HAL
open science

Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, ...) et mieux gérer les formes fluviales

L. Schmidt, J.J. Bravard, F. Rey

To cite this version:

L. Schmidt, J.J. Bravard, F. Rey. Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, ...) et mieux gérer les formes fluviales. Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord), ASTEE, p. 84 - p. 93, 2013. hal-00942298

HAL Id: hal-00942298

https://hal.science/hal-00942298

Submitted on 5 Feb 2014

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

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

Schmidt, L. ; Bravard, J.J. ; Rey, F. (2013) Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, …) et mieux gérer les formes fluviales. In Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord). pp. 84-93

6

MAÎTRISER LES ÉVOLUTIONS DU LIT DES COURS D'EAU (INCISION, ATTERRISSEMENT, …) ET MIEUX GÉRER LES FORMES FLUVIALES

Voir les fiches retours d'expériences se rapportant à cette partie au point 4 du chapitre 4 de l'ouvrage (p. 238 à 261)

1 Contexte et enjeux

1. INTRODUCTION ET RAPPELS DE QUELQUES PRINCIPES DE GÉOMORPHOLOGIE FLUVIALE

Les rapports entre la société et les cours d'eau ont connu une profonde évolution au cours des trois dernières décennies, en rupture avec plusieurs siècles d'une gestion visant à assurer un contrôle sévère des processus naturels. Depuis le XVIIIème siècle au moins, la société occidentale a en effet cherché à maîtriser la dynamique naturelle des rivières et des fleuves pour réduire les débordements, bloquer les déplacements latéraux du chenal, synonymes de perte de terre (mais les gains équivalents sont dans ce cas passés sous silence), favoriser la navigation, etc. (cf. infra). Ces aménagements ont atteint une partie de leurs buts avec une réduction (locale) des inondations et des débits solides associés. Dans les années 1950-1960, ces travaux ont affecté, avec des moyens de plus en plus lourds, des cours d'eau souvent très sollicités pour la fourniture de granulats, dans des régions rurales par ailleurs soumises au remembrement des terres, au drainage et à la disparition des zones humides. Les cours d'eau, maltraités, ont connu, comme des pans entiers du territoire, une remise en question des modes traditionnels de mise en valeur au profit du « déménagement » du territoire, pour paraphraser le titre d'un ouvrage du géographe Maurice Le Lannou. Le mouvement de contestation, né au début des années 1970, s'est amplifié dans la société civile et a gagné les services officiels de la gestion de l'environnement à la fin de la décennie. Des manuels pour techniciens ont fait la promotion de nouvelles pratiques dès le début des années 80 ; l'objectif a été de réduire les aménagements « durs » puis, très vite, de conserver, de restaurer ou de réhabiliter le fonctionnement « naturel » des hydrosystèmes. L'ensemble des acteurs scientifiques, opérationnels et politiques a pris aujourd'hui conscience que les processus hydromorphologiques (transport de la charge de fond, mobilité latérale, etc.) sont bénéfiques pour les rivières et les vallées alluviales et, de manière indirecte, pour la société. Dès le début des années 1990, après la tenue des Assises de l'eau et le vote de la loi sur l'eau de 1992, il est admis qu'il convient de les protéger, de les valoriser et de les gérer durablement.

La gestion environnementale des cours d'eau, conçue dans la perspective de la « durabilité », répond à une demande sociétale croissante, aussi bien sur un plan national (nouvelle Loi sur l'Eau de 2006), européen (Union Européenne, 2000) qu'international (Brierley et Fryirs, 2005, 2008). Ce consensus sociétal est lié au fait que le développement des sociétés est indissociablement lié à l'accès à l'eau (Gentelle, 2003 ; Schneier-Madanes, 2010) et aux multiples services rendus par les hydrosystèmes (ressource alimentaire halieutique, alimentation en eau potable, dimension récréative, en complément d'usages traditionnels tels que la navigation, la production énergétique et l'irrigation).

Les lits fluviaux sont des enveloppes ajustables de façon à optimiser les transferts d'eau et de sédiments, la charge de fond jouant un rôle déterminant en dynamique fluviale.

Schmidt, L. ; Bravard, J.J. ; Rey, F. (2013) Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, …) et mieux gérer les formes fluviales. In Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord). pp. 84-93

Ajustements consécutifs à des évolutions relatives de la charge de fond Q_s et du débit liquide Q

+ : augmentation - : diminution

changements relatifs	plancher alluvial	style fluvial	largeur du chenal	profondeur du chenal	longueur d'onde	sinuosité du chenal	pente du chenal
$Q^- < Q_s^-$	incision	méandrage	-	+	-	-	+
$Q^- > Q_s^-$	accumulat°	méandrage	-	-	-	-	+
$Q^+ < Q_s^+$	incision	tressage	+	+	+	+	-
$Q^+ > Q_s^+$	accumulat°	tressage	+	-	+	+	-

TABLEAU 4 D'APRÈS BRAVARD ET GILVEAR, 1993

La balance de Lane (1955)

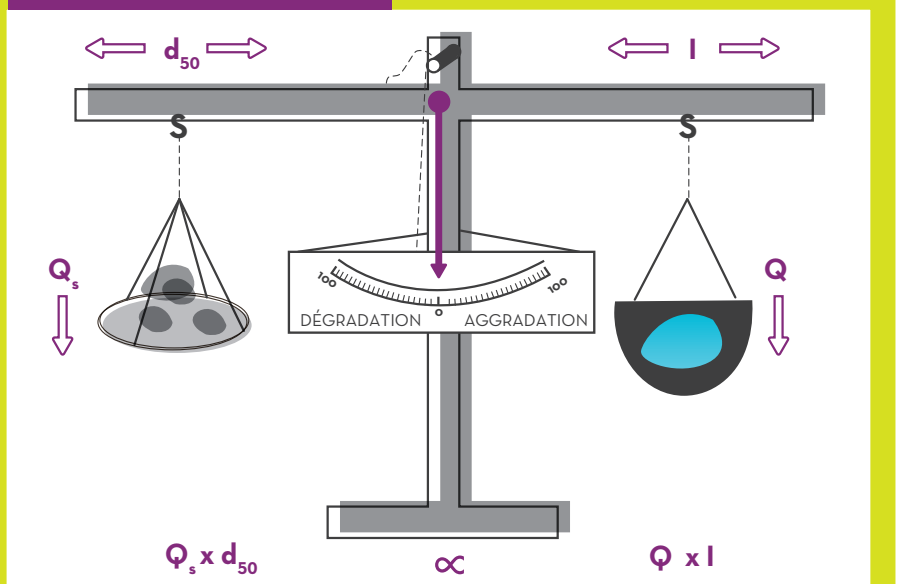

FIGURE 31 D'APRÈS BRAVARD ET GILVEAR, 1993

Les ajustements s'opèrent dans les trois dimensions, de telle sorte que la rivière possède plusieurs degrés de liberté (**TABLEAU 4**), en réponse aux changements dans le temps et l'espace des variables de contrôle qui sont le débit liquide et le débit solide. Ces derniers sont eux-mêmes placés sous le contrôle du bassin versant (relief, géologie, climat, occupation du sol), les variables relatives à ce derniers pouvant varier à l'échelle de temps humaine étant le climat et, surtout, l'occupation du sol (Bravard et Petit, 1997 ; Malavoi et Bravard, 2010). Les processus de dépôt et d'érosion du lit d'un cours d'eau résultent de la recherche d'un équilibre dynamique entre les flux sédimentaires et les flux hydriques. Ce principe est bien décrit par la balance de Lane (1955) (voir **FIGURE 31**). Un tronçon de cours d'eau stable est un système pour lequel la puissance des écoulements, contrôlée par le débit liquide (Q) en période de crue et la pente (I), est compensée par la dissipation d'énergie occasionnée par le transport de la charge solide (Q_s) et la taille des sédiments (d_{50}). La réponse du cours d'eau à un éventuel déséquilibre de la balance se traduit par un phénomène d'exhaussement ou de d'incision du lit.

Schmidt, L. ; Bravard, J.J. ; Rey, F. (2013) Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, …) et mieux gérer les formes fluviales. In Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord). pp. 84-93

2. L'HYDROMORPHOLOGIE, CLÉ DE VOÛTE DES ÉCOSYSTÈMES AQUATIQUES ET RIVERAINS ET DE LEURS FONCTIONS

Il est aujourd'hui largement connu que l'hydromorphologie contrôle fortement les structures et fonctionnements des habitats physiques aquatiques et riverains, donc la biodiversité et les fonctions des hydrosystèmes (par exemple Brierley et Fryirs, 2008 ; Schmitt *et al.*, 2011). Le concept d'hydrosystème fluvial prend en considération, de façon interdisciplinaire, les processus morphodynamiques et écologiques dans les dimensions longitudinales, transversales, verticales (échanges entre le lit mineur et son substrat alluvial), le tout dans la quatrième dimension qui est le temps (ou les temps), de l'épisode de crue à de séquences pluri-séculaires pouvant présenter des styles fluviaux différents.

Les liens étroits entre hydromorphologie et écologie concernent aussi bien le lit mineur (granulométrie, faciès d'écoulement, bancs plus ou moins végétalisés, etc.), les berges (selon les pentes) et le lit majeur (annexes hydrauliques, forêts riveraines, etc.) (**FIGURE 32**, Amoros et Petts, 1993). Les liens entre la mobilité latérale des chenaux et la mosaïque des habitats et biocénoses (différents stades de successions végétales par exemples) sont particulièrement marquants. La stabilité de l'ensemble est étroitement liée aux « instabilités locales » (processus d'érosion/dépôt), garantes de la complexité et de la richesse de l'hydrosystème.

De fait, l'hydromorphologie tient une place de plus en plus centrale dans les programmes de préservation et restauration/réhabilitation des hydrosystèmes fluviaux, dans une perspective durable (Downs et Gregory, 2004).

ILLUSTRATION DU CONCEPT D'HYDROSYSTÈME FLUVIAL ET DE SES ÉCHELLES SPATIALES.
a. Schéma des flux bidirectionnels selon les dimensions transversale et verticale. b. Schéma d'un hydrosystème fluvial, comprenant différents secteurs fonctionnels, au sein de son bassin versant. c. Schéma des ensembles et unités fonctionnels au sein d'un secteur fonctionnel, ici un méandre

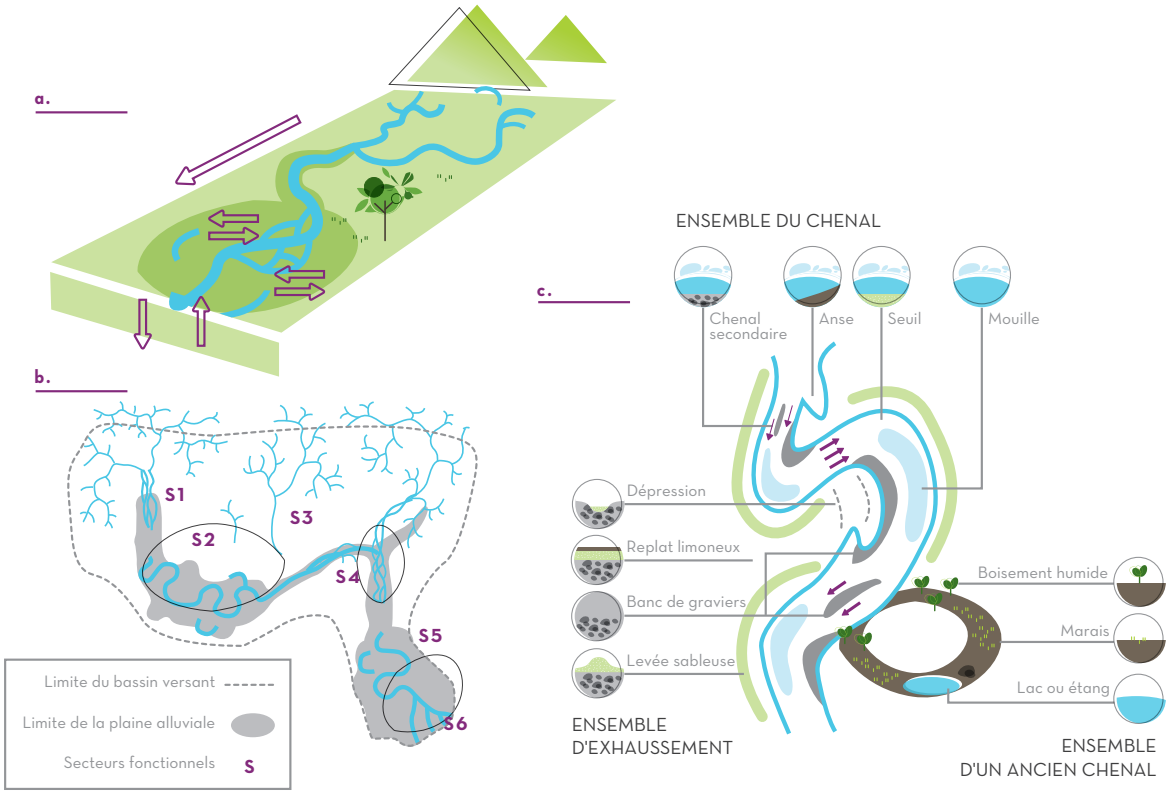

FIGURE 32 D'APRÈS AMOROS ET PETTS, 1993

Schmidt, L. ; Bravard, J.J. ; Rey, F. (2013) Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, …) et mieux gérer les formes fluviales. In Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord). pp. 84-93

Il est indispensable de dépasser les approches locales et d'intégrer les projets dans une analyse spatiale élargie, à l'échelle d'un tronçon de plus grande dimension ou, mieux encore à l'échelle du bassin versant.

3. DES HYDROSYSTÈMES SOUS CONTRÔLE ANTHROPIQUE

Depuis le Néolithique, que ce soit aux échelles des bassins versants (défrichements, gestion forestière, agriculture, etc.), des lits majeurs (irrigation, protection contre les crues, etc.) ou des lits mineurs (stabilisation des berges), la dynamique des systèmes fluviaux est contrôlée par la société à des degrés divers (voir par exemple Bravard et Salvador, 2009). Les hydrosystèmes d'Europe peuvent ainsi être considérés comme des « anthroposystèmes », les composantes humaines et naturelles interagissant et co-évoluant depuis des siècles voire des millénaires, selon des modalités et des rythmes variés, souvent complexes, et dans des spatialités diverses (voir par exemple Gunnell, 2009). Néanmoins, la pression anthropique sur les hydrosystèmes n'a cessé de croître (cf. supra), avec des endiguements, des stabilisations de berges, des rectifications, des constructions de retenues, des extractions de granulat dans les lits mineurs et majeurs, des canalisations et chenalisations, des changements d'occupation du sol (dont l'imperméabilisation due à l'étalement urbain), et des pratiques culturales (voir par exemple United Nations, 2007).
Si l'on considère, comme l'énoncent Tricart et Kilian (1979), qu'un « … aménagement consiste à infléchir ou à remplacer par une autre une dynamique existante », on constate que la plupart des aménagements hydrauliques ont largement modifié les dynamiques hydromorphologiques et écologiques des hydrosystèmes, ainsi que leurs fonctions écologiques et les services rendus à la société. Parmi les impacts, citons la contraction des zones inondables, l'accélération des ondes de crue, l'incision des lits et l'enfoncement corrélatif des niveaux piézométriques, l'augmentation de l'aléa inondation en aval des zones aménagées et/ou incisées, la stabilisation des formes fluviales, la pollution des eaux, le non renouvellement et donc le vieillissement des successions écologiques, l'altération de la biodiversité, etc. (Voir par exemple Piégay et Stroffek, 2000). L'ampleur des impacts anthropiques amène à considérer que les milieux fluviaux sont parmi les écosystèmes les plus dégradés au monde, notamment dans les pays industrialisés et/ou fortement peuplés (Rapport *et al.*, 1998).

2 Grands principes à appliquer

Il ne s'agit plus de décrire des processus localisés et de « corriger » les rivières par rapport à une norme communément admise. A la conception « carcérale » qui dominait naguère a succédé une conception dynamique basée sur les principes suivants : (i) intégration des cours d'eau dans leur bassin versant, au sens où l'eau, les sédiments et les solutés transitent en direction des grands axes de drainage, (ii) interprétation des formes fluviales au filtre des « processus-réponses » (Schumm, 1977) et (iii) « liberté » des processus et des réponses dans les différentes dimensions de l'espace, les variations de flux d'eau et de matière provoquant des modifications de l'enveloppe fluviale de nature déterministe, au point que les styles fluviaux, et plus généralement les formes fluviales, sont eux-mêmes considérés comme des réponses de variables « internes » au jeu de variables « externes » (climat, occupation du sol du bassin, etc.), d'où une grande diversité de formes et processus fluviaux (Schmitt *et al.*, 2007).

1. INSCRIRE LE PROJET DANS UNE POLITIQUE TERRITORIALE ET LE TRAITER AUX BONNES ÉCHELLES SPATIALES

Il est indispensable de dépasser les approches locales et d'intégrer les projets dans une analyse spatiale élargie, à l'échelle d'un tronçon de plus grande dimension ou, mieux encore à l'échelle du bassin versant, laquelle représente un échelle fondamentale car c'est à ce niveau qu'agissent les variables de contrôle de la dynamique fluviale : évolution de l'occupation du sol modifiant les flux hydriques et la fourniture sédimentaire aux chenaux à l'origine des ajustements morphologiques (sédimentation lorsque la fourniture sédimentaire dépasse la capacité de transport, incision dans le cas contraire).
Il est aussi important de tenir compte du fait que toute intervention sur un tronçon de la rivière est susceptible d'avoir des répercussions morpho-sédimentaires à l'amont et à l'aval des opérations réalisées.

Schmidt, L. ; Bravard, J.J. ; Rey, F. (2013) Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, …) et mieux gérer les formes fluviales. In Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord). pp. 84-93

2. S'INSPIRER DES MÉCANISMES NATURELS

Sur un territoire donné où un cours d'eau et/ou ses annexes sont à réhabiliter, plusieurs objectifs de restauration physique des milieux sont possibles :

- rétablir un espace de liberté si l'énergie le permet et si la mobilité latérale constitue un processus important du chenal considéré. En principe les chenaux dont la puissance spécifique à pleins bords dépasse environ 35 W/m^2 ont la capacité de se réajuster spontanément après un aménagement, si celui-ci n'est pas trop « dur » ;
- restaurer une dynamique sédimentaire. De nombreux lits connaissent aujourd'hui un déficit, qui entraîne une tendance à l'incision. Des recharges sédimentaires peuvent alors être effectuées, de façon artificielle, ou naturellement par des apports issus des versants (glissement de terrain) ou par le destockage sédimentaire induit par la mobilité latérale ;
- reconnecter le lit mineur avec le lit majeur pour écrêter les crues, restaurer des annexes hydrauliques, renforcer les échanges nappe-rivière et recouvrer la biodiversité du chenal, des berges et de la plaine inondable.

3. PRENDRE EN COMPTE LE TEMPS POUR LA DURABILITÉ DES ACTIONS

La durabilité des fonctions écologiques des hydrosystèmes est d'autant mieux assurée que ces dernières peuvent se maintenir de façon autonome ou s'auto-entretenir, en incorporant des interventions humaines les moins importantes et fréquentes possibles. Les actions d'ingénierie écologique doivent donc intégrer la nécessité de prendre en compte la dimension temporelle, à court, moyen et long termes (Jollivet, 2001). Sur un plan géomorphologique, cela amène à interroger les évolutions passées des hydrosystèmes ou leurs trajectoires temporelles de façon à mettre en évidence les conditions de durabilité du passé, les conditions de réaction, de relaxation, de récupération et de résilience, ainsi que les seuils de rupture. Il s'agit finalement d'en déduire, en utilisant des modèles prospectifs, des tendances évolutives qui concernent les fonctions des hydrosystèmes et les variables de contrôle correspondantes (hydro-climatologie, occupation du sol, fourniture sédimentaire des bassins versants, etc.)(par exemple Dufour et Piégay, 2009).

Lien entre les fluctuations climatiques, les flux hydriques et minéraux et l'activité morphodynamique depuis le premier Âge du Fer (bassin du Rhône moyen)

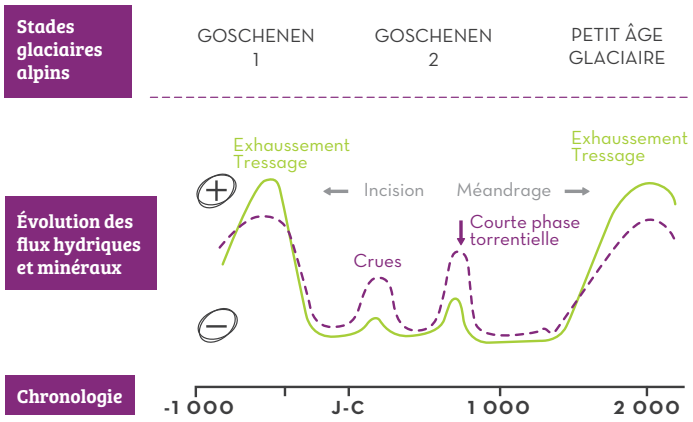

FIGURE 33 D'APRÈS BRAVARD ET PETIT, 1997

Schmidt, L. ; Bravard, J.J. ; Rey, F. (2013) Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, …) et mieux gérer les formes fluviales. In Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord). pp. 84-93

4. MINIMISER LES INTERVENTIONS D'ENTRETIEN LOURDES ET COÛTEUSES

La notion de durabilité est sous-tendue par la question des moyens financiers à mobiliser pour atteindre les objectifs ciblés, ce qui renvoie à la question des bilans coûts-bénéfices qui peuvent être réalisés et qui requièrent des études économiques (voir par exemple Piégay *et al.*, 2008). Pour que ces bilans soient les plus positifs possibles, il paraît préférable de viser l'auto-entretien (ou « l'auto-restauration ») des hydrosystèmes (Downs et Gregory, 2004 ; Wohl *et al.*, 2005), avec le moins d'interventions humaines possibles. Mais même dans ce cas, les fonctions écologiques sont sujettes à des variations temporelles plus ou moins importantes, du fait de ruptures de seuils liées la variabilité temporelle des hydrosystèmes qui leur est propre.

5. INTÉGRER LE SUIVI DE PERFORMANCE DÈS LE DÉBUT DE L'OPÉRATION

Toute opération d'ingénierie écologique, et a fortiori de restauration ou de réhabilitation, devrait s'accompagner d'un suivi environnemental pour vérifier que les objectifs ont bien été atteints, et si ce n'est pas le cas, pour diagnostiquer les causes de l'échec. Bien entendu, le suivi post-restauration n'a de sens que s'il est précédé d'un état initial pré-restauration. En outre, il semble important que ce suivi ne concerne pas des métriques d'état, mais de fonctionnement ou de dynamiques hydromorphologiques et écologiques. Enfin, la diversité des échelles de temps à considérer, et en particulier le besoin de prendre en compte les moyens et longs termes, impose de mettre en œuvre des outils de suivi sur les mêmes temporalités. La notion d'observatoires des milieux aquatiques prend ici tout son sens.

La question des effacements d'ouvrage (barrages, seuils, etc.), très présente dans les réflexions sur le retour au bon état écologique, va probablement être au centre de beaucoup de projets dans les années à venir.

3 Outils et réalisation

Une action d'ingénierie écologique visant à agir sur le lit d'une rivière peut poursuivre différents objectifs [15] :

- la simple protection des berges et les techniques douces, de type « génie végétal » étant substituées aux techniques dures de type enrochement ; le génie végétal améliore en particulier l'esthétique des berges mais peut ne pas être compatible avec l'amélioration souhaitable du fonctionnement de l'hydrosystème ;
- la restauration ou la réhabilitation d'écosystèmes, de communautés, d'espèces ;
- la production d'écosystèmes nouveaux (ou « création », cf. infra), durables (ou du moins les plus durables possibles), qui contribuent à maintenir une biodiversité élevée et dont les fonctions sont utiles à l'homme ;
- l'élaboration d'outils biotiques pour retrouver ou optimiser des services écologiques (dépollution, etc.).

La question des effacements d'ouvrage (barrages, seuils, etc.), très présente dans les réflexions sur le retour au bon état écologique, va probablement être au centre de beaucoup de projets dans les années à venir. Nous illustrons la problématique par deux exemples : le contrôle de l'équilibre sédimentaire des rivières et la stabilité des berges.

1. GESTION MORPHO-SÉDIMENTAIRE DES RIVIÈRES

A l'échelle du territoire national français, les problèmes à résoudre sont variés et les solutions doivent être adaptées à chaque cas. Par exemple, dans les bassins versants comme celui de la Durance, la tendance est à l'exhaussement du lit des rivières en raison d'un excès de charge solide fine, avec pour conséquence une augmentation du risque d'inondation (Balland *et al.*, 2002). Mais à l'inverse, dans les bassins versants de beaucoup d'autres rivières comme par exemple la Drôme, l'Ain ou la Moselle, on constate un déficit de charge solide grossière avec pour conséquence l'incision du fond du lit des rivières, pouvant entraîner le déchaussement des piles de pont (**FIGURE 35**), des pertes en ressource en eau souterraine, etc. (Piégay *et al.*, 2004 ; Liébault *et al.*, 2005).

[15] *http://www.cnrs.fr*

Schmidt, L. ; Bravard, J.J. ; Rey, F. (2013) Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, …) et mieux gérer les formes fluviales. In Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord). pp. 84-93

Comme nous l'avons vu, la couverture végétale des bassins versants est un facteur de contrôle important à l'origine de la recharge sédimentaire des rivières. Ainsi, lorsqu'il y a excès de charge solide fine, on cherche à lutter contre l'érosion des versants et des berges par des techniques de génie végétal. En situation de déficit de charge solide grossière, on tente à l'inverse de réactiver le transport solide en supprimant la couverture végétale (Pont *et al.*, 2009), en laissant se développer des glissements de terrain jusqu'au cours d'eau (Bravard *et al.*, 1999), voire en procédant à des recharges sédimentaires artificielles (Rollet *et al.*, in press). Parfois, ces deux situations peuvent cohabiter au sein du bassin versant d'une même rivière.

Comme nous l'avons vu, l'érosion latérale des alluvions récentes et/ou quaternaires stockées dans le fond de vallée représente le principal mode de recharge sédimentaire naturel des rivières alluviales. Dans de nombreux cas, les gestionnaires cherchent aujourd'hui à redonner à la rivière un « espace de liberté » lui permettant d'effectuer ces translations latérales, selon une approche méthodologique relativement bien cadrée (Malavoi, 1998 ; Bravard, 2011), même si des adaptations locales sont fréquentes.

Il est également important de préserver, voire recouvrer dans de nombreux cas, la continuité longitudinale de la charge de fond. Les éléments entravant celle-ci sont essentiellement les curages, barrages et seuils et d'anciennes extractions en lit mineur. Des arasements/effacements de seuils, des transferts artificiels, des chasses en aval des retenues, etc., sont fréquemment effectués (Malavoi *et al.*, 2011).

La méthode de détermination de l'espace de liberté des cours d'eau repose notamment sur la délimitation de l'espace de divagation historique, à partir de cartes anciennes et de photographies aériennes. Ici l'exemple de l'Allier à Toulon sur Allier

FIGURE 34

© IGN-PARIS 1998. LE TRACÉ BLEU EST DE 1946.

Schmidt, L. ; Bravard, J.J. ; Rey, F. (2013) Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, …) et mieux gérer les formes fluviales. In Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord). pp. 84-93

2. LE GÉNIE VÉGÉTAL ET LA STABILITÉ DES BERGES ET DES VERSANTS

Le génie végétal (ou génie biologique) regroupe des techniques variées faisant appel aux propriétés mécaniques et biologiques des végétaux pour la gestion des phénomènes érosifs et la stabilité des pentes et des berges (AGéBio, 2012). Même si, comme nous l'avons vu, l'érosion des berges est un processus important du fonctionnement hydromorphologique d'une rivière alluviale qu'il convient de préserver, il est nécessaire de lutter contre les sapements quand ils menacent des zones à forts enjeux (habitations, voies de communication, etc.). Quand cela est possible, les techniques de protection végétale des berges sont alors à préférer aux enrochements.

Le génie végétal regroupe des techniques variées faisant appel aux propriétés mécaniques et biologiques des végétaux.

Le génie végétal fait appel à l'utilisation de matériel végétal sous la forme de semences, de boutures ou de plants. On trouve ainsi des techniques d'ensemencement par projection hydraulique, de fascines, de cordons, de clayonnages, de garnissages ou encore de palissades. Ces différents ouvrages présentent des fonctions diverses selon leur structure et leur composition végétale (matériel végétal, espèces). Certains ont un rôle plutôt tourné vers la stabilisation : ils ont alors une forme de seuil et permettent de casser la pente du substrat ou du lit érodé ou instable. Les fascines, les clayonnages et les caissons végétalisés par exemple, rentrent dans cette catégorie. D'autres ouvrages ne remplissent pas cette fonction de stabilisation et sont surtout destinés à installer une couverture végétale appuyée sur des plançons, ainsi que les cordons, assurent de telles fonctions.

En terme de conception, le choix de la bonne technique et sa bonne mise en œuvre passent par une phase de diagnostic, au cours de laquelle il convient de déterminer et localiser les enjeux, qu'ils soient écologiques (l'ingénierie écologique est alors mise en œuvre pour le vivant), ou bien sociaux et économiques (l'ingénierie écologique est alors mise en œuvre par le vivant) (Rey, 2011). Vient ensuite la phase de caractérisation et de cartographie du processus ou du phénomène que l'on souhaite gérer. A ce stade, une caractérisation et une cartographie de la végétation, à l'échelle spatiale intéressant ce processus ou phénomène (de l'échelle locale à celle du bassin versant), doivent permettre de déterminer son influence et la nécessité ou non de la gérer.

Les stratégies d'intervention vont alors consister à (Adam *et al.*, 2008 ; Rey, 2011) :

- **déterminer le type de couverture végétale recherchée, en fonction de la finalité de l'intervention.** Les objectifs d'une intervention par génie biologique peuvent correspondre à plusieurs finalités qui, d'un point de vue écologique, peuvent correspondre à la restauration du milieu érodé, à sa réhabilitation ou encore à sa réaffectation. La couverture végétale à installer pourra alors être de différente nature (pelouse, lande, forêt) afin de répondre à cette finalité.
- **définir des zones d'interventions prioritaires à différentes échelles spatiales.** Lorsque les surfaces à traiter sont importantes, en contexte torrentiel par exemple, il peut être nécessaire de définir des priorités d'intervention, afin d'orienter les moyens financiers mis à disposition des gestionnaires vers des priorités hiérarchisées.
- **choisir les bons ouvrages et les espèces végétales adaptées.** Les ouvrages, mettant en jeu différentes espèces végétales, doivent remplir deux fonctions :
  - résister aux contraintes climatiques, hydrologiques (ou encore gravitaires) lors des épisodes de sécheresse ou de pluies (crues) ;
  - protéger ou stabiliser les berges, grâce à leurs systèmes racinaires ou à leurs parties aériennes assurant différents rôles (stabilisation, piégeage de matériaux).
- **installer les ouvrages de génie végétal dans l'espace et dans le temps, sur une certaine surface d'intervention et à des endroits précis** (haut ou bas de berge par exemple). La stratégie globale d'installation des ouvrages dans l'espace et dans le temps doit répondre aux contraintes et aux exigences d'ordres technique et écologique. Par exemple, la hauteur sur laquelle un talus ou une berge doit faire l'objet d'une végétalisation, doit se baser sur des paramètres hydrauliques et hydrologiques liés aux crues et à leur fréquence de retour.

Schmidt, L. ; Bravard, J.J. ; Rey, F. (2013) Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, …) et mieux gérer les formes fluviales. In Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord). pp. 84-93

Exemple de déstabilisation d'un pont par l'incision d'une rivière alluviale : la Moselle à Bainville-aux-Miroirs

FIGURE 35

L'érosion latérale, un processus fondamental pour l'équilibre morpho-sédimentaire d'une rivière alluviale (la Moselle à Mangonville)

FIGURE 36

4 Perspectives et freins

Une expérience est capitalisée depuis une trentaine d'années grâce au croisement et au retour d'expériences nationales et internationales. Parmi les acquis, retenons :

- L'importance d'agir directement sur les variables de contrôle du système et non pas sur les variables d'ajustement (ou de réponse) à l'échelle des formes.
- L'importance de réaliser une étude du fonctionnement initial du milieu. Cela peut inclure une étude historique basée sur des cartes, des photographies, des données sédimentologiques en lit mineur et/ou lit majeur, etc., afin de connaître la trajectoire temporelle du système et sa sensibilité aux perturbations. Dans certains cas, l'étude historique montrera qu'il est préférable de ne pas viser un fonctionnement antérieur, aujourd'hui inatteignable (par exemple du fait de la présence de grands aménagements hydrauliques), mais plutôt une nouvelle dynamique correspondant à la fois à des fonctions ciblées et aux capacités du système. Cette dernière condition doit permettre au système de s'auto-réguler durablement.
- L'importance de ne pas viser systématiquement le bon état, mais plutôt un bon fonctionnement. Ce dernier est souvent acquis en restaurant la continuité et la mobilité longitudinale des flux ainsi que la mobilité latérale du chenal (migration latérale, capacité de défluviation, etc.). C'est la capacité du système à s'autoréguler, c'est-à-dire à connaître la réversibilité des processus et des paysages en réponse à des variables exogènes.
- L'importance des suivis post-travaux dans les milieux restaurés, qui sont basés sur des métriques permettant de mesurer l'évolution de variables à partir de l'état initial, c'est-à-dire la dynamique après restauration.
- L'intérêt d'études comparatives avec des milieux peu impactés (références spatiales) et des milieux non restaurés pour permettre l'estimation des bénéfices tirés de la restauration.
- Les suivis longitudinaux et comparatifs permettent seuls de confirmer le caractère durable des opérations entreprises. Les démarches « adaptatives » garantissent un ajustement des moyens à la cible lorsque l'évolution s'éloigne de la trajectoire souhaitée.

Schmidt, L. ; Bravard, J.J. ; Rey, F. (2013) Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, …) et mieux gérer les formes fluviales. In Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord). pp. 84-93

L'ingénierie écologique évolue des pratiques « douces », en vigueur dans les années 80, vers des conceptions prenant en compte le bassin versant.

Les acteurs s'accordent généralement sur la mise en œuvre de ces principes, mais dans la pratique ces derniers sont loin d'être toujours mis en œuvre.

Il reste encore beaucoup à réaliser et d'expériences à accumuler et à formaliser pour dégager une méthodologie (ou sans doute plutôt « des méthodologies », en fonction des contextes géographiques et des types d'anthropisation) affirmée(s) et reconnue(s) de la restauration des hydrosystèmes fluviaux.

Différents domaines où les besoins d'investissement et de recherche se font le plus sentir peuvent être identifiés.

- Les connaissances sur le charriage, et plus généralement sur le transport sédimentaire, à divers pas de temps, sont encore insuffisantes. Or, les transferts sédimentaires, de l'échelle spatiale du tronçon jusqu'à celle du bassin, représentent un aspect important pour le succès des opérations de gestion.
- Les modèles prospectifs sont encore peu précis car les hydrosystèmes sont sujets à une forte variabilité, tant sont nombreuses les combinaisons entre facteurs de contrôle, aux différentes échelles spatiales (poids des héritages géomorphologiques inclus).
- Les modèles des réponses écologiques aux modifications géomorphologiques sont aussi encore insuffisamment robustes.
- L'évolution holocène des systèmes fluviaux et de leurs interactions avec les sociétés du passé est un héritage lointain, mais constitue une composante importante du patrimoine du cours d'eau et de sa plaine. Les conditions d'équilibre, les seuils (au sens de limite au-delà desquelles le système peut connaître une rupture), les formes d'ajustement et les spatialités de ces capacités d'ajustements font l'objet de recherches actuelles. Ce que l'on peut apprendre du passé est un champ à peine exploré et riche de promesses. Plus précisément, existe-t-il une géographie des trajectoires temporelles ? Sera-t-il possible de proposer des modèles régionaux d'évolution des hydrosystèmes et des formes d'action pour obtenir le succès d'opérations de restauration, par exemple à l'échelle de territoires apparentés aux hydroécorégions ?
- Quelle est la géographie de la sensibilité des systèmes fluviaux aux pressions anthropiques sachant qu'un des facteurs déterminants est, avec la charge de fond, l'énergie mise en jeu pendant les crues ?
- Quelles sont les durées de vie des opérations de réhabilitation et de restauration dans les milieux naturels dotés d'une dynamique faible, moyenne ou forte ?

Les Trente Glorieuses ont été une période capitale pour la relance de l'économie française après les années de la Dépression et de la guerre. En contrepartie elles ont eu la caractéristique d'imposer un modèle de développement irrespectueux des lieux de notre territoire. Le paysage rural de la France a subi des traumatismes violents au nom du progrès économique. C'est la multiplication des usages et des conflits qui, au début des années 80, a fait prendre conscience de la nécessité de faire cesser la dégradation des rivières, puis, dans un deuxième temps, de gérer de manière plus respectueuse des équilibres, enfin, à partir des années 2000 de maintenir ou de recréer un « bon état » et un « bon fonctionnement », seuls garants de la pérennité des services rendus par les milieux aquatiques. Le multi-usages, qui est la quête du maximum d'aménités aux dépens de milieux trop sollicités, a des vertus quand il est bien géré, mais lorsque des seuils d'utilisation raisonnable sont franchis, il est susceptible de rendre plus difficile le maintien des fonctions essentielles.

L'ingénierie écologique donc évolue des pratiques « douces », et souvent locales en vigueur dans les années 80, vers des conceptions plus ambitieuses prenant en compte le bassin versant, les réponses complexes à l'échelle des tronçons ainsi que les écosystèmes aquatiques et terrestres. Dans l'interdisciplinarité, qui a été forgée il y a 30 ans dans divers bassins, et où l'hydrmorphologie joue un rôle central, les disciplines se rejoignent dans une pratique cohérente, adaptée au contexte écogéographique, et durable.