

Partie I



Principes d'aménagement des cours d'eau

1. **Introduction**
2. **Fonctionnement des cours d'eau de montagne**
3. **Génie végétal en montagne**
4. **Pourquoi, quand et comment protéger ?**
5. **Conclusion : du bon usage du génie végétal**

Nicolas Valé, André Evette, Frédéric Liébault, Caroline Zanetti, Fabien Espinasse,
Jean-Baptiste Barré, Patrice Mériaux, Michel Vennetier, Paul Cavallé, Camille Lannes

Génie Végétal en rivière de montagne

1. Introduction

L'atteinte du bon état écologique, objectif fixé par la Directive cadre européenne sur l'eau (DCE) du 23 octobre 2000, nécessite une gestion globale de l'eau et des milieux aquatiques à l'échelle d'un territoire cohérent : **le bassin versant**. Une gestion globale, cohérente et concertée consiste à rechercher la conciliation entre l'ensemble des enjeux du territoire.

L'évaluation de la qualité des cours d'eau français (Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement – MEDDTL 2005) fait ressortir que près de 50 % des masses d'eau de surface du territoire métropolitain risquent de ne pas atteindre le bon état écologique en 2015 en raison, notamment, d'un mauvais fonctionnement hydromorphologique. Le rapport annuel 2010 de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse (AERM&C) fait en effet ressortir que « la dégradation morphologique des cours d'eau » constitue l'un des deux principaux enjeux de l'état des eaux (AERM&C 2011).

Définition du bon état écologique :

L'état écologique d'une masse d'eau de surface résulte de l'appréciation de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques associés à cette masse d'eau. Il est déterminé à l'aide d'éléments de qualité : biologiques (espèces végétales et animales) et physico-chimiques, appréciés par des indicateurs (par exemple les indices invertébrés ou poissons en cours d'eau). Pour chaque type de masse d'eau (par exemple : petit cours d'eau de montagne, lac peu profond de plaine, côte vaseuse, etc.), il se caractérise par un écart aux « conditions de référence » de ce type, qui est désigné par l'une des cinq classes suivantes : très bon, bon, moyen, médiocre et mauvais. Les conditions de référence d'un type de masse d'eau sont les conditions représentatives d'une eau de surface de ce type, pas ou très peu influencée par l'activité humaine.

En Suisse, on considère qu'environ 48 % des cours d'eau sont dans un mauvais état et que 22 % du réseau hydrographique est fortement modifié par les interventions humaines (Office fédéral de l'environnement – OFEV 2011). Ces chiffres atteignent près de 80 % en zone habitée (Institut fédéral suisse de recherche sur les sciences et technologies de l'eau – EAWAG 2010). L'OFEV estime ainsi nécessaire d'engager une politique de revitalisation pour près de 11 000 km de cours d'eau en Suisse.

Au sortir de près d'un siècle de dégradations physiques diverses issues des activités humaines, les cours d'eau français, suisses et, plus largement, européens subissent des dysfonctionnements graves et parfois irréversibles (incision généralisée des lits fluviaux, dégradation de la qualité des eaux, disparition d'habitats et d'espèces, etc.) qui impactent en retour les activités humaines (diminution des ressources en eau disponibles, déchaussement d'ouvrages d'art, etc.).

Avec les travaux de chenalisation des cours d'eau, d'extraction dans le lit mineur ou encore de blocage de la dynamique latérale du lit, le déficit sédimentaire de la plupart des cours d'eau français et suisses est indéniable et inquiétant. Dans ce cadre, il s'avère aujourd'hui indispensable de rétablir un transport de matériaux solides en quantité suffisante au sein de nos fleuves et rivières.

Il est par conséquent nécessaire, dans la mesure du possible, de conserver des zones de mobilité pour les cours d'eau au sein du corridor fluvial afin d'assurer la remobilisation du stock sédimentaire en place et de restaurer un « bon fonctionnement » de nos rivières, tant sur le plan géomorphologique qu'écologique.

Toutefois, compte tenu des différents enjeux socio-économiques en présence, il est également important de protéger certains secteurs contre l'érosion.

1.1. Contexte et enjeux en présence

1.1.1. Protection des biens et des personnes ou préservation de l'espace de mobilité des cours d'eau ?

Le transport solide constitue un élément fondamental de l'équilibre de l'hydrosystème fluvial et participe largement au bon état des cours d'eau. Lorsque la quantité de matériaux solides charriée par le cours d'eau est inférieure à sa capacité de charriage, celui-ci a tendance à éroder les berges afin de se réapprovisionner en charge solide (fig. 1).

À défaut (protection de berges trop importante, absence de zones d'apports suffisants, etc.), le cours d'eau érode le fond de son lit. Il en résulte alors un enfoncement du lit mineur dont les conséquences sont particulièrement préoccupantes :

- accroissement de l'érosion des berges ;
- déchaussement d'ouvrages de franchissement (ponts, passerelles, etc. – fig. 2) ou de protection (digues notamment) ;
- diminution de la ressource en eau disponible ;
- perte de la dynamique alluviale entraînant la modification des peuplements végétaux riverains ;
- perte de biodiversité par déconnexion des milieux annexes au cours d'eau (connectivité) et création de discontinuités longitudinales.

L'incision généralisée des cours d'eau européens, observée depuis plusieurs décennies, nuit fortement au bon fonctionnement de l'hydrosystème et à la qualité des milieux aquatiques. La ressource en eau et la biodiversité s'en trouvent particulièrement affectées. Il convient donc de **faciliter la reconquête d'un espace de mobilité des cours d'eau** (ou de bon fonctionnement) **afin de favoriser l'apport de charge solide et, indirectement, atteindre le « bon état écologique ».**

Au-delà de ce cadre général, il convient **d'aborder cette problématique de manière globale** et de **mettre en parallèle les avantages et inconvénients de la restauration d'un cours d'eau et de son espace de mobilité, avec les coûts engendrés directement et indirectement.** Il est ainsi parfois préférable de sauvegarder certains enjeux socio-économiques en place qui présentent une importance particulière (captages d'eau potable, voies de communication principales, zones urbanisées, etc.) et dont le déplacement coûterait bien davantage que les bénéfices socio-économiques obtenus par la restauration de l'espace de mobilité du cours d'eau sur le secteur. **Il s'agit donc de préserver la sécurité des biens et des personnes face au risque d'érosion des berges de cours d'eau par la protection de certains secteurs contre l'érosion.**

La maîtrise de l'érosion constitue donc un défi majeur pour les pouvoirs publics ; défi qu'il convient d'inclure dans une logique globale d'aménagement du territoire afin de concilier de manière cohérente et coordonnée « protection des biens et des personnes » et « préservation de l'espace de mobilité des cours d'eau » (fig. 3).



Fig. 1 - Érosion de berge sur le Haut Giffre (Haute-Savoie - France).

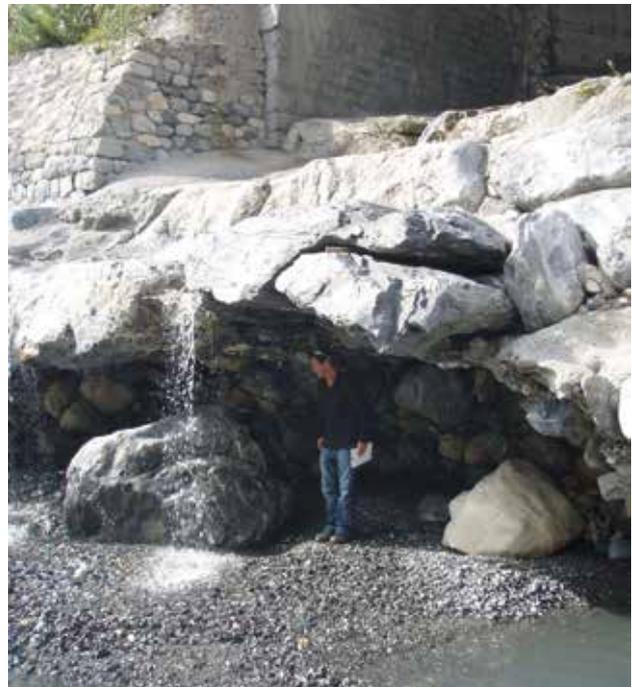


Fig. 2 - Déchaussement d'ouvrage latéral dû à l'incision du cours d'eau à la confluence du Claret avec l'Arc (Savoie - France).



Fig. 3 - Érosion de berge menaçant plusieurs enjeux socio-économiques sur la Dora di Bardonecchia (Piémont - Italie) : route, chemin de fer, réseau électrique.

1.1.2. La maîtrise de l'érosion en rivière de montagne : constat sur les techniques utilisées

Les rivières de montagne, situées entre les hauts bassins versants torrentiels et la plaine, présentent des contraintes spécifiques du fait de leur situation en fond de vallée et de l'urbanisation croissante des bassins versants alpins (fig. 4). L'espace disponible pour la conservation ou la restauration d'un espace de mobilité du cours d'eau est ainsi souvent limité, faute notamment d'une réelle politique de maîtrise foncière des zones alluviales. Les cours d'eau alpins français sont par ailleurs identifiés comme faisant l'objet d'importantes pressions hydromorphologiques risquant d'empêcher l'atteinte du bon état (AERM&C 2011). Il en va de même pour les rivières suisses.



Fig. 4 - L'Arc en vallée de la Maurienne : une rivière très contrainte (Savoie - France).

En raison de leurs spécificités (régimes hydrauliques parfois torrentiels, fortes pentes, vitesses d'écoulement importantes, forte dynamique, lit mobile, etc.), les cours d'eau alpins sont particulièrement concernés par les phénomènes érosifs. De plus, les caractéristiques des zones de montagne induisent souvent une augmentation des coûts d'intervention et d'entretien par rapport aux territoires de plaine.

Dans le cadre des opérations de **protection de berges**, le choix des techniques à utiliser repose souvent sur des critères empiriques liés à l'expérience des gestionnaires, aux usages ou encore à des considérations politiques locales. Ainsi, les zones exposées aux phénomènes d'érosion font fréquemment l'objet d'interventions recourant à des techniques lourdes (enrochement, recalibrage, bétonnage, endiguement – fig. 5) alors qu'il existe souvent des alternatives plus douces, plus respectueuses sur le plan environnemental et paysager, et parfois moins coûteuses : les **techniques de génie végétal** (fig. 6).



Fig. 5 - Enrochement de berge en rivière de montagne.

D'une manière générale, les techniques de génie végétal appliquées à la protection des berges sont souvent considérées par les maîtres d'ouvrage publics et maîtres d'œuvre français et suisses comme inefficaces sur des cours d'eau dynamiques comme ceux du massif alpin. Or, les niveaux de recours à ces techniques et les types d'ouvrages réalisés sont variables suivant les pays et les régions de l'Arc alpin. En France comme en Suisse, les différentes options d'aménagement apparaissent souvent relever des habitudes locales plutôt que d'un choix raisonné croisant les enjeux sécuritaires, les contraintes physiques, les aspects environnementaux et les coûts associés.



Fig. 6 - Exemple de technique végétale appliquée aux berges de rivières de montagne (Sud Tyrol - Italie).

1.1.3. La végétation riveraine des cours d'eau : un corridor biologique pour la conservation de la biodiversité

Rapportée à leur surface, la contribution des milieux aquatiques à la biodiversité globale est nettement supérieure à celle des écosystèmes terrestres (EAWAG 2010). Or, l'OFEV estime, par exemple, qu'en Suisse, 90 % des zones alluviales ont disparu au cours des dernières décennies. En France, l'évolution des zones humides fut jugée

alarmante au cours de la période 1960-1980 (Bernard 1994). Au cours de la période 1990-2000, « *si on observe un ralentissement de la perte des surfaces, la dégradation des milieux est toujours importante comparée aux années 1960-1980* » (Fouque et al. 2006).

L'érosion de la biodiversité constitue aujourd'hui une problématique centrale des politiques environnementales, qui a incité la mise en œuvre de politiques publiques de préservation, notamment par la conservation, la restauration et la création de continuités écologiques.

Il s'agit de permettre la préservation de conditions favorables au maintien des espèces animales et végétales par la conservation de réservoirs (zones de vie des espèces, propices à l'abri, au nourrissage et à la reproduction) et de voies de déplacement entre ces réservoirs, appelées « corridors ». C'est ainsi qu'est apparue, au cours des dernières années, la **notion de trame verte et bleue**, axée sur la circulation des espèces. Elle complète les dispositifs conservatoires que sont les réserves naturelles notamment.

En France, cette notion est traduite à l'échelle régionale par les Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE). Côté helvétique, la Conception paysage suisse (CPS) engage les acteurs à l'échelle nationale, tandis que les cantons énoncent des orientations précises par l'intermédiaire des plans directeurs cantonaux.

Les berges de cours d'eau constituent des zones d'interface entre milieux terrestre et aquatique et présentent une très grande richesse biologique. Les ripisylves jouent quant à elles un rôle écologique majeur de par leurs fonctions de zone d'abri, de nourrissage, d'ombrage, d'autoépuration ou encore de ralentissement des crues. **Les berges et leurs milieux associés jouent également un rôle majeur de corridor biologique qu'il convient de préserver.**

De manière générale, les milieux montagnards et alpins sont parmi les mieux conservés. Dans certaines vallées alpines fortement anthropisées, les ripisylves constituent parfois les derniers corridors disponibles pour la faune et présentent à ce titre une importance particulière.

Les ouvrages de génie civil (enrochements, murs en béton) constituent autant de coupures du corridor qui perd alors une part importante de sa fonctionnalité écologique (fig. 7). L'utilisation de techniques de génie végétal peut ainsi jouer un rôle important en termes de préservation des corridors biologiques et de la biodiversité (chap. II.2.2 et II.6) dans le cas où la restauration de la dynamique alluviale n'est pas envisageable.



Fig. 7 - Rupture de la continuité du corridor écologique.

1.2. Politiques publiques de gestion des cours d'eau en France et en Suisse : des regards proches

Une gestion efficace et cohérente des cours d'eau et des milieux aquatiques nécessite la mise en place de politiques publiques concertées et incitatives visant à coordonner l'ensemble des acteurs concernés (riverains, agriculteurs, industriels, collectivités locales, etc.) en faveur d'une préservation de milieux et de ressources à la fois fragiles et précieux. Pour cela, l'Union européenne et la Confédération helvétique se sont dotées d'instruments législatifs et réglementaires permettant d'assurer une gestion cohérente et concertée de leurs milieux aquatiques. Certains de leurs objectifs diffèrent mais tendent de plus en plus à se rapprocher.

1.2.1. Des cadres réglementaires et législatifs très différents...

Largement inspirée du système français de gestion de l'eau et des milieux aquatiques mis en place depuis les années 1970, la Directive cadre européenne sur l'eau (DCE), adoptée en 2000, définit le contexte législatif de la politique publique de l'eau de l'Union européenne. Elle fixe un cadre communautaire global qui s'impose au-delà des législations nationales préexistantes et impose aux États membres des efforts importants pour un objectif ambitieux : **atteindre le « bon état des milieux aquatiques » en 2015.**

Les milieux sont divisés par « masses d'eau souterraines et superficielles » qui doivent répondre d'un bon état chimique, écologique et quantitatif. L'objectif « 2015 » est contraignant, mais des dérogations peuvent toutefois être accordées pour certaines masses d'eau afin de reporter l'échéance à 2021, voire 2027 dans les cas les plus problématiques. L'État français est ainsi soumis à des objectifs de résultats qui déterminent largement sa politique et qui sont traduits par l'intermédiaire de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA : loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 – fig. 8).

En Suisse, la protection de l'eau à l'échelle de la Confédération est inscrite dans la Constitution (art. 74 et, plus précisément, art. 76) qui énonce la base de la législation sur la protection de l'eau (SWGK : Schweizer Wasser- und Gewässerschutzgesetzgebung). La base juridique en matière de gestion de la ressource et des milieux aquatiques diffère néanmoins de la France et de l'Europe par **l'absence de législation unique dans ce domaine**. Au lieu de cela, un ensemble de **lois sectorielles, spécifiques à chaque domaine mais interdépendantes et combinables**, ont été édictées sur la base de la Constitution fédérale. Ces lois sectorielles, dont notamment les lois pour la pêche (LFSP), la protection contre les crues et l'aménagement des cours d'eau (LACE), l'utilisation des forces hydrauliques (LFH) ou encore la protection des eaux (LEaux), constituent le fondement de la politique de gestion de l'eau et des milieux aquatiques en Suisse. La loi sur la protection de la nature et du paysage (LPN, art. 18) vise quant à elle la protection d'espèces animales et végétales et réglemente notamment les zones alluviales et les ripisylves en tant qu'espaces vitaux et espaces de déplacement des espèces.

L'organisation de la gestion intégrée de l'eau en Suisse varie largement selon le canton considéré. Des planifications sectorielles peuvent être mises en œuvre à différentes échelles (régionale, cantonale, bassin versant). Les thématiques choisies diffèrent selon les cantons. Il n'existe donc pas d'organisation générale appliquée à l'échelle nationale, hormis dans certains cas particuliers,

tels que la renaturation des eaux (fig. 8). **Les cantons sont en effet tenus de planifier et de mettre en œuvre des mesures visant à préserver ou à restaurer l'état naturel des cours d'eau à travers des plans sectoriels de renaturation** (revitalisation, assainissement et utilisation de la force hydraulique). Ceux-ci doivent être mis en place à l'échelle cantonale selon la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) et être soumis à la Confédération d'ici fin 2013 pour adoption avant fin 2014.

Tous les plans sectoriels ne sont pas intégrés dans les plans directeurs cantonaux. Hormis les plans sectoriels prévus spécifiquement par la LEaux dans le cadre de la thématique de renaturation des eaux, il ne s'agit pas d'une exigence pour les autres plans sectoriels (fig. 8). La pratique, là aussi, diffère d'un canton à l'autre.

S'insérant dans le cadre fixé au niveau national, les lois cantonales viennent spécifier et compléter certaines thématiques, d'une manière qui varie d'un canton à l'autre. Ainsi, elles sont **parfois subdivisées en thématiques plus précises**, comme, par exemple, dans le canton de Vaud, les lois cantonales sur l'aménagement des cours d'eau, sur la distribution de l'eau ou sur la police des eaux du canton.

Bien que ne faisant pas partie de l'Union européenne, la Suisse joue un rôle majeur dans la gestion des cours d'eau en Europe, du fait notamment de sa situation géographique à la source de deux grands fleuves, le Rhône

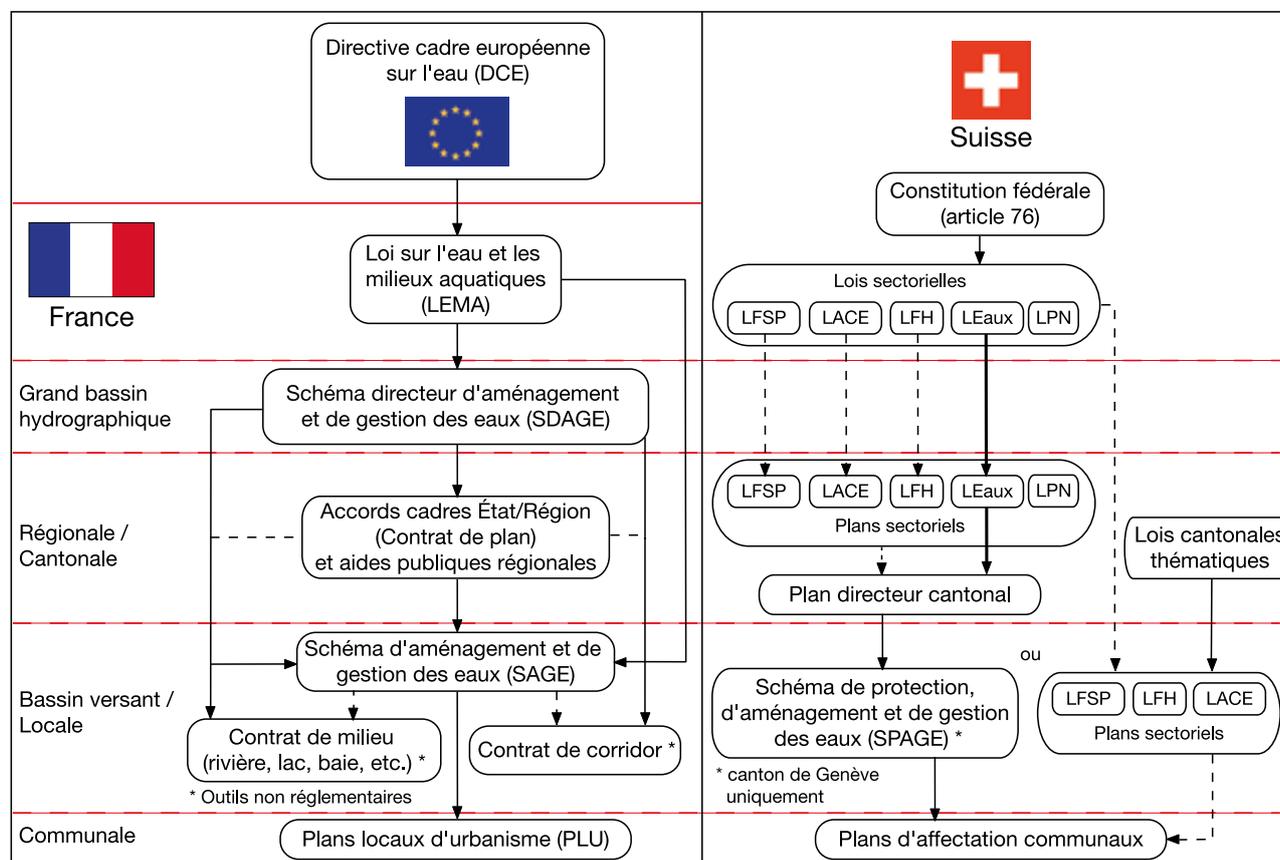


Fig. 8 - Organigramme hiérarchique des réglementations et outils non réglementaires français et suisses intervenant à différentes échelles sur la gestion globale des milieux aquatiques et de l'eau : tentative de comparaison.

et le Rhin. **Plusieurs conventions transfrontalières ont été mises en place afin d'assurer un juste équilibre dans le partage des eaux**, à l'exemple, entre autres, de la convention franco-suisse instaurée en 1962 pour le maintien et la restauration d'une qualité écologique de l'eau et des milieux aquatiques du Léman (Commission internationale pour la protection des eaux du Léman – CIPEL).

Certaines orientations politiques actuelles telles que la récente révision de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), entrée en vigueur le 1^{er} juin 2011, tendent à rapprocher la législation suisse de la DCE.

1.2.2. Une échelle de gestion commune, le bassin versant, pourtant géré de manière différente...

La notion de bassin versant constitue l'échelle de référence de la gestion des cours d'eau de part et d'autre de la frontière. Elle n'est pas calquée sur les frontières administratives et politiques mais constitue l'unité géographique et territoriale la plus cohérente et la plus pertinente pour une gestion efficace des milieux aquatiques et de l'eau (fig. 9).

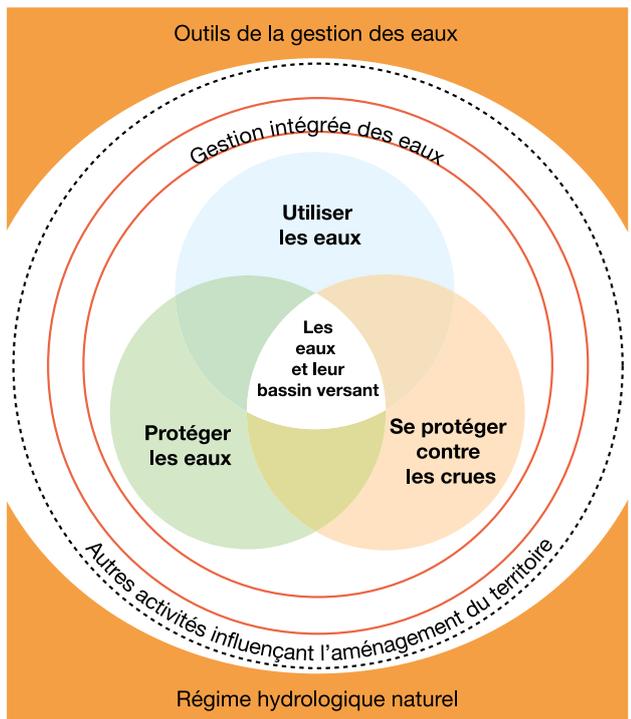


Fig. 9 - Schéma conceptuel de la gestion globale des milieux aquatiques et de l'eau (d'après OFEV 2012).

Néanmoins, bien que reconnu comme tel en Suisse, **le bassin versant n'est pas géré par une structure spécifique et unique**. L'autorité cantonale est responsable de la coordination et de l'exécution des mesures définies par la législation fédérale (OEaux, art. 46) en termes de renaturation des eaux. Elle peut le faire, à l'exemple de l'État de Genève, par l'intermédiaire du Schéma de protection,

d'aménagement et de gestion des eaux (SPAGE), inscrit au plan directeur cantonal (fig. 8).

L'absence de structures de bassin ayant des compétences de gestion des milieux aquatiques à l'échelle du bassin versant, sur le modèle des « Agences de l'eau » ou des « syndicats de rivière » français, rend nécessaire une coordination d'autant plus efficace entre les différents acteurs d'un même territoire par des services cantonaux forts. **Contrairement à la France, où les intercommunalités (syndicats, communautés de communes, etc.) prennent en charge le rôle exécutif par l'intermédiaire d'une maîtrise d'ouvrage d'études et de travaux, ce sont principalement les communes qui possèdent le plus souvent cette compétence**. Celle-ci leur est en effet en grande partie déléguée par le canton, les différents services de ce dernier intervenant en appui. Là encore, la situation est variable d'un canton à l'autre.

À l'échelon supérieur, la Confédération helvétique, à travers l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), est chargée du financement des mesures et actions ainsi que de la législation sur la gestion de l'eau applicable par les cantons. Elle propose par ailleurs à ces derniers une aide à l'exécution pour la renaturation des cours d'eau.

Ainsi, si la mise en œuvre de la DCE en France s'effectue dans le cadre d'une approche systémique au sein des grands bassins hydrographiques (Rhône-Méditerranée ou Loire-Bretagne, par exemple) et appelle à une coopération et une coordination à travers et au-delà des frontières administratives (communales, départementales, etc.), dans le cadre de la législation suisse sur la protection de l'eau (SWGG), la coordination des actions ne s'effectue pas toujours dans le cadre requis de la coopération inter-cantonale (d'après OFEV 2007).

Au niveau français, l'État est garant de l'application et du respect des règles édictées par la LEMA par l'intermédiaire de ses **services déconcentrés** à l'échelle régionale (Direction régionale de l'environnement, de l'agriculture et du logement : DREAL) et départementale (Direction départementale des territoires : DDT). Les six **Agences de l'eau**, établissements publics administratifs de l'État sous la tutelle du ministère chargé de l'Environnement, subventionnent les intercommunalités pour la réalisation de travaux en faveur de l'amélioration de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques. Au niveau régional, les politiques de l'eau des différents conseils régionaux varient largement. La Région Rhône-Alpes mène depuis de nombreuses années une politique de financement des opérations de gestion des milieux aquatiques dans le cadre des contrats de rivière, ce qui explique que 95 % de son territoire soit couvert par ce type de procédures.

La France a mis en place un mode de gestion s'appuyant sur deux outils fondamentaux : le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et le Schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE), institués par la loi sur l'eau de 1992 (fig. 8). Le tableau ci-après propose quelques éléments de comparaison avec le SPAGE, outil développé par le canton de Genève (tab. 1).

1.2.3. Mise en regard des outils français et suisses pour la gestion de l'eau

Les politiques française et suisse de gestion des milieux aquatiques se rapprochent à différents égards, dont l'échelle de gestion globale et cohérente (le bassin versant) et la mise en place d'une gestion différenciée par tronçons. De même, les deux États encouragent la dynamique naturelle des cours d'eau par différentes mesures en faveur de la restauration d'un espace de mobilité.

1.2.3.1. Des outils aux objectifs différents mais en voie de rapprochement

Elles se différencient néanmoins par les outils mis en place et par leurs objectifs. **Les SDAGE et SAGE français mettent en avant la préservation de la qualité des milieux et une gestion équilibrée de la ressource en eau depuis de nombreuses années**, ce qui dénote une volonté de donner la priorité à la protection de l'environnement. Cette volonté fut en revanche moins explicite, jusqu'au début de l'année 2011, dans **l'outil SPAGE, pour lequel les objectifs premiers de gestion des cours d'eau sont clairement orientés à des fins de protection des biens et des personnes contre les crues.**

Début 2011, des modifications apportées aux lois sur la protection des eaux, sur l'aménagement des cours d'eau, sur l'énergie et sur le droit foncier rural sont entrées en vigueur. Ces **nouvelles dispositions fédérales démontrent une volonté d'aménager les cours d'eau en vue de revenir à un niveau proche de l'état naturel** (revitalisations, espace réservé aux eaux). Dans son rapport sur l'environnement, l'OFEV (2011) estime que ces **nouvelles dispositions encouragent la revitalisation des cours d'eau** dans le but de rétablir leurs fonctions naturelles, de renforcer leur rôle social et de réduire les effets négatifs sur l'environnement causés par l'utilisation de la force hydraulique (régime d'éclusées, obstacle à la migration des poissons et perturbation du régime de charriage).

Il s'agit ainsi de deux visions qui ne sont pas incompatibles mais qui ont néanmoins longtemps relevé de paradigmes et de problématiques différentes. Elles tendent pourtant à se rapprocher depuis quelques années.

1.2.3.2. Une approche participative historiquement moins développée en Suisse...

Par ailleurs, **la loi française**, fortement liée à la DCE, **impose la consultation du public et de l'ensemble des**

Tab. 1 - Comparatif des principaux outils de gestion en France et en Suisse

	France		Suisse
	SAGE	SDAGE	SPAGE
Loi d'instauration	Loi sur l'eau du 3 janvier 1992	Loi sur l'eau du 3 janvier 1992	Légitimité dans la loi sur les eaux du 5 juillet 1961 et règlement d'exécution du 15 mars 2006
Objectifs	Utilisation, mise en valeur, protection qualitative et quantitative de la ressource en eau	Gestion équilibrée de la ressource en eau avec développement économique et respect de l'environnement, objectifs de la DCE	Protection des eaux et de leurs rives contre toute atteinte nuisible à leurs fonctions et en vue de la protection des personnes et des biens contre les risques de crue
Phases / Déroulement	État des lieux-diagnostic, tendances et scénarios, choix stratégiques, produits du SAGE et validation finale, arrêté préfectoral	Consultation du public, des acteurs et des Assemblées, caractérisation et définition du programme de mesures, examen, approbation, arrêté préfectoral	Diagnostic, plan d'action, mise en œuvre, suivi
Date du 1 ^{er} outil mis en place	1997 - SAGE Drôme	1996-2009 - SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse	Adoption en Conseil d'État le 24 mars 2010 du SPAGE du BV Aire-Drize (canton de Genève)
Initiative	Locale (collectivités territoriales, élus locaux)	Obligatoire sur chacun des 6 bassins hydrographiques	Collaboration avec tous les services concernés
Gestionnaire	Commission locale de l'eau (CLE)	Comité de Bassin (40 % d'élus, 40 % d'usagers de l'eau, 20 % de représentants de l'État)	Canton / Service de la planification de l'eau (SPDE)
Unité de référence	« Échelle locale cohérente » - bassin versant	Grand bassin hydrographique	Bassin versant, échelle locale
Portée juridique	Opposable au tiers (arrêté préfectoral)	Opposable à l'administration (État, collectivités territoriales, établissements publics) et non aux tiers	Aucune (prise en compte dans les plans cantonaux)
Durée	Révision tous les 10 ans	Révision tous les 6 ans	Révision tous les 6 ans

acteurs du territoire lors de l'élaboration du SDAGE et des SAGE à travers les Comités de bassin et les Commissions locales de l'eau (CLE), composés d'élus, d'usagers de l'eau (agriculteurs, industriels, particuliers, etc.) et de représentants de l'État. **La politique de gestion des milieux aquatiques était ainsi davantage participative du côté français que du côté suisse qui donnait davantage de prérogatives à la Confédération et aux services cantonaux.**

De son côté, en effet, la Confédération helvétique n'imposait aucune démarche participative. Encouragée ces dernières années par un taux de subventionnement supplémentaire, la gestion participative se développe aujourd'hui en Suisse avec l'instauration de la nouvelle politique fédérale de subventionnement pour la revitalisation des eaux. Celle-ci **impose désormais une approche participative dans tout projet de revitalisation.**

1.2.3.3. ... mais des cours d'eau mieux pris en compte par les outils d'aménagement du territoire

L'un des grands avantages de la politique de gestion suisse est l'intégration de la dimension « cours d'eau et milieux aquatiques » dans sa politique d'aménagement du territoire, au moyen d'outils plus larges et complémentaires au SPAGE, et qui tiennent compte de la protection de la nature et du paysage autant que des besoins de la collectivité et de l'économie.

La Confédération fixe les principes généraux pour les autorités cantonales. Celles-ci doivent définir l'espace réservé aux eaux sur l'ensemble de leurs cours d'eau pour les inscrire dans :

- le **plan directeur cantonal**, instrument central de planification de l'aménagement du territoire, qui propose une gestion locale ;
- les **plans d'affectation communaux** (équivalents des Plans locaux d'urbanisme français : PLU) qui fixent les utilisations admissibles du sol et garantissent un espace réservé aux eaux à l'échelle parcellaire (fig. 8).

La revitalisation des cours d'eau constitue un enjeu fort de la politique suisse. Cette préoccupation se traduit par la réalisation de planifications cantonales de revitalisation qui priorisent et définissent globalement les actions de restauration sur une période de 20 ans (mise à jour tous les 12 ans), ceci sur une durée totale de 80 ans. Une procédure clairement établie garantit que les revitalisations seront faites là où elles auront le plus d'effets.

La Suisse se distingue ainsi largement de la France qui peine à intégrer efficacement ces aspects dans ses outils d'aménagement du territoire tels que les Schémas de cohérence territoriale (SCOT).

1.2.4. Deux priorités : restauration des milieux aquatiques et espace de bon fonctionnement des cours d'eau

À l'état naturel, l'hydrosystème est composé d'une mosaïque de milieux abritant une grande diversité animale et végétale. Or, des milieux aquatiques fonctionnels et proches de cet état naturel rendent des services importants à la société, que ce soit en matière de lutte contre les inondations (rôle tampon lors de crue), d'épuration des eaux par filtration, de conservation de la biodiversité ou encore d'attractivité paysagère.

Le préalable indispensable au bon fonctionnement des cours d'eau est le maintien ou la restauration d'un transport solide suffisant. Pour cela, la présence de zones d'alimentation sur les versants et de terrains érodables permettant la remobilisation de la charge solide stockée dans le lit majeur doit être préservée. Ainsi, « *pour garantir l'équilibre géodynamique des cours d'eau à dynamique active, éviter leur incision et préserver ainsi les divers usages qui leur sont associés, [...] il est nécessaire d'accepter que les rivières érodent régulièrement une partie de leur lit majeur* » (Malavoï et al. 2011).

En France comme en Suisse, ce principe est de mieux en mieux assimilé dans les politiques publiques. Ainsi, **la restauration des cours d'eau et le maintien d'un espace de mobilité** (également appelé espace de bon fonctionnement ou encore espace de liberté) **constituent aujourd'hui des axes forts de la politique de l'eau des deux pays.**

À titre d'exemple, **la loi française offre la possibilité d'instituer une servitude d'utilité publique** en vue de « *créer ou restaurer des zones de mobilité du lit mineur d'un cours d'eau [...] afin de préserver ou de restaurer ses caractères hydrologiques et géomorphologiques essentiels* » (loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages ; art. L. 211-12 du Code de l'environnement). Cet article prévoit ainsi la préservation de certains secteurs contre la protection et la fixation du lit mineur, mais aussi la suppression de protections ou de points durs existants. Le principe de préservation et de restauration de l'espace de mobilité est également affirmé de manière forte dans les différents SDAGE (à l'exemple de l'orientation fondamentale n°6A-01 du SDAGE Rhône-Méditerranée).

Le décret n°2002-202 du 13 février 2002 signale par ailleurs que **les protections de berge ne doivent pas réduire de manière significative l'espace de mobilité des cours d'eau.** Celui-ci est défini par la loi française comme « *l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le lit mineur peut se déplacer* » (arrêté du 24 janvier 2001). Les exploitations de carrières de granulats y sont interdites.

En Suisse, les mesures agro-environnementales imposent aux **exploitations agricoles riveraines de consacrer l'équivalent de 7 % de leur surface agricole utile à des surfaces de compensation écologique (SCE).** Celles-ci sont notamment des milieux naturels ou semi-

naturels exploités de manière extensive (prairies et pâturages extensifs, haies, etc.). **L'espace réservé aux eaux défini par les cantons pourra être exploité uniquement comme surface de compensation écologique** de type prairie extensive, surface à litière, pâturage extensif, pâturage boisé, haie, bosquet champêtre ou berge boisée. De plus, l'ordonnance sur les zones alluviales d'importance nationale de 1992 charge les cantons de protéger les zones alluviales, de conserver, voire de rétablir leur dynamique naturelle, et d'accorder les usages avec les objectifs de protection. Près de 23 000 ha de zones alluviales sont ainsi concernés.

De chaque côté de la frontière, les structures ou autorités locales chargées de la gestion des milieux aquatiques sont incitées à mener des opérations de revitalisation (ou de « restauration ») des cours d'eau perturbés par les aménagements successifs (endiguement, chenalisation, protection de berge, etc.) et les diverses activités humaines (extraction de granulats, loisirs, etc.). **Les politiques de gestion incitent également les structures à laisser le cours d'eau éroder ses berges dans la limite de l'acceptable** afin de lui permettre de mobiliser au mieux les matériaux stockés sur les berges et de reconstituer une alternance de milieux hétérogènes (radier, mouilles, bancs alluviaux, etc.). On peut alors parler de « **non-intervention** ».

Les opérations visant le blocage de la dynamique latérale du cours d'eau par l'intermédiaire d'ouvrages de protection de berge sont, par conséquent, à proscrire lorsqu'aucun enjeu humain ne se trouve menacé par l'érosion.

1.2.5. Le génie végétal au sein des politiques publiques

La position des partenaires techniques et financiers français en matière de protection de berges a évolué depuis plusieurs années. Ainsi, si **les Agences de l'eau** ont financé des ouvrages de protection au cours des dernières décennies, que ce soit en génie civil dans un premier temps, ou en génie végétal dans un second temps, elles **ne s'engagent plus aujourd'hui financièrement sur des chantiers concernant la protection des berges face à l'érosion**. Néanmoins, elles participent indirectement à cette mission en subventionnant les opérations de restauration hydromorphologique qui intègrent souvent des techniques de génie végétal. Les projets d'aménagement de protection en génie civil, quant à eux, ne bénéficient plus d'aucune subvention.

Les partenaires techniques et financiers français mènent, à l'instar de la Région Rhône-Alpes, une **politique de non-intervention en matière de protection de berges et mettent en avant le maintien et/ou la création d'un espace de mobilité des cours d'eau**. Le SDAGE Rhône-Méditerranée préconise néanmoins des mesures de protection contre l'érosion latérale lorsque celles-ci sont justifiées par la protection des populations et des ouvrages existants. Il stipule également que « *lorsque la protection*

est justifiée, des solutions d'aménagement les plus intégrées possible sont recherchées en utilisant notamment les techniques du génie écologique » (SDAGE RM 2009).

Le point de vue de **la législation suisse diffère** par certains aspects, même si la tendance générale s'oriente également **vers la renaturation voire la revitalisation** des cours d'eau. Si l'objectif prioritaire de la loi sur l'aménagement des cours d'eau (LACE) est la protection des biens et des personnes contre les crues (art. 1), cette même loi ne recommande pas d'intervention systématique. En effet, face à tout problème engendré par les crues, elle préconise prioritairement des mesures relevant de l'entretien ou de la planification territoriale. Si ces deux types de mesures ne peuvent donner satisfaction, il est alors possible de mettre en œuvre des mesures structurelles relevant de l'aménagement. Cette priorisation permet ainsi de minimiser les impacts physiques sur le cours d'eau.

Par ailleurs, lors de toute intervention sur un cours d'eau, le tracé naturel doit être respecté voire reconstitué, les interactions avec la nappe phréatique ne doivent pas être perturbées, et les conditions doivent être offertes pour favoriser le développement d'une flore et d'une faune typiques et diversifiées (LEaux, art. 37 ; LACE, art. 4). Or, même s'il n'est pas cité, le génie végétal contribue dans une large mesure à satisfaire à ces conditions lors d'interventions physiques.

Cependant, les techniques en génie civil peuvent être utilisées dans des contextes très précis (sécurisation des agglomérations et voies de communication) et subventionnées en partie par la Confédération. Le rapport explicatif se rapportant à l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) indique que des « *mesures pour empêcher l'érosion naturelle de la berge du cours d'eau ne sont admissibles dans l'espace réservé aux eaux que si elles sont indispensables pour assurer la protection contre les crues ou empêcher une perte disproportionnée de surface agricole utile* ». Ce dernier point constitue une divergence légale entre les politiques suisse et française.

Certains cantons ont tout particulièrement cherché, ces dernières années, à favoriser les techniques en génie végétal en raison de leur sensibilité écologique. Les cantons de Genève, Zurich ou Berne, par exemple, ont été les pionniers dans l'utilisation de ces techniques pour la renaturation de cours d'eau de plaine.

En France, l'utilisation de techniques de génie végétal pour la protection des berges n'est pas soumise à autorisation ou à déclaration. En effet, la rubrique 3.1.4.0 de la nomenclature « Loi sur l'eau » exclut les techniques exclusivement végétales. Les ouvrages de protection de berge faisant appel aux techniques de génie civil ou aux techniques mixtes, ainsi que les digues de protection contre les inondations, sont quant à eux soumis à autorisation ou déclaration depuis les modifications de la nomenclature « Loi sur l'eau » de 2002 (arrêté du 13 février 2002, art. 6). Il s'agit d'une évolution cruciale de la loi qui impose notamment, pour tout projet concerné, une étude d'impact ou d'incidence, avec définition de mesures compensatoires. Cette évolution favorise ainsi l'utilisation de techniques végétales.

Le génie végétal est considéré par les politiques publiques française et suisse comme un outil à part entière pour la restauration et la renaturation des cours d'eau, mais ne constitue pas une fin en soi.

Les politiques publiques restent ainsi vigilantes concernant l'utilisation du génie végétal afin qu'il ne constitue pas la justification à des projets d'aménagement qui pourraient avoir un impact négatif sur les milieux et les fonctionnalités écologiques des cours d'eau. Il est donc bel et bien considéré comme une ingénierie au service de la protection et de l'environnement et non comme une simple caution écologique ou un « verdissement ».

Notons enfin que d'autres pans des législations européenne, française et suisse encadrent la mise en œuvre du génie végétal, comme, par exemple, les réglementations sur la production et la commercialisation des graines, semences, plants ou parties de plants (chap. III.3.2.3), le statut de protection des espèces, les installations de chantiers, les possibilités de défrichage et d'intervention dans le lit mineur, etc. Autant de réglementations qui peuvent influencer sur le développement du génie végétal, en montagne notamment.

2. Fonctionnement des cours d'eau de montagne

Avant de s'intéresser aux raisons qui permettent de décider de la mise en œuvre d'un chantier de protection de berge et aux techniques de génie végétal, à leurs avantages et inconvénients, il convient d'aborder les spécificités du fonctionnement d'un cours d'eau de montagne. Ce chapitre est destiné à définir le cadre d'intervention des structures de gestion de cours d'eau de montagne ainsi que les différents concepts scientifiques sur lesquels s'appuyer pour comprendre le fonctionnement du cours d'eau dans sa globalité et décider de l'opportunité du recours à une protection de berge.

2.1. Principes de fonctionnement

2.1.1. L'équilibre morphologique

Une des principales caractéristiques de la rivière est d'assurer le transfert des sédiments (sables, graviers, galets, etc.) vers l'aval. Selon les cours d'eau, la quantité de sédiments transportée se compte généralement en dizaines de milliers de tonnes par an. Pour cela, la rivière dispose de deux principales sources d'énergie : la gravité liée à la pente du fond de vallée et les débits en période de crue.

Plus la pente est forte et les débits élevés, plus la rivière est capable de déplacer de grandes quantités de matériaux. On quantifie cette énergie disponible par la puissance hydraulique, qui est le produit de la pente de la ligne d'eau, du débit et du poids volumique de l'eau. Afin de pouvoir comparer des rivières de différentes tailles, on rapporte cette puissance à la largeur du lit et on obtient la puissance spécifique.

La fourniture sédimentaire et les débits ne sont pas constants dans le temps. Ils fluctuent en fonction des variations climatiques (saisonniers à séculaires) et des modifications de l'occupation du sol qui affectent le bassin versant. Le lit de la rivière s'ajuste donc continuellement pour maintenir une capacité de transport en adéquation avec la charge sédimentaire charriée par les eaux. C'est la raison principale de la grande mobilité des lits fluviaux.

Cette mobilité se manifeste concrètement par des berges qui reculent, des chenaux qui changent de position, des bancs qui se forment et qui disparaissent... Sans cette « respiration » des formes fluviales, la rivière ne peut trouver son état d'équilibre dans lequel les processus d'érosion et de dépôt se compensent, et les sédiments sont

transportés vers l'aval. On parle d'équilibre lorsque les paramètres qui définissent la morphologie du lit (pente, largeur et profondeur à pleins bords, tracé et sinuosité) restent relativement stables dans le temps.

Il arrive parfois que l'équilibre soit rompu et que la géométrie du lit se transforme durablement sous l'effet d'une dérive des variables de contrôle comme les modifications des régimes de crue ou des quantités de sédiments disponibles, appelées forçages hydrologiques et détritiques. Les mécanismes qui gouvernent ces ajustements ont été conceptualisés au début du 20^e siècle par Gilbert (1914) et Mackin (1948), puis représentés schématiquement sous forme d'une balance par Borland et Lane quelques années plus tard (fig. 1). Cette illustration offre la possibilité de prédire qualitativement les réponses morphologiques susceptibles de se produire lorsque les débits liquides et/ou la charge sédimentaire changent. Elle permet aussi de prédire quels seront les mécanismes du retour à l'équilibre.

Les **variables de contrôle** sont imposées au cours d'eau par le climat, le relief, la géologie et l'occupation du sol et sont soumises à de fortes variabilités dans l'espace et dans le temps. Il s'agit d'une part des caractéristiques hydrologiques donc le **débit liquide** conditionné entre autres par le taux de **boisement** du bassin versant et, d'autre part, du **débit solide**, conditionné par les conditions d'érosion du bassin versant, l'état des réserves sédimentaires dans les lits et la nature des berges du cours d'eau.

L'ensemble de ces variables influent sur les caractéristiques des cours d'eau et, par conséquent, sur des variables de réponse (ou d'ajustement) qui s'ajustent en permanence aux débits liquide et solide : géométrie du lit, tracé en plan, taille des matériaux.

Ainsi, lorsque la capacité de transport devient excédentaire par rapport à la charge à transporter, le lit s'incise, ce qui a pour effet de réduire la pente et donc de réduire la capacité de transport du cours d'eau. D'autre part, des processus de tri granulométrique vont progressivement augmenter la dissipation d'énergie et diminuer ainsi la capacité de transport. L'enfoncement du lit s'effectue principalement par évacuation des matériaux de petit diamètre, ce qui conduit à la formation d'une couche grossière de surface, appelée pavage. La rugosité de surface s'en trouve augmentée, ainsi que la résistance du lit à l'érosion.

Inversement, lorsque la capacité de transport devient déficitaire par rapport à la charge sédimentaire, le lit s'exhausse, la pente augmente et le tri granulométrique contribue à diminuer la taille des grains en surface.

Cette approche reste néanmoins limitée en matière de prédiction quantitative de l'ajustement morphologique, car elle ne donne pas de formulation mathématique de la relation entre débit liquide, débit solide, pente et taille des grains. Il est toutefois théoriquement possible de combiner une loi de résistance à l'écoulement et une loi de transport solide afin de modéliser la pente d'équilibre (Wilcock *et al.* 2009), mais ce type d'approche reste encore du domaine de la recherche (Ferro et Porto 2011).

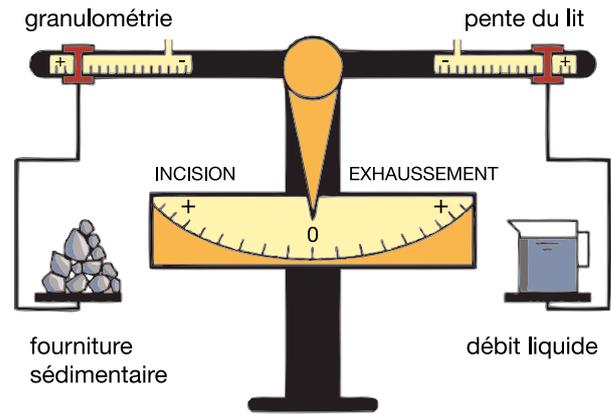


Fig. 1 - La balance de Lane-Borland (1960) illustrant le concept d'équilibre morphologique (Gilbert 1914 ; Mackin 1948 ; Lane 1955).

La balance de Lane-Borland ne s'intéresse qu'à la pente d'équilibre (s) et à la granulométrie du lit (D_{50} ou diamètre médian). Or, la morphologie d'une rivière possède bien d'autres variables d'ajustement, dont les principales sont la largeur et la profondeur à pleins bords (notées respectivement w_b et d_b), la sinuosité du tracé en plan (λ), ainsi que la rugosité du lit (n). Ces variables s'ajustent également aux modifications des forçages hydrologiques et détritiques. La synthèse des observations empiriques a conduit à proposer d'autres modèles conceptuels qui intègrent toutes les dimensions de la morphologie fluviale. Il s'agit du modèle de Schumm (1971), qui peut s'écrire ainsi :

$$Q \approx \frac{w_b d_b D_{72} n \lambda}{s} \quad Q_s \approx \frac{w_b s}{d_b D_{72} n \lambda}$$

avec Q , le débit liquide, et Q_s , le débit solide.

Ces relations expriment les tendances d'évolution des variables d'ajustement en réponse à une augmentation ou à une diminution des débits liquide et solide. Par exemple, dans le cas d'une diminution du débit solide, les variables placées au numérateur (largeur à pleins bords et pente) vont décroître, tandis que celles placées au dénominateur vont augmenter (profondeur à pleins bords, sinuosité, granulométrie, rugosité de surface).

Toutes ces relations ne donnent qu'une image partielle de la complexité des interactions qui gouvernent les hydro-systèmes fluviaux. Elles ne prennent pas en compte l'influence de la végétation sur la morphologie fluviale. Or, celle-ci joue un rôle primordial, notamment par le renforcement de la résistance des berges à l'érosion, par l'augmentation de la résistance à l'écoulement et par la fourniture de débris végétaux qui peuvent jouer un rôle morphologique majeur, notamment en matière de stockage sédimentaire : de par la création d'embâcles (piégeage de débris végétaux par la végétation en place : bois mort de toutes tailles, feuillages, etc.), les sédiments sont piégés à leur tour et s'accumulent.

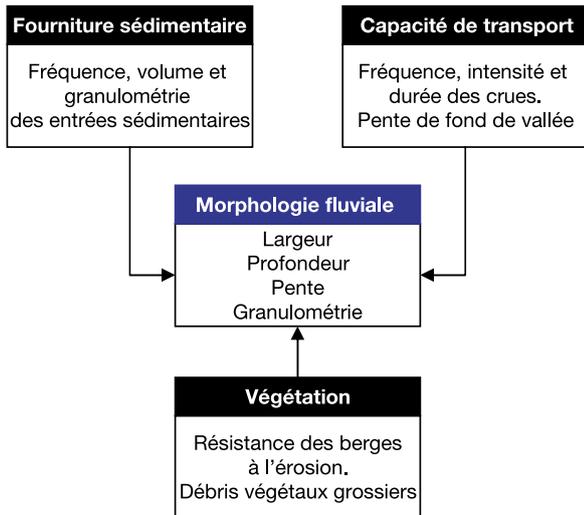


Fig. 2 - Les variables de contrôle de la morphologie fluviale aux échelles de temps pluri-décennales (Montgomery et Buffington 1998).

Certains auteurs proposent d'intégrer la végétation comme une variable de contrôle de la morphologie au même titre que les forçages hydrologiques et détritiques (Montgomery et Buffington 1998 – fig. 2).

2.1.2. Fluctuations verticales du lit

Une attention particulière doit être portée aux fluctuations verticales des lits fluviaux, notamment lorsqu'il s'agit d'implanter des ouvrages de protection de berge. Ces fluctuations peuvent provoquer la ruine de l'ouvrage par déchaussement, et inversement, la stabilisation des berges peut dans certains cas amplifier une tendance lourde à l'enfoncement du lit par diminution de la fourniture sédimentaire. L'érosion des berges participe en effet à la recharge sédimentaire des lits et donc à l'équilibre morphologique du système.

On distingue deux grands types de fluctuations verticales en fonction des échelles de temps auxquelles elles se produisent. Les fluctuations sur des pas de temps courts, typiquement à l'échelle de la crue ou de la saison, sont gouvernées par des déséquilibres provisoires du transport solide. On parle parfois de respiration du lit, ce dernier passant par des phases courtes de stockage et déstockage, qui se compensent mutuellement (fig. 3). Dans les rivières de montagne, toujours proches des sources sédimentaires (érosion des versants), cette respiration traduit l'irrégularité de l'alimentation solide depuis les versants. Il faut donc imaginer la propagation de petites vagues sédimentaires depuis l'amont, dont le passage en une section donnée se traduit par un cycle dépôt-reprise. Le lit va s'engraver lorsque la vague se dépose, puis se creuser lorsque ces matériaux vont transiter vers l'aval. Ces phénomènes se retrouvent plus en aval lors de la migration de macroformes sédimentaires (vague de plus grande ampleur). Ils traduisent également le caractère très discontinu du charriage, les particules étant généralement déplacées sur des distances relativement courtes (typiquement quelques centaines de mètres pendant un épisode de crue).

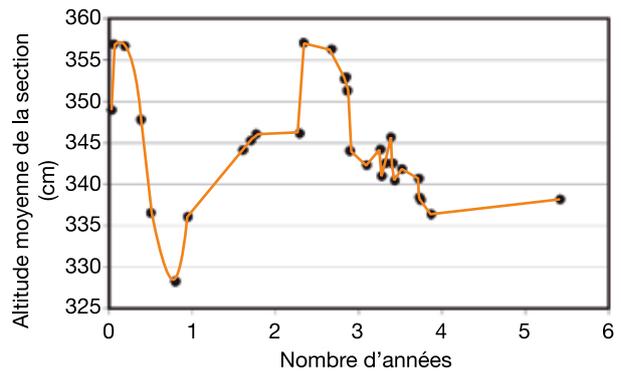


Fig. 3 - Exemple de respiration du lit mesurée sur un petit torrent du Diois (la Barnavette), entre 1997 et 2002, au droit d'une section en travers sur un tronçon divaguant (Liébault 2003).

Des fluctuations verticales peuvent aussi se produire sur des pas de temps longs (décennaux voire séculaires). Dans ce cas, elles traduisent les modifications du régime sédimentaire du bassin versant, défini comme le différentiel entre les entrées et les sorties solides. Lorsque le régime est en équilibre, les fluctuations se compensent et l'altitude moyenne du lit reste stable. Lorsque le régime est excédentaire (entrées > sorties), le lit s'engrave de manière durable. On parlera alors d'exhaussement. Ceci se traduit souvent par une expansion latérale de la bande active et

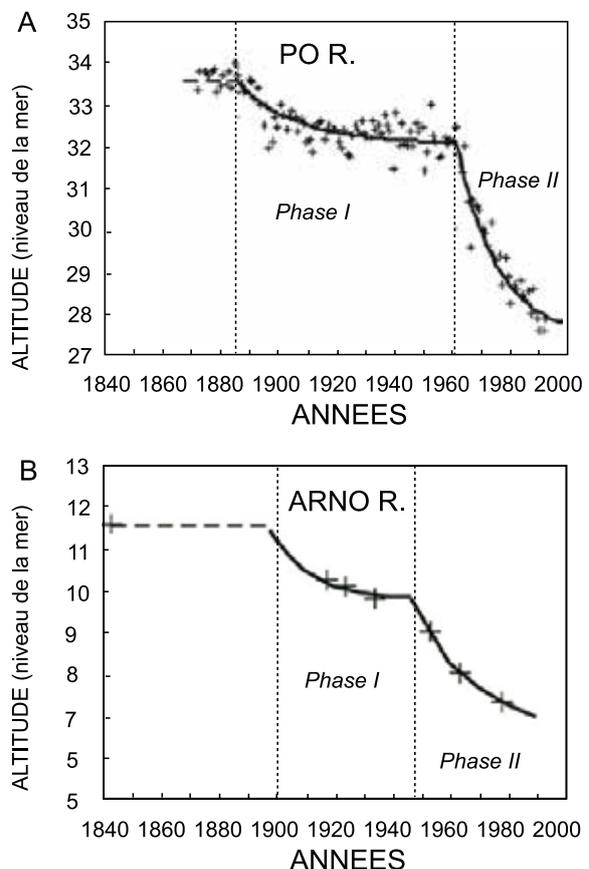


Fig. 4 - Incision du lit sous l'effet du reboisement (phase I) et des extractions de graviers (phase II) pour le Po et l'Arno en Italie (Surian et Rinaldi 2003).

par l'amplification du tressage. Inversement, lorsque le régime est déficitaire (entrées < sorties), le lit s'enfoncé et on parle d'incision. Ces tendances s'analysent à partir de données historiques (anciens levés topographiques) et elles permettent de replacer l'état actuel dans la trajectoire morphologique du système (fig. 4). Sur l'exemple en figure 4, le Po et l'Arno, aux altitudes considérées, ne sont pas des cours d'eau de montagne, mais des rivières de piémont. Néanmoins, les trajectoires présentées sont ici influencées par l'évolution de la production sédimentaire des têtes de bassin.

Dans les Alpes françaises, la grande majorité des rivières présentent des régimes déficitaires dus aux extractions de graviers massives des années 1970 et 1980 et de la reconquête forestière planifiée (travaux RTM : restauration des terrains en montagne, etc.) et spontanée des versants (Bravard 1991 ; Liébault *et al.* 2005). Ceci se traduit par une incision accélérée, qui peut atteindre près de 10 mètres à l'échelle du siècle en valeur maximum (Peiry *et al.* 1994).

2.1.3. Typologie des rivières de montagne

La diversité des paysages torrentiels est grande et témoigne de la complexité des processus naturels qui gouvernent la morphologie des rivières de montagne. Certains torrents prennent l'allure de grandes plaines de graviers arides au sein desquelles serpente un mince filet d'eau. Pour d'autres, l'eau jaillit entre de gros rochers en formant des successions de petites cascades et de piscines naturelles. Malgré leur complexité, il est possible de distinguer quelques règles dans l'organisation spatiale des paysages torrentiels. La plus évidente est celle qui consiste à ordonner

les formes de l'amont vers l'aval en fonction des processus d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments (Montgomery et Buffington 1997 – fig. 5).

La zone de production, située à l'amont, a pour caractéristique principale de produire les sédiments que la rivière utilise pour bâtir son lit et façonner sa plaine alluviale. Elle regroupe l'ensemble des ravins et des têtes de bassin qui fonctionnent un peu à l'image des condensateurs électriques : ils accumulent de l'énergie sur de longues périodes sous forme d'apports sédimentaires depuis les versants, puis ils se purgent brutalement lors d'épisodes pluvieux suffisamment intenses pour déclencher des coulées de débris. Lorsque ces chenaux sont en phase d'accumulation, leur lit est encombré de débris de toutes tailles qui forment un ensemble d'allure chaotique. Après le passage des coulées se forme un lit en U décapé qui laisse souvent apparaître la roche-mère dans le fond du lit. Ce sont les lits rocheux (fig. 6). Ces formes sont typiques des branches les plus reculées du réseau hydrographique.

En aval de la zone de production, se trouve la zone de transport. C'est ici que se forment la majorité des lits à blocs, souvent organisés en alternances plus ou moins régulières de marches et de fosses de surcreusement (fig. 7a). Ce sont les step-pool (littéralement « marche-cuvette », que l'on peut traduire par « lit en marche d'escalier »), forme emblématique des petites rivières de montagne. La présence de blocs et de gros cailloux en surface confère au lit un aspect chaotique et génère un écoulement très turbulent. Cette forte rugosité du lit entraîne d'importantes déperditions d'énergie, ce qui conduit à les interpréter comme des formes de cours d'eau ajustées à de très fortes capacités de transport solide, bien supérieures à la fourniture sédimentaire réelle. Autrement dit, la puissance de la rivière (liée au produit de la pente et du débit)

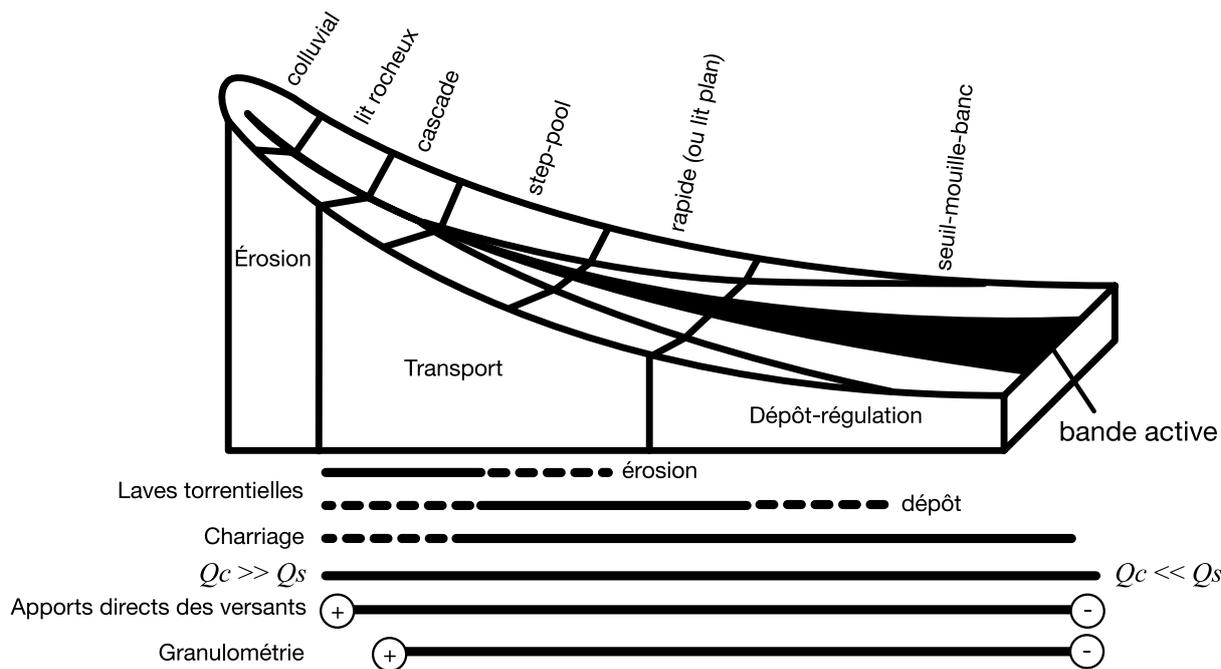


Fig. 5 - Continuum des types morphologiques (adapté de Montgomery et Buffington 1997) ; Q_c : capacité de transport ; Q_s : charge sédimentaire.

étant supérieure à la charge sédimentaire à transporter, la morphologie s'ajuste de façon à consommer la puissance excédentaire en augmentant la résistance à l'écoulement.

En progressant leur parcours vers l'aval, les matériaux arrivent progressivement à la zone de dépôt, où les pentes sont plus faibles mais où les surfaces drainées augmentent. La situation s'inverse et, cette fois-ci, la puissance du cours d'eau est insuffisante pour mobiliser toute la charge sédimentaire qui provient de l'amont. Ceci se traduit par la formation de stocks sédimentaires dans les lits et par l'apparition de styles morphologiques spécifiques. Ce sont les bancs alternes et les lits en tresses, qui se forment par élargissement du lit et démultiplication des chenaux en eau dans de grandes plaines de graviers mobiles (fig. 7b). Ces paysages se forment par accumulations successives de vagues sédimentaires en provenance de l'amont et sont typiques des zones de piémont.

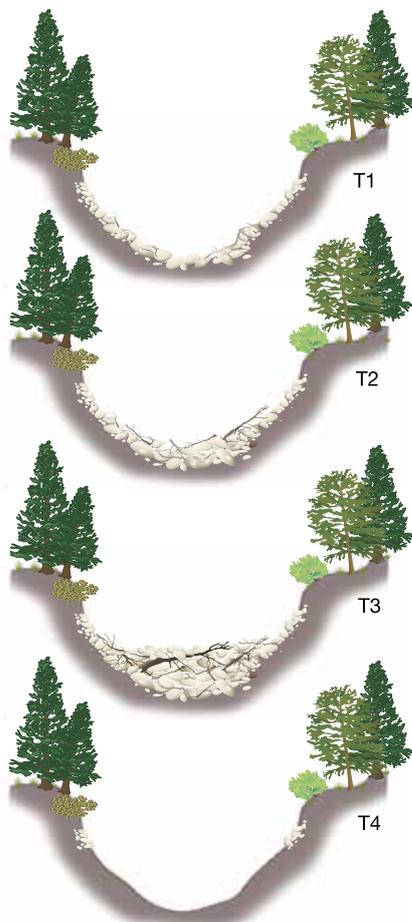


Fig. 6 - La morphologie des ravins situés en tête de bassin est fortement contrôlée par les apports sédimentaires en provenance des versants ; de longues phases d'accumulations sédimentaires se succèdent avec des phases rapides de vidange brutale sous forme de coulées de débris (T4 - d'après Jakob *et al.* 2005).

2.1.4. Liens entre blocage des berges et dynamique du transport solide

2.1.4.1. Influence des berges sur l'équilibre morphologique du cours d'eau

L'érosion des berges participe à la recharge sédimentaire du lit et donc à son équilibre morphologique (fig. 8). La migration des méandres offre une illustration de ce mécanisme. Le méandre se déplace par érosion de la berge concave, qui alimente un banc de convexité en aval par le dépôt de matériaux et contribue ainsi à construire la plaine alluviale (fig. 9). Une étude récente du bilan sédimentaire d'une rivière alpine en Italie a montré que la recharge sédimentaire en provenance des berges, estimée à partir de photos aériennes et de données LiDAR, pouvait représenter jusqu'à 100 000 m³/an, soit 10 à 20 fois plus que les entrées solides en amont du tronçon étudié (Surian et Cisotto 2007). Une méthodologie similaire a été utilisée sur le Bès, un affluent de la Bléone (Alpes-de-Haute-Provence - France) qui présente un lit en tresses particulièrement bien préservé. L'étude a montré une recharge nette par érosion de berge de l'ordre de 65 000 m³ pour la période 2000-2008, période pendant laquelle les extrêmes hydrologiques n'ont pas dépassé la valeur de période de retour biennale (Genin 2009 - fig. 10).

La télédétection par mesure LiDAR, acronyme de l'expression anglaise « Light Detection And Ranging », désigne une technique de mesure optique fondée sur l'émission et la réception d'ondes laser. Elle permet d'obtenir des modèles numériques de terrain de haute résolution sur de vastes étendues spatiales. Elle offre aussi la possibilité de restituer la topographie sous le couvert forestier.

La stabilisation massive des berges peut provoquer un déficit sédimentaire et aggraver une tendance à l'incision du lit (Bravard *et al.* 1999). Tout projet d'implantation de protection de berge doit donc étudier avec soin l'évolution historique du cours d'eau afin de caractériser précisément son régime sédimentaire. Une étude récente réalisée sur les rivières en tresses du bassin Rhône-Méditerranéenne a montré un lien statistique entre l'évolution altimétrique séculaire des tresses, étudiée à partir des anciens profils en long, et le linéaire de berges érodables (Liébault *et al.* 2010). Les berges sont différenciées selon deux modalités (berges érodables et berges stables). Sont considérées comme stables, les berges protégées par des aménagements (digues, enrochements) ou en contact direct avec les versants rocheux. Le linéaire de berge ne répondant pas aux critères de stabilité est considéré comme érodable. Les tresses qui maintiennent un régime sédimentaire en équilibre ou excédentaire sont celles sur lesquelles le potentiel de divagation latérale a été le mieux préservé.

Dans le cas des méandres mobiles, l'érosion des berges est le principal moteur de la dynamique morphologique du système. La stabilisation d'un recul de berge peut avoir des répercussions majeures à l'échelle du tronçon fonctionnel. Ainsi, le blocage de la migration d'un méandre peut provoquer une accélération de l'érosion de berge sur le méandre en aval sous l'effet d'une augmentation locale de la capacité érosive de l'écoulement (Larsen et

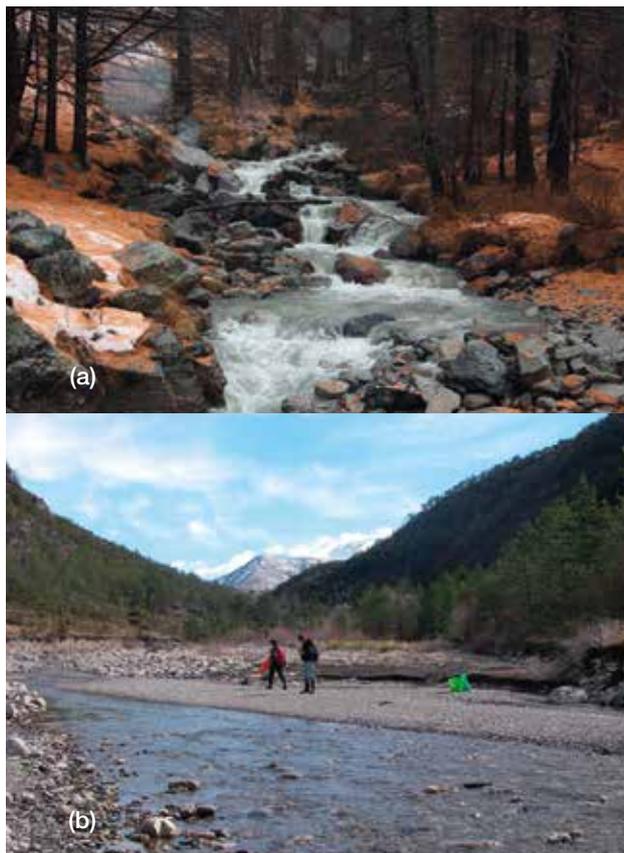


Fig. 7 - (a) exemple de step-pool, morphologie en alternance de marches et de fosses de surcreusement ; **(b)** exemple de lit en seuil-mouille-banc.

Greco 2002). Si les méandres ont tendance à migrer vers l'aval, ceci peut conduire également à l'empilement des méandres en amont par effet de compression mécanique, ce qui augmente le risque de recoupement (Degoutte 2006 ; Malavoi et Bravard 2010).

Il faut enfin souligner que la dynamique morphologique des lits fluviaux est créatrice d'habitats écologiques diversifiés par régénération des annexes fluviales. Elle participe ainsi au bon fonctionnement des écosystèmes de plaine alluviale. La stabilisation des berges peut donc avoir des répercussions sur les communautés vivantes de ces milieux. On peut citer, à titre d'exemple, la réduction des apports en bois mort à la rivière et son impact sur la diversité des habitats aquatiques (Angradi *et al.* 2004).

2.1.4.2. Influence de la végétation des berges sur la section transversale du cours d'eau

Les cours d'eau et les milieux associés sont particulièrement riches en termes de biodiversité. Les différents aménagements qui sont réalisés peuvent avoir des impacts importants sur ce plan (chap. I.2.2 et II.6).

La végétation des berges a une grande influence sur la recharge sédimentaire et sur les profils en long et en plan des cours d'eau. Elle a aussi un impact important sur les



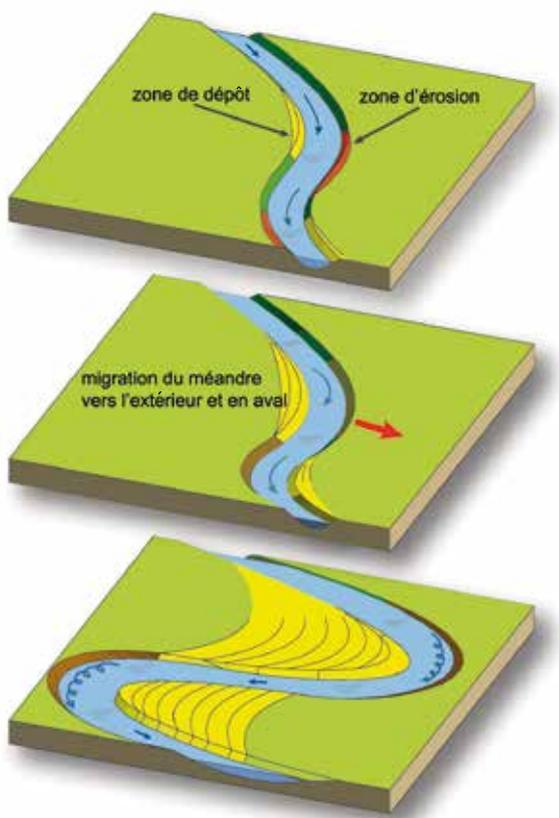
Fig. 8 - Les sapements de berges participent à la recharge sédimentaire des rivières : **(a)** recul d'une berge sableuse sur la Bruche, en Alsace, par remobilisation de la plaine alluviale ; **(b)** recharge sédimentaire par sapement d'une berge caillouteuse sur le Bès, dans la Drôme, par remobilisation d'une terrasse Holocène.

profils transversaux. Comme avec le profil longitudinal, il existe une forte relation entre la forme du profil transversal et la structure des ripisylves. Les conditions hydrauliques vont contraindre les ripisylves *via* des processus d'érosion, de submersion et d'ensevelissement. À son tour, la végétation agit sur la forme du profil transversal :

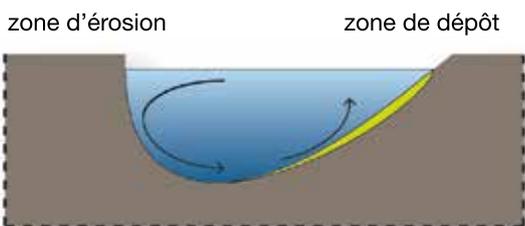
- en ralentissant la vitesse des écoulements à proximité du sol et donc les forces d'arrachement associées ;
- en protégeant le sol grâce à l'ancrage et l'armature fournis par les racines ;
- en modifiant le microclimat et donc les cycles gel-dégel au niveau du sol (Wynn et Mostaghimi 2006).

Le ratio « largeur de plein bord naturelle / profondeur du cours d'eau » est un indicateur de l'activité dynamique d'un cours d'eau. Plus ce rapport est élevé, plus la dynamique d'érosion latérale et la dynamique de transport solide sont importantes. Ce ratio reflète également la cohésion des berges. Plus celle-ci est élevée, plus la largeur du cours d'eau a tendance à être faible et la profondeur importante. Par conséquent, le ratio est faible (Malavoi et Bravard 2010).

Plusieurs études ont montré que les cours d'eau végétalisés présentent un ratio « largeur de plein bord / profondeur » plus faible que les cours d'eau non végétalisés. Dans le cas des rivières à graviers, Millar et Quick (1993) ont établi des rapports entre la géométrie des sections



Le mouvement de l'eau en tire-bouchon provoque l'érosion puis le dépôt des sédiments.



Coupe transversale

Fig. 9 - Mécanisme de déplacement des méandres par sapement de la berge concave et construction de plaine alluviale par dépôt sur la berge convexe.



Fig. 10 - Cartographie de la recharge par sapement de berge sur le Bès (Alpes-de-Haute-Provence - France) entre 2000 et 2008 à partir de la comparaison d'une orthophotographie et d'un levé LiDAR aéroporté (Genin 2009).

transversales de cours d'eau avec et sans végétation sur les berges (tab. 1) qui illustrent l'impact de la végétation sur la tenue des berges. Lorsque les berges sont végétalisées, le lit est moins large et plus profond, et la pente du fond du lit diminue.

Tab. 1 - Géométrie de la rivière en fonction de la végétalisation des berges : cas des rivières stables avec un lit de gravier et des berges cohésives (Millar et Quick 1993 ; Degoutte 2006).

	Berges bien végétalisées	Berges peu végétalisées
Largeur	L	1,6 x L
Profondeur	H	0,7 x H
Pente du fond du lit	i	1,1 x i

Ainsi, en fixant les berges et en empêchant l'érosion latérale, la végétation diminue le ratio « largeur/profondeur ». De même, l'augmentation du tirant d'eau provoque une augmentation de la contrainte au fond du lit et favorise son incision.

La présence de végétation ligneuse diminue les processus d'érosion latérale et modifie le profil transversal en travers de la section. Les berges cohésives ralentissent la dynamique d'érosion latérale des cours d'eau.

Par ailleurs, il a été montré que les berges de cours d'eau végétalisées sont plus raides que les berges non végétalisées. Par conséquent, les végétaux augmentent la résistance au cisaillement de berge et limitent les risques de glissement (Abernethy et Rutherford 1998). Cette capacité à améliorer la résistance au glissement a toutefois des limites : elle peut être remise en cause si le fond du lit s'incise et/ou si les arbres, par leur taille excessive, présentent un port déséquilibré.

Les végétaux influent également sur le profil transversal des cours d'eau en favorisant et en maintenant les plages de dépôts sédimentaires. Par effet de peigne, les racines superficielles et les tiges favorisent les dépôts sédimentaires en ralentissant les vitesses d'écoulement. Les sédiments sont ainsi piégés et protégés de l'érosion hydraulique. Ces dépôts sédimentaires et les débris piégés par les végétaux vont eux-mêmes diminuer la section d'écoulement en encombrant le lit du cours d'eau.

Les végétaux augmentent la rugosité des berges et provoquent une diminution de la vitesse d'écoulement à proximité des berges. La présence de végétaux au sein de la zone d'écoulement lors des crues va aussi diminuer la section transversale et la capacité de transit, ce qui va provoquer une élévation du tirant d'eau. La figure 11 montre la différence de positionnement des isolignes de vitesse sur le profil transversal entre deux sections de cours d'eau, l'une sans végétation et l'autre avec. Les vitesses sont plus faibles à proximité de la berge et plus fortes au centre. Pour un même débit, le tirant d'eau augmente sur un cours d'eau végétalisé.

2.1.5. La notion d'espace de mobilité des cours d'eau

La mobilité latérale des lits fluviaux est aujourd'hui reconnue comme un élément positif qui participe au bon fonctionnement géomorphologique de l'hydrosystème et qui contribue à enrichir la diversité des habitats écologiques. Cette reconnaissance est à l'origine du concept d'**espace de liberté** (on parle aujourd'hui davantage d'**espace de mobilité** ou d'**espace de bon fonctionnement**), qui est un concept de gestion apparu dans l'Allier au début des années 1980 quand il s'est révélé nécessaire de trouver des solutions alternatives pour faire face à l'enfoncement du lit suite aux extractions de graviers (Malavoi et Bravard 2010). Le concept a progressé, puisqu'il est aujourd'hui reconnu juridiquement en France dans plusieurs textes législatifs sous l'appellation « *espace de mobilité* » (chap. I.1.2.4).

L'article 2 de l'arrêté français du 24 janvier 2001 stipule que « [...] *l'espace de mobilité est évalué par l'étude d'impact en tenant compte de la connaissance de l'évolution historique du cours d'eau et de la présence des ouvrages et aménagements significatifs, à l'exception des ouvrages et aménagements à caractère provisoire, faisant obstacle à la mobilité du lit mineur. Cette évaluation de l'espace de mobilité est conduite sur un secteur représentatif du fonctionnement géomorphologique du cours d'eau en amont et en aval du site de la carrière, sur une longueur minimale totale de 5 kilomètres* ». Le lit mineur est défini dans l'arrêté comme « *l'espace d'écoulement des eaux formé d'un chenal unique ou de plusieurs bras et de bancs de sables ou galets, recouvert par les eaux coulant à pleins bords avant débordement* ». **Cette notion recouvre donc clairement celle de bande active des géomorphologues, à savoir l'espace occupé par les chenaux en eau et les bancs de graviers ou de sables non végétalisés.**

Un guide méthodologique publié par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse (AERM&C) est entièrement consacré au problème de la délimitation de cet espace (Malavoi *et al.* 1998). Celui-ci est défini de manière plus précise comme étant « *l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre une mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres* ». Il intègre donc la bande active du cours d'eau et l'espace du lit majeur (fond de vallée inondé par les crues extrêmes) susceptible d'être érodé par le cours d'eau et accepté socialement comme tel (fig. 12).

L'approche historique qui consiste à reconstituer les tracés successifs du lit et à définir une enveloppe de migration historique (fig. 13) est présentée comme une méthode appropriée de délimitation de l'espace de mobilité fonctionnel. Cette approche doit être couplée à une cartographie précise des enjeux et de leur vulnérabilité. L'espace de mobilité ainsi défini doit ensuite faire l'objet d'une phase de négociation avec les acteurs afin de soustraire d'éventuels enjeux dont la protection semble justifiée.

Principes d'aménagement des cours d'eau - 2. Fonctionnement des cours d'eau de montagne

Les lignes pointillées indiquent le rapport entre la vitesse en un point et la vitesse moyenne.

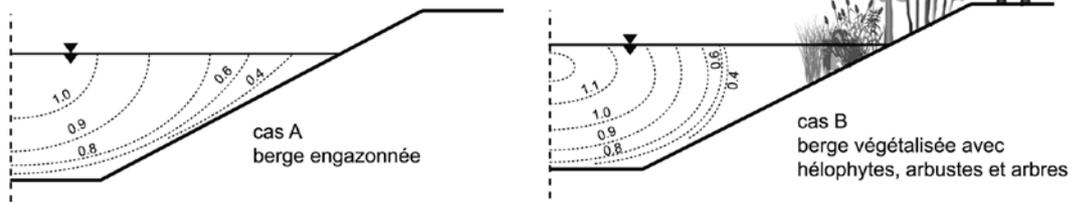


Fig. 11 - Schéma de l'impact de la végétation sur le champ des vitesses dans l'écoulement (d'après BMLFW dans Donat 1995).

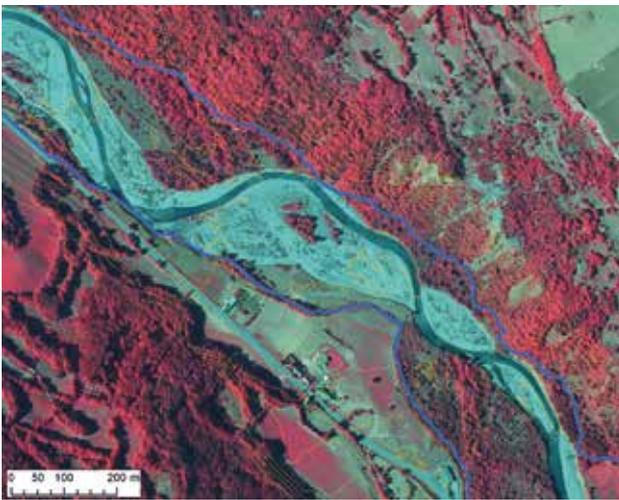


Fig. 12 - Exemple de délimitation de l'espace de liberté sur le Drac (traits bleus). Celui-ci incorpore la bande active (chenaux en eau et bancs de graviers non végétalisés) et la plaine alluviale boisée (fond : BD Ortho infra-rouge couleur de l'IGN - 2009).

Une revue bibliographique récente des pratiques en matière de délimitation de l'espace de mobilité (Piégay *et al.* 2005) recommande l'imbrication d'échelles spatiales comme approche pertinente pour la définition des objectifs de gestion en matière de préservation et de restauration de cet espace. Une revue des outils mobilisables est également proposée, en distinguant trois grands types d'approche :

- l'approche morphométrique fondée sur l'amplitude d'équilibre des méandres (fig. 14) ;
- l'approche historique fondée sur la superposition des tracés en plan au cours du temps (fig. 13) ;
- la modélisation numérique.

L'espace de mobilité est ainsi reconnu comme une solution permettant de délimiter une enveloppe spatiale résultant d'un compromis négocié. Il s'agit en effet de faire la part entre les bénéfices environnementaux liés à l'érosion des berges, et les bénéfices économiques induits par la protection des terrains et des infrastructures contre l'érosion.

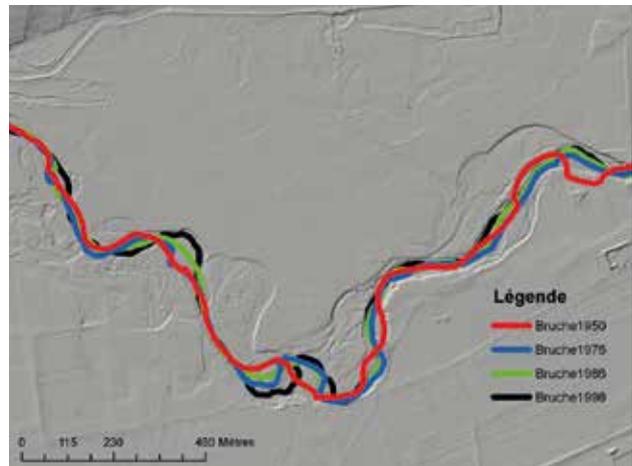


Fig. 13 - Exemple de reconstitution des tracés successifs de la Bruche à partir de photographies aériennes historiques et de données LiDAR.

Morphométrie des méandres

- amplitude (a)
- longueur d'onde (λ)
- rayon de courbure (r_c)
- indice de sinuosité (I_s)

$$I_s = L/\lambda$$

$I_s < 1,05$: chenal rectiligne

$1,05 < I_s < 1,5$: chenal sinueux

$I_s > 1,5$: méandre



Fig. 14 - Principaux indices morphométriques utilisés pour caractériser la forme des méandres. L'amplitude est souvent utilisée dans la délimitation de l'espace de mobilité.

Il est aussi admis que le principe visant à promouvoir le recul des berges et la mobilité en plan du lit des cours d'eau n'est pas adapté à toutes les situations. Certains types de cours d'eau ne possèdent pas véritablement de dynamique latérale active. Délimiter un espace de mobilité dans un tel contexte n'a donc pas vraiment de sens. Il

existe aussi des cas où l'**analyse coût-bénéfice (ACB)** de la protection de berge peut justifier le recours au génie civil ou au génie biologique. Enfin, il n'est pas non plus pertinent de promouvoir l'érosion des berges dans une situation de régime sédimentaire excédentaire et d'exhaussement du lit. **Le concept apparaît surtout adapté aux morphologies à bancs alternés et en tresses en régime sédimentaire déficitaire.**

La législation suisse impose quant à elle la définition précise d'un espace réservé pour les cours d'eau, visant à assurer la protection contre les crues et les fonctions biologiques et sociales.

Défini à l'aide d'un abaque (fig. 15) dont le périmètre de référence correspond à la largeur du fond du lit, cet espace minimal est basé sur les besoins réels des cours d'eau, dépendant de la taille du bassin versant, des débits, de la dynamique naturelle ainsi que des besoins de la faune et de la flore typiques des cours d'eau. Ainsi, l'article 41 de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) impose les dimensions exactes de ces espaces. À titre d'exemple, « l'espace réservé doit être de 11 m pour les cours d'eau dont la largeur naturelle du fond du lit est inférieure à 1 m ».

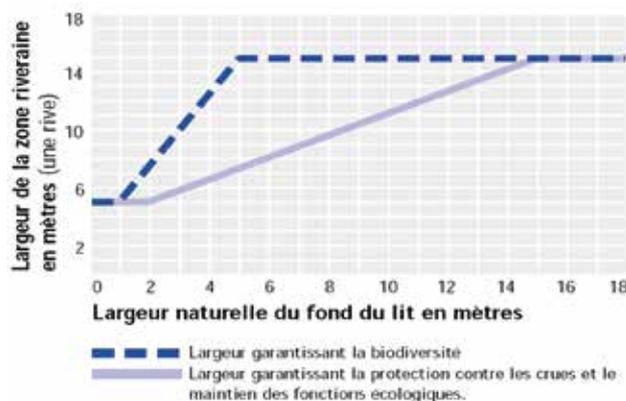


Fig. 15 - Abaque servant à déterminer la largeur de la zone riveraine (OFEFP : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage ; OFEG : Office fédéral des eaux et de la géologie – 2003).

Aucune construction nouvelle n'est tolérée au sein de cet espace à l'exception des installations qui servent un intérêt public ou en zone urbaine suite à dérogation.

Bien que les méthodes de définition du périmètre de l'espace de mobilité soient différentes en France et en Suisse, il n'en reste pas moins que les États encouragent la mise en œuvre d'actions favorisant la dynamique naturelle des cours d'eau.

2.2. La biodiversité des cours d'eau et de leurs milieux annexes

2.2.1. Généralités, fonctions et enjeux

2.2.1.1. Qu'est-ce que la biodiversité ?

Le terme « biodiversité » est largement utilisé mais englobe souvent des réalités différentes. On entend généralement par « biodiversité », la diversité de toutes les espèces vivantes. Il englobe également la diversité des écosystèmes et la diversité génétique. L'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) définit la biodiversité comme « *la variabilité entre les organismes vivants provenant de toutes origines, notamment des écosystèmes terrestres, marins et aquatiques ainsi que les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces, entre les espèces et celle des écosystèmes* ». On peut ainsi **appréhender la biodiversité à trois niveaux : génétique, spécifique et écosystémique.**

La **diversité génétique** concerne la variabilité génétique au sein d'une même espèce. Elle offre aux individus qui la composent des aspects et des caractéristiques différents. Elle permet à l'espèce de s'adapter dans un environnement changeant. La **diversité des écosystèmes** renvoie à la variabilité spatiale des êtres vivants en lien avec les différents milieux qu'ils occupent.

Enfin, plus récemment, la notion de **biodiversité fonctionnelle** a émergé. Il ne s'agit alors plus seulement de considérer les variabilités spécifiques, génétiques et écosystémiques des êtres vivants, mais aussi de prendre en compte leurs propriétés à agir sur le fonctionnement des écosystèmes, comme la production de biomasse, la protection des sols contre l'érosion, la pollinisation, etc.

2.2.1.2. Pourquoi préserver la biodiversité ?

Les espèces sont en interaction entre elles et avec le milieu au sein des écosystèmes, et dépendent souvent les unes des autres pour assurer leur cycle vital. L'homme dépend ainsi du bon fonctionnement des écosystèmes, qu'il s'agisse de la production de biomasse (aliments, énergie, etc.), du recyclage des nutriments (déchets) ou de la photosynthèse (production d'oxygène). Des travaux expérimentaux et théoriques menés ces dernières décennies ont montré que la biodiversité avait un effet positif sur la production de biomasse des écosystèmes.

Des chercheurs ont par ailleurs montré une relation positive entre la diversité et la stabilité de la production de biomasse après une perturbation, indiquant qu'**un écosystème retrouvera généralement plus facilement ses capacités de production après une perturbation** (incendie, sécheresse, destruction, etc.) **s'il est diversifié.**

On voit ainsi que **le maintien de la biodiversité constitue une garantie pour le fonctionnement des écosystèmes**, et qu'il est donc prudent de la maintenir si l'on veut conserver les services fournis par ces écosystèmes. En berges de cours d'eau, ces services sont nombreux,

qu'ils soient récréatifs, liés à la dépollution de l'eau, au développement de la vie aquatique ou à la fixation des berges (fig. 16).

Parmi les services rendus par les écosystèmes, il faut prendre en compte ceux qui sont avérés, mais également ceux qui peuvent être rendus dans le futur. La biodiversité possède un potentiel futur important en termes biochimique ou génétique, par exemple. La préservation de la biodiversité constitue, en ce sens, une assurance pour l'avenir.

Les écosystèmes sont généralement interconnectés et échangent des espèces et des flux de nutriments entre eux. Ainsi, l'altération d'un compartiment va aussi avoir un impact sur les compartiments adjacents. Par exemple, la destruction d'une ripisylve peut interrompre la circulation de certaines espèces, ce qui impacte les échanges de gènes et donc la vitalité des populations, faisant courir un risque de disparition des milieux adjacents. De même, dans un écosystème, **les espèces sont en interaction**, et la disparition d'une espèce peut entraîner la disparition d'autres espèces associées.

Ainsi, si la biodiversité peut être conservée parce qu'elle fait partie de notre patrimoine commun, elle doit aussi l'être parce qu'elle constitue une assurance sur le bon fonctionnement de notre environnement à venir.

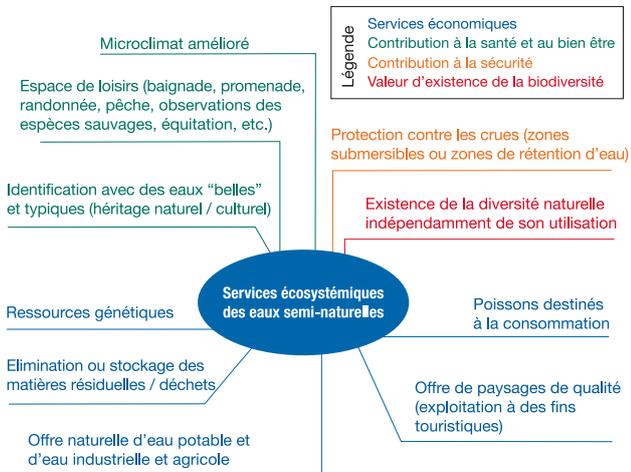


Fig. 16 - Les avantages écosystémiques des cours d'eau (d'après OFEV).

2.2.1.3. Les cours d'eau : des zones particulièrement riches en biodiversité

Les cours d'eau et leurs milieux annexes abritent naturellement une biodiversité élevée. De nombreuses espèces animales et végétales s'y reproduisent, s'y alimentent et s'y réfugient (fig. 17).

Ils constituent des zones d'interface (ou écotones) entre les milieux terrestres et aquatiques et présentent une très grande richesse floristique et faunistique. Si les lacs et rivières n'occupent que 1 à 2 % de la surface des terres émergées, on considère qu'au moins un tiers des vertébrés (poissons, batraciens, reptiles, oiseaux et mammifères)

dépendent étroitement de ces milieux pour accomplir leur cycle biologique (Lévêque 1998). Les formations végétales riveraines permettent également l'accueil de nombreux animaux terrestres (mammifères, oiseaux, amphibiens, arthropodes, etc.), soit durant tout leur cycle de vie, soit seulement pendant une période particulière de ce cycle, comme la reproduction ou l'alimentation. Ces zones abritent à la fois des espèces d'oiseaux inféodées aux habitats forestiers ou rupestres et des espèces spécifiques, comme le martin-pêcheur ou le cincle plongeur, qui dépendent pour leur alimentation ou leur nidification de la présence de l'eau.



Fig. 17 - *Calopteryx splendens* sur une feuille de *Salix purpurea*.

Cette richesse taxonomique particulière s'explique par différents facteurs, notamment par la diversité des biotopes et des structures végétales. En effet, outre son lit mineur et ses berges, le cours d'eau est connecté avec différents milieux annexes (bras morts, zones humides, affluents, terrasses alluviales, ripisylve, etc. – fig. 18).



Fig. 18 - Diversité des habitats sur une portion non rectifiée de la Haute Durance (Hautes-Alpes - France).

Cette hétérogénéité d'habitats est notamment liée aux différentes conditions de sol (granulométrie, fertilité, hygrométrie, etc.) et à un régime élevé de perturbation déterminé par le régime hydrologique du cours d'eau et

les crues qui en résultent. Ce régime est complexe et possède une fréquence élevée. Il est responsable de la création régulière de nouveaux habitats présentant des faciès différenciés empêchant généralement les espèces les plus compétitives de dominer complètement les communautés végétales (Everson et Boucher 1998).

Les crues sont également responsables de l'arrivée de nombreuses espèces végétales par l'intermédiaire de graines qui peuvent germer et de fragments de végétaux qui peuvent se développer par multiplication végétative (propagules). On observe ainsi de véritables pics de diversité spécifique liés à l'arrivée de graines lors des crues qui vont contribuer à diversifier les écosystèmes. Une étude menée à large échelle confirme que les crues et les processus écologiques liés à la présence du cours d'eau ont une importance majeure, alors que la diversité végétale située dans les milieux terrestres à proximité joue un rôle mineur (Renöfält *et al.* 2005). La comparaison de la diversité végétale de rivières aux crues naturelles et de rivières aux crues régulées par des barrages montre que ces dernières ont une diversité moindre. Cela souligne à nouveau le rôle majeur des crues dans la genèse et le maintien de la diversité des milieux rivulaires (Christer et Roland 1995).

On note aussi que la diversité végétale varie en fonction du rang du cours d'eau. Elle est en effet généralement supérieure dans les cours d'eau de rang intermédiaire alors qu'elle est souvent plus faible dans les parties aval (Nilsson *et al.* 1989 ; Nilsson *et al.* 1994 ; Ferreira et Moreira 1999). Enfin, la qualité de l'eau et le degré de perturbation anthropique sont également des facteurs importants.

Outre les espèces inféodées aux milieux rivulaires, ces milieux accueillent également les espèces qui y transitent. **Les ripisylves jouent ainsi un rôle majeur de corridors biologiques** sur les territoires français et suisses qui comptent plusieurs centaines de milliers de kilomètres de cours d'eau. Ces corridors remplissent des fonctions écologiques essentielles et jouent le rôle de vecteurs canalisant les propagules de nombreuses espèces des milieux adjacents. Utilisés comme couloir de migration par de nombreuses espèces, ils créent aussi une continuité en développant des connexions entre des milieux souvent fragmentés. Cela augmente la biodiversité génétique des peuplements en facilitant leur mélange.

2.2.1.4. Des milieux fortement impactés par les espèces végétales envahissantes

Les espèces invasives sont particulièrement dynamiques sur les berges de cours d'eau (fig. 19), notamment en raison du fort régime de perturbation qui y règne et de l'importance du flux de propagules. Il était ainsi estimé en 2001 que 20 à 30 % des espèces de la flore des communautés riveraines de cours d'eau étaient constituées d'espèces invasives (Planty-Tabacchi *et al.* 2001). L'invasion des berges par des plantes invasives joue à la fois sur la diversité spécifique de ces milieux (en la réduisant), mais également sur la diversité des différents taxons qui uti-

lisent ces corridors dans leurs déplacements (Gerber *et al.* 2008). Les espèces invasives ont ainsi un impact sur le bon fonctionnement des corridors écologiques.



Fig. 19 - Berge de cours d'eau envahie par les renouées (*Reynoutria sp.*).

2.2.2. Impacts des aménagements sur la biodiversité

2.2.2.1. Les cours d'eau : des zones particulièrement touchées par l'anthropisation

D'une manière générale, on estime que deux tiers des zones humides originelles françaises ont été détruites. Dans les Alpes françaises, sur plus de mille kilomètres de rivières en tresses, 53 % ont disparu en 200 ans (Piégay *et al.* 2009). Si cette disparition a plusieurs explications, les endiguements et rectifications réalisés afin de protéger des zones urbaines et agricoles y jouent un grand rôle. Ainsi, la même étude montre que sur les cours d'eau en tresses disparus en un siècle, 21 % ont été endigués, 48 % ont été canalisés et 5 % se sont retrouvés inclus dans des plans d'eau de barrages. À titre d'exemple, la largeur de l'Arve sur la commune de Cluse (Haute-Savoie) était comprise entre 300 et 500 mètres en 1936, elle n'était plus que de 120 mètres en 1970 pour atteindre 50 mètres en 1984 (Source : SM3A). En 1996, seuls 18 % des cours d'eau des Alpes françaises pouvaient encore être considérés comme des hydrosystèmes sauvages (Pautou *et al.* 1996). En Suisse, on estime que seuls 54 % des cours d'eau sont dans un état proche de leur état naturel et que plus de 90 % subissent une altération due à l'activité hydroélectrique (EAWAG 2010). La petite massette (*Typha minima*), espèce alpine se développant dans les zones marécageuses des cours d'eau en tresses, a été très impactée par la chenalisation des cours d'eau alpins. Une étude a ainsi montré que son aire de répartition dans les Alpes s'était réduite de 85 % en un siècle. Elle n'occupe plus que 480 kilomètres de cours d'eau, alors qu'on la rencontrait sur environ 3 170 kilomètres au 19^e siècle (Prunier *et al.* 2010).

On s'attachera ici à **trois principaux types d'impact anthropique** sur la structure physique des cours d'eau de montagne : **les travaux de chenalisation, les prélèvements de granulats et les barrages.**

2.2.2.2. Les travaux de chenalisation

Les travaux de chenalisation englobent les travaux de recalibrage, de rectification de tracé, d'endiguement, de protection de berge et de curage. « *Les objectifs hydrauliques visés par les aménagements sont le plus souvent atteints, et cela se traduit par l'accélération de l'écoulement, un surdimensionnement du lit, une réduction de la diversité des mosaïques d'habitats, la disparition des structures d'abris, la réduction des connexions avec le lit majeur* » (Wasson et al. 2000). L'accélération des écoulements liée à la chenalisation des cours d'eau entraîne une augmentation des débits de pointe à l'aval et donc une augmentation des effets dévastateurs des crues. Ces travaux ont aussi un lourd impact sur les écosystèmes. La biomasse piscicole peut ainsi être réduite de plus de 80 % après de tels travaux. Ceux-ci sont en effet le plus souvent suivis par la mise en place de seuils pour stabiliser le fond du lit. Le cumul de ces deux facteurs est particulièrement impactant pour les populations piscicoles. La destruction des connexions hydrauliques avec le lit majeur a aussi un impact fort sur la production piscicole en supprimant des zones de refuge, d'alimentation ou de reproduction.

Dans des zones fortement urbanisées (comme le sont, par exemple, certaines vallées alpines), les ripisylves constituent parfois le dernier corridor écologique disponible pour connecter les écosystèmes situés de part et d'autre des zones urbanisées. Dans ces zones où la pression foncière est forte, l'espace disponible pour les ripisylves est souvent réduit, avec des endiguements et des protections de berge fréquents (fig. 21). Les conditions déjà difficiles pour la circulation de la faune sont parfois encore compliquées par l'existence d'ouvrages linéaires de protection constitués d'enrochements (fig. 20). Ils créent des discontinuités dans les corridors biologiques, avec peu ou pas de caches, de zones refuges pour la faune terrestre, ni de zones d'alimentation. On y observe aussi des températures estivales parfois très élevées et peu favorables à la faune.



Fig. 20 - Protection de berge en enrochement sur un torrent de montagne.

2.2.2.3. Les prélèvements de granulats

À la chenalisation se sont parfois ajoutées des extractions de granulats. Des extractions d'alluvions (sables, graviers, galets) ont ainsi lieu depuis des décennies sur différents cours d'eau alpins. Sur l'Arve, ce sont 10 à 15 millions de m³ de granulats qui ont été extraits entre 1950 et 1980 ; sur la rivière Drôme, des extractions allant jusqu'à 250 000 m³ par an ont été autorisées de 1950 à 1985 (Landon et al. 1998). Ces prélèvements sont en grande partie responsables d'un enfoncement du lit allant jusqu'à 5 mètres pour la Drôme et 12 mètres sur l'Arve. Celui-ci provoque de nombreuses perturbations tels que la déstabilisation des berges ou le déchaussement d'ouvrages. Il est aussi responsable d'un abaissement du niveau de la nappe et donc de l'assèchement de certaines zones humides ainsi que de l'augmentation des risques concernant l'approvisionnement en eau potable.

En France, de telles extractions sont aujourd'hui interdites en lit mineur et fortement réglementées en lit majeur.

2.2.2.4. Les barrages et les seuils

De nombreux barrages à vocation essentiellement hydroélectrique ont été installés sur les cours d'eau alpins. Ils ont un fort impact sur l'hydrologie du cours d'eau, avec une désaisonnalisation du régime originel (stockage de l'eau, soutien d'étiage) et une réduction des débits sortants.

La régulation des régimes de crue par les barrages change le régime hydrologique et réduit le nombre et l'intensité des crues. En conditions naturelles, le régime de crue est à l'origine de perturbations fortes des écosystèmes alluviaux. Ces perturbations récurrentes contribuent à la biodiversité des cours d'eau en maintenant des milieux à différents stades d'évolution, mais aussi en assurant la connexion du lit mineur avec les milieux annexes. Par conséquent, le lissage des crues par les barrages a des effets négatifs non négligeables sur le milieu : il entraîne une perte de l'hétérogénéité des habitats et une diminution de la biodiversité des cours d'eau et de leurs annexes. Ces ouvrages constituent également un obstacle physique à la circulation des organismes aquatiques comme la remontée ou la dévalaison du poisson. Ils entravent le transit sédimentaire, créant ainsi un déficit en matériaux solides à l'aval. De plus, les « chasses », qui servent à évacuer une partie des matériaux stockés dans la retenue, ont un impact important, notamment à cause d'un apport massif de matières en suspension. Enfin, la qualité de l'eau stockée dans la retenue est inférieure à celle du cours d'eau à l'amont (désoxygénation, concentration de polluants, etc.). L'eau rejetée à l'aval provient ainsi généralement des eaux stagnantes et profondes, ce qui est susceptible d'avoir des impacts sur les organismes aquatiques.



Fig. 21 - Comparaison de la confluence des rivières Arve et Giffre entre 1935 et 2004.

Ainsi, les différentes formes d'artificialisation des cours d'eau, qu'il s'agisse de la modification de l'hydrologie, du curage, du rescindement de méandres, de la construction de protections de berge ou d'endiguement, ont toutes en commun d'altérer les dynamiques naturelles des écosystèmes et des successions écologiques propres à ces milieux. Ces interventions détruisent également les connexions entre les différents milieux associés aux cours d'eau, fragmentant les habitats et limitant la circulation et le développement de nombreuses populations animales et végétales.

De plus, on peut noter que le bois mort dans les cours d'eau, s'il peut être un facteur aggravant de l'érosion et des inondations, constitue très généralement un facteur bénéfique du point de vue écologique en créant des habitats et un apport de matière organique pour les organismes aquatiques. Ainsi, dans certains cas, la biomasse totale de poissons peut être réduite de 30 % par l'enlèvement des embâcles sur un cours d'eau lors de travaux d'entretien systématiques (Wasson *et al.* 2000).

3. Génie végétal en montagne

3.1. Définition et principes

Le génie végétal est un ensemble de techniques de construction fondé sur l'observation et l'imitation des modèles naturels pour répondre à des problématiques d'aménagement du territoire. Les principaux domaines d'utilisation du génie végétal sont :

- la lutte contre l'érosion du sol ou l'instabilité des talus ;
- la renaturation d'un site (écologique, paysagère, etc.) ;
- la lutte contre les espèces invasives ;
- la protection contre les risques naturels ou le bruit.

Il s'agit donc de techniques alternatives aux techniques traditionnelles de génie civil.

Surell déclarait en 1841 que « *la végétation est le meilleur moyen de défense à opposer aux torrents. [...] L'art alors se bornera à imiter la nature, à s'emparer de ses procédés, et à opposer habilement les forces de la vie organique à celles de la matière brute* ». Cette idée de **reproduction de modèles naturels** se retrouve dans beaucoup de définitions du génie végétal (ou génie biologique). Ainsi, pour Zeh (2007) : « *Le génie biologique traite de la construction d'une manière proche de la nature.* » Pour Adam et al. (2008), « *il est une imitation de la nature* » et correspond à « *une protection vivante inspirée des modèles naturels* ».

Un ouvrage relève du génie végétal si la végétation y assure des fonctions structurelles (stabilité, ancrage) et qu'elle n'intervient pas uniquement comme supplément (verdissement) d'une structure qui se suffit à elle-même sur le plan mécanique (fig. 1). Ainsi, Schiechl (1992) stipule qu'une caractéristique du génie biologique est que **les plantes et le matériel végétal constituent des matériaux de construction (vivant) à part entière, utilisables seuls ou en association avec des matériaux inertes**. Dans cet esprit, un ouvrage ne peut être qualifié de génie végétal que si les matériaux vivants sont utilisés comme base de sa construction (Adam et al. 2008).

Gray et Sotir (1996) différencient les techniques de stabilisation « biotechniques » (*biotechnical stabilization*) du génie biologique proprement dit (*soil bioengineering*). Pour ces auteurs, les techniques de stabilisation « biotechniques » combinent des structures inertes et des végétaux vivants sans que ces derniers n'assurent nécessairement de rôle mécanique. Le génie biologique apparaît ainsi comme un sous-ensemble du domaine biotechnique pour lequel les végétaux servent comme éléments structurants de l'ouvrage, assurant un vrai rôle mécanique. Dans le même esprit, et en ce qui concerne les berges de cours d'eau, Fripp (2008) souligne le caractère flexible et plastique des aménagements structurés par des végétaux, et propose de séparer les ouvrages en fonction de leur flexibilité : il oppose alors les **ouvrages rigides** dont la structure repose sur des matériaux inertes, et les **ouvrages**

souples dont la structure repose sur des végétaux. Ces définitions et les portées sémantiques des termes présentent une importance particulière lorsqu'on s'intéresse au génie végétal en rivière de montagne. En effet, **s'agissant de rivières à fortes pentes et à forte énergie, les ouvrages de protection de berge font fréquemment appel à des matériaux auxiliaires lourds comme des enrochements**.



Fig. 1 - Protections de berges en génie végétal sur la Petite Gryonne, cours d'eau torrentiel des Préalpes vaudoises (chantier pilote Géni'Alp - Canton de Vaud - Suisse).

En s'appuyant sur les définitions énoncées ci-dessus, on peut considérer que **le génie végétal rassemble l'ensemble des ouvrages pour lesquels les végétaux assurent une fonction de stabilisation mécanique**. On parlera de génie biotechnique pour les ouvrages dans lesquels ce sont les matériaux inertes qui assurent les fonctions de stabilisation mécanique, comme, par exemple, les enrochements végétalisés. Dans les ouvrages de génie biotechnique, les végétaux n'assurent pas ou peu de fonctions mécaniques, ces dernières étant assurées par des ouvrages de génie civil comme l'enrochement ou le grillage. Les végétaux assurent en revanche des fonctions écologiques (création d'habitats, maintien d'une partie de la fonctionnalité des corridors, etc.) et des fonctions paysagères. Même en appui de matériaux minéraux lourds, les végétaux peuvent également contribuer à la stabilité de la berge par augmentation de sa rugosité et par renforcement de la stabilité de l'ouvrage par les systèmes racinaires.

Les ouvrages de protection de berge peuvent être classés en trois types principaux : le génie végétal, le génie forestier et le génie civil. Le génie forestier concerne les ouvrages réalisés avec des structures bois (rondins), et le génie civil concerne les ouvrages réalisés avec des matériaux minéraux (enrochements, grillages, etc.). La figure 2 ci-après permet de positionner ces trois types d'ouvrages qui ne s'excluent pas mutuellement. En effet, des végétaux vivants peuvent être intégrés à des ouvrages bois (caissons végétalisés, par exemple), des techniques végétales peuvent également être associées à des techniques de génie civil (lits de plants et plançons et enrochement de pied de berge, par exemple).

Les matériaux utilisés dans les ouvrages de génie végétal sont principalement des végétaux vivants (semences, boutures, plants, etc.). En appui à ces matériaux vivants, des matériaux inertes à base de matière végétale (troncs, pieux en bois, géotextiles, etc.) ou minérale (enrochements, pieux métalliques, fils de fer, etc.) peuvent toutefois être utilisés. Les techniques de génie végétal utilisant à la fois des matériaux végétaux et minéraux sont appelées techniques mixtes.

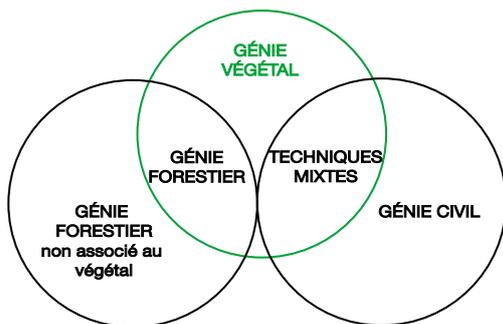


Fig. 2 - Étendue du génie végétal et des domaines associés.

Des matériaux inertes sont parfois installés pour assurer la tenue de la berge en attendant que la végétation se développe et prenne le relais de la protection de la berge, comme c'est le cas pour les géotextiles biodégradables ou, dans une certaine mesure, pour les caissons en bois végétalisés. Ces matériaux peuvent également être utilisés en complément de la végétation pour accroître la stabilité de la berge dans des zones à trop fortes contraintes. Par exemple, des enrochements de pied de berge sont souvent utilisés pour protéger la partie inférieure de celle-ci dans les rivières de montagne, en complément d'ouvrages en matériaux vivants sur la partie supérieure. Cette pratique peut notamment se justifier par la présence naturelle de blocs dans le lit des rivières de montagne (fig. 3).



Fig. 3 - Présence de blocs en rivière de montagne.

Le génie végétal est un domaine pluridisciplinaire faisant appel à des connaissances variées : ingénierie, botanique, écologie végétale, hydraulique, hydrologie, pédologie, géotechnique, etc. La mise en œuvre de chantiers de génie végétal est donc complexe car de multiples facteurs interviennent et influent sur l'efficacité de la stabilisation de la berge et la pérennité de l'ouvrage. Celle-ci

dépend largement du bon développement des végétaux, ces derniers ayant pour but d'augmenter la stabilité du sol.

Pour qu'un ouvrage de génie végétal soit efficace, il faut être particulièrement attentif au choix des espèces utilisées, à la conception, à la méthode de construction de l'ouvrage et à son entretien. Une bonne observation du site et de ses paramètres stationnels (hydrologie, température, propriété du sol, luminosité, etc.) est primordiale pour la réalisation de ces ouvrages. En effet, les végétaux doivent être en mesure de se développer rapidement dans les conditions locales. **Un ouvrage de génie végétal est réussi lorsqu'il protège les biens et les personnes contre les problèmes d'érosion, mais aussi lorsqu'il s'intègre parfaitement à son milieu (propriétés écosystémiques, paysage, usages, etc.).**

Un des dangers de l'utilisation de ces techniques peut être de considérer les ouvrages de génie végétal uniquement comme des aménagements paysagers. Lachat (1994) considère que le génie végétal ne doit pas se borner à un « *effet esthétique* ». Au contraire, l'ambition du génie végétal est **de contribuer à la conservation, l'amélioration et la recréation des fonctions naturelles** (Lachat 1991).

Dans un contexte global d'aménagement des cours d'eau, le génie végétal est utilisable dans différentes situations et pour plusieurs types d'intervention. Ses domaines d'application variés en font **un outil à disposition du gestionnaire et non pas un concept d'aménagement**. Comme présenté sur la figure 4, le génie biologique fournit des solutions intéressantes et s'adapte tout à fait à différents types de projets, qu'il s'agisse de travaux d'endiguement comme de travaux de restauration de cours d'eau au sens large.

En effet, il s'intègre parfaitement à la fois dans le cadre de travaux lourds visant des objectifs purement sécuritaires de protection contre les crues et contre l'érosion. Mais il est surtout utilisé et adapté dans le cadre de travaux de revalorisation (niveau d'objectif du type **R1**) et de renaturation de cours d'eau (**R2**) visant à diversifier les milieux et à améliorer les caractéristiques écologiques (Malavoi *et al.* 2007). Au-delà, il est également largement utilisé pour des opérations plus ambitieuses de revitalisation, dont l'objectif est de rendre un espace de mobilité latérale à la rivière et de reconstituer les conditions nécessaires à la dynamique fluviale (**R3** – fig. 4).

RESTAURATION (R)		
ENDIGUEMENT	REVALORISATION (R1) RENATURATION (R2)	REVITALISATION (R3)
Protection contre les crues comme unique objectif	Amélioration de la structure des berges et du lit	Espace nécessaire au cours d'eau
Génie civil	Adoucissement des berges	Expression des phénomènes dynamiques
Techniques mixtes	Diversification du milieu et amélioration des conditions de développement pour les biocénoses	Ouvrages de protection réduits au minimum
Impacts négatifs souvent importants sur les biocénoses		Aménagement du territoire
GÉNIE BIOLOGIQUE (techniques végétales)		

Fig. 4 - Principales catégories d'intervention et situation du génie biologique dans un contexte global d'aménagement des cours d'eau.

3.2. Le génie végétal face au génie civil : avantages, limites et coûts

3.2.1. Des avantages environnementaux et techniques certains...

Le génie végétal est souvent présenté comme une alternative plus respectueuse de l'environnement par rapport aux techniques traditionnelles du génie civil (enrochement, béton, maçonnerie, etc.). Du point de vue de la biodiversité et de la ressemblance des aménagements par rapport aux berges « naturelles », le génie végétal présente en effet des atouts certains (chap. II.6).

Parmi les **bénéfices environnementaux** du génie végétal, on peut citer :

- l'augmentation de l'ombrage sur le cours d'eau, engendrant une **diminution de la température de l'eau et une augmentation de la concentration de l'oxygène dans l'eau**. Cela procure des conditions favorables pour le développement de la faune aquatique (macro-invertébrés et poissons notamment) ;
- la garantie de la **présence d'habitats diversifiés** favorables au développement de nombreuses espèces animales (insectes, macro-invertébrés, poissons, oiseaux, reptiles, etc.) ;
- **l'apport d'aliments** (production de matières organiques et piégeage des nutriments) pour la faune du cours d'eau ;
- le **maintien des fonctions de « corridor biologique »**. En zone urbanisée ou péri-urbanisée, le corridor est fondamental au maintien et à la conservation de nombreuses espèces animales qui, sans possibilités de déplacement, périssent, se raréfient, voire disparaissent (appauvrissement génétique par isolement de populations) ;
- la **limitation de la prolifération des espèces invasives**, telles que la renouée du Japon ;
- **l'augmentation du pouvoir autoépuration du cours d'eau** : les végétaux favorisent en effet la dégradation ou l'absorption de molécules polluantes. La ripisylve filtre ainsi une partie de la pollution en diminuant, par exemple, la quantité de nitrate. Elle constitue ainsi une **zone tampon** entre les milieux terrestres et le cours d'eau ;
- une **bonne intégration paysagère** du cours d'eau. La présence de ripisylve constitue un atout pour le tourisme et les loisirs.

Par ailleurs, sous réserve de l'utilisation d'espèces indigènes de provenance locale, la mise en place d'ouvrages de génie végétal participe à la **conservation du patrimoine génétique des espèces**. Par exemple, dans le cas des rivières de montagne, l'utilisation de certaines espèces vulnérables, présentes naturellement aux abords du site, permet de créer de nouveaux noyaux de populations favorisant ainsi la pérennité de l'espèce en facilitant l'échange de gènes entre les différents noyaux existants. Les cas de la myricaire ou de l'argousier (en régression

dans tout l'Arc alpin) et des saules glauque, helvétique ou bleuâtre en sont de parfaites illustrations. **Par l'intermédiaire de processus de brassage génétique, une espèce ou un contingent d'espèces diversifient ainsi leur patrimoine génétique**. Ceci va alors se traduire par l'augmentation de la tolérance des populations vis-à-vis de différents facteurs comme les maladies ou les conditions climatiques extrêmes (froid, sécheresse, etc.).

Sur un **plan technique**, le génie végétal présente des avantages également considérables. Notons principalement les points suivants :

- **l'efficacité de la résistance des ouvrages de génie végétal augmente avec le temps** du fait du développement des végétaux, tandis que celle des enrochements stagne, voire diminue avec le temps. À terme, certaines techniques telles que les couches de branches à rejets dépassent ainsi le seuil de résistance de certains types d'enrochement (Schiechl et Stern 1996) ;
- la grande diversité de techniques disponibles permet **d'adapter les aménagements à de multiples contextes** en combinant les techniques (part. II) ;
- les végétaux installés sur les ouvrages peuvent éventuellement à leur tour fournir la matière première (branches, boutures, etc.) pour la construction d'autres ouvrages. Ceci n'est toutefois pas conseillé car il s'ensuit, à terme, un appauvrissement génétique (boutures de boutures) ;
- la possibilité, dans de nombreux cas, de **prélever le matériel sur place ou à proximité directe d'un chantier** permet au maître d'ouvrage de diminuer les coûts énergétiques pour la construction ;
- les **ouvrages de génie végétal** sont généralement **souples et adaptables**, contrairement aux ouvrages de génie civil qui sont rigides.

Selon les contextes, les techniques de génie végétal n'ont toutefois pas que des avantages et peuvent présenter des inconvénients parfois gênants pour leur utilisation ou nécessiter un suivi plus important.

3.2.2. Des inconvénients surmontables...

3.2.2.1. Les limites techniques d'avant-projet

La **période d'intervention** pour la création d'un ouvrage de génie végétal est réduite par rapport à celle dont le maître d'ouvrage dispose pour un ouvrage de génie civil. La période estivale n'est généralement pas propice à la réalisation de chantiers utilisant les végétaux en raison de la période végétative (montée de sève) et d'une plus faible disponibilité en eau dans le sol durant cette période. Il convient donc, dans la mesure du possible, d'intervenir en dehors de cette période. **En cours d'eau de montagne**, cette question est davantage problématique en raison des **régimes hydrologiques et des conditions climatiques contraignants pour les travaux** (accessibilité du chantier, tenue du sol, présence de neige, difficultés pour travailler dans le lit mineur en période de hautes eaux, etc.) et pour la végétation (crues). Sur certains cours d'eau, la fraie hivernale des salmonidés peut également constituer un facteur limitant pour l'intervention.

Même s'il existe de nombreuses espèces ligneuses adaptées à l'altitude, la **limite altitudinale de la végétation** est bien sûr un facteur limitant de la mise en œuvre d'ouvrages de génie végétal (part. III). Par ailleurs, le **régime torrentiel** de certains cours d'eau de montagne implique des **contraintes mécaniques élevées** que le génie végétal ne peut supporter au-delà d'un certain seuil (chap. II.3). Dans ce cas, si l'intervention est nécessaire, il est indispensable d'avoir recours à des techniques de génie civil.

3.2.2.2. Les problèmes potentiels d'après travaux

La question de la **résistance mécanique dans les premiers mois suivant la mise en place de l'ouvrage** constitue également une limite qu'il convient de prendre en compte. En effet, avant que les végétaux ne se développent, la résistance de l'ouvrage aux contraintes mécaniques exercées par une éventuelle crue est faible.

Avec une période de hautes eaux printanière ou estivale, l'ouvrage a davantage de risques de subir une crue et d'être ainsi déstabilisé ou détruit avant la reprise de la végétation (chap. II.3). C'est moins le cas pour un ouvrage de génie civil tel qu'un enrochement, dont la résistance mécanique est immédiatement maximale. La qualité de réalisation de l'ouvrage, qu'il soit en génie végétal comme en génie civil, pondère bien sûr très largement ce constat. Un aménagement bien conçu et bien réalisé présentera immédiatement une résistance plus élevée qu'un ouvrage présentant des défauts de conception ou de fabrication.

Ces éléments ne sont pas les seuls facteurs d'échec possibles d'un ouvrage de génie végétal. Qu'il s'agisse de la **sensibilité des espèces utilisées aux maladies et à la sécheresse**, ou de la vulnérabilité des espèces à bois tendre comme les saules face à l'appétit des castors, ou encore des risques de dégradation ou de vandalisme, **les causes d'échec sont multiples. Néanmoins, elles peuvent souvent être anticipées et réduites.**

Par ailleurs, par rapport aux procédés de génie civil classiques, la végétalisation des berges peut avoir des conséquences négatives en termes de gestion des inondations. Par exemple, l'augmentation de l'encombrement du lit et/ou la production accrue d'embâcles peut provoquer une augmentation de la hauteur d'eau en amont de l'ouvrage. On prêtera également attention à la végétalisation à proximité des digues de protection contre les inondations qui peut parfois accroître les risques de rupture (chap. I.4.1.5).

Il convient ainsi de prendre en compte ces différentes contraintes lors de l'élaboration d'un projet de protection de berge.

3.2.3. Les coûts de revient d'ouvrages en génie végétal et en génie civil

3.2.3.1. Objectifs et approche méthodologique

L'objectif est ici de fournir aux maîtres d'ouvrage et aux maîtres d'œuvre une première idée *a priori* des prix applicables pour la réalisation d'ouvrages de génie végétal et de faciliter leur choix quant aux techniques à utiliser

(tab. 2). L'idée est de **fournir une fourchette des coûts de revient des techniques** suivantes :

- fascines de saules ;
- lits de plants et plançons ;
- couches de branches à rejets ;
- caissons végétalisés ;
- enrochement de pied de berge.

Les quatre premières techniques sont complétées par la mise en œuvre de plantations, de boutures et d'un enherbement, comprenant le prix du géotextile. La présentation d'enrochements de pied de berge dans les techniques considérées ici se justifie par la nécessité d'utiliser cette technique dans une grande partie des ouvrages de protection de berge réalisés en rivière de montagne afin de stabiliser le pied de l'ouvrage face aux fortes contraintes tractrices qui lui sont imposées.

Le projet Génie'Alp s'est attaché à réaliser un retour d'expériences sur des cours d'eau de montagne de l'espace alpin afin de recenser les coûts de différentes techniques utilisables en rivière de montagne. Plusieurs références issues de la littérature scientifique européenne fournissent des éléments de chiffrage des différentes techniques. Ceux-ci semblent néanmoins insuffisamment précis pour être extrapolés en France et en Suisse. Ils ont ainsi été confrontés aux coûts des chantiers pilotes mis en œuvre dans le cadre du projet (chap. II.4). L'ensemble des données recueillies a été complété grâce au recueil de coûts pratiqués auprès des partenaires du projet (ARRA, SM3A, SYMASOL, ONF, hepia, Irstea).

On constate également que la bibliographie donne des éléments de chiffrage relativement précis pour la mise en place d'ouvrages de génie végétal ou de génie civil en plaine. Néanmoins, **les prix pratiqués localement varient très largement selon le contexte économique, la situation du site, la disponibilité des matériaux sur place, etc.** Les comparaisons sont donc difficiles. **Concernant l'application de ces techniques en zone de montagne, les éléments de chiffrage sont par contre très rares** en raison du très faible nombre de retours d'expériences disponibles et des caractéristiques spécifiques de ces territoires. La variabilité des prix y est encore plus importante du fait de la grande diversité de contraintes influant sur les conditions de mise en œuvre (période et durée d'intervention, accès au chantier, espèces utilisées, etc.). Il est ainsi très complexe de déterminer les prix moyens des techniques de génie végétal en rivière de montagne.

L'analyse et la comparaison des coûts sont d'autant plus difficiles qu'il existe différentes modalités de réalisation pour une même technique. La densité des plants, par exemple, peut différer pour un même type d'ouvrage selon les concepteurs et le contexte. Les coûts unitaires propres à chaque technique ne sont pas non plus fournis avec les mêmes unités (unité, ml, m² ou m³), ce qui complexifie encore la comparaison.

L'analyse présentée ici consiste à déterminer les prix de plusieurs techniques prises de manière individuelle et non de leurs combinaisons qui, selon l'ouvrage et le contexte, différeront par leurs modalités de mise en œuvre, les matériaux utilisés ou les linéaires réalisés.

3.2.3.2. Coûts observés

Les coûts présentés comprennent les fournitures (bou-tures, plants, bois, géotextile, etc.) et la mise en place de l'ouvrage. Les coûts d'installation du chantier, de prépa-ration du terrain (retalutage, déblai/remblai, etc.) et d'en-tretien sont exclus du fait de leur caractère très variable selon les chantiers et les territoires.

Ces éléments de chiffrage sont donnés à titre indicatif et reflètent la forte variabilité des prix de chaque technique.

Ils doivent être pris avec précaution, d'une part en raison d'unités de mesures différentes (mètre linéaire, m², m³, unité) et, d'autre part, la comparaison isolée du coût des techniques ne correspond pas à la réa-lité du terrain. Ces techniques ne sont en effet que très rarement utilisées seules sur un ouvrage.

En effet, la protection d'une berge impose généra-lement de combiner différentes techniques, notam-ment entre le pied de berge et la partie supérieure de celle-ci. Des combinaisons possibles sont ainsi fournies dans le tableau suivant (tab. 1).

Les fourchettes des coûts observés en France et en Suisse pour chaque technique sont présentées dans le tableau ci-après (tab. 2). L'amplitude de variation des tarifs est déterminée par les valeurs minimales et maxi-males recueillies.

Tab. 1 - Combinaisons possibles de techniques de génie végétal et de techniques mixtes.

Pied de berge	Partie supérieure de la berge
Fascines de saules	Bouturage/plantation + Ensemencement
Fascines de saules	Lits de plants et plançons + Ensemencement
Caissons végétalisés	Bouturage/plantation
Enrochement de pied de berge	Couches de branches à rejets + Plantation + Ensemencement
Enrochement de pied de berge	Bouturage/plantation + Ensemencement
Enrochement de pied de berge	Lits de plants et plançons + Ensemencement

Les techniques purement végétales semblent moins coûteuses que les techniques mixtes. On observe éga-lement des coûts particulièrement élevés en Suisse (tab. 2). La variation des prix mise en évidence pour une même technique est relativement importante. Elle dépend notamment :

- de la provenance des matériaux (achetés ou pré-lévés sur site) ;
- du type de structure qui réalise les travaux (entreprise, association d'insertion, régie) et de son expérience ;
- de la densité des plantations, boutures et enherbements ;
- de l'accessibilité du site ;
- de la qualité des matériaux utilisés ;
- du cours des marchés.

Tab. 2 - Synthèse des coûts par technique de génie végétal et technique mixte (éléments de chiffrage fournis à titre indicatif et à considérer avec précaution : unités de mesure différentes, techniques prises isolément et très rarement utilisées seules sur un même ouvrage).

Techniques de génie végétal et techniques mixtes	Unité	Prix observés (fournitures + mise en œuvre)	
		En France (en € HT)	En Suisse (en CHF HT)
ENHERBEMENT / ENSEMENCEMENT (géotextile compris)	m ²	4 à 10	8 à 9
BOUTURES	Unité	1 à 5	2,5 à 5
PLANTATIONS	Unité	2 à 10	3 à 20
FASCINES DE SAULES	ml	50 à 100	60 à 150
LITS DE PLANTS ET PLANÇONS	ml de lit	20 à 40	60 à 100
COUCHES DE BRANCHES À REJETS	m ²	30 à 80	80 à 100
CAISSONS VÉGÉTALISÉS	m ³ de bois posé	100 à 400	300 à 700
ENROCHEMENT	m ³	70 à 150	170 à 500

Rappelons également, à titre indicatif, que les ouvrages doivent faire l'objet d'un entretien régulier espacé dans le temps, selon les buts de la protection et des impacts de la végétation sur les flux ou sur les biens. Il s'agit d'assurer la pérennité de l'ouvrage et de limiter les éventuels troubles provoqués par son vieillissement (encombrement du lit, embâcles, perturbation des flux, etc.). On estime que ces

coûts d'entretien sont compris entre 10 et 15 % du montant total de l'ouvrage. Ce dernier doit faire l'objet d'une surveillance accrue au cours des premières années afin de vérifier la bonne tenue de l'aménagement, la bonne reprise végétative des plants et boutures, et réparer d'éventuels dégâts causés par une crue précoce ou par la sécheresse.

4. Pourquoi, quand et comment protéger ?

Au cours des derniers siècles, les sociétés modernes n'ont eu de cesse de protéger les berges des cours d'eau pour l'agriculture et l'urbanisation, et de se protéger contre les inondations.

La réflexion autour de la protection de berges est une question d'aménagement du territoire, dont les conséquences dépassent largement la seule protection d'un enjeu local et doivent être envisagées à l'échelle d'un cours d'eau ou d'un tronçon. Elle intervient bien évidemment en amont et est totalement indépendante de toute réflexion autour des techniques à utiliser.

Si certains enjeux doivent nécessairement être protégés compte tenu de leur importance (zones d'urbanisation dense, infrastructures de transport majeures, ouvrages de franchissement, etc.), il doit être envisagé, dans un souci de restauration des cours d'eau, d'**accepter l'érosion de certains terrains faisant l'objet d'enjeux moindres**. En effet, la stabilisation des berges bloque le processus de recharge sédimentaire nécessaire aux cours d'eau pour retrouver un équilibre morphologique, et participe ainsi à l'aggravation des dysfonctionnements de l'hydrosystème fluvial dont les conséquences sont tant environnementales qu'économiques.

La généralisation à l'ensemble d'un bassin versant des déséquilibres sédimentaires liés au blocage du transport solide et de la recharge sédimentaire risque d'engendrer des effets cumulatifs potentiellement graves et impactants pour les activités humaines. Pour exemple, l'incision du fond du lit provoque l'augmentation des processus d'érosion de berge par affouillement et l'accroissement du risque de déchaussement d'ouvrages d'art (ponts, digues, etc.) et de protection de berge. L'abaissement de la nappe d'accompagnement et son corollaire, la diminution de la ressource en eau, voire sa disparition (affleurement du substrat rocheux), figurent également parmi les conséquences les plus graves liées à l'incision.

Stabiliser les berges d'un cours d'eau dans sa plaine alluviale signifie empêcher la reprise du stock alluvial du lit majeur récemment formé et des terrasses plus anciennes par le cours d'eau (« production interne »), ce qui permettrait de garantir son rééquilibrage sédimentaire (Malavoi *et al.* 2011). De même, en zone de montagne, principale zone de « production externe » de sédiments grossiers, la stabilisation des versants est préjudiciable à l'alimentation du cours d'eau en matériaux.

Ceci, associé aux fortes perturbations du transport de matériaux solides induites par la création de barrages et seuils et par les importantes opérations de curage et d'extraction de granulats menées au cours du siècle dernier notamment, provoque d'**importants dysfonctionnements hydromorphologiques des cours d'eau**. C'est de ce constat qu'est né le concept d'espace de liberté ou de mobilité dans les années 1980, ainsi que la prise de conscience de la nécessité de garantir l'équilibre sédimentaire des cours d'eau en préservant leur capacité d'érosion (Malavoi *et al.* 2011 ; chap. 1.2).

Ainsi, s'il est tout à fait acceptable de protéger les enjeux importants contre l'érosion, il est également indispensable d'inclure cette démarche dans une **logique de préservation de l'espace de mobilité à l'échelle de l'intégralité du linéaire du cours d'eau afin d'assurer une recharge sédimentaire suffisante. Il s'agit ainsi de prendre en compte la problématique de l'équilibre sédimentaire des cours d'eau dans les politiques d'aménagement du territoire afin de préserver l'intérêt général.**

Ce point impose la prise en compte, à l'échelle du bassin versant, des enjeux tant environnementaux que socio-économiques, des dysfonctionnements de l'hydrosystème et de leurs impacts potentiels sur ces enjeux, mais également l'appréciation du rapport « coûts/bénéfices » lié au déplacement de certains enjeux hors de l'espace de mobilité du cours d'eau. Une analyse coût-bénéfice (ACB) est ainsi à privilégier (chap. 1.4.1.3.1).

Définition :

La notion d'enjeu recouvre une notion de valeur ou d'importance. Un bien matériel peut ainsi être caractérisé par une valeur fonctionnelle, économique (vénale) et/ou sociale.

Un enjeu (bien ou activité) peut être vulnérable vis-à-vis d'événements ou de phénomènes donnés. On peut définir sa vulnérabilité en termes physiques (son « aptitude à être plus ou moins affecté, en termes de perte ou d'endommagement, par la survenance d'un phénomène donné d'intensité donnée ») ainsi qu'en termes sociaux, économiques, environnementaux ou fonctionnels (« niveau des conséquences prévisibles d'un phénomène sur les enjeux, en termes sociaux, économiques ou fonctionnels »).

« L'identification des enjeux a pour objet la mise en évidence de biens, de personnes, de milieux ou de fonctions qui seraient susceptibles d'être endommagés par des phénomènes [...]. Ces dommages auraient probablement de plus des conséquences économiques et/ou sociales et/ou environnementales » (INERIS et BRGM 2007).

leurs acquéreurs en raison de leur faible coût d'achat et de la valeur ajoutée produite par les activités qui y furent installées, parfois très importantes (usines, manufactures, agriculture intensive, etc.).

C'est le cas en zone de montagne et de piémont, où les recalibrages successifs des cours d'eau et la lutte contre les inondations ont permis à la fois le développement de l'agriculture, l'implantation d'infrastructures productives et de transport ainsi que l'urbanisation des fonds de vallées. Ceux-ci, auparavant largement occupées par la rivière, ont ainsi été colonisés par les activités humaines favorisant très fortement le développement économique de territoires autrefois relativement hostiles. En France, à l'exemple de la vallée de l'Arve, les vallées alpines ont connu un essor industriel majeur au cours du 20^e siècle notamment. Cela s'est traduit en France comme en Suisse par l'installation de très nombreux ouvrages hydroélectriques et par la canalisation des rivières.

4.1. Les enjeux socio-économiques et la protection face au risque « érosion »

4.1.1. Des enjeux hérités de politiques économiques et d'aménagement du territoire...

Les pouvoirs publics et les collectivités gestionnaires de milieux aquatiques doivent aujourd'hui composer avec un « héritage socio-économique » fruit de plusieurs décennies de politiques d'aménagement du territoire au cours desquelles la logique économique a largement prévalu sur la logique environnementale. Les lits majeurs des cours d'eau ont offert des terrains peu coûteux et en apparence faciles à viabiliser pour l'urbanisation et les différentes activités économiques. Ces terrains ont apporté une réelle plus-value économique et financière à

L'implantation d'enjeux au sein du lit majeur des cours d'eau a causé une forte augmentation de la vulnérabilité face au risque d'inondation, et a nécessité la création d'ouvrages hydrauliques comme les digues de protection contre les crues. Or, ces aménagements ont un effet pervers : sensés diminuer le risque, ils n'ont en réalité diminué que l'aléa, avec plus ou moins de succès. Au bilan, le risque a fortement augmenté par le positionnement d'enjeux en arrière des ouvrages, qui a accru la vulnérabilité (Degoutte 2006). Ainsi, les différentes politiques d'aménagement du territoire ont mis en place un cercle vicieux nécessitant toujours davantage de protection contre les inondations et l'érosion des berges afin de protéger des enjeux dont l'implantation en lit majeur est favorisée par un sentiment illusoire de sécurité, lui-même fourni par l'existence des aménagements hydrauliques. Or, ces aménagements nécessitent une gestion, une surveillance et un entretien parfois lourds et coûteux afin d'assurer leur bon fonctionnement et leur pérennité. Celle-ci peut d'ailleurs parfois être remise en cause par un mauvais usage et un mauvais entretien des végétaux sur l'ouvrage (chap. I.4.1.5).



Fig. 1 - L'Arve au Fayet (Haute-Savoie - France), corsetée entre les infrastructures de transport, les zones urbanisées et les zones d'activité économique.

Aujourd'hui, on retrouve ainsi à la fois des zones urbanisées (habitat, zones d'activités, zones industrielles, etc.) et de l'habitat isolé, mais aussi d'importantes infrastructures de transport (routes principales, autoroutes, chemin de fer, etc. – fig. 1). La création de ces enjeux stratégiques ainsi que leur protection nécessitant une quantité importante de matériaux, a conduit au développement de zones d'extraction massive de granulats en lit mineur puis en lit majeur (gravières). Au-delà de la simple préservation de leur intérêt économique, ces gravières, plans d'eau artificiels le plus souvent créés à proximité directe des cours d'eau, constituent désormais un risque environnemental en cas de connexion avec le cours d'eau (piégeage massif des sédiments en transit et aggravation des processus d'érosion).

Par ailleurs, **la substitution de zones naturelles ou de pâturage par des terres labourées et cultivées gagnées sur la rivière a également participé, au même titre que l'urbanisation, à augmenter considérablement les valeurs sociale et vénale des fonds de vallées alpines.**

4.1.2. La prise en compte de la dimension socio-économique

Dans ce cadre, il est souvent complexe de définir une stratégie de gestion et d'intervention et de déterminer quelle zone d'érosion doit faire l'objet de mesures de protection et quelle zone doit pouvoir évoluer librement.

Le SDAGE Rhône-Méditerranée impose le principe de non-aggravation des perturbations subies par les cours d'eau. Il est demandé aux gestionnaires de mener des opérations de restauration physique des cours d'eau en intégrant les dimensions socio-économiques par l'élaboration de stratégies d'intervention et la détermination des options à retenir sur la base d'analyses coût-bénéfice (SDAGE Rhône-Méditerranée). En France comme en Suisse, les actuelles politiques publiques de gestion des milieux aquatiques donnent la priorité à la restauration (ou revitalisation) des cours d'eau et à la création/préservation d'un espace de mobilité suffisant pour assurer un bon fonctionnement de l'hydrosystème fluvial.

Dans certains cas, il peut être moins coûteux de déplacer l'enjeu que de réaliser une protection de berge. Dans le cadre d'une démarche de gestion globale des milieux aquatiques et de la ressource en eau, il est ainsi fondamental de **définir et de cartographier un espace de mobilité** (chap. I.1.2.4 et I.2.1.5) au sein duquel :

- **toute nouvelle protection de berge**, ainsi que toute nouvelle activité qui pourrait nécessiter à terme une protection, **est proscrite** ;
- **certaines protections contre l'érosion pourraient être remises en cause**, ainsi que les enjeux qu'elles protègent, dans le cadre d'opérations de restauration hydromorphologique.

Il est aujourd'hui impossible d'envisager le déplacement ou la destruction de certains enjeux participant au développement et au fonctionnement économique de ces territoires (zones urbaines et infrastructures de transport), ni

même des zones d'extraction de matériaux. **Le SDAGE Rhône-Méditerranée prend en compte les enjeux existants en préconisant des mesures de protection contre l'érosion latérale lorsque celles-ci sont « motivées par la protection des populations et des ouvrages existants »** (SDAGE Rhône-Méditerranée). **Dans les autres cas de figure, la priorité est donnée à la non-intervention, voire à la restauration physique du cours d'eau.**

Les politiques locales d'aménagement du territoire doivent aujourd'hui permettre et favoriser une bonne gestion des milieux aquatiques en rendant leur juste place aux cours d'eau par la préservation d'un espace de mobilité suffisant. Celui-ci doit être défini en composant avec la présence d'enjeux socio-économiques majeurs mais également en prenant la responsabilité du déplacement ou de l'abandon d'autres enjeux moins importants. **Mais comment décider de la protection d'un enjeu ? Dans quels cas le déplacer ? Dans quels cas ne pas intervenir ?**

4.1.3. Hiérarchiser les enjeux à différentes échelles

La réflexion vis-à-vis de l'opportunité d'une protection de berge doit s'appuyer sur une prise en compte approfondie des **enjeux socio-économiques** à proximité du cours d'eau et **potentiellement menacés** par les processus d'érosion. Pour cela, il est conseillé de procéder à leur hiérarchisation à l'échelle locale comme à celle du bassin versant.

Ils peuvent être distingués selon leur **nature** et leur **valeur sociale** (usage de loisir, de transport, d'infrastructure, de réseau, de pâturage, de production agricole, d'énergie, etc.), mais également selon leur **valeur vénale** (prix marchand). L'occupation du sol (agricole, urbanisée, naturelle ou forestière) et le type d'activité développée (transport, réseau, production, tourisme et loisirs, etc.) donnent plus ou moins de valeur à un terrain.

4.1.3.1. L'échelle locale

La figure 2 ci-après propose une hiérarchisation possible des enjeux socio-économiques susceptibles d'être menacés par les risques d'érosion (Malvoit *et al.* 2011). Elle prend en compte à la fois les **valeurs sociale, fonctionnelle et vénale des enjeux**. Bien sûr, **cet exemple ne constitue pas un modèle car il est fondamental d'apprécier au cas par cas la valeur des enjeux en place**. On peut néanmoins se baser sur cet exemple pour une première hiérarchisation *a priori*.

La hiérarchisation des enjeux selon leur valeur sociale s'apprécie en fonction de l'usage qui en est fait par la société et de son utilité sociale. Il convient, par exemple, de prendre en compte la propriété du bien, sa fréquentation éventuelle par le public et l'activité liée à l'élément, etc. On peut ainsi s'interroger de la manière suivante :

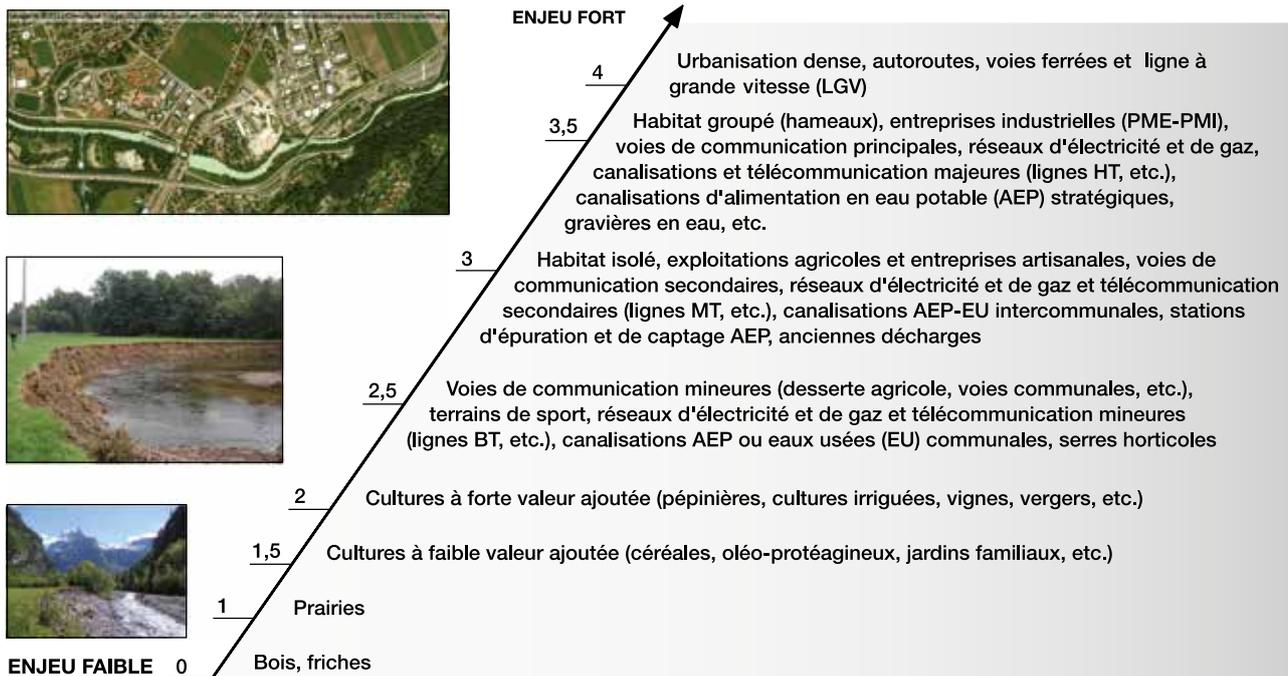


Fig. 2 - Exemple de grille de détermination du niveau d'enjeu socio-économique susceptible d'être menacé par des risques d'inondation/érosion liés au transport solide (d'après Malavoi *et al.* 2011).

- s'agit-il d'une propriété privée ou publique ?
- la fréquentation du site ou du bien est-elle importante ?
- d'autres sites ou infrastructures sont-ils susceptibles de remplir le même rôle social ?

La **valeur économique de l'enjeu** constitue bien évidemment un point crucial. Les grandes infrastructures de transport (voies ferrées, routes, autoroutes), en raison de leur coût particulièrement important, constituent des enjeux majeurs, au même titre que les zones densément urbanisées ou les zones d'activités. À l'inverse, **compte tenu de leur valeur économique relativement peu importante, les terrains non bâtis constituent des enjeux relativement faibles.**

En 2010, en France, le prix moyen d'acquisition d'une terre agricole de type « prés » était de 5 230 €/ha à l'échelle nationale ; 3 229 €/ha pour des forêts. Lorsqu'il s'agit de patrimoine bâti isolé, la valeur vénale du terrain augmente fortement : 169 000 €/ha en moyenne à l'échelle nationale pour un terrain abritant une maison d'habitation en zone rurale (prix issus des SAFER – Sociétés d'aménagement foncier et d'établissement rural).

Dans le cas des réseaux de fluides (eau, électricité, gaz), les coûts de déplacement peuvent être relativement élevés. Par exemple, le prix du déplacement d'un pylône THT (très haute tension) est estimé à environ 150 000 €, celui d'un poteau HTA (haute tension A) à 60 000 € (N'Guyen 2008).

Ces coûts sont à mettre en rapport avec ceux d'une protection de berge, qu'il s'agisse de génie végétal ou de génie civil, mais aussi avec d'éventuels coûts issus de perturbations engendrées ailleurs sur le tronçon du cours d'eau (déchaussement d'ouvrages, inondations, etc.) afin de bien mesurer les avantages et inconvénients à large échelle de l'abandon ou du déplacement de l'enjeu.

L'analyse coût-bénéfice (ACB) peut apporter des éléments de réponse pertinents. Aujourd'hui fortement promue dans toute démarche d'aménagement, elle constitue un **outil d'évaluation des projets d'investissement** dans une perspective à long terme et du point de vue de l'économie dans son ensemble.

Cette méthode apporte des réponses sur les questions d'intérêt général, en comparant les effets du projet à ceux d'une hypothèse « sans projet ». Elle permet de **comparer les coûts des mesures ou des projets avec les bénéfices environnementaux** sur la base de données prévisionnelles de coûts et d'avantages exprimés en monnaie, à l'aide d'indicateurs de rentabilité économique pour la collectivité dans son ensemble (AERM&C 2007 ; Grelot 2004 ; Grelot 2009).

4.1.3.2. L'échelle du bassin versant

Dans le cadre d'une réflexion à l'échelle du bassin versant, la préservation ou la création d'un espace de mobilité du cours d'eau favorise à la fois une amélioration du fonctionnement morphologique de celui-ci, mais également la lutte contre les inondations et leurs conséquences. L'existence de zones d'expansion de crues, qu'elles soient naturelles ou artificielles, permet la réduction de l'aléa et donc du risque en aval, par le ralentissement de la propagation de l'onde de crue et la rétention temporaire des eaux (fig. 3). Au regard des enjeux impactés par les inondations et du coût humain et financier des dégâts qui se chiffrent

souvent en millions, voire en milliards d'euros, il devient intéressant de se questionner sur l'impact potentiellement positif d'une érosion localisée, au-delà de la seule destruction de l'enjeu. Il s'agit alors de mettre en synergie les logiques de lutte contre les inondations (DCI - Directive cadre inondations) et d'atteinte des objectifs environnementaux de la DCE.

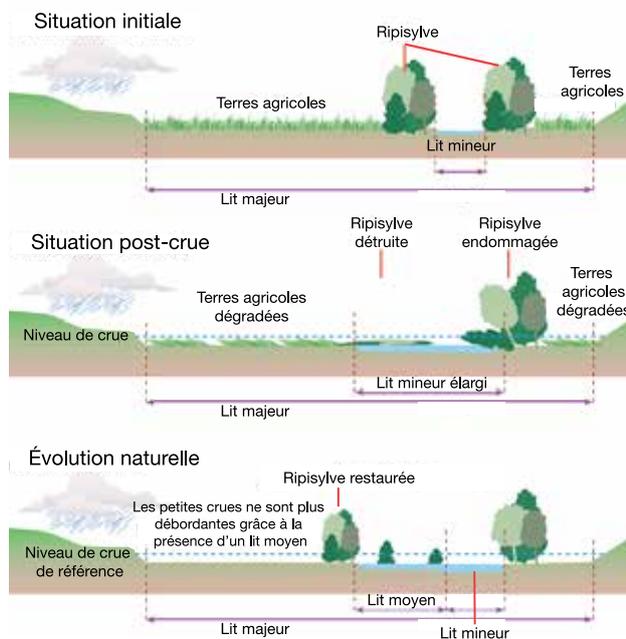


Fig. 3 - Schéma de principe des conséquences de l'élargissement du lit mineur sur les crues (d'après IRMA - Institut des Risques Majeurs).

Au-delà d'exemples strictement montagnards tels que la catastrophe du Grand-Bornand en 1987, les crues de l'Ainan en 2002 (Isère et Savoie), des torrents de Belledonne (Isère) ou du village de Lauterbrunnen (Alpes bernoises)

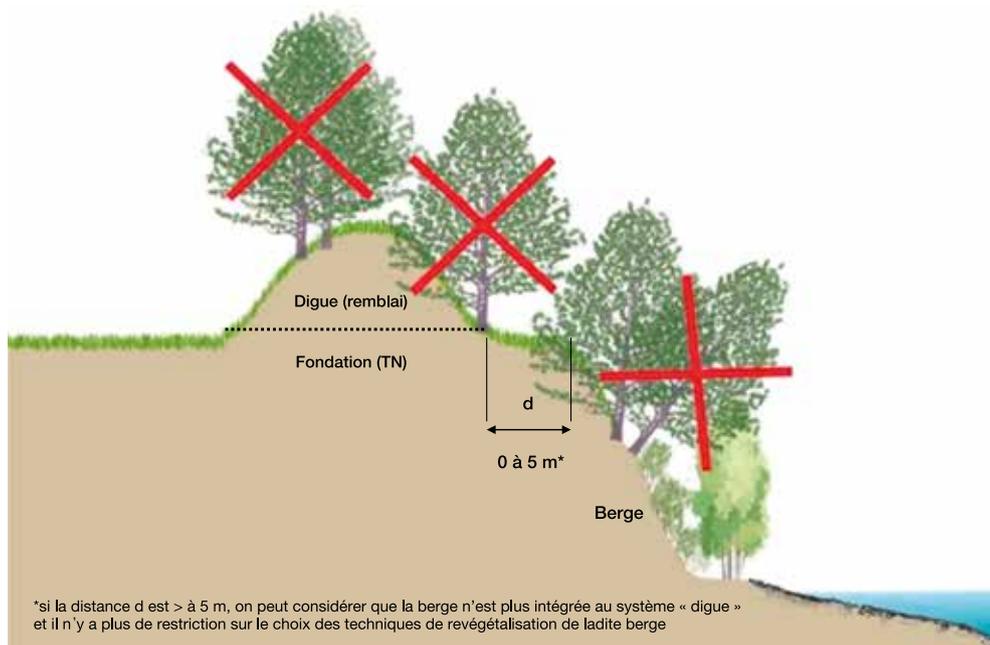
en 2005, on pense également à quelques inondations majeures des dernières décennies : le bas Rhône en 2003 (7 victimes et 1 milliard d'euros de dégâts), le Gard en 2002 (23 victimes et 1,2 milliard d'euros) ou encore l'Aude en 1999 et Vaison-la-Romaine en 1992 (1 milliard et 81 victimes à elles deux). Ces catastrophes sont bien sûr dues à des aléas forts ou exceptionnels et à une vulnérabilité importante, mais la présence de zones d'expansion de crues naturelles en amont aurait pu participer à atténuer le risque et les conséquences à la fois humaines et économiques pour certains de ces événements.

4.1.4. Protection ou non-intervention : une hiérarchisation *a priori*

La mise en place systématique de mesures de protection contre l'érosion n'est pas une solution adaptée. Il convient bien d'agir au cas par cas, selon la valeur réelle des enjeux menacés et les possibilités d'action.

Néanmoins, au regard de la figure 2 ci-avant, on peut déterminer *a priori* trois catégories d'enjeux :

- **de 0 à 2 : non-intervention.** Aucune protection de berge ne doit être préconisée afin de permettre la recharge sédimentaire du cours d'eau ;
- **de 2,5 à 3 : protection en cas d'impossibilité de déplacement ou de coûts trop élevés en regard de leur protection.** Il est important d'envisager sérieusement la possibilité de déplacer l'enjeu afin de le soustraire au risque d'érosion ;
- **de 3,5 à 4 : protection impérative.** Ces enjeux, les plus souvent stratégiques, coûteux et non déplaçables, doivent absolument être soustraits au risque d'érosion. Il est important d'envisager des opérations de recharge sédimentaire par ailleurs sur des tronçons sur lesquels les enjeux sont moins importants.



*si la distance d est > à 5 m, on peut considérer que la berge n'est plus intégrée au système « digue » et il n'y a plus de restriction sur le choix des techniques de revégétalisation de ladite berge

Fig. 4 - Modalités de gestion des ligneux sur les digues.



En présence de gravières ou de plans d'eau artificiels en bordure directe du cours d'eau, il est fondamental de protéger la rivière d'une éventuelle capture par la gravière.

Dans le cas contraire, les conséquences sur son équilibre sédimentaire peuvent être catastrophiques en raison du piégeage par le plan d'eau d'une part importante, voire de l'ensemble des matériaux solides. Les conséquences se font alors directement sentir en aval par l'accroissement des phénomènes d'érosion latérale et verticale (incision).

4.1.5. Étude et recommandations sur les limites de la végétalisation ligneuse sur des berges intégrées à une digue de protection contre les crues

La végétalisation des protections de berge et les ouvrages de défense de berge construits à l'aide de techniques végétales présentent de nombreux avantages sur les plans écologique et paysager. Ces techniques sont donc à encourager dans les projets d'aménagement de cours d'eau. Il existe cependant une configuration d'ouvrages où des restrictions à la recommandation précédente s'imposent : lorsque la berge à défendre est prolongée par le talus (ou parement) d'une digue de protection contre les crues, les règles de l'art du génie civil recommandent de la maintenir dans un état strictement enherbé, dans sa partie haute tout au moins.

Une digue de protection contre les crues est un ouvrage en remblai ou en maçonnerie construit en élévation par rapport au niveau du terrain naturel et/ou au sommet de la berge (si la digue est proche du cours d'eau), dont la fonction est de contenir l'eau afin de l'empêcher d'envahir une zone naturellement inondable. Dans le présent ouvrage, seul le cas des digues en remblai est considéré.

Dans cette configuration, des arbres ou arbustes se développant sur la digue ou à proximité de son pied, côté rivière ou torrent, sont susceptibles de remettre en cause la sécurité de l'ouvrage et donc sa fonction de protection des biens et des personnes situés dans la zone inondable. **Il peut alors y avoir une contradiction entre la volonté**



Fig. 5 - Effondrement en crête de digue suite à la décomposition d'une souche.

de végétaliser les berges de cours d'eau et celle d'éviter arbres et arbustes sur les digues. Notons que la configuration amenant à un tel conflit d'objectifs n'est absolument pas majoritaire le long des cours d'eau de montagne car, bien que l'on ne dispose pas de statistiques précises, seule une faible part du linéaire total des rivières torrentielles et des torrents alpins est endiguée, au sens défini ci-dessus.

Par ailleurs, il est ici convenu que la berge de cours d'eau est dite « intégrée » à une digue lorsque le sommet de berge est confondu avec le pied côté rivière ou torrent du parement de ladite digue, ou est situé à moins de 5 mètres de celui-ci (fig. 4). **Si le sommet de berge est à plus de 5 mètres du pied de digue, on peut en effet considérer que l'on dispose d'une marge de sécurité suffisante pour laisser les ligneux se développer sur la berge sans conséquence fâcheuse pour la digue, à condition toutefois de pratiquer une surveillance de routine adéquate.**

Pour mieux évaluer les risques liés aux ligneux se développant sur les digues ou sur les berges intégrées à une digue, des études ont été conduites, notamment dans le cadre du projet Géni'Alp, sur les enracinements des arbres et arbustes susceptibles de s'y trouver. Ces études ont consisté à dessoucher des arbres pour caractériser la structure globale de leurs systèmes racinaires (forme, dimension, distribution des racines, spécificités morphologiques, volume d'encombrement et phénomène de décomposition racinaire). Ces analyses permettent d'affiner les recommandations pour la mise en œuvre des techniques de génie végétal sur une berge intégrée à une digue.

4.1.5.1. Les paramètres contrôlant la structure des systèmes racinaires : impacts sur les digues

Il existe **quatre types d'enracinement : traçant, fasciculé, pivotant et mixte** (Köstler *et al.* 1968). Chaque type induit des risques différents pour les digues à moyen et long terme (Zanetti 2010).

Un **système traçant** est peu résistant aux contraintes d'arrachement mais assure en contrepartie une fixation de la partie superficielle du sol face au ruissellement ou au courant. Ce type de structure est dangereux pour la digue



Fig. 6 - Conséquences d'un renard hydraulique sur le barrage des Ouches (Puy-de-Dôme - France).

si les racines s'enfoncent dans le corps de l'ouvrage ou dans sa fondation à l'horizontale et le traversent en partie.

Un **système fasciculé** présente une bonne résistance à l'arrachement du fait de la répartition dense et homogène des racines, mais possède un volume d'encombrement élevé, nuisible pour la structure en génie civil en cas de pourrissement ou d'arrachage.

Un **système pivotant** mature génère un risque pour les digues car il pénètre le corps du remblai. Il assure un bon ancrage de l'arbre par son ou ses pivots, mais pose cependant des problèmes de déstructuration des matériaux. Les pivots de gros diamètre engendrent en outre un risque d'effondrement après leur pourrissement.

Un **système racinaire à structure mixte**, composé de racines horizontales et verticales, rassemble les avantages et inconvénients précédemment énoncés pour les systèmes traçants et pivotants.

Les paramètres influençant la structure des systèmes racinaires sont essentiellement :

- la **position de l'arbre sur le talus** (parement de la digue ou berge), qui conditionne l'accès à l'eau ;
- les **propriétés des matériaux de la digue ou de la berge** (granulométrie, sédimentométrie, etc.).

→ **Structure racinaire et position de l'arbre sur la digue ou la berge**

Les arbres positionnés en pied de berge ou de digue et proches de l'eau ont généralement des systèmes traçants. On observe chez la plupart des espèces une galette racinaire plane qui épouse la surface supérieure de la nappe par un nombre très important de radicelles. En effet, l'essentiel des essences de bord de cours d'eau ont d'importants besoins en eau pour se développer, mais n'émettent pas de racines sous le niveau permanent des eaux (asphyxie), à l'exception des aulnes qui ont des racines capables de capter l'oxygène présent dans l'eau.

Sur les zones situées en milieu de digue et de berge, les systèmes racinaires sont généralement mixtes ou fasciculés. Dans ces situations, les racines se développent en profondeur pour capter l'eau. Une fois que les pivots ont atteint l'eau, ils se subdivisent en racines fines et radicelles absorbantes.

En haut de berge ou de digue, sur matériaux grossiers et drainants, et lorsque la nappe est trop lointaine (> 3 m), le sol sec et pauvre est peu propice aux racines : les systèmes racinaires restent alors superficiels, sauf dans les climats très humides en été qui empêchent le dessèchement du substrat.

→ **Structure racinaire et matériaux**

La granulométrie des matériaux induit des modifications de la structure racinaire. Dans les matériaux grossiers (sablo-graveleux), les racines ont une morphologie irrégulière (marquée par la présence de galets) et sont moins nombreuses que dans les matériaux fins (sablo-limoneux).

Dans ces derniers, les racines sont nombreuses et ont une morphologie régulière.

Sur matériaux grossiers, les arbres développent un système racinaire à structure mixte, tandis que sur matériaux fins, on observe souvent des systèmes à structure fasciculée. **La structure racinaire dépend beaucoup plus des conditions de développement (accès à l'eau et nature des matériaux) que de l'espèce végétale.**

4.1.5.2. **Décomposition racinaire et risques engendrés pour les digues**

Tandis que la décomposition des pivots et du cœur des souches génère des risques d'effondrements localisés des talus de digue (fig. 5), celle des grandes racines traversantes crée un risque de formation de renard hydraulique. Le renard hydraulique est une érosion interne de conduit qui se matérialise par l'entraînement des particules des parois d'un conduit ou d'une fissure dans le sol (fig. 6).

Lors de l'étude sur le terrain de la dégradation naturelle des racines, la date de leur mort est souvent inconnue, mais **l'état visuel de dégradation renseigne sur les modalités du phénomène de décomposition**. La **texture** (sciure, copeaux, bois encore consistant), la **structure** (état de conservation du cœur, du duramen, de l'aubier et de l'écorce) ainsi que les **traces d'attaque du bois** (champignons ou insectes) **peuvent être observées**. Cette caractérisation de l'état de décomposition permet de déterminer le moment à partir duquel les racines pourries sont susceptibles de créer des chemins d'écoulement préférentiel pouvant générer l'apparition de désordres dans les ouvrages.

Dans les matériaux faiblement cohésifs (sables, graviers, alluvions grossiers, etc.), le réarrangement spontané comble les zones de décomposition au fur et à mesure que le bois pourrit. Ainsi, le bois en décomposition n'accroît que peu le risque de circulation d'eau car ces matériaux sont déjà perméables naturellement.

Par contre, dans les matériaux fins et cohésifs (limoneux, argilo-limoneux), les vides créés par la décomposition des racines persistent longtemps. Si cela n'est pas nécessairement problématique sur une berge, cela l'est beaucoup plus sur une digue dont la fonction principale est de contenir la charge hydraulique et les écoulements en période de crue.

Indépendamment du type de matériau, les racines peuvent créer des galeries lorsque le bois de cœur se désagrège plus rapidement que le bois périphérique ou l'écorce. La présence de matière organique liée à la décomposition des racines est ainsi favorable à la colonisation des galeries de racines mortes par les racines vivantes des végétaux implantés à proximité (fig. 7).



Fig. 7 - Départ de galerie créée par une racine décomposée en pied de digue dans des matériaux cohésifs.



Fig. 8 - Système racinaire avec deux longues racines traçantes pénétrant la digue.

4.1.5.3. Synthèse et préconisations

La végétation arborée et arbustive sur les berges remplit de multiples fonctions positives sur les plans écologique, mécanique et paysager. Les techniques de génie végétal sont donc fortement recommandées pour la protection des berges si, bien sûr, une telle protection est nécessaire. Aucune restriction n'existe lorsque ces berges ne sont pas intégrées à des digues ou lorsque qu'il faut protéger la berge qui supporte la digue (végétalisation possible de la partie inférieure de la berge située sous la digue – fig. 4).

Cependant, les configurations dans lesquelles la berge est intégrée à une digue, certes minoritaires en termes de linéaire mais importantes en termes d'enjeux de sécurité, imposent de rester vigilant quant à la colonisation des espèces végétales implantées à l'interface berge/digue. En effet, certaines essences arborées développent de grandes et grosses racines, susceptibles de traverser une partie voire la totalité de la digue (fig. 8) et menaçant de ce fait la sécurité de l'ouvrage. Les vieilles souches, ayant un volume d'encombrement très important, génèrent la désstructuration d'une partie importante de l'ouvrage en cas de basculement de l'arbre par le vent ou le courant (fig. 9). **Les digues remplissant des fonctions de protection des biens et des personnes contre les inondations, leur bon fonctionnement apparaît donc comme une priorité. Pour remplir ce rôle sécuritaire, il est nécessaire d'éviter tout risque nuisant à leur bonne étanchéité ou stabilité.**

Par ailleurs, afin de suivre l'état de ces digues dans le temps, il est indispensable de pouvoir les surveiller visuellement. Un tel contrôle visuel n'est malheureusement pas compatible avec la présence de ligneux qui peuvent cacher d'éventuels désordres, voire empêcher ou gêner la progression pédestre sur les ouvrages. Sans compter que la présence d'un couvert boisé favorise la venue d'animaux fouisseurs (blaireau, ragondin, rat musqué, lapin, etc.) qui creusent leur terrier dans les digues.



Fig. 9 - Arrachement par basculement d'une souche de mélèze.

Il est cependant difficile d'établir des règles générales pour tous les ouvrages hydrauliques et cours d'eau. En effet, chaque cas est particulier en termes d'enjeux sécuritaire, social, écologique et paysager, ainsi qu'en termes de régime hydrologique, de type et de violence de crue, de matériaux constitutifs, de dimension, de climat, de position de la digue par rapport à la berge, de marge de sécurité, etc.

Gardons à l'esprit qu'au-delà d'une distance de l'ordre de 5 mètres par rapport au pied de digue, le gestionnaire a toute latitude pour végétaliser les berges.

Un diagnostic précis et le développement d'un plan de gestion adapté sont nécessaires pour tout choix qui s'écarte de la règle de base consistant à maintenir, sur les digues et plus généralement sur les ouvrages hydrauliques en terre, une végétation au stade uniquement herbacé. Il s'agit ainsi d'éviter totalement la présence d'arbres ou grands arbustes sur ces ouvrages et, lorsqu'ils sont déjà boisés, d'éviter au moins que ces arbres et leurs souches n'atteignent de grandes dimensions en hauteur ou diamètre.

Cette règle ne souffre d'exception que sur les ouvrages à profil transversal très confortable, avec des pentes faibles de talus et/ou une crête large, voire lorsqu'ils sont équipés de dispositifs étanches robustes (paroi moulée), cas rare dans les aménagements de montagne.

Il faut cependant noter que sur les ouvrages à profil étroit et talus raides, les arbres restent parfois les seuls éléments assurant temporairement une certaine stabilité à l'ouvrage. Leur suppression implique donc de refaire l'ouvrage dans sa totalité, ce qui ne peut se faire que dans le cadre d'un projet de confortement comportant une étude de diagnostic préalable.

Bien que cela soit parfois difficilement acceptable aux niveaux social, écologique et paysager, il n'est pas souhaitable d'implanter des arbres sur les ouvrages hydrauliques en remblai, neufs ou remis en état. **La structure de protection de surface à recommander pour les digues en remblai modernes est la couverture herbacée régulièrement entretenue.**

Dans les projets de réaménagement de digue, une possibilité permettant de concilier protection de berge par végétalisation (sans plus aucune restriction) et sécurité de la digue remise à niveau, est de déplacer la digue, c'est-à-dire de l'éloigner du cours d'eau afin de restaurer l'espace de mobilité de ce dernier sur les tronçons où cela s'avère possible. De telles solutions de travaux apparaissent progressivement.

4.2. La définition d'une stratégie adaptée face à l'érosion : une nécessaire approche méthodologique

4.2.1. Abandon, déplacement, protection : quels éléments prendre en compte pour décider ?

« Toute intervention doit [...] être précédée d'une phase de diagnostic du comportement de la rivière sur un tronçon bien plus long que celui sur lequel on compte intervenir. On devra bien se garder d'établir un diagnostic au vu de quelques particularités locales, comme les ponts ou les seuils [...] ou se réfugier derrière le caractère exceptionnel d'un épisode de crue [...]. Au total, une vision suffisamment large dans l'espace et dans le temps est la meilleure aide pour l'aménageur ou le gestionnaire. La rivière est son propre architecte et sait montrer les solutions à qui sait l'observer » (Degoutte 2006).

L'identification d'une érosion de berge menaçant un ou plusieurs enjeux fait émerger plusieurs interrogations pour la collectivité. Dans la pratique, les prises de décisions ne

reposent pas forcément sur une démarche organisée et complète. Or, d'après les observations énoncées par le guide de l'AERM&C (1999) « *beaucoup de dysfonctionnements des rivières découlent des dysfonctionnements décisionnels. [...] Ils relèvent de simplifications, de raccourcis, d'une inadéquation de l'échelle de travail adoptée et peuvent être considérés comme un non-respect des exigences méthodologiques* ».

L'idée est donc ici de **détailler ce processus décisionnel, soit de distinguer les grandes phases intervenant dans le processus de décision, et qui mènent à la protection de la berge ou, au contraire, à ne pas intervenir.**

On s'appuiera sur la figure 10 ci-après pour déterminer les grandes phases du processus décisionnel. **Cette figure n'a pas vocation à être exhaustive. Elle ne peut pas constituer un outil unique et indiscutable de décision, car celle-ci doit être appuyée, plus largement, sur tout un panel d'éléments qu'il convient de prendre en compte « sur le terrain », en fonction de l'expérience du technicien, et qu'il n'est pas possible d'intégrer ici.** Elle a néanmoins pour but de poser les bases de la démarche en formalisant les principales composantes influant sur la décision.

4.2.2. Quelques éléments de réflexion à l'usage des gestionnaires

Chaque point de ce chapitre renvoie aux grands titres de la figure 10.

→ 1 – Questions préalables : phase de diagnostic

La première étape d'une démarche logique de réflexion porte sur :

- 1/ l'identification de l'érosion ;
- 2/ l'analyse des enjeux à proximité afin d'établir l'importance de chacun (degré faible/fort) ;
- 3/ le choix de la stratégie d'intervention.

1/ Lors de la constatation visuelle d'une érosion de berge, il convient de s'interroger sur son **ampleur et de bien distinguer l'affouillement, phénomène localisé, et l'incision, phénomène généralisé.**

Le **diagnostic** doit commencer par répondre aux questions suivantes :

- s'agit-il d'un affouillement causé par un simple embâcle (obstruction du cours d'eau par une accumulation de bois mort et autres débris au niveau d'un point dur), d'un réseau mis à jour, d'un rétrécissement du cours d'eau, d'un glissement, etc. ?
- s'agit-il d'un phénomène d'incision généralisée sur le tronçon ?

À défaut de distinguer ces deux notions au travers du diagnostic, un ouvrage de protection de berge, qu'il fasse appel aux techniques végétales, mixtes ou minérales, sera mal conçu.

Il est également opportun de **prendre en compte le temps de retour de l'événement** (dimension historique) qui a engendré le « désordre », c'est-à-dire la crue.

Il est fondamental d'être « **très attentif aux problèmes généralisés et bien rechercher leur véritable cause avant d'envisager une protection, même dans des secteurs à forte vulnérabilité** » (Degoutte 2006). En présence de zones d'érosion ou de glissement de berge sur un tronçon, il est possible que celui-ci soit sujet à l'incision en raison d'un déficit du transit sédimentaire. **Il convient alors de traiter la cause (le déficit en matériaux solides) et non les conséquences (l'érosion des berges).**

La prise en compte de l'aspect historique et temporel de l'évolution du tracé en plan du cours d'eau au sein de sa plaine alluviale (analyse diachronique) permet également d'évaluer l'importance de l'érosion, sa probable évolution (sens et vitesse) et la zone effectivement menacée.

Dans le cas des rivières de montagne, le plus souvent à lit mobile, on peut se retrouver confronté à des problèmes locaux auxquels s'ajoutent des évolutions plus globales d'incision ou de reptation de méandre (translation progressive vers l'aval).

2/ Le diagnostic doit également **prendre en compte les enjeux à proximité, menacés par l'érosion, avec une attention particulière à leur nature et leur valeur.** Il est important d'évaluer de manière objective les dégâts qui pourraient être occasionnés par l'avancée de l'érosion de la berge. Il s'agit de mettre en évidence les conséquences d'une aggravation de celle-ci et, ainsi, **définir le degré de vulnérabilité de la zone.**

Il s'agit donc de tenir compte de **la nature et de la valeur sociale de l'enjeu menacé**, et de poser très rapidement **la question des coûts** dus à sa destruction (manque à gagner, perte de terre arable ou constructible, etc.) ou à son déplacement (coût des travaux) **comme élément de diagnostic et de concertation avec les partenaires techniques** (Police de l'eau, Région, canton, etc.) **et les acteurs concernés** (riverains, agriculteurs, propriétaire de la berge, etc.).

Il convient ainsi de **comparer le coût d'une protection de berge** (qu'il s'agisse de génie végétal ou de génie civil) et de son entretien, d'une part, **avec la valeur marchande des terres menacées par l'érosion et leur productivité**, d'autre part (Degoutte 2006). Sur l'Allier, par exemple, le coût moyen de l'acquisition d'un hectare de terre en bordure de cours d'eau dans le cadre d'une politique de maîtrise foncière est de 3 220 €/ha (Saillard 2006). En rapport au prix de 100 mètres linéaires de protection de berge en enrochement estimé entre 15 000 et 30 000 €, le coût d'acquisition d'une terre menacée par l'érosion, en vue de la préservation de la dynamique latérale du cours d'eau, peut s'avérer particulièrement rentable, tant financièrement que d'un point de vue environnemental.

En présence d'enjeux agricoles, il est ainsi préférable de ne pas protéger la berge. Non seulement le **coût d'une protection de berge est de 8 à 75 fois plus élevé que le coût du terrain** (Degoutte 2006), mais, en outre, la

recharge du lit mineur en matériaux solides stockés sur les berges est bénéfique au rééquilibrage sédimentaire du cours d'eau et à son bon fonctionnement morphologique.

Dans d'autres cas, il est par contre évident que des mesures de protection sont indispensables au vu des coûts de déplacement, de la valeur vénale du terrain ou de l'importance stratégique de l'enjeu existant.

On peut également s'appuyer sur l'échelle de hiérarchisation présentée précédemment (fig. 2 et chap. I.4.1.4).

3/ Ces éléments de diagnostic permettent de **définir une stratégie d'intervention opportune.** En fonction de la cause de l'érosion et des enjeux, la stratégie à mettre en place varie entre une simple **suppression de l'obstacle à l'écoulement, la protection de la berge ou la non-intervention.**

En présence d'un embâcle de bois mort, la suppression de l'obstacle à l'écoulement est préconisée dans la plupart des cas, dans une logique de protection de la sécurité des biens et des personnes face au risque « inondation ». Il s'agit d'une opération que l'on peut qualifier « d'entretien » – l'embâcle est retiré du cours d'eau – et il n'y a pas d'intervention directe sur les berges. En l'absence de risque en aval de l'embâcle, et dans certains cas (simple déviation du lit par l'embâcle par exemple), le gestionnaire peut être amené à décider de ne pas intervenir et éventuellement conserver l'obstacle. Cela s'apprécie au cas par cas, à partir des compétences du technicien et de son niveau d'expertise.

Pour tout autre phénomène susceptible d'engendrer une érosion, et après avoir déterminé **le degré d'importance de l'enjeu**, si ce dernier **est considéré comme « faible », la non-intervention est préférable.** Il en est de même lorsque l'enjeu est fort mais néanmoins déplaçable selon des prix raisonnables. En revanche, **lorsqu'un enjeu fort n'est pas déplaçable** compte tenu du prix des travaux ou de son emprise, **une intervention de protection de berge est préconisée.**

Cette première phase de diagnostic est indispensable afin que le maître d'ouvrage puisse décider d'une intervention ou, à l'inverse, de laisser l'érosion et le cours d'eau évoluer naturellement. Elle doit permettre de poser les bases d'une concertation autour de la pertinence d'un ouvrage de protection de berge avec l'ensemble des acteurs concernés. Il est ainsi important de noter que **la protection ne doit pas être la réponse systématique à l'érosion d'une berge : elle n'est pas une fin en soi et ne doit constituer qu'un dernier recours.**

L'aléa est une notion importante dans la définition du risque, et doit être pris en compte dans la phase de diagnostic et de concertation. Cependant, il n'est pas déterminant dans la décision d'intervention (protection de berge) ou de non-intervention (reconquête d'un espace de mobilité). En effet, en présence d'un aléa fort face à

un enjeu faible, il n'y aura pas d'intervention, dans une volonté de laisser un espace de mobilité au cours d'eau. Inversement, face à un enjeu fort, même si l'aléa est faible, une intervention sera la plupart du temps préconisée.

Ainsi, lorsque qu'une menace est avérée, la **décision finale n'est généralement dépendante que de l'importance de la vulnérabilité et non directement de l'aléa.**

Notons que la **décision de ne pas intervenir** pour protéger la berge **ne signifie pas nécessairement** pour la collectivité « **ne rien faire** ». Hormis sur les rivières domaniales, les berges de cours d'eau sont le plus souvent des propriétés privées. Les propriétaires peuvent alors être tentés d'intervenir eux-mêmes pour protéger leur terrain. S'ils sont tenus par la réglementation française d'entretenir leurs berges, la loi ne spécifie pas qu'ils doivent permettre la libre divagation du cours d'eau.

La collectivité dispose de différents outils lui permettant de préserver certains secteurs contre la protection et la fixation du lit mineur, voire pour supprimer des protections ou des points de fixation existants. En France, elle a par exemple la possibilité de mettre en place une **servitude de mobilité des cours d'eau** au titre de l'article L. 211-12 du Code de l'environnement (chap. I.2.1.5). Celle-ci nécessite la réalisation d'une enquête publique préalable. Elle permet à la fois de mener des opérations importantes de suppression de protections de berge et d'éviter toute nouvelle mesure de protection sur le linéaire concerné, tout en protégeant l'intérêt du propriétaire. Celui-ci peut ainsi bénéficier d'une indemnisation et de la possibilité de demander le rachat de tout ou partie de son terrain. On rentre ainsi dans une **stratégie de maîtrise foncière.**

→ 1 à 5 – Concertation

La **stratégie d'intervention face à l'érosion doit également faire l'objet de concertation avec les acteurs concernés** directement (riverains, élus locaux, acteurs économiques et sociaux) et indirectement (services de l'État). L'organisation de réunions de concertation est ainsi conseillée le plus en amont possible des projets. **La concertation constitue un élément clé dans la bonne gestion d'un cours d'eau.** Elle doit perdurer tout au long de la réflexion autour du projet d'aménagement de la berge.

Les **services de Police de l'eau doivent être associés au plus tôt** dans la démarche **et tout au long de la réflexion.** Les impacts potentiels de l'ouvrage doivent être appréciés avec leur aide et prendre en compte le cours d'eau dans son ensemble. Notons qu'en France, dans le cas de mesures de protection de berges, le choix des techniques végétales seules facilite le plus souvent l'aval de la Police de l'eau et évite généralement des procédures administratives lourdes (procédure d'autorisation au titre de la rubrique 3.1.4.0 de la nomenclature « Loi sur l'eau » – chap. I.1.2.5).

→ 2 – Élaboration du projet : conditions techniques préalables

Lorsque la stratégie d'intervention s'oriente vers une protection de la berge, le gestionnaire doit **arbitrer entre l'utilisation de techniques végétales (ou mixtes) et de génie civil.** Cette décision est conditionnée par l'analyse des conditions techniques préalables et indispensables à l'utilisation du génie végétal. Il s'agit de **déterminer si les conditions limites d'utilisation du végétal sont dépassées.**

La réalisation de techniques de génie végétal nécessite généralement davantage d'**espace disponible** en arrière de la berge que les techniques de génie civil. Hormis avec l'utilisation de caissons bois, il est en effet impossible de réaliser des ouvrages en génie végétal bénéficiant de la même pente de berge que pour la mise en place de gabions ou de cunettes béton. On se reportera à la deuxième partie de ce guide, dédiée aux techniques en elles-mêmes, pour les spécifications de pentes des ouvrages (chap. II.3.2.3).

Le **niveau de résistance mécanique requis** pour la réussite de l'ouvrage est l'élément principal à prendre en compte. Le gestionnaire doit déterminer précisément quelles sont les forces tractrices appliquées sur la berge lors des crues les plus importantes afin de choisir la technique la plus adaptée en fonction de sa **résistance aux contraintes.** Celle-ci, mesurée en newton par mètre carré (N/m^2), **augmente avec le temps dans le cas des ouvrages utilisant le végétal. Celle des ouvrages minéraux a, quant à elle, tendance à diminuer.** On portera l'attention notamment sur les niveaux de résistance initiale et finale de l'ouvrage (à la réalisation puis après trois ou quatre ans). **Sa résistance est minimale juste après la réalisation.** C'est à ce moment-là qu'il est le plus vulnérable aux crues. La végétation se développe au cours des années suivantes et protège de plus en plus efficacement la berge. L'utilisation du végétal n'est possible que si les forces tractrices exercées par le cours d'eau sur l'ouvrage sont en deçà des limites de résistance des techniques végétales (chap. II.3).

Par ailleurs, en raison de l'utilisation de matériel vivant et d'espèces végétales inféodées à des conditions stationnelles particulières (climatiques, pédologiques, etc.), la réalisation d'ouvrages végétaux devient aléatoire dans les Alpes au-delà de 2 300 mètres d'**altitude** environ. Les saules d'altitude atteignent dans certaines situations des altitudes de 2 400 à 2 500 mètres, mais au-delà de 2 200 mètres environ, les conditions d'utilisation et de croissance ne sont plus optimales (part. III).

Dernière condition technique préalable, la **capacité hydraulique du cours d'eau** doit être suffisante pour permettre le développement de végétation. Sur un cours d'eau de faible largeur, il sera potentiellement malvenu de réaliser un ouvrage en génie végétal en raison des risques supplémentaires d'embâcle induits par la présence d'une végétation dense et abondante. L'écoulement des eaux de crue vers l'aval risque de s'en trouver gêné par le ralentissement voire le blocage des eaux, impliquant un débordement à l'amont.

Si l'ensemble de ces conditions préalables sont remplies, il est préférable de recourir aux techniques végétales ou à des techniques mixtes. Il s'agit ensuite de choisir la combinaison de techniques et les espèces à utiliser pour élaborer le projet technique qui permettra de répondre à la problématique initiale d'érosion de berge.

Si les conditions ne sont pas réunies, le gestionnaire n'a d'autres choix que de faire appel au génie civil.

→ 3 – Prévision budgétaire et calendrier d'intervention

L'estimation des coûts et la programmation budgétaire apparaissent bien souvent comme des éléments déterminants pour l'adoption du projet. Le coût d'un ouvrage variant fortement en fonction de sa conception (combinaison de techniques choisie, choix des matériaux – chap. 1.3.2.3) et de paramètres externes (disponibilité directe des matériaux, par exemple), il est complexe de fournir un ordre d'idée précis des prix.

Pour les **matériaux** (bois, boutures, plants et éventuels blocs), **on privilégiera principalement le recours à des circuits courts d'approvisionnement.** La disponibilité des matériaux à proximité est un facteur de diminution des coûts et de limitation de l'impact environnemental (limitation des coûts de transport et des émissions de gaz à effet de serre). Il est donc pertinent de mener une campagne de terrain visant à déterminer la présence des espèces végétales qui pourront être utilisées. La troisième partie de ce guide fournit des éléments utiles à l'identification des espèces végétales utilisables dans les ouvrages de génie végétal. L'élaboration d'un budget précis nécessite par ailleurs la programmation d'opérations régulières d'entretien. Il est donc important de prévoir entre 10 et 15 % du montant total de l'ouvrage.

La problématique du **calendrier d'intervention**, contrainte importante pour l'utilisation du génie végétal, doit également être prise en compte afin d'assurer la réussite de l'ouvrage (chap. II.2.2.3). De manière générale, **les travaux doivent être réalisés en dehors de la période végétative afin de permettre une bonne reprise des végétaux.** La récolte des matériaux végétaux doit ainsi être réalisée de préférence avant la fin de la période de dormance et le débourrement des bourgeons. Cela complique l'identification des espèces. Plus spécifiquement en rivière de montagne et de piémont, cette contrainte est accompagnée du **raccourcissement de la fenêtre d'intervention**

en raison des périodes d'enneigement et de hautes eaux printanières ou estivales. Celles-ci risquent d'endommager l'ouvrage ou de nuire à la reprise végétative. Les végétaux rentrant à peine dans leur période végétative, ils ne sont pas encore assez résistants pour subir de fortes crues. On le comprend alors aisément, plus le chantier est réalisé en altitude et en rivière à forte pente, plus les contraintes sont fortes et plus l'ouvrage doit être réfléchi et dimensionné (part. II).

→ 4 – Validation du projet et réalisation

Il est pertinent de **créer des indicateurs d'évaluation** pour **assurer un suivi à moyen ou long terme** de l'ouvrage. À court terme, il peut s'agir du taux de reprise des boutures ou plants. Sur un temps plus long, il s'agit de suivre et évaluer le comportement de l'ouvrage et sa résistance en cas de crue, si possible par une reconnaissance de terrain. Cela permet, si nécessaire, d'envisager d'**éventuelles mesures correctives** pour renforcer l'ouvrage, voire tout simplement l'ajout de boutures ou de plants complémentaires afin de remplacer ceux qui n'auraient pas repris.

Il peut aussi être intéressant de mettre en œuvre des indicateurs liés à la biodiversité afin d'établir un suivi dans le temps des différentes communautés faunistiques et floristiques. La réalisation d'un état des lieux avant intervention (lorsqu'il est possible) peut constituer un apport scientifique important, s'il est complété dans les années suivantes par des relevés rigoureux et réguliers.

→ 5 – Suivi, évaluation et entretien de l'ouvrage

Enfin, un entretien régulier des protections de berge doit être planifié en fonction des techniques mises en œuvre, des objectifs de protection et des impacts de la végétation sur les flux ou sur les biens. Ces opérations peuvent ainsi aller de la simple surveillance et du réajustement, au recépage. L'ouvrage doit faire l'objet d'une surveillance accrue au cours des premières années afin de vérifier la bonne tenue de l'aménagement, la bonne reprise végétative des plants et boutures, et réparer d'éventuels dégâts causés par une crue précoce ou par la sécheresse.

Il est par ailleurs indispensable d'assurer un suivi dans le temps afin de prévenir l'implantation d'espèces invasives sur l'ouvrage dans les premières années suivant sa création. Des interventions d'arrachage précoce des plants de renouée du Japon, par exemple, permettent de lutter efficacement contre son implantation sur l'ouvrage et sa dispersion. Pour cela, un repérage de terrain suite aux crues est nécessaire.

5. Conclusion : du bon usage du génie végétal

Le génie végétal n'est pas un but en soi. Il est un outil à disposition du gestionnaire et non pas un concept d'aménagement.

Grâce à un grand nombre de solutions techniques, il offre une grande souplesse d'utilisation et peut donc faire l'objet de nombreuses applications aux objectifs variés (endiguement, restauration de niveaux R1, R2, R3 – fig. 4, chap. 1.3.1). Ainsi, même s'il peut être utilisé à des fins de protection pure et simple (crues, érosion), il intervient néanmoins au service d'une logique d'aménagement durable du territoire donnant la priorité au respect de l'environnement et à la préservation des milieux aquatiques.

Le génie végétal en berge de cours d'eau n'est pas une simple action de « verdissement » et d'intégration paysagère. Il s'agit véritablement d'une construction basée sur des matériaux vivants, s'inspirant des modèles naturels et répondant à des critères techniques et mécaniques exigeants (Adam *et al.* 2008). L'objectif est bien de fixer et de stabiliser la berge, et toute autre utilisation de ces techniques ne relèverait pas du génie végétal mais d'aménagement paysager.

Dans le cadre de travaux sécuritaires de protection contre les crues et/ou contre l'érosion, le génie végétal constitue une alternative intéressante à des techniques minérales issues du génie civil. Il est en général préférable de laisser divaguer le cours d'eau lorsque le contexte le permet. Son utilisation est ainsi parfois un « pis-aller » lorsqu'il n'est pas possible de faire autrement que d'intervenir pour protéger une berge. Les politiques publiques le considèrent comme un outil permettant de diminuer l'impact environnemental de la protection.

Mais il est également un outil particulièrement efficace au service d'objectifs environnementaux de restauration des cours d'eau, bien au-delà de son seul intérêt paysager. Il constitue l'un des outils de base en vue de diversifier les milieux tout en encadrant la mobilité latérale du lit mineur lorsque cela s'avère nécessaire.

Quel que soit son champ d'application (restauration ou protection), la réussite d'un ouvrage de génie végétal ne se mesure pas uniquement par des aspects techniques. Certes, une protection efficace des biens et des personnes contre les problèmes d'érosion constitue l'un des indica-

teurs de cette réussite. Mais l'intégration de l'ouvrage à son milieu récepteur sur le plan écologique doit être optimale. Adam (2008) estime qu'un ouvrage n'est réellement réussi que si « *le milieu récepteur [...] acquiert des potentialités et des valeurs écologiques supérieures à [l'état] initial et [...] à ce qu'un ouvrage classique aurait pu apporter* ».

Au-delà de son champ d'application, la question du recours au génie végétal s'intègre au sein d'une problématique plus large d'aménagement durable du territoire à l'échelle du bassin versant. La question de la place laissée au cours d'eau, à sa dynamique latérale et à ses débordements est l'un des éléments fondamentaux pour un projet de territoire cohérent et une gestion globale, conciliant activités humaines et préservation d'espaces naturels ou semi-naturels.

Comme on l'a vu précédemment, la préservation ou la création d'un espace de mobilité réservé au cours d'eau constitue un enjeu environnemental majeur. Il s'agit d'un moyen efficace de limiter l'incision des rivières et donc l'abaissement des nappes d'accompagnement. Cela contribue par conséquent à préserver l'accès à la ressource en eau. Au-delà des objectifs environnementaux fixés par les politiques publiques, l'existence d'un espace de mobilité participe également à la préservation des enjeux socio-économiques face aux risques d'inondation par la création de zones de rétention temporaire ou d'écroulement de l'onde de crue en amont des secteurs à enjeu.

Il est ainsi fondamental :

- d'intégrer la **problématique de l'érosion de berge dans une logique de territoire** tenant compte des enjeux tant socio-économiques qu'environnementaux, **à l'échelle globale du bassin versant** et du tronçon de cours d'eau ;
- de considérer la création d'une **protection contre l'érosion comme un dernier recours et non comme une solution systématique** d'aménagement ;
- de **privilégier des travaux de restauration** de cours d'eau ambitieux intégrant l'objectif de **constitution** (ou de préservation) **d'un espace de mobilité** ;
- de **privilégier le recours aux ouvrages de protection de berge** aux seuls cas où il est indispensable d'intervenir.

Si le génie végétal constitue la solution à privilégier lorsque le choix d'aménagement s'oriente vers la protection de berge, il est néanmoins inopportun de l'opposer totalement au génie civil et de rejeter en bloc l'utilisation de ce dernier. Les deux peuvent en effet être complémentaires dans le cadre de techniques mixtes combinant à la fois matériaux vivants et inertes. L'un et l'autre sont bien souvent nécessaires, notamment en rivière de montagne où leur utilisation commune est justifiée par les caractéristiques mêmes des cours d'eau et la présence, à l'état naturel, de blocs de diamètre plus ou moins important (fig. 1). Dans certains contextes, le recours au génie civil pur peut également être justifié, notamment dans le cas de contraintes mécaniques très élevées.

Le choix technique d'aménagement doit s'appuyer sur une démarche logique et pragmatique de conception essentiellement basée sur la pleine compréhension des processus en action et des enjeux à l'échelle du site, mais, plus largement, du tronçon et du bassin versant. Le gestionnaire ne peut en aucun cas se départir d'une telle démarche au risque de certaines désillusions.



Fig. 1 - Modèle de berges naturelles en cours d'eau de montagne.

La réussite d'un ouvrage de génie végétal est dépendante de nombreux facteurs de natures diverses que le concepteur doit connaître et prendre en compte lors de l'élaboration du projet. Cela nécessite un niveau d'expertise important et fait appel à des connaissances pluridisciplinaires. C'est pourquoi, sans nier la difficulté d'élaboration et de réalisation d'un ouvrage en génie civil, le recours au génie végétal est complexe et nécessite un haut niveau d'expertise ainsi que beaucoup d'expérience.

Les guides techniques sur le génie végétal constituent un appui pour le concepteur et visent à partager une partie des savoirs techniques sur le sujet. Ils ne remplacent néanmoins pas l'expertise et l'expérience mais visent à les compléter. Le présent ouvrage vient en complément d'autres, réalisés précédemment et dont la qualité est indéniable (Lachat 1994 ; Zeh 2007 ; Adam *et al.* 2008), afin de préciser des éléments spécifiques aux rivières de montagne.

En effet, en présence d'un contexte montagnard, les conditions d'utilisation de végétaux pour la protection de berges de cours d'eau diffèrent très largement d'un contexte de plaine. Gestionnaires et scientifiques manquent, encore aujourd'hui, de connaissances concernant la résistance mécanique des ouvrages et des végétaux ou encore le niveau de diversité végétale et animale des différents types d'aménagement, mais également de retours d'expériences. Les prochaines parties visent ainsi à fournir des éléments de connaissance sur ces sujets fondamentaux.

La deuxième partie du présent guide fournit ainsi des bases techniques utiles à la conception d'ouvrages en rivière de montagne, tandis que la troisième partie apporte des éléments de connaissance nécessaires au choix des espèces végétales dans le contexte des Alpes du Nord.