la Pêche et Pisciculture. **[Géomorphologie]**
- MALAVOI J.-R., ADAM P.**, 2006, *Préservation et restauration physique des cours d'eau. Aspects techniques*, Techniques, Sciences et Méthodes. **[Restauration]**
- MALAVOI J.-R., ANDRIAMAHEFA H., LECARPENTIER T., DUBAUD N.**, 2006, *Typologie des cours d'eau de Franche-Comté vis-à-vis de leur activité géodynamique potentielle (bases de données Mapinfo)*, DIREN Franche-Comté. **[Géomorphologie]**
- MALAVOI J.-R., BRAVARD J.-P., PIÉGAY H., HEROUIN E., RAMEZ E.**, 1998, *Guide technique SDAGE n° 2 : Méthode de délimitation de l'espace de liberté des cours d'eau*, Agence de l'Eau RMC. **[Géomorphologie]**
- MALAVOI J.-R., MICHELOT J.-L., GENDRAUD N.**, 1999, *Guide technique : Travaux post-crue, bien analyser pour mieux agir*, GRAIE (Groupe de recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau). **[Géomorphologie]**
- MALAVOI J.-R., PARIS P.**, 2003, *Stratégie d'intervention de l'Agence de l'Eau sur les seuils en rivière*, Rapport d'étude. Agence de l'Eau Loire-Bretagne. **[Dysfonctionnements hydromorphologiques]**

- MALAVOI J.-R., SOUCHON Y.**, 2002, *Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière. Clé de détermination qualitative et mesures physiques*, Bulletin Français de la Pêche et Pisciculture. **[Géomorphologie]**
- MICHELOT J.-L.**, 1995, *Gestion patrimoniale des milieux naturels fluviaux. Guide technique*, Réserves Naturelles de France. **[Géomorphologie]**
- MULLER S.**, 2004, *Plantes invasives en France. Etat des connaissances et propositions d'actions. Volume 62 de la collection « Patrimoines Naturels » des publications scientifiques du Museum national d'Histoire Naturelle*, Museum national d'Histoire Naturelle. **[Botanique]**
- PEDROLI B., DE BLUST G., VAN LOOY K., VAN ROOIJ S.**, 2002, *Setting Targets in Strategies for River Restoration*, Landscape Ecology. 17. 5-18. **[Restauration]**
- PIÉGAY H., PAUTOU G., RUFFINONI C.**, 2003, *Les forêts riveraines des cours d'eau ; écologie, fonctions et gestion*, Institut pour le développement forestier. **[Ecologie]**
- RICHARD, A.**, 2000, *La libre circulation des poissons migrateurs sur les rivières de Basse-Normandie*, Conseil Supérieur de la Pêche. **[Poissons]**
- RUTHERFURD I.D., MARSH K.J., MARSH N.**, 2000, *A Rehabilitation Manual for Australian Streams*, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Land and Water Resources Research and Development Corporation. Canberra. **[Restauration]**
- SALDI-CAROMILE K., BATES K., SKIDMORE P., BARENTI J., PINEO D.**, 2004, *Stream Habitat Restoration Guidelines: Final Draft*, Co-published by the Washington Departments of Fish and Wildlife and Ecology and the U.S. Fish and Wildlife Service. Olympia, Washington. **[Restauration]**
- SCHNITZLER-LENOBLE A., CARBIENER R.**, 2007, *Forêts alluviales d'Europe ; écologie, biogéographie, valeur intrinsèque*, Editions TEC et DOC. **[Ecologie, botanique]**
- SHIELDS F.D., COPELAND R.R., KILINGEMAN P.C., DOYLE M.W., SIMON A.**, 2003, *Design for Stream Restoration*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 08, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 08. **[Restauration]**
- SINBIO**, 2003, *Retour d'expérience des travaux réalisés en techniques végétales sur les cours d'eau français*, Agence de l'Eau Rhin-Meuse. **[Génie végétal]**
- THE RIVER RESTORATION CENTER**, 2002, *Manuel of River Restoration Techniques*. RRC, River Restoration Center. Web Edition. **[Restauration]**
- VNF**, Mai 2003, *Guide des techniques végétales*, Département de l'eau et l'environnement. **[Génie végétal]**
- VNF**, 2005, *Restauration et aménagement de berges sur les voies navigables d'Île-de-France. Monter et réussir son projet, guide méthodologique*, VNF direction interrégionale du bassin de la Seine et Agence de l'Eau Seine-Normandie. **[Génie végétal]**
- WAGNER A., WAGNER I.**, 2002, *Flusslandschaft Isar*, Bayerische Landesamt für Umweltschutz. **[Restauration]**
- WASSERWIRTSCHAFT IN BAYERN**, 1989, *Flüsse und Bäche : erhalten, entwickeln, gestalten*, Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. **[Restauration]**
- WASSERWIRTSCHAFT IN BAYERN**, 1997, *Flüsse, Auen, Täler : erhalten und entwickeln*, Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. **[Restauration]**
- WASSON J.G., MALAVOI J.-R., MARIDET L., SOUCHON Y., PAULIN L.**, 1998, *Impacts écologiques de la chenalisation des rivières*, CEMAGREF éd. Coll. « Etudes » : Gestion des milieux aquatiques, n° 14. **[Géomorphologie, écologie]**
- WASSON J.G., CHANDESIS A., PELLA H.**, 2002, *Définition des hydroécorégions de France*, Rapport CEMAGREF. **[Géomorphologie, écologie]**
- ZEH H.**, 2007, *Génie biologique, manuel de construction* (guide publié en 5 langues), Société suisse du génie biologique et Fédération européenne pour le génie biologique. **[Génie biologique]**

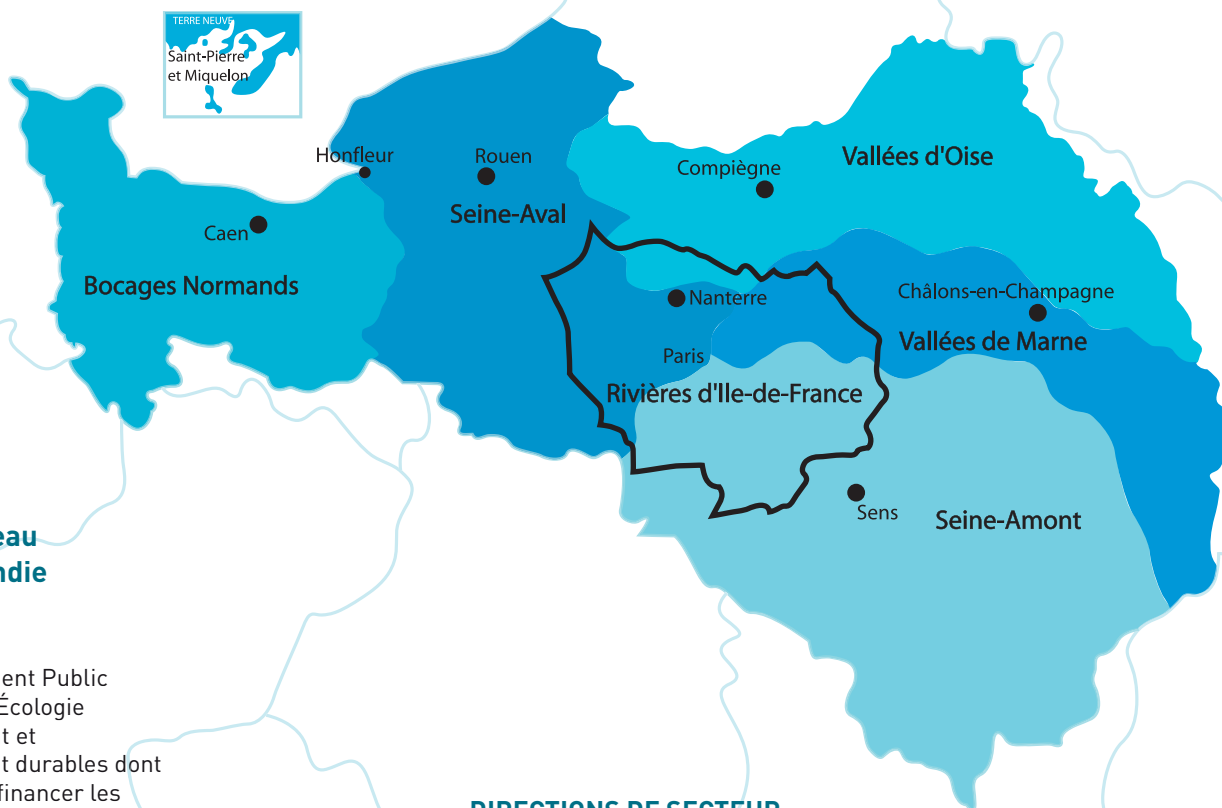


CRÉDIT PHOTOGRAPHIQUE ET ICONOGRAPHIQUE

Photos de la couverture :

Patrick Dieudonné

Figure 1 : photos Malavoi	7
Figure 2 : a) photo Malavoi b), c), et d) photos Biotec e) et f) photos Pro Natura	8
Figure 4 : photos Malavoi	10
Figure 5 : photos Malavoi	11
Figure 8 : photos Biotec et Malavoi	14
Figure 9 : a) photo TP Delémont b) et c) photos Biotec	15
Figure 10 : photos Biotec et Malavoi	15
Figure 12 : photos Biotec	16
Figure 14 : Biotec, Malavoi, 2006	18
Figure 17 : photos Malavoi	25
Figure 18 : photos Biotec	25
Figure 20 : photo Biotec	27
Figure 21 : photo Luc Terraz, photo : DIAE du canton de Genève	27
Figure 25 : photos C. Thévenet	31
Figure 26 : photos Biotec	31
Figure 27 : photos Biotec	32
Figure 28 : photos Biotec	32
Figure 29 : photos Biotec	33
Figure 31 : photo Biotec, photo J. Bertran	35
Figure 32 : photos Malavoi	35
Figure 35 : photos Malavoi	37
Figure 37 : a) photo IGN b) et c) photo Malavoi	40
Figure 39 : la Moselle, photos Malavoi	42
Figure 41 : a) photo L. Sarteau, b) photo Biotec, c) photo Biotec	43
Figure 42 : photos Biotec	44
Figure 43 : photos Biotec	45
Figure 44 : photos Biotec	46
Figure 45 : figure Biotec	47
Figure 46 : figure Biotec	47
Figure 47 : photos Adèle David-Vaudey	48
Figure 48 : photos Biotec	49
Figure 49 : figure Biotec	49
Figure 50 : photo Biotec	50
Figure 51 : figure Biotec	50



L'Agence de l'eau Seine-Normandie

est un Établissement Public
du ministère de l'Écologie
du Développement et
de l'Aménagement durables dont
la mission est de financer les
ouvrages et les actions qui
contribuent à préserver les
ressources en eau et à lutter
contre les pollutions, en
respectant le développement des
activités économiques. Pour ce
faire, elle perçoit des redevances
auprès de l'ensemble des
usagers. Celles-ci sont
redistribuées sous forme
d'avances et de subventions aux
collectivités locales, aux
industriels, aux artisans,
aux agriculteurs ou aux
associations qui entreprennent
des actions de protection du
milieu naturel.

Siège

51, rue Salvador Allende
92027 Nanterre Cedex
Tél : 01 41 20 16 00
Fax : 01 41 20 16 09

www.eau-seine-normandie.fr

DIRECTIONS DE SECTEUR

Bocages Normands

1, rue de la Pompe - BP 70087 - 14203 Hérouville-Saint-Clair Cedex
Tél : 02 31 46 20 20 - Fax : 02 31 46 20 29

Rivières d'Ile-de-France

51, rue Salvador Allende - 92027 Nanterre Cedex
Tél : 01 41 20 16 10 - Fax : 01 41 20 17 01

Seine-Amont

2 bis, rue de l'Ecrivain - 89100 Sens
Tél : 03 86 83 16 50 - Fax : 03 86 95 23 73

Seine-Aval

Hangar C - Espace des Marégraphes - BP 1174 76176 Rouen Cedex 1
Tél : 02 35 63 61 30 - Fax : 02 35 63 61 59

Vallées de Marne

30-32, chaussée du Port - 51035 Châlons-en-Champagne Cedex
Tél : 03 26 66 25 75 - Fax : 03 26 65 59 79

Vallées d'Oise

2, rue du Docteur Guérin - 60200 Compiègne
Tél : 03 44 30 41 00 - Fax : 03 44 30 41 01