## Partie II



- 1. Introduction
- 2. Le génie végétal en rivière de montagne : histoire et spécificités
- 3. Approche mécanique
- 4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants
- 5. Ouvrages transversaux en bois
- 6. Analyse comparative des diversités animales et végétales de différents types de berges aménagées et naturelles

André Evette, Damien Roman, Jean-Baptiste Barré, Paul Cavaillé, Fabien Espinasse

## 1. Introduction

### 1.1. Objectifs généraux de cette deuxième partie

Cette partie vise à recenser et à mettre à disposition les expériences techniques des gestionnaires et les connaissances théoriques et pratiques disponibles sur les techniques végétales de protection de berges et les ouvrages bois en rivière de montagne. C'est-à-dire sur des cours d'eau présentant une forte pente (profil en long supérieur à 1 %), des pentes de berges souvent abruptes, un transport solide important et/ou situés en altitude (étages montagnard et subalpin). Cependant, comme les ouvrages existants sont peu nombreux en rivière de montagne, quelques exemples sont issus de zones non spécifiquement montagnardes, mais illustrent des techniques utilisables sur certains cours d'eau de montagne.

Toutefois, il ne s'agit en aucun cas de fournir des outils clé en main pour réaliser des aménagements. En effet, la conception de ces ouvrages nécessite des compétences pluridisciplinaires et leur réalisation demande une analyse fine des paramètres environnementaux, relevant de différents domaines techniques et scientifiques. Elle requiert également des observations de terrain préalables et beaucoup de recul dans leur analyse. L'expérience apparaît comme particulièrement utile et importante, notamment dans le domaine du génie végétal.

Par contre, cette partie devrait fournir quelques éléments qui permettront d'affiner et d'élargir la réflexion lors de la conception des ouvrages.

### 1.2. Présentation du plan de la deuxième partie

### 1.2.1. Histoire et spécificités du génie végétal en rivière de montagne

Ce premier chapitre vise à repositionner le génie végétal dans son contexte historique. Il s'agit de techniques anciennes qui ont fait l'objet de nombreux développements au cours des siècles qui nous ont précédés.

Ce chapitre comprend également des éléments relatifs à la spécificité de l'utilisation de techniques végétales en rivière de montagne. La végétation, les conditions hydrologiques et climatiques sont en effet différentes en montagne par rapport à ce que l'on rencontre en plaine. Ces conditions particulières demandent à être analysées finement lors de la conception et de la réalisation d'un ouvrage.

### 1.2.2. Approche mécanique

Ce deuxième chapitre synthétise les connaissances actuelles sur les limites mécaniques des ouvrages de génie végétal. Il s'agit de mieux comprendre comment les différentes techniques peuvent résister aux contraintes d'arrachement exercées par les cours d'eau. Il nous est apparu nécessaire de travailler cet aspect car c'est une limite importante des techniques de génie végétal. De plus, c'est souvent sur ce point que leurs détracteurs s'appuient pour dire que le génie végétal ne peut pas être mis en place. Ainsi, une meilleure diffusion de la connaissance des limites mécaniques de ces ouvrages pourrait vraisemblablement contribuer à briser quelques préjugés les concernant.

Les connaissances sur la résistance mécanique des ouvrages de génie végétal en berges de cours d'eau sont principalement issues de travaux menés par les chercheurs autrichiens de l'Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau de Vienne.

### 1.2.3. Principes, techniques et exemples de réalisations

Ce chapitre est consacré aux retours d'expériences et au recueil de techniques utilisées en rivière de montagne, incluant le génie végétal ainsi que les enrochements végétalisés. Elle décrit un certain nombre d'ouvrages utilisant des végétaux sur des rivières à forte pente et en altitude. Dans la mesure du possible, des éléments de contexte décrivant la situation initiale, des coupes types et des indications sur la végétation utilisée sont fournis.

Les chantiers pilotes réalisés en France et en Suisse, dans le cadre du projet Géni'Alp, sont notamment décrits. Dans ce chapitre, un ouvrage italien de plus de vingt ans et réalisé en cours d'eau de montagne est également présenté. On peut, en effet, trouver dans les Alpes italiennes des ouvrages anciens réalisés avec des techniques de génie végétal.

Une partie spécifique est dédiée aux ouvrages transversaux en bois, construits dans le lit afin de stabiliser le profil en long, et donc indirectement les berges des cours d'eaux et torrents.

### 1.2.4. Apports en termes de biodiversité du génie végétal

Ce dernier chapitre concerne la biodiversité qui s'épanouit sur les berges de cours d'eau. Il s'agit dans un premier temps de caractériser et de quantifier les biodiversités animales et végétales présentes sur les ouvrages de génie végétal et de génie civil. Le choix de la technique va en effet influer sur le type et le nombre d'espèces animales et végétales qui vont pouvoir s'installer sur une berge aménagée. Le développement des espèces exotiques envahissantes va aussi différer en fonction des choix initiaux d'aménagement.

L'objectif de cette partie est de fournir des éléments de compréhension à destination des gestionnaires de cours d'eau, pour appréhender dès la phase de projet, l'impact que pourront avoir leurs aménagements sur la biodiversité des berges de cours d'eau.

## 2. Le génie végétal en rivière de montagne : histoire et spécificités

### 2.1. Leçons de l'histoire

## 2.1.1. Le génie végétal : des techniques ancestrales

L'origine des techniques végétales remonte loin dans le passé, puisque déjà au premier siècle avant J.-C., Columelle, agronome romain, décrit la façon d'utiliser des boutures de saule (Evette et al. 2009). En Chine, les traces de l'utilisation des végétaux sont très anciennes et pourraient remonter à plus de 2 000 ans avant J.-C. (Stokes et al. 2010).

Et si l'on trouve déjà des guides donnant des informations techniques sur les ouvrages de génie végétal dès le 18<sup>e</sup> siècle, c'est bien au 19<sup>e</sup> que ces techniques prennent leur essor dans les Alpes. En effet, à cette période, les Alpes font face à des phénomènes de déboisement intenses en lien notamment avec une pression de pâturage élevée. L'absence de végétation ligneuse sur de nombreux bassins versants génère de forts problèmes d'érosion, aggravant les phénomènes de laves et charriages torrentiels ou d'inondations. Ces désastres amènent à une prise de conscience des pouvoirs publics et à la promulgation de mesures énergiques par les gouvernements suisse, italien ou français. Ainsi, en France, des lois sur le reboisement et l'engazonnement des montagnes sont adoptées autour de 1860 (Labonne et al. 2007).

S'ensuivent, dans de nombreuses parties des Alpes, d'énormes travaux de restauration des terrains en montagne, incluant des ouvrages de génie civil, mais également une large part de travaux à base de génie végétal. À titre d'exemple, dans le Diois et les Baronnies (Sud de la région Rhône-Alpes), ce ne sont pas moins de 92 720 ouvrages de génie végétal de type fascines ou clayonnages qui furent construits le long des thalwegs.

De même, 760 km de ravines furent stabilisés à l'aide de matelas de branches (Evette et al. 2009).

Ces travaux gigantesques ont généré une importante expérience française des services de restauration des terrains en montagne (RTM) en matière de génie végétal et d'engazonnement (Bernard, Demontzey, Mathieu, Surell, Thiery, etc.) dans la deuxième moitié du 19<sup>e</sup> siècle et au début du 20<sup>e</sup>.



Fig. 1 - Garnissage d'un ravin par la technique de clayonnage en croisillons, services de restauration et conservation des terrains en montagne (1911).

## 2.1.2. Expérience ancienne sur le génie végétal en rivières et torrents de montagne

De nombreuses techniques ont été utilisées pour stabiliser le fond du lit et les berges des rivières de montagne (Labonne *et al.* 2007). Dans ce chapitre, quelques exemples seront montrés afin d'illustrer l'intérêt et les limites de ces techniques.

## 2.1.2.1. Stabilisation du fond du lit des rivières de montagne

Parmi les techniques de génie végétal utilisées pour stabiliser le fond des rivières et torrents de montagne (majoritairement pour des ravines et cours d'eau temporaires), on peut notamment citer les barrages en fascines, ceux en clayonnages et ceux en palissades.

Il est important de signaler qu'il est illusoire de chercher à stabiliser le fond d'un cours d'eau à écoulement permanent avec des végétaux vivants. En effet, les ligneux ne peuvent pas survivre dans des milieux constamment immergés, et les racines des arbres ne descendent quasiment pas sous le niveau de la nappe. Pour protéger une berge avec du génie végétal, il est donc indispensable d'avoir soit une protection de pied de berge en enrochement, soit d'avoir un fond de lit stable. Par ailleurs, dans les torrents et rivières torrentielles, le charriage de matériaux grossiers peut conduire à un décapage de la végétation exposée.

Des barrages en clayonnages transversaux ont été utilisés pour stabiliser le fond du lit des torrents, entre deux barrages en maçonnerie, comme on peut le voir sur la figure 2a représentant le torrent du Bourget, en Savoie (France). Il semble néanmoins que ces ouvrages transversaux n'aient pas résisté avec le temps, puisque 18 ans plus tard (fig. 2b), la série de barrages en clayonnages a été remplacée par un barrage en maçonnerie.





Fig. 2 - Torrent du Bourget : (a) en 1887 ; (b) en 1905.

On peut néanmoins noter que ces techniques de végétalisation du lit et des berges ont conduit dans d'autres cas à des résultats spectaculaires, comme le montrent les deux photos prises à 5 ans d'intervalle sur un ouvrage italien de 1912 (fig. 3).

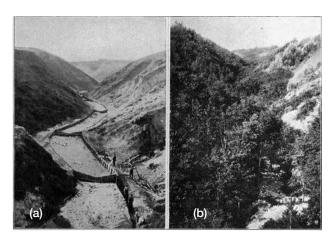


Fig. 3 - Le Val di Mezzo (Rivoli Veronese - Vénétie - Italie) : (a) au moment des travaux de lutte contre l'érosion ; (b) 5 ans après la plantation de saules, d'aulnes et de robiniers (Di Tella 1912).

### 2.1.2.2. Stabilisation des berges de cours d'eau

De nombreuses techniques ont été utilisées pour la protection des berges des rivières et torrents de montagne. On peut bien sûr citer les fascines, qui peuvent être de structure et de dimension variables.

La fascine simple est constituée de tiges souples, droites et sans intersection, d'un diamètre inférieur ou égal à 2-3 cm. Ces tiges sont assemblées toutes dans le même sens, dans un fagot de 30 à 35 cm de diamètre et d'une longueur de 2,5 à 3 m. Ces fagots sont serrés avec des liens en fil de fer ou en osier. Les fascines d'une longueur supérieure à 3 m sont plus difficiles à utiliser (Scheck 1885).

Les fascines à noyau, encore appelées saucissons, sont des structures de plus gros diamètre variant entre 0,8 à 1,20 m. Ces saucissons contenaient un cœur en sable, gravier, terre ou pierres qui était entouré de branchages, voire par 7 fascines juxtaposées. Ces saucissons pouvaient être utilisés seuls ou juxtaposés par deux ou trois (fig. 4 et 5) (Dugied 1819 ; Defontaine 1833 ; Labonne et al. 2007).



Fig. 4 - Canalisation d'un torrent par construction de saucissons parallèles sur les berges (Mathieu 1864).



Fig. 5 - Stabilisation des berges de la Broye au moyen de fascines à noyau, selon le système de Gumppenberg (ingénieur en Bavière), vers 1865 (Vischer 2003).

On trouve également des protections faites à base de gabions en osier (fig. 6), qui permettent d'endiguer les petits torrents à des coûts bien moindres que les digues en pierres (Dugied 1819).

Fig. 6 - Gabions coniques et prismatiques triangulaires en osier remplis avec des graviers (Defontaine 1833).

De nombreux épis ont également été construits à l'aide de techniques de génie végétal pour protéger les berges. Ces ouvrages étaient appelés « tunages » (fig. 7) et faisaient largement appel aux fascines, généralement sur plusieurs couches.

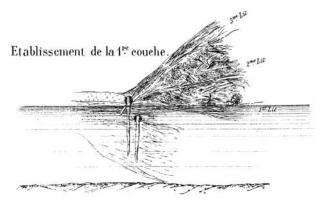


Fig. 7 - Tunage sur le Rhône, à Bex (Vaud - Suisse), avec fascines et pieux (Barraud 1888, d'après Vischer 2003).

Ce bref aperçu montre l'ampleur de ce qu'ont pu être les travaux de génie végétal au cours des siècles précédents. La faiblesse des coûts de main-d'œuvre autorisait en effet des constructions végétales sur de très longs linéaires et avec des techniques variées.

## 2.2. Spécificités du génie végétal en montagne

## 2.2.1. Le génie végétal en montagne : des modèles naturels particuliers

### 2.2.1.1. Une structuration de la rive particulière

Les milieux alluviaux et les berges de cours d'eau présentent une végétation spécifique en montagne. Les types de végétation vont dépendre du régime hydromorphologique, de la zone climatique, de l'altitude, de la géologie. Les différents modèles végétaux présents sur les berges de cours d'eau sont décrits dans la partie III de ce guide. Le cortège des ripisylves et notamment les espèces de saules vont ainsi varier en fonction de l'altitude. Certains de ces saules de montagne ont des capacités de bouturage intéressantes comme Salix daphnoides ou S. myrsinifolia, d'autres comme S. appendiculata sont plus difficiles à utiliser sous forme de boutures, de plançons ou de couches de branches.

On peut également noter la présence de blocs et d'« enrochements naturels » sur la berge de certaines rivières torrentielles et des torrents (fig. 8 et 9). La présence de ces structures minérales dans les berges augmente avec la pente des cours d'eau.



Fig. 8 - Torrent de montagne.

En milieu montagnard, le type de végétation présent est souvent spécifique. Les espèces herbacées et ligneuses de plaine (dont certains saules) ne sont pas forcément adaptées à l'altitude. Il y a donc lieu d'accorder une vigilance particulière aux espèces utilisées pour la revégétalisation, et s'assurer de leur bonne adéquation aux conditions de milieu, notamment en ce qui concerne l'altitude. La partie III donne ainsi les caractéristiques des espèces utilisables pour le génie végétal en berges de cours d'eau, tant en termes d'exigences de milieu que de modalités d'utilisation en génie végétal. Ces notions sont largement détaillées dans la partie III du guide.

### 2.2.1.2. Quelle définition du génie végétal en altitude ?

Si on reprend la définition du génie végétal donnée en I.3.1 de cet ouvrage, sont considérés comme des ouvrages de génie végétal ceux pour lesquels les végétaux assurent une fonction de stabilisation mécanique. Les ouvrages dans lesquels les matériaux inertes assurent les fonctions de stabilisation mécanique, comme les enrochements végétalisés, sont alors appelés génie biotechnique.

Cependant, cette définition peut poser problème en ce qui concerne les rivières à forte pente. En effet, un des objectifs du génie végétal est de copier les modèles naturels qui fonctionnent. Il s'agit généralement de s'inspirer des structures végétales présentes à proximité des ouvrages et qui sont stables vis-à-vis de l'érosion (chap. I.3.1). Or, sur les rivières et torrents à forte pente, les berges de cours d'eau sont souvent naturellement constituées de blocs et de végétation entremêlés, donc d'« enrochements végétalisés naturels ». Ainsi, si les enrochements végétalisés ne peuvent pas être considérés comme des ouvrages de génie végétal en rivière de plaine, la question se pose bien différemment sur les rivières à forte pente.



Fig. 9 - Exemple d'un enrochement naturel en pied de berge d'un torrent.

Fig. 10 - Ouvrage de génie végétal sur une rivière dynamique juste après sa mise en place.

### 2.2.2. Problématique liée à la végétation

## 2.2.2.1. Des conditions qui influencent la croissance des végétaux

En montagne, la période de végétation diminue avec l'altitude sous l'effet de la baisse des températures et de l'augmentation de l'enneigement. Ainsi, les saules d'altitude débourrent plus tard et perdent leurs feuilles plus tôt que leurs cousins des plaines.

La vitesse de croissance des plantes décroît avec l'altitude ; cela peut d'ailleurs se vérifier sur les espèces présentes sur une large gamme altitudinale. Ainsi, en comparaison avec les saules de plaine, les saules de montagne ont une croissance plus lente. De par ces conditions de croissance, leur bois est plus dur, ce qui leur confère une meilleure résistance (dessiccation, battage, etc.). Leur bois est aussi plus difficile à couper lorsque l'on veut le prélever pour faire des boutures. Il est par ailleurs souvent moins rectiligne et moins souple. Les saules de montagne présentent donc des conditions de prélèvement et de mise en œuvre qui diffèrent de celles des saules de plaine (Duperray 2010).

Cette plus faible croissance des plantes en altitude va ainsi freiner le développement des ouvrages de génie végétal par rapport à ce que l'on peut observer en plaine. De plus, la résistance des ouvrages de génie végétal augmentant avec le temps, on peut conclure que la résistance des ouvrages de génie végétal en rivière de montagne augmente moins vite que sur les rivières de plaine.

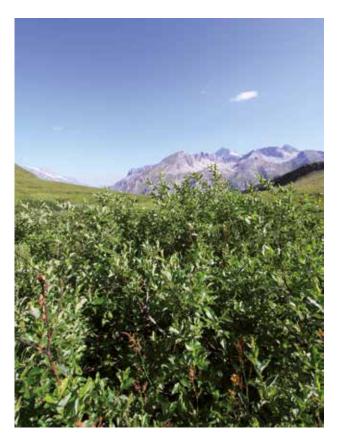


Fig. 11 - Saules d'altitude.

### 2.2.2.2. Quelle origine pour les espèces utilisées ?

Souvent, faute de disponibilité ou pour des raisons pratiques, le matériel végétal utilisé pour la revégétalisation de zones de montagne provient d'autres zones géographiques, et notamment de plaine, où il est plus facile de le cultiver et de le prélever. Lorsque l'on utilise des boutures issues de zones éloignées, d'autres massifs, voire de plaines, on introduit des espèces et des variétés ou souches non indigènes. Ces dernières ne sont pas forcément bien adaptées aux contraintes du milieu ambiant. Pourtant, en zone de montagne, on est généralement dans des territoires avec une forte valeur patrimoniale, avec une végétation diversifiée qui présente des espèces ou des écotypes spécifiques. L'utilisation de souches locales apparaît donc comme primordiale, à la fois dans l'objectif d'utiliser un matériel végétal adapté aux conditions de milieu, que pour respecter le caractère patrimonial de ces milieux à forte typicité.

Les saules de montagne ayant une saison de végétation plus courte, leur utilisation pourrait apparaître comme une solution pour des chantiers de plaine précoces à l'automne ou tardifs au printemps (Duperray 2010). Ainsi, on pourrait avoir des saules en période de dormance à utiliser sur des chantiers où les saules locaux seraient encore ou déjà en végétation. Ceci dit, se pose là aussi le problème de l'indigénat et de l'adaptation des espèces et écotypes utilisés.

### 2.2.3. Périodes d'intervention

### 2.2.3.1. Contraintes hydrologiques

Dans les Alpes du Nord, on considère généralement trois types principaux de régime hydrologique.

Tout d'abord le régime glaciaire, qui correspond à des cours d'eau dont une part importante du bassin versant est alimentée par des glaciers. Ces cours d'eau connaissent des étiages hivernaux et de hautes eaux estivales. Ils sont aussi caractérisés par des variations de débit importantes entre le jour et la nuit, les débits nocturnes étant plus faibles.

Le régime nival, quant à lui, correspond à des bassins versants d'altitude où une part importante des précipitations tombe sous forme de neige. Il est caractérisé par de très fortes crues de printemps, liées à la fonte des neiges.

Enfin, le régime pluvio-nival se trouve dans des bassins versants à plus basse altitude. Ce régime est caractérisé par deux périodes de crues, l'une au printemps à la fonte des neiges, l'autre en automne ou en hiver. La prédominance de la crue d'automne/hiver est d'autant plus marquée que l'influence nivale est faible.

Les variations de débit pendant la saison de végétation sont à prendre en compte dans la conception des ouvrages de génie végétal.

Dans le cas du régime glaciaire, la période de mise en place des ouvrages au printemps ou à l'automne correspond à des périodes où le débit n'est pas très élevé, ce qui est favorable au déroulement des chantiers.

Les crues de printemps sur les cours d'eau à régime nival sont préjudiciables si l'on souhaite installer les ouvrages de génie végétal à cette période. Elle risque en effet de se produire au cours du chantier, et donc d'empêcher sa bonne réalisation.

Sur les cours d'eau à régime pluvio-nival, les risques de crues importantes, au printemps mais aussi à l'automne, ne sont pas là non plus sans répercussions pour la bonne réalisation des chantiers à ces périodes.

La question du régime hydrologique est une des questions préalables importantes à se poser lors de la conception d'un projet de génie végétal en rivière de montagne. Le niveau de l'eau pendant la saison de végétation peut en effet être très variable et conditionner à la fois les périodes de chantier, mais aussi le calage vertical des ouvrages de génie végétal. Il y a ainsi lieu de bien caler la hauteur des ouvrages afin d'éviter qu'ils ne soient immergés pendant une partie importante de la période de végétation. Par exemple, le calage vertical d'une fascine avec le niveau d'eau pendant la saison de végétation apparaît particulièrement important. Si elle est mal calée et trop longtemps immergée ou trop longtemps à sec, elle ne reprendra pas et les branches de saule ne survivront pas. La protection du pied de berge contre l'érosion arrêtera d'être fonctionnelle dès que la fascine aura disparu.

À noter que la contrainte du niveau d'eau élevé ou des variations fréquentes de hauteur d'eau (jour/nuit) en pleine période de végétation, est d'autant plus forte sur des cours d'eau canalisés et endigués. En effet, la réduction latérale du gabarit hydraulique, consécutif à la chenalisation, accentue les variations de niveau d'eau.

## 2.2.3.2. Contraintes liées à la neige et à la période de végétation

Les saules, très souvent utilisés en génie végétal, sont parmi les ligneux qui sortent les premiers du sommeil hivernal. Le débourrement de leurs bourgeons intervient fréquemment alors que la neige est encore présente au sol. Mais pour réaliser des travaux de génie végétal en altitude au printemps, il y a lieu d'attendre la fonte de la neige, pour des raisons pratiques et d'accessibilité. Survient alors le risque que le matériel végétal prélevé sur place ne soit plus en l'état de dormance. Or, la mise en place de boutures déjà feuillées risque de limiter leur taux de reprise.

Les périodes d'intervention pour les travaux en altitude sont soumises aux aléas hydrologiques et notamment aux fortes crues de printemps pour le régime nival. Dans ce dernier cas, une solution peut être de réaliser les ouvrages à l'automne pour éviter le risque hydrologique.

Il existe pourtant également un risque à réaliser les travaux à l'automne. En effet, les procédures liées à la mise en place des marchés et les aléas propres à l'installation du chantier conduisent fréquemment à un retard dans son démarrage. Ce retard est susceptible de poser problème en termes d'accès et de bon déroulement du chantier si la neige vient à faire une apparition marquée et durable. On prend alors le risque de devoir arrêter le chantier pour l'hiver, et d'être obligé de le reprendre lors de la crue de printemps... Il y a donc lieu d'être particulièrement vigilant sur les procédures et la rédaction des marchés de travaux. Le cas échéant, il peut être judicieux de reporter les travaux à l'année suivante.

## 3. Approche mécanique

## 3.1. Contraintes mécaniques sur les rivières de montagne

## 3.1.1. Le rôle mécanique de l'eau sur les berges

En fonction du régime hydrologique, de la structure de la berge et de la zone étudiée, l'eau peut avoir une action mécanique favorable ou défavorable sur la tenue de la berge. La berge est, on le rappelle, constituée d'un sol de granulométrie variable (grossière, fine ou mixte). L'eau joue ainsi un rôle complexe qui se décline à des échelles très différentes.

### 3.1.1.1. L'eau et les propriétés physiques du sol

### → La teneur en eau des sols fins

La teneur en eau du sol influence sensiblement ses propriétés physiques et plus spécialement sa résistance au cisaillement. Le cisaillement correspond à une sollicitation tangentielle à la surface de laquelle sont appliqués ces efforts. Au plan de cisaillement, nous observons un glissement des particules de matière (fig. 1).

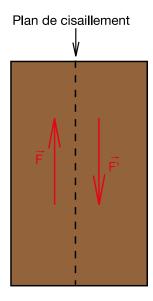


Fig. 1 - Représentation schématique du cisaillement sur une éprouvette de sol.

La stabilité d'une berge, notamment vis-à-vis du glissement, est étroitement liée à sa résistance au cisaillement. La résistance au cisaillement d'un sol saturé en eau est plus faible que celle d'un sol non saturé. Dans ce dernier, des forces attractives d'absorption entre les grains augmentent la résistance au cisaillement apparente du sol.

Cette force est à l'origine d'une cohésion apparente améliorant la qualité mécanique du sol.

Les épisodes de crue, en saturant le sol en eau, diminuent sa cohésion, augmentent les pressions interstitielles et favorisent les risques de glissement.

Il y a ainsi lieu de bien distinguer la cohésion, qui est source de stabilité, de la pression interstitielle, qui génère les risques les plus forts de glissement à la décrue (chap. II.3.1.4).

Isolée de toute contrainte extérieure, la stabilité de la berge est assurée grâce à sa géométrie (pente), sa composition (granulométrie, texture) et sa teneur en eau. Autrement dit, une augmentation de la teneur en eau peut modifier, à elle seule, l'état de stabilité de la berge.

La teneur en eau du sol est influencée par :

- le niveau du cours d'eau et de la nappe d'accompagnement;
- la nature des matériaux constitutifs de la berge et notamment leur perméabilité;
- les conditions météorologiques ;
- l'évapotranspiration de la végétation rivulaire.

### Les cycles de gel et de dégel

Les cycles de gel et de dégel sont à l'origine d'une destructuration mécanique du sol, aggravée par la présence d'eau dont le volume augmente à l'état solide. Plus la fréquence de ces cycles est élevée, plus la dynamique d'érosion est importante. Ce type d'érosion augmente avec l'altitude. Il a été démontré que la présence de végétaux, et même d'un enherbement épars, réduit les fluctuations de température dans le sol en limitant les vitesses de vent et les échanges de chaleur entre le sol et l'atmosphère. Il a également été observé que le couvert végétal diminue la fréquence du cycle de gel et dégel sur les berges de rivière et diminue ainsi les mécanismes d'érosion (Bohn 1989, dans Abernethy et Rutherfurd 1998).

## 3.1.1.2. Les actions mécaniques directes engendrées par l'eau

### La vitesse du courant

La vitesse du courant fait partie des grandeurs caractéristiques d'un cours d'eau. Sa détermination se fait classiquement à partir des lois telles que Manning-Strickler ou Keulegan.

La formule de Manning-Strickler est souvent employée pour calculer la vitesse de l'eau en régime permanent et uniforme. Le coefficient de rugosité K doit être calé sur des mesures de ligne d'eau. Il peut également être calculé à partir de la granulométrie du lit. Cependant, les modèles proposés ne sont plus valables lorsque la pente et le diamètre des blocs sont élevés.

$$U = K R^{2/3} J^{1/2}$$

### Où:

- $U = \text{la vitesse de l'eau (m.s}^{-1});$
- K =le coefficient de rugosité (ou de Strickler) ;
- R = le rayon hydraulique (m) rapport de la surface mouillée sur le périmètre mouillé;
- I = la pente du cours d'eau (-).

Ces dernières donnent des résultats corrects pour des profondeurs relatives supérieures à 7 environ. La profondeur relative est définie par le ratio  $R/D_{84}$ , où :

- R = le rayon hydraulique ;
- la granulométrie D<sub>84</sub> = l'ouverture théorique du tamis telle que 84 % des particules ont un diamètre inférieur.

Mais ce domaine correspond à l'échelle des « petites rugosités » selon la classification proposée par Bathurst et al. (1981). Pour les plus faibles tirants d'eau (échelles des rugosités moyennes et larges), qui concernent la plupart des cours d'eau de montagne en écoulement de crue, ces formules surestiment les vitesses.

Pour les grandes rugosités, la formule de Manning-Strickler a été revue par Ferguson (2007). Cette formulation, dite « VPE » (Variable Power Exponent), permet de déterminer la vitesse à partir de la hauteur d'eau :

$$\frac{U}{\sqrt{gJR}} = \frac{a_1 a_2 (R/D_{84})}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 (R/D_{84})^{5/3}}}$$

### Où :

- $a_1 = 6.5 \text{ et } a_2 = 2.5$ ;
- $U = \text{la vitesse d'écoulement (m.s}^{-1});$
- $g = \text{la pesanteur (m.s}^{-2})$ ;
- J =la pente d'énergie prise à égale à la pente du cours d'eau dans notre cas (–) ;
- R = le rayon hydraulique (m).

Dans le même esprit, Rickenmann et Recking (2011) ont proposé un calcul permettant de déterminer la vitesse à partir du débit unitaire q (débit par unité de largeur en  $m^2s^{-1}$ ):

$$\frac{U}{\sqrt{gJD_{84}}} = 1.44q^{*0.6} \left[ 1 + \left( \frac{q^*}{43.8} \right)^{0.82} \right]^{-0.24}$$

En utilisant deux nouvelles variables adimensionnelles :

$$U^* = U / \sqrt{gJD_{84}}$$
 et  $q^* = q / \sqrt{gJD_{84}^3}$ 

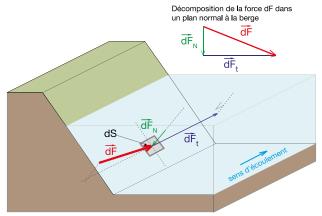
### Où:

- U = la vitesse d'écoulement (m.s<sup>-1</sup>);
- $g = \text{la pesanteur (m.s}^{-2})$ ;
- J = la pente d'énergie prise à égale à la pente du cours d'eau dans notre cas (-);
- R = le rayon hydraulique (m);
- D<sub>84</sub> = le diamètre correspondant à 84 % des matériaux de diamètre inférieur sur la courbe granulométrique (m).

### L'action mécanique de l'eau

L'eau exerce un effort sur les parois du lit. La force dF exercée sur une unité de surface dS, peut être décomposée dans un plan normal à une paroi de la manière suivante :

- la force tractrice dFt, composante parallèle à la paroi (fond ou berge) et dirigée dans le sens de l'écoulement;
- la force normale  $dF_N$ , liée à la pression de l'eau par la relation  $dP = dF_N.dS$  avec dP, pression élémentaire de l'eau sur dS. Cette composante est perpendiculaire à la paroi.



dS: surface élémentaire de la berge

dF<sub>N</sub>: pression élémentaire exercée par l'eau sur la surface dS dF<sub>t</sub>: force tractrice élémentaire exercée par l'eau sur la surface dS

dF: force élémentaire exercée par l'eau sur la surface dS

Fig. 2 - Détails des efforts exercés par l'eau sur les parois d'un tronçon de rivière rectiligne.

## → La contrainte tractrice (ou de cisaillement ou d'arrachement)

La force de frottement de l'eau, ou force tractrice, génère une contrainte sur le lit du cours d'eau. Cette contrainte tractrice  $\tau$  représente la contrainte tangentielle de la colonne d'eau exercée sur la paroi du chenal :

$$\tau = \frac{dF_t}{dS}$$

Où:

•  $\tau$  = la contrainte tractrice (N.m<sup>-2</sup>);

• dFt = la force de frottement élémentaire de l'eau (N);

• dS = la surface élémentaire d'application de la force sur la paroi (m<sup>2</sup>).

En écoulement uniforme, la contrainte tractrice au fond du lit peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$\tau = \rho.g.R.j$$

Où:

•  $\tau$  = la contrainte tractrice (N.m<sup>-2</sup>);

•  $\rho$  = la masse volumique de l'eau (kg.m<sup>-3</sup>);

• g = l'accélération de pesanteur (m.s<sup>-2</sup>);

• R = le rayon hydraulique (m);

• i = la perte de charge linéaire (adimensionnel).

Des hypothèses de calcul permettent de simplifier cette expression : la ligne d'énergie (j) est parfois remplacée par la pente (i) du cours d'eau pour simplifier les calculs (équivaut à se placer dans le cas d'un écoulement uniforme). Sur les cours d'eau suffisamment larges  $(L>20\ R)$ , on peut remplacer le rayon hydraulique (R) par la hauteur d'eau (h).

Sur une berge immergée, la force de pesanteur s'ajoute à la force tractrice pour la mise en mouvement des matériaux. Ainsi, plus la berge est inclinée, plus il est facile de mettre les particules en mouvement.

Lorsque cette contrainte atteint un seuil critique, elle est responsable de la mise en mouvement des matériaux du fond du lit ou de la berge. Nous parlons alors de « contrainte tractrice critique ».

L'expression de la contrainte tractrice critique sur les berges fait intervenir l'angle de frottement interne  $\varphi$  du matériau constituant le sol et la pente de la berge  $\beta$  :

$$\tau_{\beta} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \varphi}} \times \tau$$

Où:

•  $\tau_{\beta}$  = la contrainte tractrice critique sur une pente d'angle  $\beta$  avec l'horizontale (N.m<sup>-2</sup>);

•  $\varphi$  = l'angle de frottement interne du sol (°);

 τ = la contrainte tractrice moyenne exercée par le fluide sur la paroi (N.m<sup>-2</sup>).

Il est d'usage d'évaluer la contrainte tractrice moyenne sur les berges équivalente à 0,75 fois la contrainte maximale sur le fond du lit, mais la validité de cette approximation reste à démontrer pour les rivières de montagne.

## → La poussée stabilisatrice du cours d'eau sur la berge

L'eau exerce une pression sur la berge (fig. 2). Elle correspond au poids de la colonne d'eau supportée. Pour une surface élémentaire, la pression élémentaire est :

 $dP = \rho.g.h.dS$ 

Où:

• dP = la pression de l'eau (N.m<sup>-2</sup>) sur la surface dS (m<sup>2</sup>);

•  $\rho$  = la masse volumique de l'eau (kg.m<sup>-3</sup>);

• g = l'accélération de pesanteur (m.s<sup>-2</sup>);

• h = la hauteur de la colonne d'eau (m).

### → La profondeur d'affouillement

Il existe deux types d'enfoncement du fond du lit : les incisions généralisées qui s'étendent sur un tronçon de cours d'eau et les affouillements localisés liés à une singularité hydraulique (rétrécissement, embâcle, etc.).

La formule d'Izard et Bradley retravaillée par Ramette permet de calculer la profondeur d'affouillement ou la profondeur sur laquelle les matériaux du lit risquent d'être déplacés (Ramette 1981). Cette formule n'est valable que pour un affouillement localisé au droit d'un rétrécissement, elle n'est pas applicable pour un tronçon homogène :

$$E = Y - h$$
où  $Y = 0.73 \times Q^{2/3} \times L^{-2/3} \times D_{50}^{-1/6}$ 

Où:

• E = l'épaisseur d'affouillement (m);

• Y = la profondeur du fond du lit en mouvement sous eau (m);

• h = le tirant d'eau (m);

 $Q = \text{le débit liquide (m}^3.\text{sm}^{-1});$ 

 $\widetilde{L}$  = la largeur du cours d'eau (m) ;

• D = le diamètre des matériaux du fond du lit (m).

À noter que cette formule n'est qu'indicative, et que la profondeur de mise en mouvement des matériaux lors des crues est peu connue, notamment sur les cours d'eau à forte pente.

### 3.1.2. Le transport solide

Le transport solide correspond au charriage des sédiments grossiers par les cours d'eaux au gré des crues. Il a un rôle morphogène important.

Il existe de nombreuses formules pour calculer le débit solide théorique des cours d'eau. La formule de Smart et Jaeggi (1983), par exemple, est adaptée aux rivières de montagne :

$$q_{sb} = 4 \times \left(\frac{D_{90}}{D_{30}}\right)^{0.2} \times \frac{qi^{1.6}}{\rho_s - \rho_w} \times \left(1 - \frac{\theta_{cr}}{\theta}\right)^{3/2}$$

Οù

•  $q_{sb}$  = le débit solide volumique de charriage par unité de largeur (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>);

• D = le diamètre d'une particule (m);

q = le débit liquide par unité de largeur (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>);

- i = la pente du fond du lit (%);
- $\rho_s$  = la masse volumique du solide (kg.m<sup>-3</sup>);
- $\rho_{w}$  = la masse volumique de l'eau (kg.m<sup>-3</sup>).

Le paramètre de Shields critique ( $\theta_{cr}$ ) et le paramètre de Shields ( $\theta$ ) sont définis ci-après.

Le débit solide calculé correspond à la capacité de transport solide du cours d'eau. Le débit solide mesuré peut être inférieur au débit calculé, notamment lorsque l'apport sédimentaire est insuffisant. La capacité de transport est atteinte lorsqu'il y a un équilibre entre érosion et dépôt.

Le transport solide apparaît dès que la contrainte qui s'exerce sur le lit est capable de mettre en mouvement les sédiments. Il est possible de déterminer ce seuil avec le nombre de Shields. Il s'agit d'une contrainte adimensionnelle qui représente le rapport des forces stabilisantes (le poids des matériaux dans l'eau) sur les forces déstabilisantes (la contrainte de fond) pour la mise en mouvement d'un matériau de diamètre (D) au fond du lit :

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_{\scriptscriptstyle S} - \rho_{\scriptscriptstyle W}) \times g \times D}$$

Où:

- $\theta$  = le nombre de Shields ;
- $\tau = \text{la contrainte tractrice (N.m}^{-2})$ ;
- $\rho_s$  = la masse volumique du solide (kg.m<sup>-3</sup>) de la particule de diamètre D (m) ;
- $\rho_{w}$  = la masse volumique de l'eau (kg.m<sup>-3</sup>).

Le nombre de Shields critique ( $\theta_{cr}$ ), correspond à la valeur du paramètre de Shields de mise en mouvement des particules de diamètre D. Le paramètre de Shields critique de mise en mouvement du fond du lit peut être calculé en fonction de la pente, (formule de Recking  $et\ al.\ 2008$ ) :

$$\theta_{cr} = 0.15 \times i^{0.275}$$

Où:

- $\theta_{cr}$  = le nombre de Shields critique ;
- i = la pente du fond (%).

Si  $\theta$  <  $\theta_{cr}$ , les particules restent immobiles. Si  $\theta_{cr}$  >  $\theta$ , les particules sont mises en mouvement.

### 3.1.3. Puissance des cours d'eau

La puissance d'un cours d'eau par unité de surface mouillée peut être définie comme suit :

$$\omega_a = \tau \times v$$

Où:

- $\omega_a$  = la puissance du cours d'eau (W.m<sup>-2</sup>);
- $\tau$  = la contrainte tractrice du fond du lit (N.m<sup>-2</sup>);
- $v = \text{la vitesse de l'eau (m.s}^{-1}).$

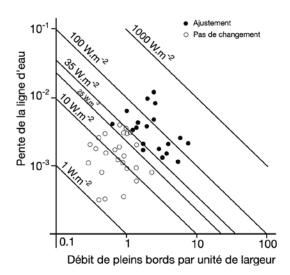


Fig. 3 - Indication sur l'existence d'un ajustement de cours d'eau pour un débit de pleins bords et une pente de la ligne d'eau donnés. La puissance est calculée en fonction de ces deux derniers paramètres (Malavoi et al. 2007, d'après Brookes et Gregory 1988).

La figure 3 montre un seuil de 35 W.m<sup>-2</sup> en dessous duquel la rivière ne subit pas d'ajustement. Comme le font remarquer Malavoi et al. (2007), cette valeur est à relativiser car la possibilité d'ajustement du cours d'eau dépend aussi de la cohésion des berges.

### 3.1.4. Mécanisme d'évolution des berges

La stabilité des berges dépend à la fois de ses propriétés intrinsèques et des paramètres du milieu extérieur (les contraintes de frottement et les activités anthropiques). Les différentes propriétés des berges ont été listées par Mosselman (1992). Ainsi, la masse et la texture des matériaux, leurs résistances au cisaillement et à la traction, le niveau de la nappe d'accompagnement, la perméabilité, la stratigraphie, la géométrie et la végétation jouent sur leur équilibre.

Les berges subissent principalement trois processus d'évolution morphologique (Degoutte 2006) :

- l'érosion par le courant ;
- le glissement ;
- l'effondrement.

Bien que physiquement différents, ces processus sont indissociables les uns des autres et l'étude d'un mouvement d'une berge fait souvent apparaître ces phénomènes associés dans des proportions variables.

### 3.1.4.1. L'érosion

L'érosion est une des conséquences de la force tractrice (fig. 4). En s'érodant peu à peu, les berges se creusent en fonction de leur structure (résistance à l'arrachement, stratigraphie). À terme, l'équilibre est rompu, provoquant un glissement ou un effondrement. Les mécanismes d'éro-

sion sont d'autant plus forts que l'angle entre le courant principal et la berge est fort, et donc que l'on se trouve sur les berges concaves (Degoutte 2006).



Fig. 4 - Érosion de la berge et incision du lit mettant en danger le pont.

Dans le cas des rivières à fonds mobiles, les matériaux du fond du lit peuvent se déplacer lors des crues, provoquant un approfondissement temporaire du lit qui peut provoquer l'entraînement du pied de berge.

### 3.1.4.2. Le glissement

Le glissement en masse correspond au déplacement d'une partie de la berge le long d'une surface de cisail-lement (fig. 5). Le processus de glissement résulte de la confrontation entre les forces déstabilisantes exercées par le poids de la berge au-dessus de la surface de cisaillement, et par d'éventuelles pressions interstitielles et les forces stabilisantes (liées au frottement et à la cohésion) le long de la surface de cisaillement.

Un glissement survient le plus généralement lors de la phase de décrue de la rivière. La saturation en eau du sol surcharge considérablement la berge, réduit les caractéristiques mécaniques du sol et y engendre des pressions interstitielles. Conjointement, la baisse du niveau d'eau réduit la poussée stabilisatrice qu'elle exerce sur la berge. Ce phénomène s'observe surtout sur les sols peu drainants (argileux, limoneux, etc.).

L'angle de stabilité d'un talus avec un sol peu cohérent et non saturé en eau correspond à son angle de frottement interne. Lorsque le sol est saturé en eau, l'angle de stabilité diminue presque du double.

Les causes de glissement de berges peuvent être : une augmentation de la pente du talus par érosion, une augmentation de la teneur en eau du talus, un affouillement du pied de berge, une incision du lit, une augmentation du poids de la berge par infiltration d'eau, une surcharge en sommet de berge (croissance des arbres, constructions trop proches du sommet).

L'érosion du pied (ou affouillement) est très souvent le mécanisme initiateur d'un glissement ou d'un effondrement ; et glissement et effondrement sont des mouvements de masse, comparés à l'érosion qui est un mouvement grain par grain.

Si l'incision du lit est généralisée sur le cours d'eau, des glissements vont apparaître sur un grand linéaire. Une opération de restauration des berges peut éventuellement être envisagée, mais celle-ci ne pourra intervenir qu'après la stabilisation du fond du lit (seuils, épis, etc.).

### 3.1.4.3. Conclusion et mise en garde

Ce début de chapitre fait une synthèse des différents mécanismes mettant en lien la force de l'eau avec la stabilité des berges et du fond du lit. Ces éléments ont pour objet d'aider à une meilleure compréhension des contraintes en jeu et de la façon dont les berges peuvent se dégrader.

Il faut garder à l'esprit que les grandeurs et les équations fournies ci-dessus ont été établies avec des hypothèses précises telles que, par exemple, l'écoulement en régime permanent ou des matériaux non cohésifs. Or, dans les conditions naturelles, ces hypothèses ne sont pas respectées et les valeurs obtenues n'ont ainsi qu'une portée limitée.

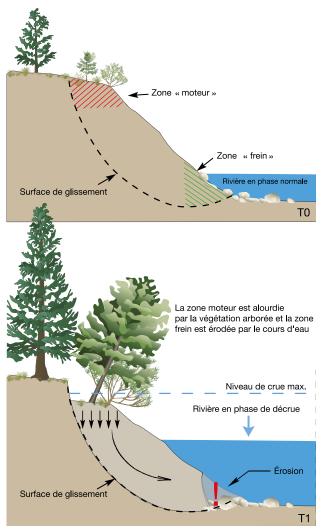


Fig. 5 - Mécanisme du glissement de berge lors d'une décrue.

# 3.2. Résistance mécanique des techniques de génie végétal sur les cours d'eau de montagne

## 3.2.1. Résistance des végétaux à l'écoulement

La conception des ouvrages de génie végétal est largement inspirée des modèles naturels, le principe étant de copier les structures végétales en place, qui résistent à l'érosion. La bonne intégration dans le paysage et les milieux naturels adjacents, et la résistance mécanique de l'ouvrage en découlent en partie. Ces modèles donnent aussi de précieuses indications sur les végétaux à utiliser. Ces derniers doivent être en mesure de résister aux différentes contraintes exercées par la rivière. Les plantes doivent avoir un système racinaire suffisamment développé pour se maintenir et protéger le sol contre l'érosion. Le port, le développement et la souplesse des tiges aériennes jouent également un rôle important dans la protection de la berge.

Les différentes espèces de saules présentent un caractère pionnier qui se traduit notamment par un besoin accru de lumière et une remarquable tolérance face à des substrats grossiers et peu fertiles... Elles supportent, temporairement, d'être en tout ou partie immergées et ont pour la majeure partie d'entre elles une forte capacité de reprise au bouturage et de régénération après perturbation exceptionnelle. Elles ont, par ailleurs, des systèmes racinaires très développés. L'ensemble de ces caractéristiques les destinent particulièrement aux ouvrages de génie végétal.

Fig. 6 - Plantes herbacées (Deschampsia cespitosa) plaquées au sol par le courant.

Depuis des temps anciens, les concepteurs ont ainsi retenu les saules sous forme de boutures, ramilles, plançons, branches pour construire ou participer à « l'armature » des ouvrages.

Il arrive malgré tout que les sollicitations de la rivière aient raison de la ténacité de ces espèces. Les saules ont ainsi fait l'objet d'études pour mieux appréhender leur comportement face aux forces hydrauliques. L'enjeu de ces recherches est d'améliorer la connaissance sur la résistance des ouvrages face aux contraintes mécaniques exercées par l'eau. L'objectif finalisé de ces travaux est de pouvoir construire des ouvrages plus résistants, ou avec une résistance suffisante, à travers une conception et une maintenance adaptées.

### 3.2.1.1. Élasticité et rigidité des végétaux

Les différentes strates de végétation présentes sur les berges réagissent différemment face aux crues :

- la strate herbacée, avec une taille faible par rapport au tirant d'eau en crue, est rapidement immergée;
- les arbustes ont une taille comparable au tirant d'eau en crue et ne sont pas obligatoirement immergés;
- la strate arborée, dépassant de l'eau, est rarement immergée.

Les espèces herbacées se plient rapidement au sol et offrent un écran de protection contre l'érosion, par effet de couverture (fig. 6).

Les arbres ont un comportement rigide. Ils résistent un temps au courant sans trop de dommage. Mais ils engendrent des turbulences locales susceptibles de déstabiliser le sol et les arbres eux-mêmes (fig. 7).

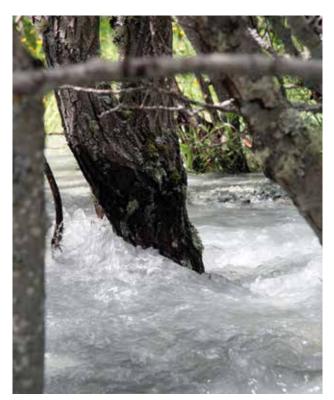


Fig. 7 - La ripisylve subissant une crue.

Les arbustes, quant à eux, adoptent un comportement différent selon le diamètre de leurs tiges et de l'espèce considérée. Oplatka (1998) a ainsi réalisé une série d'expériences dans un canal d'étalonnage pour tester le comportement des saules âgés d'environ cinq ans et provenant d'une berge de rivière. Il a ainsi observé qu'avec une augmentation de la vitesse, les saules se plient et leur système caulinaire s'étire et diminue en largeur (fig. 8). Il a estimé la surface exposée au courant et mis en évidence que cette surface diminue d'un facteur 4 à 5 lorsque la vitesse du courant passe de 0 à 1 m.s<sup>-1</sup>. Entre 3 et 4 m.s<sup>-1</sup>, la contraction continue mais avec un facteur plus faible. À partir de 5 m.s<sup>-1</sup>, la contraction atteint une valeur limite.

D'autres expériences ont été menées pour tester l'influence du diamètre des tiges sur la flexibilité des saules et de quelques autres essences rivulaires. (Weitzer-Bruckner 2000).

Les résultats (fig. 9) mettent en évidence un diamètre limite d'environ 5 cm à partir duquel la tige adopte, en rapport avec la sollicitation, un comportement rigide. En dessous de ce diamètre, les tiges possèdent une flexibilité suffisante pour se coucher au sol et limiter l'érosion.

Une autre expérience réalisée dans un canal expérimental sur la rivière Wien à Vienne (Autriche) (fig. 10), démontre que la densité et la flexibilité des boutures âgées de trois mois peuvent protéger efficacement les sables et graviers contre l'érosion (Grestgraser 1998).

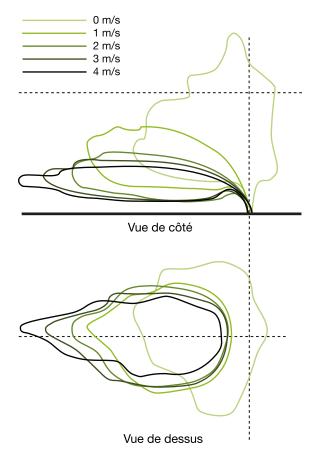


Fig. 8 - Schéma de courbure des saules en fonction de la vitesse du courant lors des expériences effectuées en canal par Oplatka (1998).

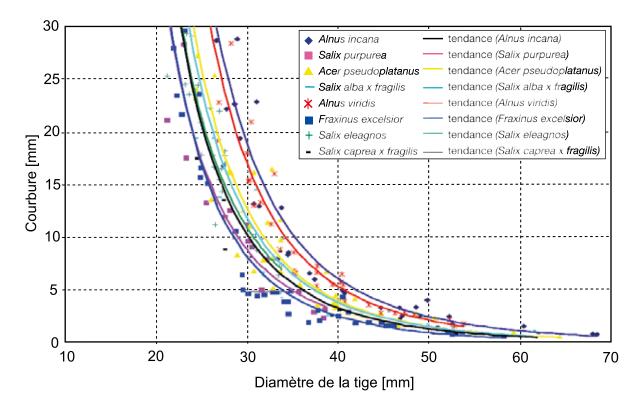


Fig. 9 - Comparaison de la courbure de différentes espèces d'arbres rivulaires sur des tiges d'un mètre soumises à une force latérale de 10 N (Weitzer et al. 1998, dans Gerstgraser 2000) – arbres âgés de 5 à 18 ans.

Comment résiste le végétal en cas de crue ? Risque-t-il d'être arraché et emporté par le courant ? Les expérimentations faites sur ce canal artificiel à Vienne ont ainsi apporté des réponses intéressantes quant à la résistance des saules immergés. Dans ce canal, construit dans le lit de la rivière, les chercheurs ont notamment implanté différents types d'ouvrages de génie végétal. En contrôlant le débit et en mesurant la vitesse de l'eau, ils ont développé des connaissances sur la résistance de ces ouvrages face



Fig. 10 - Canal de test de l'Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftbau.

Pour en savoir plus, se référer au site de l'Universität für Bodenkultur Wien (en allemand) :

http://www.baunat.boku.ac.at/8615.html?&L=1

Notons aussi qu'une fois couchés, les arbustes immergés offrent une résistance à l'écoulement grâce à l'effet de peigne engendré par leurs branchages (tiges et feuilles). Ils ralentissent l'écoulement à proximité de la berge, ce qui favorise les dépôts sédimentaires.



Fig. 11 - Piégeage des sédiments fins par les ramilles anti-affouillement, placées ici sous un ouvrage de protection de pied de berge, perpendiculairement au courant.

### 3.2.1.2. Résistance des végétaux à la force d'arrachement

Les premières années de vie d'un aménagement en génie végétal sont déterminantes pour sa longévité. Les végétaux ne sont alors pas totalement implantés et la résistance mécanique de l'ouvrage n'a pas atteint son optimum. C'est une des raisons pour laquelle des matériaux non vivants (géotextiles, pieux, blocs) sont le plus souvent associés dans les aménagements.

### ->

### Force du courant et arrachement des saules

La force de traînée peut être estimée à partir de la formule de Newton (Oplatka 1998) :

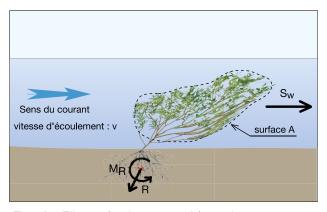
$$Sw = \frac{1}{2} \times \rho_w \times C_d \times A \times v^2$$

Où:

- $S_{w}$  = la force de traînée (N);
- $\rho_{w}$  = la masse volumique de l'eau (kg.m<sup>-3</sup>);
- $C_d$  = le coefficient de résistance (-) ;
- A = la surface d'application de la force sur le végétal (m²);
- $v = \text{la vitesse d'écoulement (m.s}^{-1}).$

Le coefficient de résistance Cd est considéré comme constant, égal à 0,6, à partir d'une vitesse d'écoulement de 0,55 m.s<sup>-1</sup> (Vollsinger *et al.* 2005, dans Stone *et al.* In press).

En réaction à cet effort, un couple résistant  $M_R$  et une force de résistance à l'arrachement R apparaissent au niveau du système racinaire (fig. 12).



**Fig. 12 -** Efforts mécaniques engendrés par le courant sur un arbuste immergé. Avec R, la force de résistance à l'arrachement, et  $M_R$ , le couple résistant.

La résistance des végétaux à l'arrachement a fait l'objet d'expérimentations menées par Vollsinger et al. (2000) sur différentes espèces de saules âgés de 2 à 5 ans. L'expérience met notamment en évidence une différence de résistance entre les différentes espèces végétales. Il est important de noter que cette résistance est, dans tous les cas, 5 à 10 fois supérieure à la force  $S_w$  exercée par le courant (fig. 13).

Ainsi, la force exercée par le courant sur le végétal ne peut pas, à elle seule, arracher un arbuste. Lorsque le végétal est emporté avec son système racinaire, c'est généralement suite aux actions combinées d'un affouillement localisé, du transport solide et du courant. Un ouvrage de génie végétal ne cède pas à cause de l'arrachement par la force du courant sur la partie aérienne des végétaux, mais par érosion interne du substrat en lien avec les parties racinaires des plantes.

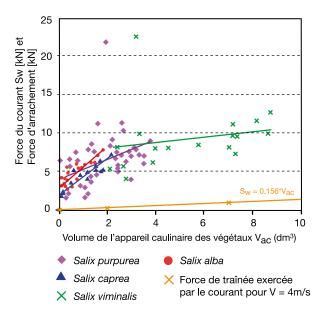


Fig. 13 - Résistance à l'arrachement de différentes espèces de saules par rapport à la force exercée par le courant sur les saules (d'après Vollsinger et al. 2000, dans Florineth 2007).

### Résistance au transport solide

On considère ici le transport solide comme le déplacement de particules (argiles, limons, sables, graviers, galets et blocs) dans les cours d'eau, pouvant s'effectuer soit par suspension, soit par déplacement sur le fond du lit du fait des forces tractrices liées au courant (on parle dans ce dernier cas de charriage). On exclut donc ici les torrents à lave.

Le transport solide (surtout le charriage) est certainement le phénomène le plus dangereux pour les végétaux. Il agit comme une bande abrasive occasionnant recouvrements, blessures ou encore cassures de parties aériennes.

Dans les cours d'eau de montagne où le transport solide est plus violent qu'en plaine, le charriage de gros blocs est suffisamment puissant pour casser ou écorcer des troncs d'arbres (fig. 14).



Fig. 14 - Charriage des sédiments et résistance des végétaux aux contraintes mécaniques.

# 3.2.2. Résistance mécanique des ouvrages de génie végétal sur les cours d'eau de montagne

Contrairement aux pratiques du génie civil, qui reposent sur l'emploi exclusif de matériaux inertes, le dimensionnement des ouvrages de génie végétal ne s'appuie pas sur des règles de calculs normées. L'emploi de matériel vivant en est une raison essentielle.

Les connaissances du comportement mécanique des ouvrages de génie végétal s'affinent, mais leurs variabilités ne permettent pas de tirer des conclusions définitives. Ainsi, le dimensionnement est essentiellement empirique et repose sur le savoir-faire des spécialistes.

Toutefois, lorsqu'une étude hydraulique du cours d'eau est disponible, la contrainte tractrice est retenue pour étayer la décision. Il s'agit d'un paramètre classique pour apprécier les interactions hydrauliques et structurelles. Des retours d'expériences ont aussi permis de faire le lien entre la contrainte tractrice et la résistance des ouvrages. Pour structurer ce savoir et fournir une aide à la conception, une synthèse des valeurs rencontrées dans la littérature spécialisée a été réalisée. Le tableau 1 (Frossard et Evette 2009) dresse un large panel des valeurs de résistance des différentes techniques.

Les valeurs de référence dans le tableau mettent en évidence les disparités entre les auteurs et révèlent la large gamme de valeurs de résistance pour certaines techniques. Toutefois, des tendances se dessinent. Les couches de branches à rejets présentent une résistance importante par rapport aux autres techniques et notamment par rapport aux fascines, aux boutures de saule et aux tressages (= clayonnages).

D'après le tableau 1, les ouvrages les plus résistants aux contraintes tractrices sont les couches de branches à rejets avec enrochements en pied de berge ( $\tau_{lim}=300-450~\rm N.m^{-2}$ ) et les caissons végétalisés ( $\tau_{lim}=600~\rm N.m^{-2}$ ). Ces valeurs ont une gamme de résistance équivalente ou supérieure à certains enrochements ( $\tau_{lim}=250~\rm N.m^{-2}$ , correspondant à des blocs en vrac de 30 cm de diamètre) ou aux enrochements végétalisés ( $\tau_{lim}=300-350~\rm N.m^{-2}$ ).

Par conséquent, les techniques de génie végétal ont une résistance importante aux contraintes de traction.

Par ailleurs, les ouvrages de génie végétal se fortifient avec le temps. Leur résistance est minimale suite à la construction, c'est à ce moment que l'ouvrage est le plus vulnérable aux crues. Les années suivantes, la végétation se développe (système racinaire et tiges aériennes) et apporte son rôle protecteur à la berge.

**Tab. 1** - Contraintes tractrices calculées pour des crues données pour diverses techniques de génie végétal.

Technique		Contrainte tractrice [N/m²]		
		À la réalisation	1 à 2 ans après	3 ou 4 ans après
Enherbement		4 <sup>(3)</sup> -20 <sup>(3)</sup>	25-30 <sup>(3)</sup>	30 <sup>(3)</sup> -100 <sup>(2)</sup>
Boutures		10 <sup>(3)</sup>	60 <sup>(3)</sup> -150 <sup>(1)</sup>	60 <sup>(3)</sup> -165 <sup>(1)</sup>
Boudin d'hélophytes		10 <sup>(3)</sup> -30 <sup>(2)</sup>	20-30 <sup>(3)</sup>	50 <sup>(3)</sup> -60 <sup>(1)</sup>
Clayonnages		10 <sup>(2,3)</sup>	10-15 <sup>(3)</sup>	10 <sup>(3)</sup> -120 <sup>(1)</sup>
Fascines		20 <sup>(3)</sup> -60 <sup>(2)</sup>	50 <sup>(3)</sup> -60 <sup>(3)</sup>	80 <sup>(2)</sup> -250 <sup>(4)</sup>
Saules			50-70 <sup>(4)</sup>	100-140 <sup>(4)</sup> 800 (20 ans) <sup>(4)</sup>
Plantation d'arbre		20 <sup>(2)</sup>		120 <sup>(2)</sup>
Lit de plants et plançons		20 <sup>(2,3)</sup>	120 <sup>(3)</sup>	140 <sup>(2,3)</sup>
Couche de branches à rejet		50 <sup>(2,3)</sup> -150 <sup>(3)</sup>	150 <sup>(3)</sup> -300 <sup>(3)</sup>	300 <sup>(2,3)</sup> -450 <sup>(3)</sup>
Caissons végétalisés		500 <sup>(3)</sup>	600 <sup>(3)</sup>	600 <sup>(3)</sup>
	Végétalisés	100 <sup>(3)</sup> -200 <sup>(2)</sup>	100 <sup>(3)</sup> -300 <sup>(3)</sup>	300 <sup>(2)</sup> -350 <sup>(3)</sup>
Enrochements	Nus	250 <sup>(2)</sup>	250 <sup>(2)</sup>	250 <sup>(2)</sup>

- 1 : Faber 2004 ; 2 : Schiechtl et Stern 1996 ; 3 : Venti et al. 2003 ;
- 4: Lachat 1994.





Remarque sur l'usage des données : les valeurs ont été calculées pour des crues subies par des ouvrages non détériorés. Le faible nombre d'échantillons ne permet pas d'envisager une approche statistique. Il s'agit donc d'évaluations ponctuelles et indicatives, ne fixant en aucun cas les limites d'emploi des techniques.

Par conséquent, il est possible d'installer des ouvrages exposés à des contraintes supérieures ou inférieures à celles qui figurent dans le tableau, sans toutefois avoir de garanties sur le résultat. La résistance d'un ouvrage peut en effet fluctuer en fonction de la nature du sol, de l'altitude et des conditions météorologiques, de la conception de l'ouvrage, des modalités de mise en œuvre de l'ouvrage et du matériel végétal, ou encore de la variabilité génétique des végétaux utilisés.

Gerstgraser (2000) a mis en évidence des différences d'approximation dans les modes de calcul selon les auteurs, qui conduisent à augmenter l'incertitude sur les valeurs relatives.

Le calcul de la contrainte tractrice ne prend pas en compte les différences de rugosité de la berge, ni l'effet de la végétation sur le champ de vitesse. Dans certains cas, une forte rugosité générée par un couvert arbustif dense peut ralentir le courant et donc réduire les forces d'arrachement sur une protection de berge, alors que le même type de protection avec une rugosité plus faible n'aurait pas tenu. Le calcul de la contrainte tractrice est le même dans les deux cas, mais la tenue de l'ouvrage va varier en fonction du type de couverture végétale. Enfin, le calcul de la force tractrice n'est théoriquement valable que pour des tronçons rectilignes. Or, si un ouvrage est construit en partie convexe ou concave, le calcul de la force tractrice est le même, mais l'ouvrage aura plus de chance d'être arraché en rive concave.

Les valeurs de contraintes tractrices recensées dans le tableau 1 sont utilisées pour étayer le choix des techniques. Elles ne doivent être utilisées qu'à titre indicatif.

## 3.2.3. Pente des berges et résistance des ouvrages

Coucher la berge (réduire sa pente) est une solution efficace pour lutter contre l'érosion et les glissements. De plus, le fait de coucher les berges conduit généralement à une diminution des coûts directs des ouvrages. Mais bien souvent, cette solution ne peut pas être envisagée, particulièrement en zone urbaine ou semi-urbaine, lorsque la pression foncière est forte, ou dans les vallées étroites de montagne où l'espace est plus restreint qu'en plaine. En fonction des enjeux à protéger et de l'espace disponible, une pente minimum sera retenue, conditionnant ainsi le choix de la technique de restauration.

### $\rightarrow$

### Conclusion

La volonté de dimensionner les ouvrages de génie végétal en fonction de leur résistance mécanique est relativement récente. Pour le génie civil, en revanche, de nombreux modèles mécaniques permettent de dimensionner finement les ouvrages en fonction des contraintes en jeu. De tels outils n'existent pas en ce qui concerne le génie végétal. En effet, il existe une homogénéité dans les matériaux de constructions traditionnels (béton, acier, etc.) qui fait défaut dans le monde vivant, ce dernier étant souvent plus complexe à modéliser sous forme d'équation.

À ce jour, c'est le savoir-faire et l'expérience du concepteur qui prévaut dans la justification et le dimensionnement des ouvrages de génie végétal, et les calculs ne sont là que pour étayer un choix « empirique ».

### 3.2.4. Vieillissement des ouvrages

### 3.2.4.1. Le retour d'expériences Géni'Alp

Dans le cadre du projet Géni'Alp, un retour d'expériences a été mené afin de collecter des informations sur les techniques de protection de berges employées sur des cours d'eau de montagne des Alpes et d'évaluer leur résistance. Il s'est également agi d'analyser les succès et échecs des différentes techniques.

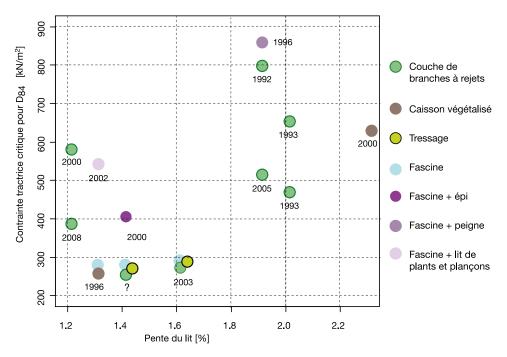


Fig. 15 - Différentes techniques de génie végétal utilisées dans les 18 ouvrages du retour d'expériences Géni'Alp, en fonction de la pente du cours d'eau et de la contrainte tractrice pour D<sub>84</sub> (l'année de réalisation est indiquée).

Les sites ont été sélectionnés principalement sur l'Arc alpin, mais aussi dans d'autres massifs, sur des cours d'eau dont la pente est supérieure à 1 %. Treize sites et dix-huit ouvrages en France et en Italie sont ici présentés. Ces ouvrages ont globalement bien « réussi ».

Chaque ouvrage a fait l'objet d'une analyse descriptive et historique, de relevés topographiques, et d'une analyse de la granulométrie du fond du lit.

Une synthèse est proposée sous forme graphique et reprend, pour chaque ouvrage, la pente du lit, la contrainte tractrice pour mettre en mouvement la granulométrie  $D_{84}$ , la technique employée et l'année de construction (fig. 15). La contrainte tractrice calculée pour  $D_{84}$  correspond à la contrainte pour laquelle 84 % des matériaux sont mis en mouvement, ce qui veut dire que le lit du cours d'eau est alors profondément remanié. Elle est calculée à partir de l'expression suivante :

$$\tau_{crit} = \theta_{crit} \times g \times (\rho_w - \rho) \times D_{84}$$

Où:

- $\theta_{crit}$  = le nombre de Shields critique ;
- g = la pesanteur ;
- $\rho_{w}$  = la masse volumique du transport solide ;
- $\rho$  = la masse volumique de l'eau ;
- $D_{84}$  = le diamètre des grains.

Ce retour d'expériences a mis en évidence que des techniques de génie végétal pur (sans enrochement de pied de berge) et des techniques mixtes (avec enrochement de pied de berge) tiennent depuis 15 à 20 ans sur les berges de cours d'eau ayant des pentes de plus de 2 % et charriant des blocs de grosse dimension. On peut ainsi noter la bonne tenue d'un ouvrage en pure technique végétale (fascine + peigne), réalisé en 1996 par le Saterce (service du Conseil Général de la Savoie) sur l'Isère, près de Bourg-Saint-Maurice (fig. 16).

Des couches de branches à rejets avec enrochement de pied de berge sur des rivières alpines avec des pentes de l'ordre de 2 % résistent depuis une vingtaine d'années en Italie (comme l'ouvrage de Riffiano décrit ci-après, ou celui d'Oulx, chap. II.4.1.5). Ce dernier a déjà résisté à de fortes crues. Ces techniques largement répandues en Italie, notamment sous l'impulsion de F. Florineth, sont toujours utilisées. Elles sont réalisées avec des tiges de gros diamètre qui font souvent de 5 à 10 cm et ne sont pas recouvertes de géotextiles.

On peut également noter un ouvrage intéressant, puisque constitué uniquement de génie végétal (épis en fascines et fascines de pied de berge), sur l'Adour, à Montgaillard (Hautes-Pyrénées - France - chap. II.4.2.2, plus spécifiquement dédié aux différentes techniques de génie végétal utilisables en rivière de montagne).

## 3.2.4.2. Le cas d'un ouvrage de couches de branches à rejets à Rifiano (Italie)

La Passer est une rivière du Sud Tyrol en Italie. Elle prend sa source à 3 479 m d'altitude à proximité de la frontière austro-italienne. Sur le tronçon étudié, le lit majeur est occupé par des terres agricoles, avec une production intensive de pommes à couteau. Suite à des crues importantes, le gestionnaire a décidé de protéger ces vergers avec des techniques de couches de branches à rejets, combinées avec un enrochement de pied de berge (fig. 17 à 23).

Cet ouvrage datant de 1992 a fait l'objet d'une étude menée par l'Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, visant à analyser le vieillissement des couches de branches (Stangl et Weinbacher 2006).

Les caractéristiques du cours d'eau au droit de l'ouvrage sont données dans le tableau 2.





Fig. 16 - Ouvrage de génie végétal à Bourg-Saint-Maurice : (a) en 1996 ; (b) en 2011. Si la fascine inférieure est immergée et n'a pas repris, des arbres se sont développés à partir de la fascine supérieure.





Fig. 17 - Vue générale de l'ouvrage de couches de branches à rejets avec enrochement en pied de berge, sur la rive droite de la rivière Passer à Rifiano : (a) situation à la fin des travaux en 1992 ; (b) état en 2011.

**Tab. 2 -** Caractéristiques de la rivière Passer au droit de l'ouvrage.

Pente du profil en long	1,9 %
D <sub>84</sub>	279 mm
Débit de la crue centennale	13 m <sup>3</sup> /s
Altitude	444 m
Longueur de l'aménagement	110 m environ

### Observations de terrain

L'état général de l'ouvrage est bon, même s'il est possible d'apercevoir localement une légère érosion en pied de berge derrière l'enrochement. L'ouvrage s'intègre parfaitement dans le paysage à tel point qu'il est difficile de le déceler autrement que par la présence des enrochements. Les saules ont largement colonisé l'espace. Cependant la renouée du Japon (Reynoutria japonica) et le robinier (Robinia pseudoacacia), deux espèces néophytes à comportement invasif, sont présents en sommet de berge.

### Mise en place de l'ouvrage

Comme le montre la figure 18, on peut observer la mise en place de couches de branches à rejets avant la pose de l'enrochement de pied de berge. À noter l'importance du diamètre et de la longueur des branches utilisées. Ces dernières sont de véritables petits arbres. Cependant, il est souvent d'usage d'utiliser du matériel de plus petit diamètre afin de limiter les possibilités d'affouillement entre les branches.

### Observations 15 ans après la mise en place

La figure 23 illustre la structure souterraine des couches de branches à rejets. La berge est protégée par une succession de troncs vivants le long de la berge. Chacun de ces troncs est ancré profondément grâce à un système racinaire dense.

L'intérêt de ces trois photos (fig. 20, 21 et 22) et de la figure 23 est de mettre en évidence l'importance de l'ancrage racinaire et de la protection apportée à la berge par les couches de branches, 15 ans après leur installation. La berge apparaît ainsi protégée par un dense treillis de saules vivants. Ces troncs de saules vivants et couchés sur le sol se succèdent, alignés parallèlement les uns aux autres et perpendiculairement au cours d'eau le long de la berge. Certains de ces troncs affleurant le sol de la berge peuvent atteindre 30 cm de diamètre au bout de 15 ans. Comme on peut le constater sur les photos, ils développent un système racinaire dense et profond qui va protéger le sol et la berge contre l'érosion. La berge est ainsi protégée par une sorte de carapace souple et vivante.

Ces structures végétales vivantes expliquent la forte résistance mécanique à l'érosion, telle qu'elle a été observée (tab. 1).



Fig. 18 - Mise en place de couches de branches à rejets.



Fig. 20 - Gros plan sur une branche à rejets, avec une mire pour repère, 15 ans après sa mise en place.

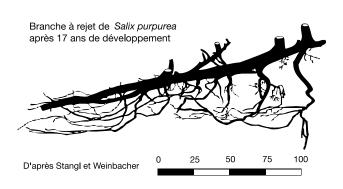


Fig. 22 - Coupe d'une branche à rejets une quinzaine d'années après sa mise en place.



Fig. 19 - Branches et leurs racines mises à nu artificiellement sur un ouvrage de type couches de branches, 15 ans après sa mise en place.



Fig. 21 - Extraction d'une branche des couches de branches à rejets, avec ses racines, 15 ans après sa mise en place.

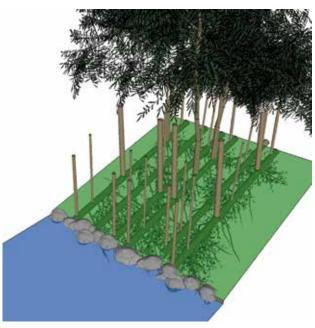


Fig. 23 - Schéma de principe sur le vieillissement de couches de branches à rejets avec enrochement en pied.

## 4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

Le présent chapitre n'a pas pour objet de décrire en détail les modalités de réalisation des techniques classiques, comme les fascines, lits de plants et plançons, etc., en donnant des profils types généraux. En effet, ces techniques et leur mise en œuvre sont déjà très bien décrites dans les guides francophones existants (Lachat 1994 ; Zeh 2007 ; Adam et al. 2008).

Nous présentons ici une série d'exemples portant sur des ouvrages de génie végétal réalisés sur des rivières à forte pente, ou offrant des perspectives en ce sens. Cinq des six chantiers pilotes réalisés dans le cadre du projet Géni'Alp sont aussi présentés. Nous insistons néanmoins sur certains détails techniques, soit parce qu'ils sont particulièrement importants ou peu abordés jusque-là, soit parce qu'ils présentent un intérêt particulier dans le contexte des rivières à forte pente et/ou d'altitude.

Sont ainsi présentées différentes techniques végétales (fascines, lits de plants et plançons, couches de branches à rejets) souvent associées avec des enrochements de pied de berge et parfois avec des épis (en fascines ou en enrochement).



Fig. 1 - Mise en place des plançons de saule sur un des chantiers pilotes de Géni'Alp.

Deux chantiers de génie végétal pur sont ensuite présentés, bien qu'ils ne concernent pas des cours d'eau de montagne. Toutefois, il s'agit de cours d'eau de pente supérieure à 1 % avec un transport solide important. Ces ouvrages sur lesquels on a une dizaine d'années de recul illustrent l'utilisation possible de techniques purement

végétales qui peuvent s'appliquer sur des rivières de montagne présentant des conditions de pente similaires.

Enfin, un paragraphe est consacré aux enrochements végétalisés, même si l'utilisation de ces techniques répond difficilement à la définition de génie végétal. En effet, il nous est apparu intéressant de développer un paragraphe sur ces techniques car, dans certains contextes, on n'a parfois pas d'autre alternative que d'utiliser de l'enrochement et, quitte à y recourir, il est préférable sur un plan environnemental de le végétaliser. Sans parler des enrochements existants qui constituent un héritage vieux parfois de plusieurs décennies, qu'il faut gérer et dont la végétalisation a posteriori, permet d'atténuer certains désagréments visuels et environnementaux. Le niveau d'information technique sur les ouvrages est variable et fonction des données disponibles (il existe par exemple moins d'informations sur les ouvrages anciens).

# 4.1. Techniques végétales et techniques mixtes en cours d'eau de montagne

Ces techniques sont présentées à travers six réalisations. Les trois premières et la dernière sont des chantiers pilotes réalisés dans le cadre du projet Géni'Alp sur des cours d'eau avec des pentes allant de 3 à 10 %.

- le Pamphiot à Anthy-sur-Léman (Haute-Savoie -France), associant fascines, caisson et lits de plants et plançons;
- l'Avançon d'Anzeindaz à Bex et Gryon (Vaud -Suisse), associant enrochements de pied de berge, épis et seuils, également en enrochements, avec lits de plants et plançons et couches de branches à rejets;
- la Petite Gryonne à Ollon (Vaud Suisse), associant fascines de pied de berge, lits de plants et plançons, caissons végétalisés et des seuils en bois et enrochements;
- le Rio di Bardonecchia à Oulx (Piémont Italie), associant couches de branches à rejets avec enrochement de pied de berge;
- l'Arve à Cluse (Haute-Savoie France), associant enrochement ou fascines de pied de berge, lits de plants et plançons et boutures;
- le Bens à Saint-Hugon (Isère France), associant enrochement de pied de berge avec caissons végétalisés et lits de plants et plançons.

### 4.1.1. Chantier d'Anthy-sur-Léman

Ce chantier a été réalisé dans le cadre du projet Géni'Alp et a vu la mise en œuvre de fascines et de lits de plants et plançons. Sur la partie amont de l'ouvrage, il n'y a pas de fascines et les lits de plants et plançons démarrent directement en pied de berge.

Ce chantier présente un intérêt particulier car les ouvrages de protection de berge mis en place sont en techniques purement végétales, alors que la pente du profil en long est importante. De plus, la technique retenue de lits de plants et plançons sans protection de pied de berge est originale.

### 4.1.1.1. Présentation générale de l'ouvrage

### Le site

Pays: France

Commune : Anthy-sur-Léman (Haute-Savoie)

Altitude: 410 m

Latitude-longitude: 46°21'40" N, 06°26'44" E

Maître d'ouvrage : SYMASOL Maître d'œuvre : BIOTEC Enjeu sécuritaire : bâtiment

Type de dégradation de berge : érosion + glissement de

terrain



Fig. 2 - Plan de situation du projet d'Anthy-sur-Léman.

### Le cours d'eau : le Pamphiot

Pente de profil en long : 3,4 %

Débit pris en compte pour le dimensionnement de l'ou-

vrage: 13 m<sup>3</sup>/s [crue centennale]

### Contexte et enjeux

Le Pamphiot subit de graves phénomènes d'érosion de berge et de glissements de terrain tout au long de la

partie aval de son cours jusqu'à son embouchure dans le lac Léman. Sur la commune d'Anthy-sur-Léman, une construction est menacée par un glissement de terrain. Ce type de glissement représente un faciès d'érosion présent sur de nombreux cours d'eau de montagne. Le traitement de ce glissement par des techniques de génie végétal pur sur un cours d'eau à forte pente présente un intérêt particulier en termes d'exemplarité et de reproductibilité. L'érosion de berge de ce cours d'eau (dont le profil en long a une pente de 3,4 %) a donc été traitée avec des techniques purement végétales.

### Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : fascines + boutures de saules, lits de plants et plançons, caisson en rondins végétalisé (mesure complémentaire intervenue pendant le chantier)

Orientation de l'ouvrage : est

Emplacement de l'ouvrage : rive gauche Longueur de l'aménagement : 40 m

Date de réalisation : 2011

Montant total de l'investissement 35 320 € HT (y compris la pose du caisson bois végétalisé)

### 4.1.1.2. Description technique de l'ouvrage

### Zone amont – Partie glissement de terrain

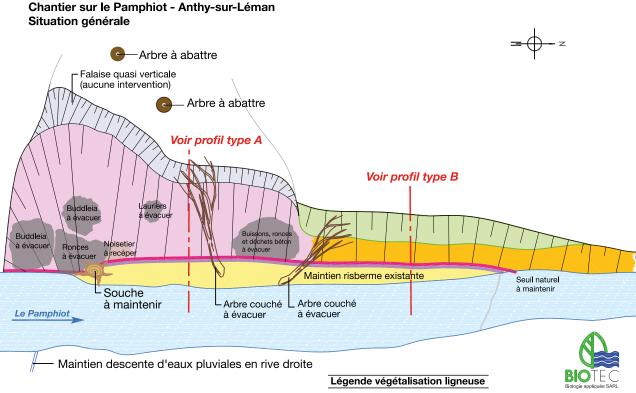
### Description de l'érosion

À quelques centaines de mètres de son embouchure au Léman, la berge rive gauche du Pamphiot présente, en léger extrados de courbure, un glissement de terrain en contrebas d'une construction. Sur une hauteur d'environ 5 m, le glissement présente un profil de pente environ égal à 1V/1H, au-dessus duquel se trouve une érosion en falaise verticale de 3 à 4 m de hauteur (fig. 3).

Le glissement, qui s'étend sur environ 20 m de longueur, s'opère sur une ancienne moraine de texture granulométrique variée, avec la présence d'un suintement à sa base, côté aval. Les matériaux constituant la base du glissement sont plus fins et de texture nettement argileuse.



Fig. 3 - État des lieux avant intervention.



### Remarques

Afin de limiter des effets de bras de levier néfastes sur les racines des végétaux, et de favoriser la lumière nécessaire à la croissance, quelques abattages complémentaires ont été réalisés, ainsi que l'évacuation des différents buissons, ronciers, buddleias et autres embâcles de bois morts présents sur le secteur des travaux. Les saules sont des espèces pionnières qui ont besoin de lumière. Le manque de lumière est un facteur important d'échec dans la réalisation d'ouvrages de génie végétal.

La coupe et l'élagage des arbres susceptibles de faire de l'ombre aux ouvrages en milieu de journée augmentent grandement leurs chances de réussite (abattage d'une dizaine de sujets de 20-25 m de haut) (BIOTEC 2011).

### **Techniques retenues**

Vu la pente du Pamphiot, qui lui donne un caractère torrentiel, il était nécessaire de faire appel à des techniques souples, qui supportent certaines déformations liées aux mouvements de terrain. Les techniques choisies doivent tolérer de légères déformations, qu'elles soient liées au glissement ou aux forces hydrauliques. La technique des lits de plançons constitue ainsi la base des éléments projetés. Cette technique est renforcée par la mise en place d'une fascine de saules à double rangée de pieux en pied de berge, sur la partie aval. Cette technique a pour objet d'augmenter la stabilité du pied de berge (fig. 5).

- Fascine de saules (liste des plantes n° l)
- Lit de plançons (liste des plantes n° 2)
- Lit de plants et plançons (liste des plantes n° 3)
- Boutures de saules (liste des plantes n° 4)
- Plantations d'arbustes (liste des plantes n° 5)

### Travaux préliminaires

- Installations de chantier
- Implantation des ouvrages, piquetage et marquage des travaux

### Travaux forestiers et de confortement

- Abattage de guelgues grands arbres pour apport de lumière et limitation des effets de bras de leviers (marquage lors des travaux)
- Enlèvement d'embâcles, souches et espèces non indigènes sur l'emprise des travaux • Débroussaillage de buissons et arbustes sur l'emprise des travaux
- Travaux de confortement (voir situation schématique)

### Travaux de suivi et garantie des végétaux

- Contrôle et surveillance des ouvrages
- Fauchage et arrosage nécessaire au bon développement des végétaux
- Élimination des essences exotiques indésirables en bordure de cours d'eau

Fig. 4 - Plan de masse des travaux sur le Pamphiot (source : BIOTEC).

Sur la partie amont de l'ouvrage, aucun ouvrage de pied de berge n'est proposé, c'est le premier lit de plançons qui vient protéger le pied.

Il a été décidé de ne traiter que la partie inférieure du glissement afin de stabiliser son évolution. L'intervention sur la partie supérieure à évolution lente présentait peu d'intérêt pour des coûts importants.

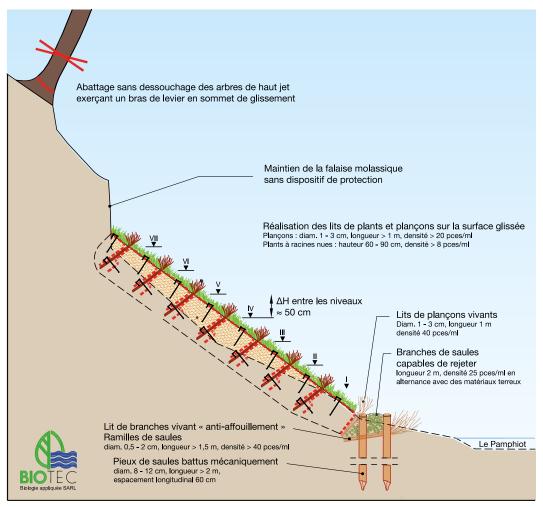


Fig. 5 - Coupe transversale sur le site amont, la fascine de pied de berge initialement envisagée n'a finalement pas été retenue (source : BIOTEC).



Fig. 6 - Le site après travaux : le premier lit de plançon en pied de berge et le caractère « fluide » des matériaux sont visibles.

### Zone aval – Partie érosion de berge

### Description de l'érosion

Toujours en rive gauche et à l'aval de la lentille de glissement, on trouve une érosion de la berge gauche sur une quarantaine de mètres (fig. 7). Cette érosion n'est pas dynamique et est vraisemblablement active uniquement lors d'épisodes pluvieux très importants. Le processus érosif est plus marqué sur les quinze premiers mètres à la suite du glissement alors que la partie aval, constituée de blocs/cailloux de plus gros diamètre, est plus stable. Sur cette partie, de nombreux embâcles occupent le lit (BIOTEC 2011).

### **Techniques retenues**

Toute la partie aval est protégée en pied de berge par une fascine de saule. La berge étant plus stable et la pente plus douce, la technique du lit de plants et plançons n'a pas été retenue ici. Au-dessus de la fascine et dans la moitié inférieure de la berge, des boutures de plusieurs espèces de saules ont été installées. Enfin, sur la moitié supérieure de la berge, moins humide, des essences forestières arbustives ont été mises en places (BIOTEC 2011).

### Aléas de chantier : la poche d'argile

Le chantier s'est déroulé à l'automne 2011. À la suite d'un épisode pluvieux, les suintements au-dessus de la couche d'argile se sont amplifiés. Le sol s'est donc mis à glisser au milieu de l'ouvrage (fig. 9). Le géotextile et le premier lit de plants et plançons ont glissé dans le cours d'eau de par la fluidité des argiles gorgées d'eau. Après plusieurs essais, il a été décidé de mettre en place un caisson végétalisé sous les lits de plants et plançons à l'endroit et à la hauteur de la poche d'argile. De cette manière, une structure bois solide et un géotextile permettent de contenir les matériaux fluants, dépourvus de consistance (fig. 11).





Fig. 7 - Partie aval du chantier : (a) avant travaux, la berge érodée retient les embâcles ; (b) pendant les travaux, mise en œuvre de la fascine vive et bouturage de la berge.



Fig. 8 - Détail de la fascine avec les branches anti-affouillement.



Fig. 9 - Mise en place d'un caisson végétalisé pour maintenir la poche d'argile.

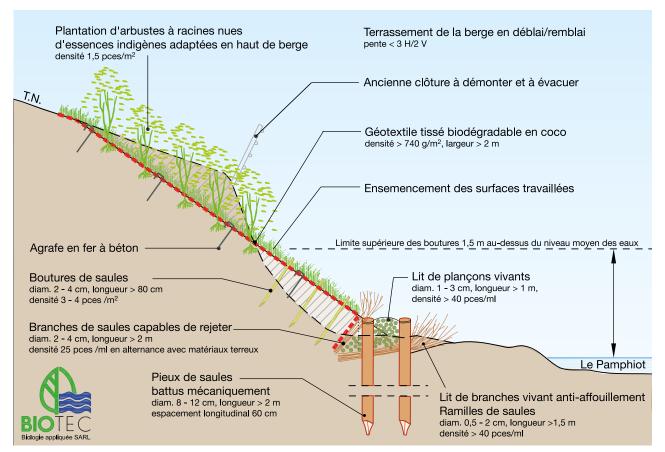


Fig. 10 - Coupe transversale de la zone aval (source : BIOTEC).



Fig. 11 - Chantier terminé au droit de la poche d'argile.

### 4.1.1.3. Végétation

→ Espèces proposées dans le cahier des charges (CCTP) pour les ouvrages (BIOTEC 2011)

Lits de plants et plançons

**Tab. 1 -** Liste des espèces utilisées sous forme de plants et plançons : **(a)** plançons de saules ; **(b)** plants.

(a) Espèces	
Salix elaeagnos	Saule drapé
Salix purpurea	Saule pourpre
Salix triandra	Saule à trois étamines
(b) Espèces	

(b) Espèces	
Cornus sanguinea	Cornouiller sanguin
Corylus avellana	Noisetier
Euonymus europaeus	Fusain d'Europe
Salix caprea	Saule marsault
Sambucus nigra	Sureau noir
Viburnum lantana	Viorne lantane
Viburnum opulus	Viorne aubier



Fig. 12 - Vue de l'ouvrage au printemps suivant l'implantation.

### Fascine de saule

**Tab. 2** - Liste des espèces utilisées dans la fascine de saule : **(a)** pieux vivants ; **(b)** branches anti-affouillement (ramilles de saules) ; **(c)** branches de la fascine.

(a) Espèces		
Salix alba	Saule blanc	
(b) Espèces		
Salix purpurea	Saule pourpre	
Salix triandra	Saule à trois étamines	
Salix elaeagnos	Saule drapé	
Salix myrsinifolia	Saule noircissant	

(c) Espèces	
Salix purpurea	Saule pourpre
Salix triandra	Saule à trois étamines
Salix elaeagnos	Saule drapé
Salix myrsinifolia	Saule noircissant

### Végétalisation de la partie supérieure des berges

**Tab. 3 -** Liste des espèces utilisées sur la partie supérieure de la berge : **(a)** boutures de saules ; **(b)** plants.

(a) Espèces	
Salix elaeagnos	Saule drapé
Salix purpurea	Saule pourpre
Salix myrsinifolia	Saule noircissant
Salix triandra	Saule à trois étamines

(b) Espèces		
Cornus sanguinea	Cornouiller sanguin	
Crataegus laevigata	Aubépine épineuse	
Crataegus monogyna	Aubépine à un style	
Euonymus europaeus	Fusain d'Europe	
Ligustrum vulgare	Troëne commun	
Lonicera xylosteum	Camerisier à balai	
Prunus spinosa	Prunellier	
Rosa canina	Églantier	
Sambucus nigra	Sureau noir	
Viburnum lantana	Viorne lantane	
Viburnum opulus	Viorne obier	

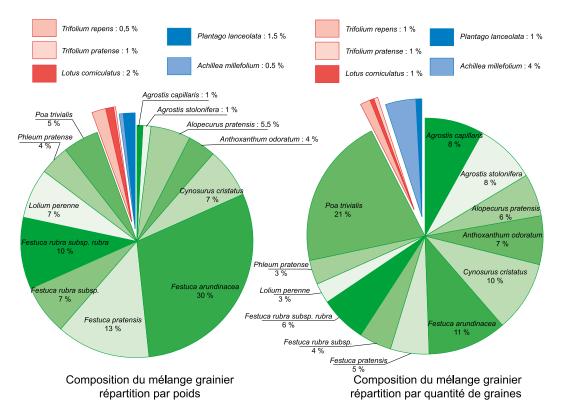


Fig. 13 - Mélange grainier prévu au CCTP sur les surfaces ensemencées (source : BIOTEC).

### 4.1.2. Chantier d'Ollon

Cet aménagement a été réalisé dans le cadre du projet Géni'Alp et met en œuvre une combinaison de techniques de génie biologique pur, de techniques mixtes et de génie forestier. La pente moyenne du profil en long du tronçon aménagé est de l'ordre de 10 %, et des techniques de protection de pied de berge avec du génie végétal sont appliquées sur un secteur à près de 8 % de pente.

### 4.1.2.1. Présentation générale de l'ouvrage

### Le site

Pays: Suisse

Commune : Ollon (Vaud) Altitude : 1 323 m

Latitude-longitude: 46°18'20" N, 07°03'33" E

Maître d'ouvrage : commune d'Ollon

Maître d'œuvre : hepia

Enjeux sécuritaires : encombrement de la voûte d'un pont

et stabilité d'un chemin

Type de dégradation de berge : dégradations de berges par phénomènes conjoints de glissement et érosion de ...

berges

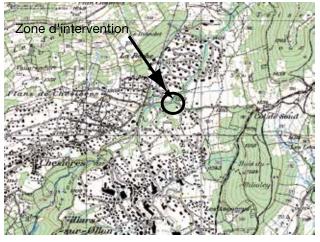


Fig. 14 - Plan de situation de l'ouvrage d'Ollon.

### Le cours d'eau : la Petite Gryonne

Pente du profil en long : 7 à 10 % Débit de crue centennale : 17 m<sup>3</sup>/s

### Contexte et enjeux

L'aménagement se situe immédiatement en amont d'un pont voûté qui passe sous le chemin de la Cousse (carrossable avec revêtement bitumineux), sur la partie haute de la station de Villars-sur-Ollon (fig. 15). En amont du pont, une herse a été mise en place, permettant d'arrêter les embâcles avant qu'ils n'aillent obstruer la voûte. Cependant, une instabilité généralisée de la berge gauche en amont engendre des apports excessifs de matériaux gravelo-terreux dans le lit, qui voit sa section se rétrécir par endroit. Lors des crues, ces matériaux gravelo-terreux sont mobilisés, ne sont pas arrêtés par la herse et sont susceptibles d'obstruer le pont. La morphologie de la berge gauche est constituée d'une succession de petits glissements et de niches d'érosion en alternance. En

berge droite, quelques niches d'érosion et des portions de berges sans végétation (consécutivement à des dépôts de matériaux) menacent la stabilité d'un chemin.

Sur le tronçon aménagé, le cours d'eau est relativement encaissé et les possibilités d'élargissement du lit sont faibles. L'encaissement est de plus en plus marqué d'amont vers l'aval, au fur et à mesure qu'on s'approche du pont, l'entrée de ce dernier étant précédée d'un enrochement existant, sur environ 5 m linéaires. La pente du profil en long est variable mais toujours au-dessus de 5 %, pour dépasser localement les 15 %.

### Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées :

Berge droite : caissons en rondins, végétalisés.

Berge gauche : fascine de saules à double rangée de pieux pour la protection du pied de berge, surmontée de 3 niveaux de lits de plants et plançons. Puis passage à un ouvrage mixte avec enrochement de pied de berge surmonté également de 4 niveaux de lits de plants et plançons.

Mise en place d'un seuil en rondins à l'aval immédiat du tronçon aménagé avec des caissons.

Orientation de l'ouvrage : berge droite : sud-est ; berge

gauche: nord-ouest.

Date de réalisation : mai 2012

Montant total de l'investissement : 83 000 CHF



Fig. 15 - Le site lors de l'état des lieux, noter le pont à l'aval.

### 4.1.2.2. Description technique de l'ouvrage

Fascine de saules à double rangée de pieux

Malgré une granulométrie grossière du fond du lit, typique des cours d'eau de montagne, le pied de la berge gauche est constitué de matériaux argileux, qui ont tendance à fluer. Cette texture de sol permet le battage mécanique de pieux, donc, a priori, l'installation d'une protection de berge en génie végétal pur. Le choix s'est porté sur une fascine de saules à double rangée de pieux qui doit fixer le pied de berge et le protéger à la fois de l'érosion, mais également des coulées de matériaux argileux provenant de la berge. L'implantation de cette fascine se fait légèrement en retrait du pied de berge initial, dont la limite était influencée par les coulées, ce qui permet un léger élargissement du lit mineur par rapport à la situation initiale avant travaux. Compte tenu que sur cette section de cours d'eau, le profil en long présente une pente de près de 8 %, la fascine doit être particulièrement résistante.

Une double rangée de pieux de robiniers d'une longueur de 2 m et battus mécaniquement est installée en pied de berge (fig. 16). Le noyau central, constitué des branches de saules capables de rejeter et de matériaux terreux, est particulièrement large (40-50 cm) et posé sur un lit de ramilles anti-affouillement, posées perpendiculairement au courant. Derrière la fascine, des branches de saules en densité élevée (25 pièces/m) sont dressées et appuyées sur cette dernière. Elles contribuent à renforcer la transition entre l'ouvrage de protection de pied de berge et la zone de lits de plants et plançons. Les zones de transition entre deux techniques représentent en effet toujours des points de faiblesse, qu'il faut particulièrement soigner.



Fig. 16 - Fascine à double rangée de pieux en cours de réalisation.

### Lits de plants et plançons

Au-dessus de la fascine, la berge est stabilisée avec 3 niveaux de lits de plants et plançons, renforcés avec un treillis de coco d'une densité de 740 g/m² (fig. 17). Cette technique très souple et d'une charge très limitée convient particulièrement pour des terrains instables qui seront vraisemblablement encore soumis à quelques mouvements et déformations. La grande densité de végétaux mise en œuvre avec cette technique, et les développements racinaires denses qui se développent rapidement en profondeur compte tenu de l'enfouissement partiel des branches de saules et des plants forestiers, doivent permettre un effet de drainage important, par phénomène d'évapotranspiration. Enfin, ces structures de végétation dense, placées perpendiculairement à la pente, forment des barrages contre les phénomènes de ruissellement et de ravinement.



Fig. 17 - Fascine pour la protection du pied de berge surmontée de lits de plants et plançons.

### Enrochement de pied de berge

Afin de se raccorder à l'enrochement existant qui précède le pont, et pour mieux s'adapter à l'encaissement progressif du cours d'eau vers l'aval, la fascine s'arrête après 20 m pour laisser la place à un enrochement de pied de berge dans un premier temps, puis d'un enrochement plus imposant, pour retrouver le niveau de l'ouvrage existant. Les enrochements sont également accompagnés en berges par 4 niveaux de lits de plants et plançons.

### Caissons en rondins, végétalisés

En rive droite, la présence d'un chemin en sommet de berge ainsi qu'une pente sévère du talus nécessitent un aménagement qui fasse office d'ouvrage de soutènement. Raison pour laquelle le choix s'est porté sur des caissons en rondins, dont la structure bois (rondins de mélèze) produit immédiatement cet effet de soutènement (fig. 18). Pour être protégé de tout phénomène d'affouillement, le caisson est ancré à une profondeur de 1 m sous le niveau du fond du lit. Sur ce premier mètre, le caisson est uniquement rempli avec des matériaux graveleux relativement grossiers. Au-dessus, il l'est cette fois avec des matériaux gravelo-terreux permettant la végétalisation des structures bois. À noter que pour éviter tout risque d'évidement du caisson en cas de crue, ces matériaux de remplissage sont contenus dans un géotextile. À l'arrière du caisson, une chemise drainante constituée de matériaux graveleux a été mise en place.



Fig. 18 - Caissons en rondins, végétalisés, pour soutenir le chemin en rive droite.

### Seuil en rondins

Compte tenu de la pente du profil en long et du fait que sur un certain linéaire les berges gauche et droite sont stabilisées, produisant ainsi un effet de chenalisation, cette stabilisation des berges crée ainsi un risque d'incision du lit. Pour écarter ce risque, un seuil de fond est mis en place à l'aval immédiat du tronçon aménagé par un caisson en rive droite et une fascine en rive gauche (fig. 18 et 21). Ce seuil permet de fixer le niveau du fond du lit. Sur un cours d'eau de largeur modeste, le choix d'un seuil en rondins est possible. Le fort ancrage latéral améliore la stabilité de l'ouvrage. Là aussi, le bois utilisé est du mélèze.

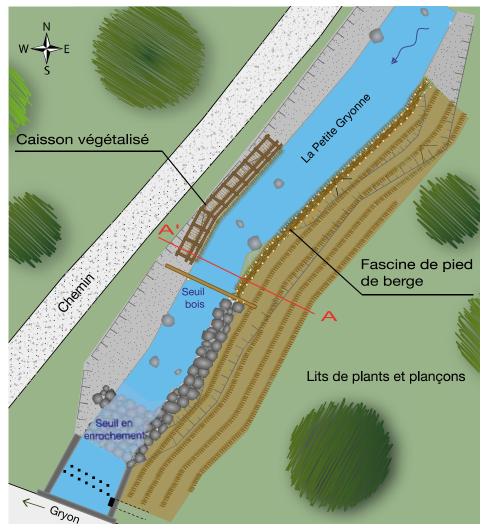


Fig. 19 - Vue d'ensemble du projet.

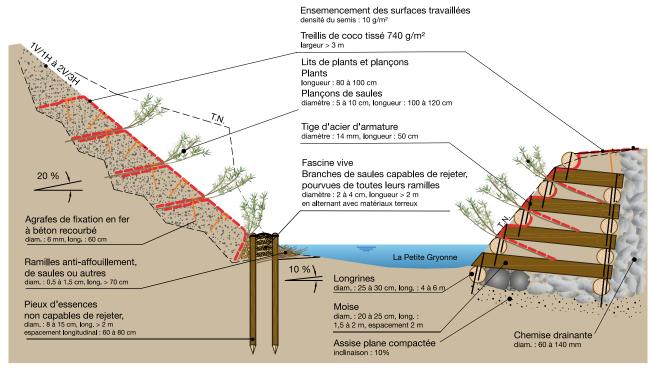


Fig. 20 - Coupe AA' montrant le caisson et la fascine surmontée de lits de plants et plançons.



Fig. 21 - Seuil en rondins pour stabiliser le profil en long. À droite, passage à un enrochement de pied de berge à l'aval du seuil.

### 4.1.2.3. Végétation

En ce qui concerne les saules, le choix s'est porté sur les espèces les plus structurantes des ripisylves des étages montagnard et subalpin inférieur. L'altitude du site ne justifie pas encore l'utilisation d'espèces typiquement alpines. La totalité des saules a été prélevée en milieu naturel aux environs de 1 500 m d'altitude, ce qui a permis de gérer l'avancement de la végétation, malgré la date relativement tardive des travaux. De plus, les branches de saules ont été prélevées 15 jours avant les travaux et entreposées au contact de l'eau, dans de grands conteneurs, ce qui a freiné quelque peu leur développement, en attendant leur mise en place.

La végétation des caissons et des lits de plants et plançons a été enrichie avec des espèces majoritairement buissonnantes et arbustives afin de ne pas trop charger les talus à terme. Le choix des essences s'est inspiré des formations forestières de montagne, notamment des sous-bois ou des clairières. Les espèces présentant une bonne aptitude à la formation de racines adventives ont été privilégiées, à l'exemple du sorbier des oiseleurs (Sorbus aucuparia) ou du sureau à grappes (Sambucus racemosa), puisqu'elles produisent ainsi un meilleur effet d'ancrage dans les ouvrages. Dans les niveaux supérieurs de la berge gauche, comme la pente n'est pas excessive et que l'on se trouve éloigné du lit mineur, quelques sujets d'espèces arborescentes, comme le frêne (Fraxinus excelsior) ou l'érable sycomore (Acer pseudoplatanus), ont également été intégrés.

Compte tenu de la date tardive pour des travaux de génie végétal, l'ensemble des plants initialement prévus en qualité racines nues (plants forestier) a été livré en mottes ou en pots.

### Fascine de pied de berge

**Tab. 4** - Liste des espèces utilisées comme branches de la fascine.

Espèces	
Salix daphnoides	Saule faux daphné
Salix elaeagnos	Saule drapé
Salix myrsinifolia	Saule noircissant
Salix purpurea	Saule pourpre

### Lits de plants et plançons

**Tab. 5** - Liste des espèces utilisées sous forme de plançons : **(a)** niveau inférieur ; **(b)** moyen inférieur ; **(c)** moyen supérieur ; **(d)** supérieur.

(a) Espèces		
Salix elaeagnos	Saule drapé	
Salix myrsinifolia	Saule noircissant	
Salix purpurea	Saule pourpre	
(b) Espèces		
Salix daphnoides	Saule faux daphné	
Salix elaeagnos	Saule drapé	
Salix myrsinifolia	Saule noircissant	
Salix purpurea	Saule pourpre	
(c) Espèces		
Salix daphnoides	Saule faux daphné	
Salix elaeagnos	Saule drapé	
Salix purpurea	Saule pourpre	
(d) Espèces		
Salix daphnoides	Saule faux daphné	
Salix elaeagnos	Saule drapé	
Salix purpurea	Saule pourpre	

**Tab. 6** - Liste des espèces utilisées sous forme de plants : **(a)** niveau moyen inférieur ; **(b)** niveau moyen supérieur ; **(c)** niveau supérieur.

(a) Espèces	
Alnus incana	Aulne blanc
Corylus avellana	Noisetier
Lonicera xylosteum	Chèvrefeuille des haies
Prunus padus	Merisier à grappes
Salix appendiculata	Saule appendiculé
Viburnum opulus	Viorne obier
(b) Espèces	
Alnus incana	Aulne blanc
Corylus avellana	Noisetier
Lonicera xylosteum	Chèvrefeuille des haies
Salix appendiculata	Saule appendiculé
Sambucus racemosa	Sureau à grappes
Sorbus aucuparia	Sorbier des oiseleurs
Viburnum opulus	Viorne obier
(c) Espèces	
Acer pseudoplatanus	Érable sycomore
Betula pendula	Bouleau
Corylus avellana	Noisetier
Fraxinus excelsior	Frêne
Lonicera alpigena	Camérisier des Alpes
Lonicera nigra	Camérisier noir
Salix appendiculata	Saule à grandes feuilles
Sambucus racemosa	Sureau à grappes
Sorbus aucuparia	Sorbier des oiseleurs
Viburnum lantana	Viorne lantane

### Caisson végétalisé

**Tab. 7** - Liste des espèces utilisées sous forme de plançons : **(a)** niveau inférieur ; **(b)** moyen ; **(c)** supérieur.

(a) Espèces		
Saule drapé		
Saule noircissant		
Saule pourpre		
Saule drapé		
Saule noircissant		
Saule pourpre		
Saule faux daphné		
Saule drapé		
Saule pourpre		

**Tab. 8** - Liste des espèces utilisées sous forme de plants : (a) niveau moyen ; (b) niveau supérieur.

(a) Espèces		
Corylus avellana	Noisetier	
Lonicera xylosteum	Chèvrefeuille des haies	
Prunus padus	Merisier à grappes	
Salix appendiculata	Saule appendiculé	
Viburnum opulus	Viorne obier	
(b) Espèces		
Sambucus racemosa	Sureau à grappes	
Sorbus aucuparia	Sorbier des oiseleurs	
Viburnum lantana	Viorne lantane	
Viburnum opulus	Viorne obier	

### Boutures de saules indigènes

Des boutures de saules ont été mises en place à la fin du chantier entre les blocs.

**Tab. 9** - Liste des espèces de saules utilisées dans les enrochements de pied de berge.

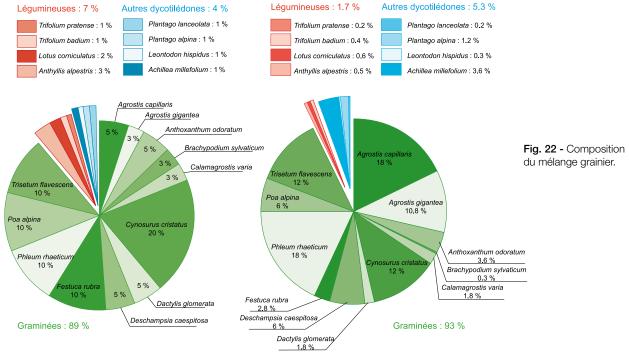
Espèces		
Salix elaeagnos	Saule drapé	
Salix myrsinifolia	Saule noircissant	
Salix purpurea	Saule pourpre	

### Mélange grainier

Après réglage des talus, les surfaces travaillées sont ensemencées avec un mélange grainier spécifique (qualité : écotypes CH). Le semis est réalisé à une densité de  $10~{\rm g/}~{\rm m}^2$ .

Le mélange vise un large spectre d'utilisation pour toutes les parties de berge du pied jusqu'au sommet, ainsi qu'en complément de tous les ouvrages en génie végétal, de même que pour la remise en état après chantier. La surface à ensemencer étant relativement modeste, cela ne justifie pas l'utilisation de mélanges plus spécifiques.

L'enjeu de protection a fait opter pour un mélange à dominance de graminées et de quelques fabacées (vitesse d'installation et densité de la couverture herbeuse). Toutefois, le mélange reste relativement diversifié et contient quelques espèces peu utilisées dans les interventions courantes.



Composition du mélange grainier répartition par quantité de graines

### 4.1.3. Chantier de pont de Cergnement

Ce chantier a été réalisé dans le cadre du projet Géni'Alp et a vu la mise en œuvre de techniques mixtes associant lits de plants et plançons avec couches de branches à rejets avec enrochement de pied de berge et épis, ainsi que deux seuils également en enrochement. La pente du cours d'eau est supérieure à 5 %. L'intérêt de ce chantier est donc de tester ces techniques sur un cours d'eau avec de très fortes contraintes mécaniques.

### 4.1.3.1. Présentation générale de l'ouvrage

### Le site

Pays: Suisse

Communes: Bex et Gryon (Vaud)

Altitude: 1 248 m

Latitude-longitude : 46°16'56" N, 07°06'55" E Maître d'ouvrage : communes de Bex et Gryon

Maître d'œuvre : hepia

Enjeu sécuritaire : stabilité d'un pont Type de dégradation : érosion + incision

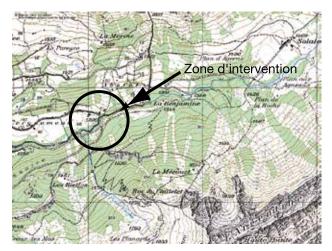


Fig. 23 - Plan de situation de l'ouvrage du pont de Cergnement.

### Le cours d'eau : l'Avançon d'Anzeindaz

Pente du profil en long : 5 à 10 %

Débit moyen de crue centennale : 57 m<sup>3</sup>/s

### Contexte et enjeux

La route communale qui franchit le pont de Cergnement est le seul accès possible aux véhicules pour atteindre le hameau de Solalex. Il s'agit d'un alpage important. En effet, le pastoralisme est encore très vivace dans ce secteur. Ce site est également très touristique, notamment pour la randonnée, l'escalade (Miroir d'Argentine) et le ski de randonnée. Deux restaurants très fréquentés en période estivale y figurent également.

Une érosion en extrados empiète sur un pâturage. Les abords immédiats du pont de Cergnement sont aussi soumis à une forte érosion (fig. 24 et 25). Une incision du lit menace les piles de l'ouvrage.

### Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées:

1<sup>er</sup> tronçon : lits de plants et plançons + épis + enrochement 2<sup>e</sup> tronçon : couches de branches à rejets + enrochement

Orientation de l'ouvrage : sud-est Emplacement de l'ouvrage : rive droite

Date de réalisation : 2011

Montant total de l'investissement : 110 000 CHF



Fig. 24 - Le site à l'aval du pont lors de l'état des lieux.



Fig. 25 - Partie aval du projet.

### 4.1.3.2. Description technique de l'ouvrage

Compte tenu des contraintes fortes et notamment de la pente du profil en long qui présente des valeurs extrêmes pour l'utilisation du génie végétal, l'utilisation de techniques mixtes s'est révélée incontournable. Non seulement par la mise en œuvre d'un enrochement de pied, mais également par l'utilisation d'ouvrages de protection indirecte, tels que les seuils et les épis.

Le chantier a débuté par la réalisation des seuils (enrochement bétonné pour le premier et libre pour le second) pour la stabilisation du profil en long et la lutte contre le phénomène d'incision sous le pont (fig. 26). Le seuil situé plus en aval contribue également à prévenir l'affouillement au pied des futurs aménagements de berge.

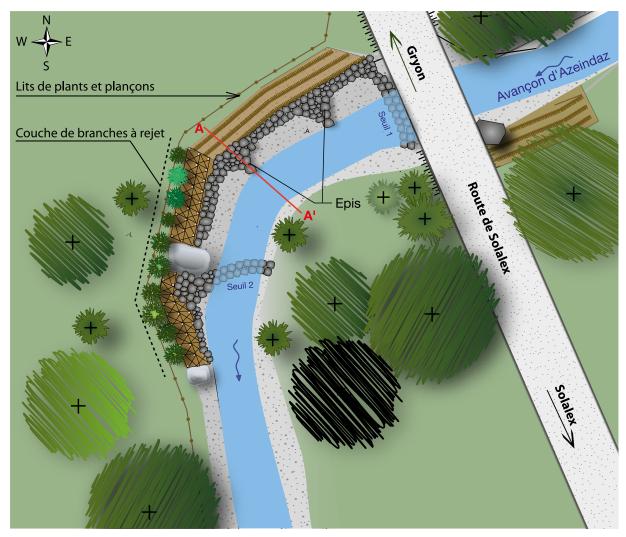


Fig. 26 - Vue d'ensemble du projet.

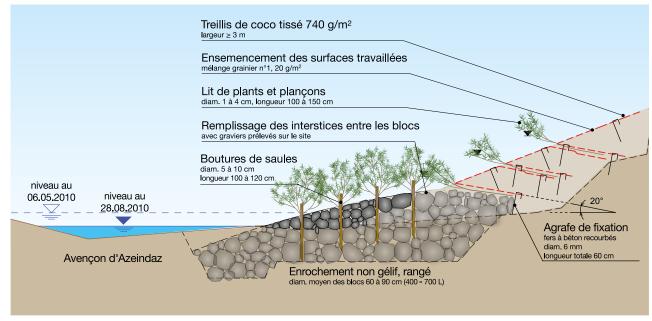


Fig. 27 - Coupe AA' montrant l'épi en enrochement surmonté d'un lit de plants et plançons.

### Seuil amont

La crête du seuil est légèrement incurvée pour concentrer le courant, notamment en période de basses eaux, mais également pour ne pas trop élever le niveau du lit en amont tout en protégeant les berges. Latéralement, le seuil remonte pour protéger les piles du pont. La pente du seuil côté aval ne doit pas être lisse, mais au contraire rugueuse et irrégulière pour permettre son franchissement par la faune piscicole (fig. 29).

### Seuil aval

La crête du seuil est au niveau du lit avant travaux, il s'agit de stabiliser le niveau entre les deux seuils. Les seuils sont constitués de blocs de 700 à 1 000 litres.

### Enrochements de pied

La base de l'enrochement est ancrée à une profondeur d'un mètre dans le lit. L'enrochement est séparé des matériaux constitutifs de la berge par un géotextile synthétique filtre. Ce détail d'aménagement prolonge la durée de vie d'un enrochement, car il prévient la dislocation des blocs provoquée par la migration des sédiments fins constituant la berge. En effet, en cas de crue, ces sédiments sont mis en suspension, subissent une forme d'aspiration et sont entraînés par le courant.

Les écoulements internes qui se produisent dans les sols sont de nature à entraîner les matériaux constitutifs de la berge (érosion interne). Cela concerne notamment les particules de sol situés derrière les enrochements. Les dispositifs de type filtre (géotextiles ou couches de transition) visent à bloquer ces phénomènes. La stabilité des sols vis-à-vis de ces mécanismes est liée au respect des règles de transition d'un sol à l'autre.

L'enrochement est solidement ancré en profondeur, seule une rangée de blocs reste visible au-dessus du niveau du lit mineur. Ainsi, la berge aménagée devrait présenter un faciès comparable à ce qui est observable sur les berges naturelles de ce cours d'eau de montagne.

### Épis en enrochements

Constitués de blocs de 400 à 700 litres, ils présentent une forme plongeante et émergent à peine de la surface du lit mineur. Leur fonction est avant tout de protéger le pied de berge de l'affouillement en cas de crue.

Il était prévu de mettre en place des pieux vivants (diam. 10-15 cm ; l. 200-250 cm) entre les blocs au fur et à mesure du montage des épis. Ces épis devaient être enfoncés dans le fond du lit pour atteindre l'eau et le substrat.

Toutefois, les contraintes de chantier n'ont pas permis d'installer les boutures en même temps que les enrochements, ces dernières ont donc été mises en place entre les blocs à la fin du chantier (fig. 27).

### Lits de plants et plançons

Les lits de plants et plançons, installés dans le premier tronçon plus ou moins rectiligne immédiatement à l'aval du pont, reposent sur un enrochement de pied. En effet, il s'agit certainement de la technique qui se marie le mieux avec l'enrochement. Ils présentent une inclinaison de 20° par rapport à l'horizontale. Les plants et les branches ne dépassent pas la berge de plus de 25 à 30 cm (fig. 28).

### Couches de branches à rejets

Les couches de branches à rejets sont implantées dans la courbe plus en aval, partie la plus sollicitée lors des crues puisque, à cet endroit, la berge est susceptible de connaître une attaque frontale du courant. Les blocs rocheux de taille importante sont conservés. Ils contribuent activement au maintien de la berge.



Fig. 28 - Lit de plants et plançons en cours de réalisation. Dans le lit, les deux épis en enrochement sont visibles.

La berge est reprofilée au-dessus des enrochements de pied pour obtenir une pente de 1V/3H. La densité des branches est de 30-40 par mètre linéaire, leur longueur est supérieure ou égale à 2 m et leur diamètre est compris entre 1 et 3 cm.

Les pieux ont une longueur supérieure à 1 m, un diamètre de 5 à 10 cm et sont battus mécaniquement. L'espacement longitudinal et latéral des pieux est compris entre 80 et 100 cm. Ils sont fixés à l'aide de fils de fer en tension, puis on procède à un battage final des pieux pour bien plaquer le dispositif au sol (fig. 30).



Fig. 29 - Seuil en enrochement bétonné à l'aval du pont.



**Fig. 30** - Détails sur l'enrochement de pied de berge et les couches de branches à rejets.

### 4.1.3.3. Végétation

En ce qui concerne les saules, le choix s'est porté sur les espèces les plus structurantes des ripisylves des étages montagnard et subalpin inférieur. L'altitude du site ne justifie pas encore l'utilisation d'espèces typiquement alpines. Une certaine tolérance aux substrats grossiers et filtrants est également recherchée, compte tenu que dans ce projet, l'ensemble des ouvrages de génie végétal repose sur une base en enrochement.

En ce qui concerne les autres ligneux, la priorité a été accordée aux espèces en station, présentant une bonne aptitude à la formation de racines adventives. Cette propriété est notamment importante pour les lits de plants et plançons, où le développement rapide d'un enracinement

dense et en profondeur est recherché. L'obtention d'un aménagement diversifié en espèces, multi-strates et bien intégré dans le milieu naturel a également orienté le choix des ligneux. Enfin, les espèces strictement arborescentes, présentant une hauteur importante à l'état adulte, ont été écartées pour des raisons de stabilité de la berge à long terme ainsi que d'entretien (pâturage adjacent).

### Lits de plants et plançons

**Tab. 10 -** Liste des espèces utilisées sous forme de plançons : **(a)** niveau inférieur ; **(b)** niveau moyen ; **(c)** niveau supérieur.

(a) Espèces		
Salix elaeagnos	Saule drapé	
Salix myrsinifolia	Saule noircissant	
Salix purpurea	Saule pourpre	
(b) Espèces		
Salix elaeagnos	Saule drapé	
Salix daphnoides	Saule faux daphné	
Salix myrsinifolia	Saule noircissant	
Salix purpurea	Saule pourpre	
(c) Espèces		
Salix elaeagnos	Saule drapé	
Salix myrsinifolia	Saule noircissant	
Salix purpurea	Saule pourpre	

**Tab. 11 -** Liste des espèces utilisées sous forme de plants : (a) niveau moyen ; (b) niveau supérieur.

(a) Espèces		
Alnus incana	Aulne blanc	
Alnus viridis	Aulne vert	
Prunus padus	Merisier à grappes	
Salix appendiculata	Saule appendiculé	
Viburnum opulus	Viorne obier	
(b) Espèces		
Alnus incana	Aulne blanc	
Laburnum alpinum	Aubours des Alpes	
Sambucus racemosa	Sureau à grappes	
Sorbus aucuparia	Sorbier des oiseleurs	

**Tab. 12** - Liste des espèces utilisées sous forme de couches de branches à rejets.

Espèces		
Salix daphnoides	Saule faux daphné	
Salix elaeagnos	Saule drapé	
Salix myrsinifolia	Saule noircissant	
Salix purpurea	Saule pourpre	

Tab. 13 Liste des espèces utilisées sous forme de pieux.

Espèces	
Salix daphnoides	Saule faux daphné
Salix elaeagnos	Saule drapé

#### Mélange grainier

Après régalage, les surfaces travaillées laissées nues sont ensemencées par un mélange grainier spécifique (qualité : écotypes CH). Le semis est réalisé à une densité de 15 g m².

Le mélange vise un large spectre d'utilisation, aussi bien pour le pied de berge (dans les interstices entre les blocs), les berges aménagées en génie végétal ou encore la remise en état du pâturage après travaux, en sommet de

répartition par poids

berge. En effet, la surface relativement modeste à ensemencer (environ 500 m²) ne justifie pas l'élaboration de plusieurs mélanges plus ciblés (fig. 32).

L'enjeu de protection a fait opter pour un mélange à dominance de graminées et de quelques fabacées (vitesse d'installation et densité de la couverture herbeuse). Toutefois, le mélange reste relativement diversifié et contient quelques espèces peu utilisées dans les interventions courantes.

répartition par quantité de graines

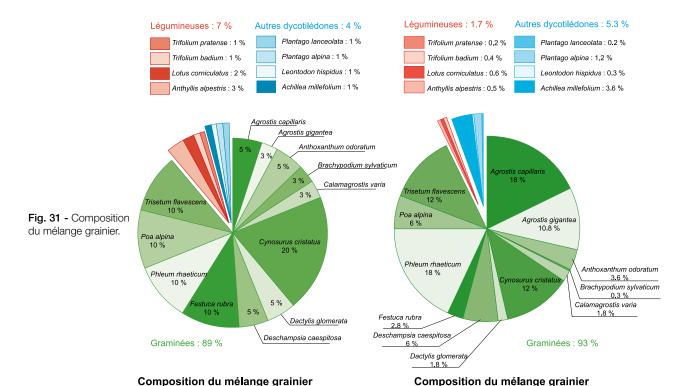


Fig. 32 - Vue générale de l'aménagement en fin de chantier.

#### Boutures entre les enrochements

**Tab. 14** - Liste des espèces utilisées sous forme de boutures dans les épis.

Espèces	
Salix elaeagnos	Saule drapé
Salix myrsinifolia	Saule noircissant
Salix purpurea	Saule pourpre

Plants en godets ou à racines nues pour le haut de berge

**Tab. 15 -** Liste des espèces utilisées sous forme de plants en godets ou à racines nues pour le haut de berge.

Espèces	
Alnus incana	Aulne blanc
Corylus avellana	Noisetier
Laburnum alpinum	Aubours des Alpes
Lonicera xylosteum	Chèvrefeuille des haies
Sambucus racemosa	Sureau à grappes
Sorbus aucuparia	Sorbier des oiseleurs
Viburnum lantana	Viorne lantane

#### 4.1.4. Chantier de Cluses

L'exemple décrit ici sur l'Arve, à Cluses, est représentatif d'une contrainte classique pour le génie végétal appliqué en cours d'eau de montagne (ou dans le fond des vallées internes des Alpes). Il s'agit de l'exposition aux crues printanières, inhérentes au régime hydrologique nival, autrement dit qui interviennent lorsque la fonte des neiges se produit dans les parties hautes du bassin versant. Ces crues printanières correspondent à la pleine période de démarrage de la végétation. Or, si les végétaux supportent relativement bien des immersions prolongées en cas de crues hivernales (fréquentes en régime pluvial), à savoir pendant le repos de la végétation, il n'en va pas de même en pleine période de végétation. Ces immersions printanières sont d'autant plus préjudiciables dans le cas de nouveaux aménagements, avec de jeunes plants, donc bas et moins résistants. Cette contrainte est souvent accentuée par des variations journalières importantes de débit, donc de hauteur d'eau, entre le jour et la nuit. Et il est bien clair que ces phénomènes sont accentués par l'endiguement, qui réduit le gabarit d'écoulement, donc amplifie les effets liés aux variations de débits. Sur l'Arve, ce type de crue peut être violent et surtout rapide, car le temps de réponse d'un événement météorologique survenant dans le bassin versant peut être très bref.

#### 4.1.4.1. Présentation générale de l'ouvrage

#### Le site

Pays: France

Commune: Cluses (Haute-Savoie)

Altitude: 473 m

Latitude-longitude: 46°04'10" N, 06°33'22" E

Maître d'ouvrage : SM3A (Syndicat mixte d'aménagement

de l'Arve et de ses abords) Maître d'œuvre : BIOTEC Enjeu sécuritaire : zone urbaine

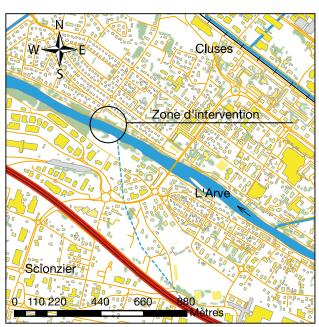


Fig. 33 - Plan de situation du chantier de Cluse.

#### Le cours d'eau : l'Arve

Pente de profil en long : 0,3 % Débit de crue centennale : 528  $\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$ 

#### Contexte et enjeux

En raison de l'endiguement et d'une exploitation exagérée des matériaux alluvionnaires pendant la deuxième moitié du 20e siècle, l'Arve a subi un phénomène important d'incision du lit. Ce phénomène a également induit une dégradation de l'état des berges qui, au fur et à mesure de l'approfondissement du lit, ont adopté un profil toujours plus incliné, donc toujours plus sensible à l'érosion. C'était le cas dans la traversée de Cluses, au niveau du parc public de la Sardagne où de vieux arbres penchés, pesant de tout leur poids, provoquaient des effets de bras de levier sur une berge très pentue et déjà dégradée. À cette situation précaire d'un point de vue mécanique s'ajoutait une qualité paysagère et écologique médiocre, notamment en raison de l'installation massive par endroits, de plantes exotiques envahissantes.

Les gestionnaires de l'Arve ont, depuis quelques années, entrepris de contrecarrer le phénomène d'incision et de rehausser le niveau du lit par la mise en place d'ouvrages transversaux, sous la forme de seuils imposants en blocs, répartis sur le profil en long. À cette première démarche devait logiquement succéder la restauration des berges. Dans le cas du parc de la Sardagne, l'intervention se justifiait d'autant plus que la berge se situe à l'aval immédiat d'un de ces ouvrages, donc dans une zone au courant parfois turbulent suite au ressaut hydraulique du seuil de Sardagne.

L'alternance des brusques montées d'eau et décrues provoque également un effet de ressuyage et de succion des matériaux constituant la berge, au demeurant très hétérogènes, donc présentant une faible cohésion. De ce fait, et compte tenu de l'état de dégradation de la berge, l'usage d'un chemin piétonnier, sis en sommet, et celui du parc public lui-même étaient remis en cause à moyen terme. Les objectifs de l'aménagement proposé étaient donc de préserver durablement les usages existants en rive, tout en participant à la mise en valeur du site sur les plans écologiques et paysagers.

#### Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : enrochement + lits de plants et plançons, fascines + boutures de saules et plants forestiers

Orientation de l'ouvrage : sud-ouest Emplacement de l'ouvrage : rive droite Longueur de l'aménagement : 280 m

Date de réalisation : 2005

Montant total de l'investissement : 427 600 € TTC

#### 4.1.4.2. Description technique des ouvrages

L'aménagement concerne la berge droite de l'Arve en aval du seuil de Sardagne sur un linéaire approchant les 300 m. Le degré de protection des berges est décroissant d'amont en aval, au regard de la diminution significative des contraintes hydrauliques, de la diminution de la pente des berges et de l'élargissement progressif du lit et du gabarit d'écoulement. Le projet se décline en trois profils types différents, d'amont en aval :

#### Aménagement type A (95 m)

Un enrochement de pied de berge, construit et rangé avec des blocs posés un à un, également muni d'un sabot parafouille, est monté jusqu'au niveau de la crue annuelle (cote 470.97 m NGF). Au-dessus de l'enrochement, trois niveaux de lits de plants et plançons sont mis en place, renforcés par la pose d'un treillis de coco. Les remous et turbulences liés au ressaut hydraulique induit par le seuil ne permettent pas de descendre plus bas que cette cote de la crue annuelle, avec les techniques végétales. Enfin, le sommet de berge est terminé par un talutage (2V/3H), la couverture des matériaux terreux avec un treillis de coco et des plantations de plants forestiers. Ces plants contribuent à diversifier le cortège d'espèces ligneuses, constituant un nouveau cordon boisé. L'ensemble de l'aménagement (enrochement, lits de plants et plançons et sommet de talus) est également ensemencé par projection hydraulique, avec un mélange grainier d'espèces indigènes adaptées.

#### Aménagement type B (135 m)

Le principe d'aménagement est identique au premier tronçon, à la différence près que l'éloignement progressif du seuil permet d'arrêter l'enrochement plus bas et de donner plus de place aux techniques végétales. Ainsi, sur ce tronçon, le sommet de l'enrochement est calé au niveau de la cote du débit moyen de l'Arve au cours des mois d'avril, mai et juin (470.08 NGF), à savoir pendant les crues printanières correspondant à la fonte des neige sur les hauteurs du bassin versant, notamment dans la vallée de Chamonix. Jusqu'à cinq niveaux de lits de plants et plançons succèdent à l'enrochement, puis la finition de la berge se fait à l'identique du premier tronçon (fig. 35).

#### Aménagement type C (50 m)

L'élargissement du gabarit d'écoulement de l'Arve permet ici de taluter la berge en pente douce (1V/5H) et d'approcher un profil d'équilibre facilitant la tenue mécanique des sols et leur stabilisation uniquement avec des végétaux. Ainsi, le pied de berge est aménagé d'une fascine de saules à double rangée de pieux. L'altimétrie de cet ouvrage de protection de pied de berge est calée en fonction de l'observation de la limite inférieure des ligneux existants, notamment en rive gauche (469,6 NGF). Compte tenu du fait que l'on se trouve sur un cours d'eau dynamique qui charrie beaucoup d'alluvions, la fascine est pourvue d'un lit de ramilles anti-affouillement placé sous les branches, perpendiculairement au courant. L'utilité de ce dispositif est de piéger les sédiments fins au pied de la fascine (par double effet de frein et de filtre). Ainsi, non seulement l'affouillement de l'ouvrage est évité, mais en plus, on favorise la sédimentation. À terme, se forme un bourrelet de sables et graviers fins qui protège la fascine.

Cet ouvrage de pied de berge est également muni de plançons dressés verticalement à l'arrière de la fascine. Ils permettent d'obtenir plus rapidement le développement de réseaux racinaires en profondeur et de renforcer la zone de transition entre deux techniques (ici entre la fascine et l'aménagement du talus de berge), qui constitue souvent un point de faiblesse. À l'arrière de la fascine et en complément de celle-ci, des boutures de saules sont plantées à densité élevée. Elles permettent d'obtenir un ourlet buissonnant et arbustif relativement large et dense, constitué de tiges souples. Cet ourlet est à même de freiner efficacement le courant en cas de crue, de favoriser ainsi la sédimentation et d'absorber les contraintes hydrauliques. De la mi-berge jusqu'au sommet, le talus est simplement couvert d'un treillis de coco et planté avec des plants forestiers d'espèces typiques des bords de l'Arve, qui contribuent au développement d'une ripisylve équilibrée, diversifiée et stable.



Fig. 34 - Mise en place des plants sur le premier lit de plants et plançons au début du printemps 2005.

#### 4.1.4.3. Végétation

Pas d'informations disponibles.

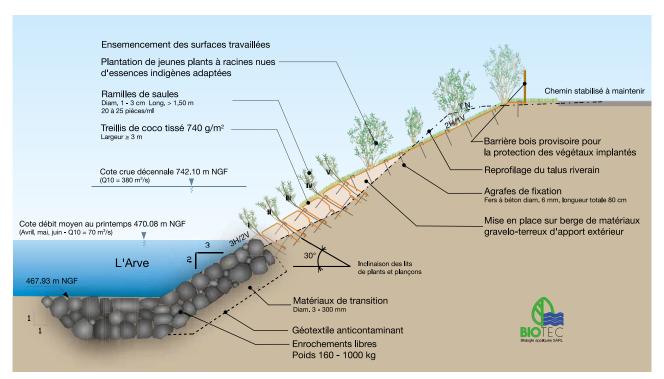


Fig. 35 - Coupe transversale sur l'ouvrage (aménagement de type B).



Fig. 36 - Le géotextile est déroulé sur le premier lit de plants et plançons.



 $\textbf{Fig. 38 -} \ L'ouvrage \ \grave{a} \ la \ fin \ des \ travaux \ (aménagement \ de \ type \ A).$ 



Fig. 37 - Fin de la mise en place des lits de plants et plançons (aménagement de type A).



Fig. 39 - L'ouvrage trois ans après la fin des travaux.

#### 4.1.5. Chantier d'Oulx

Les techniques mixtes associant les couches de branches à rejets avec enrochements de pied de berges ont fait leurs preuves sur certains cours d'eau des Alpes. Ce sont des techniques qui présentent une forte résistance et qui sont adaptées à des cours d'eau dynamiques. C'est le cas de l'ouvrage de Riffiano (chap. II.3.2.4.2) ou de celui d'Oulx (détaillé ci-après).

#### 4.1.5.1. Présentation générale de l'ouvrage

#### Le site

Pays : Italie (Val de Suse) Commune : Beaulard Altitude : 1 166 m

Latitude-longitude : 45°03'12" N, 06°44'31" E Maître d'ouvrage : Consorzio Forestale Alta Valle Suza Maître d'œuvre : Consorzio Forestale Alta Valle Suza Enjeux sécuritaires : champs et protection d'enjeux indi-

rects en rive droite et en rive gauche

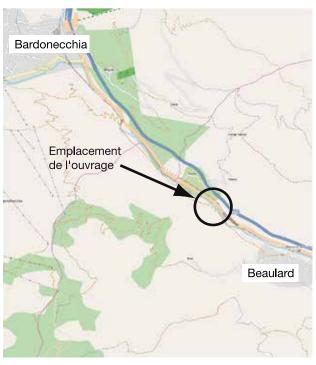


Fig. 40 - Plan de situation de l'ouvrage.

#### Le cours d'eau : le Rio di Bardonecchia

Pente du profil en long : 2 %

Débit : NC



Fig. 41 - Vue générale au niveau de l'aménagement.

#### Contexte et enjeux

Le site présentait une érosion hydraulique affectant un champ en rive droite. L'érosion était provoquée par la présence d'un mur en béton en rive gauche. Ce mur protège la route et provoque un rétrécissement de la section du cours d'eau.

La largeur du cours d'eau est particulièrement rétrécie sur ce tronçon à cause de la route et de la voie de chemin de fer en rive gauche; ces infrastructures sont protégées par un mur de soutènement en béton (fig. 41).

#### Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : couches de branches à rejets avec enrochement en pied de berge relié par des câbles et pieux métalliques. Plantations en haut de berge

Date de création : 1993

Emplacement de l'ouvrage : rive : linéaire Orientation de l'ouvrage : nord-ouest Longueur de l'aménagement : 60 m

#### 4.1.5.2. Description technique de l'ouvrage

Il s'agit d'un ouvrage mixte, reposant sur deux rangées d'enrochements de pied fixés par un câble métallique à un pieu métallique (2 m). Des boutures de saules ont été mises en place dans l'enrochement. L'ouvrage avait été conçu sans géotextile, comme c'est souvent le cas dans cette région de l'Italie pour les couches de branches à rejets.

Les enrochements ont été fixés sur les pieux métalliques côté rivière, mais aujourd'hui, sur les nouveaux ouvrages, les fixations métalliques sont placées côté berge pour assurer leur protection contre le transport solide et cacher leur aspect disgracieux.

Les blocs employés sont de gros diamètre (1 m environ).



Fig. 42 - L'observation de la fixation du câble montre que le bloc a tourné sur lui-même au cours d'une crue.



Fig. 43 - L'enrochement de pied de berge relié par un câble.

On est là aussi en présence d'un ouvrage mixte associant génie végétal et enrochement de pied de berge, et qui résiste après 20 ans d'existence et le passage de crues importantes comme en témoigne le bloc de taille importante qui a tourné sur lui-même (fig. 42).

#### 4.1.5.3. Végétation

Pas d'informations disponibles.

#### 4.1.6. Chantier du Bens à Saint-Hugon

Les caissons végétalisés offrent une bonne résistance mécanique, permettent d'avoir des pentes de berges élevées et supportent des charges importantes. Dans le cadre du projet Géni'Alp, un caisson a été mis en place pour protéger une berge sur un torrent de pente supérieure à 7 %, permettant ainsi de tester cette technique dans un torrent avec des contraintes mécaniques très élevées.

### 4.1.6.1. Présentation générale de l'ouvrage de Saint-Hugon (caisson)

#### Le site

Pays: France

Commune: La Chapelle-du-Bard (Isère)

Altitude: 1 248 m

Latitude-longitude: 45°23'11" N, 06°10'50"E

Maître d'œuvre : ONF Maître d'œuvre : ONF Appui technique : Irstea

Enjeux sécuritaires : route forestière, plate-forme de

stockage

Type de dégradation de berge : érosion

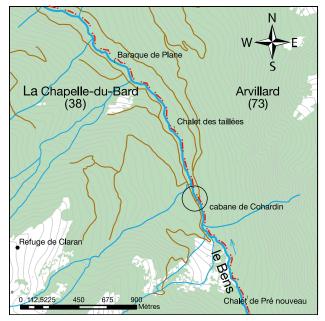


Fig. 44 - Plan de situation du projet sur le Bens.

#### Le cours d'eau : le Bens

Pente de profil en long : 7,2 %

Débit moyen de la crue décennale : 9 m<sup>3</sup>/s

#### Contexte et enjeux

Il s'agit de protéger une route forestière en sommet de berge devant supporter des surcharges importantes (grumiers). L'objectif était de tester les techniques de caisson végétalisé sous l'effet de contraintes hydromécaniques importantes.

Dans un contexte de berges très raides (pente supérieure à 2V/3H), l'exiguïté de la vallée ne permet pas de disposer d'un espace suffisant pour incliner l'ouvrage. La présence

d'arrivées d'eau permanentes (ruisseau et eaux de drainage de la piste) impose la mise en place d'un ouvrage adapté.

L'érosion se trouve dans une courbe juste dans l'axe d'un écoulement amont totalement rectiligne.



Fig. 45 - État initial avant travaux.

#### Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : caisson végétalisé et lits de plants

et plançons en partie supérieure Orientation de l'ouvrage : ouest

Emplacement de l'ouvrage : rive gauche Longueur de l'aménagement : 24 m

Date de création : 2011

Montant total de l'investissement : 34 113 €

#### 4.1.6.2. Description technique

#### Le caisson végétalisé à doubles parois

Il s'agit d'une structure bois constituée de plusieurs étages. Chaque étage est composé de deux rangées parallèles de rondins (longrines : rondins les plus longs et parallèles au sens d'écoulement des eaux) et de traverses ou moises (rondins plus courts et perpendiculaires au sens d'écoulement du cours d'eau).

Le positionnement de l'ouvrage répond à des exigences précises conditionnant sa longévité et sa résistance mécanique. Ainsi, le niveau de crue annuelle doit arriver à la hauteur du premier étage du caisson et la géométrie de l'ouvrage doit suivre le profil en long du cours d'eau : une forme en escalier a été retenue. La structure est suffisamment en recul dans la berge pour ne pas occasionner un rétrécissement de la section d'écoulement. Pour ce faire, un relevé topographique précis ainsi qu'une étude hydraulique ont été menés.

Le calcul hydraulique des lignes d'eau et des forces tractrices sur un torrent en « step pool » de pente supérieure à 7 % comme le Bens est à la limite des connaissances scientifiques actuelles.

Les modèles naturels, en amont, au droit et en aval des zones d'érosion, nous montrent une succession de seuils et de bassins. On trouve également en abondance des blocs de rocher en pied de berge. Ces blocs sont naturellement agencés pour former :

- des sortes d'épis rugueux ;
- des « escaliers » ;
- des assises et soutien de berge.

Il convient de prendre exemple sur ces modèles pour bâtir le projet.

La présence d'un enrochement latéral et en base de l'ouvrage protège la structure contre le phénomène d'affouillement. La profondeur d'ancrage (sous le lit) de l'enrochement a été calée sur la hauteur des seuils naturels présents dans le cours d'eau, ceci afin que l'ouvrage résiste même si un de ces seuils venait à se rompre en crue. Cette assise est constituée de blocs soigneusement agencés devant lesquelles sont disposés des épis en blocs plus volumineux.

Le remblai de la structure est composé de matériaux grossiers côté cours d'eau (1/4 de la largeur du caisson) afin de protéger le géotextile de l'abrasion en cas de crue et des rayons ultra-violets. Le 3/4 restant est remblayé à l'aide des matériaux issus du déblai pour permettre le développement des végétaux. Les boutures doivent traverser l'ensemble de la structure pour maximiser leur contact avec les matériaux terreux.

L'emploi de géotextiles de différentes natures se justifie par les diverses conditions d'utilisation. En pied, le géotextile doit être synthétique pour pallier l'absence de végétation. Le géotextile coco tissé à 940 g/m² est utilisé pour les étages supérieurs du caisson et celui à 740 g/m² est employé pour les lits de plants et plançons.

#### Remarques générales sur la végétalisation des caissons bois

La végétation, une fois bien installée, fournit un ombrage suffisant permettant de maintenir un taux d'humidité élevé au contact du bois, assurant ainsi une meilleure durabilité de la structure en bois. De plus, les végétaux produisent un effet de drain biologique par évapotranspiration, qui est bénéfique pour la stabilité de l'ouvrage à long terme, sans compter une meilleure intégration de l'aménagement dans le milieu naturel.

#### Mode opératoire

L'ouvrage, ici destiné à renforcer les berges des cours d'eau, a une structure semblable à certains des ouvrages à doubles parois utilisés pour réaliser des seuils et barrages (chap. II.5). Il fonctionne comme une structure poids, c'est-à-dire dont le poids propre de l'ouvrage assure sa stabilité. Il est rempli de matériaux inertes pris sur place et associés à du géotextile synthétique et biodégradable, afin de limiter les phénomènes de lessivage ou de vidange.

**Tab. 16** - Critères de pré-dimensionnement des caissons végétalisés de soutènement de berge.

Hauteur de l'ouvrage	1 m < H < 4 m
Profondeur d'ancrage mini- mum de l'ouvrage dans la berge	P < 2 m
Diamètre des longrines (fonction de la disponibilité des bois locaux)	Ø min < 15 cm
Diamètre des traverses (fonction de la disponibilité des bois locaux)	Ø min < 15 cm
Diamètre des tiges métalliques (type fer à béton HA) pour assemblage des rondins	Ø = 14 mm
Largeur de la base de l'ouvrage	b < H/2
Fruit (inverse de la pente) du parement de l'ouvrage	0,2

D'une manière générale, les ouvrages peuvent fonctionner seuls ou être végétalisés. Dans ce second cas, qui présente de multiples avantages pour l'ouvrage, la végétalisation peut s'opérer au fur et à mesure de la construction, en intégrant à chaque étage des plants en racines nues et des branches de saules, comme on le ferait pour des lits de plants et plançons. Si la construction se réalise hors des périodes favorables à la végétalisation, cette dernière peut se faire a posteriori, par bouturage entre les pièces de bois. Dans une telle configuration, la structure de l'ouvrage a pour objectif d'assurer un rôle de soutien immédiat, mais temporaire de la berge, le temps que la végétation soit suffisamment enracinée et puisse assurer seule cette fonction.

Les caissons végétalisés présentent une rugosité latérale plus forte que certains ouvrages en enrochement ou les murs en béton. Ceci contribue à limiter les désordres liés au report d'érosion vers l'aval, couramment observés avec des ouvrages de rugosité inférieure.



Fig. 46 - Construction du support du caisson en enrochement.

#### Préparation du terrain

Le caisson doit reposer sur une assise stable, régulière et nivelée. Cette assise doit également être consolidée, résistante et ne pas trop se déformer. Dans un lit présentant une granulométrie avec majoritairement des éléments grossiers (cailloux, galets), la préparation de cette assise peut se faire directement en terrassant le sol en place ou en mettant en place un enrochement.

Pour une meilleure stabilité de l'ouvrage, l'assise doit présenter une pente de 5 à 10 % orientée côté berge pour un fruit total du parement de l'ordre de 0,2.

#### Mise en œuvre et phasage

Sur l'assise de fondation ainsi réalisée, on procède au montage des longrines et traverses (aussi appelées moises). Ici, les longrines au contact de l'enrochement ont été clouées dans les blocs à l'aide de tiges métalliques afin d'assurer une meilleure résistance de l'ouvrage, étant donné les fortes contraintes mécaniques imposées par le torrent

À chaque étage de longrines, un géotextile est mis en place, dans lequel des matériaux terreux de remplissage doivent être tassés mécaniquement (godet de la pelle hydraulique ou rouleau). Un travail manuel complémentaire est nécessaire pour combler des vides sous les rondins.

Les traverses placées perpendiculairement sur les longrines sont fixées à l'aide de tiges d'acier d'armature dont le diamètre est de 14 mm au minimum.

Intercalés entre les longrines, des plançons de saules (ou des plants en racines nues d'autres espèces) sont couchés en rangs serrés. Les branches, de diamètre de 2 à 5 cm, peuvent avantageusement traverser toute l'épaisseur du caisson.

D'une manière générale, il est préférable de ne pas végétaliser la partie inférieure du caisson pour laquelle on pourra prévoir un parement en enrochement sec ou en géotextile synthétique. En effet, l'expérience montre que la végétation de la partie inférieure du caisson est souvent



Fig. 47 - L'ossature de l'ouvrage, avec les longrines parallèles au cours d'eau et les moises perpendiculaires.



Fig. 48 - Remplissage du caisson avec la terre végétale du site.

Fig. 49 - Mise en place des plançons et plants dans le caisson.

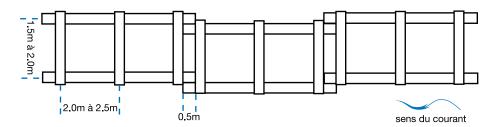


Fig. 50 - Assemblage de deux caissons.

dominée par celle des parties supérieures et dépérit avec le temps (cela dépend toutefois fortement de l'exposition du caisson et de son inclinaison). Le dépérissement des végétaux des parties inférieures du caisson risque alors d'entraîner une vidange de celui-ci.

Lorsque des arrivées d'eau en amont de l'ouvrage sont détectées, un dispositif de drainage est à prévoir. Il peut être réalisé alors par une chemise drainante constituée de galets, de graviers ou de tout-venant grossier. Les plantes jouent cependant un rôle non négligeable de drainage grâce à leur système racinaire.

Si l'aménagement est réalisé sur un tronçon de grande longueur comprenant plusieurs éléments, on peut réaliser la continuité de l'ouvrage avec une reprise entre chaque élément sur un minimum de 50 cm.

En sommet d'ouvrage, un géotextile biodégradable (type toile de coco ou de jute) peut être installé afin de protéger les semences et/ou les boutures du ruissellement. Ce géotextile doit être fixé à l'aide d'agrafes plantées dans le remblai.

Il convient de noter que la technique des caissons végétalisés doubles parois permet d'une part une stabilisation et une protection immédiates des berges (avant même une reprise efficace de la végétation). Elle permet d'autre part de traiter des berges quasiment verticales et de reprendre des surcharges importantes (poids lourds, etc.).

Il s'agit d'une structure souple supportant des petites déformations (notamment les tassements différentiels).

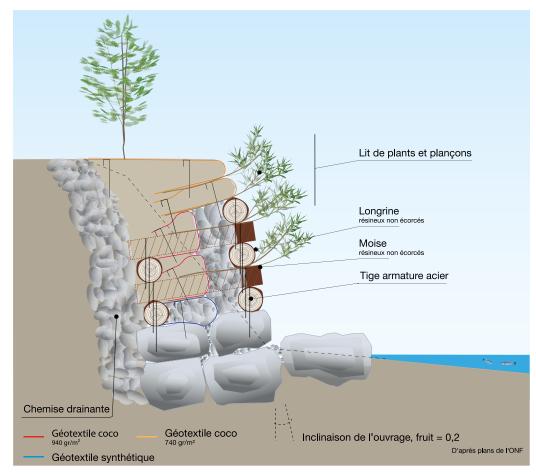


Fig. 51 - Coupe transversale de principe du caisson doubles parois végétalisé.



Fig. 52 - L'ouvrage à la clôture du chantier.

#### 4.1.6.3. Les critères de choix des végétaux

L'analyse botanique du site est essentielle afin d'implanter les végétaux adaptés au milieu particulièrement exigeant (altitude, vallée encaissée).

Aux abords de la berge, les strates herbacées, arbustives et arborées ont été étudiées.

Le choix des ligneux s'est porté sur les espèces les plus structurantes des ripisylves de ce secteur, à savoir le saule appendiculé (Salix appendiculata) et l'aulne vert (Alnus viridis). On trouve néanmoins à proximité quelques pieds de saule à trois étamines (Salix triandra). En ce qui concerne les boutures et les plançons, le saule appendiculé ayant un faible taux de reprise, il a été décidé de faire appel à d'autres espèces de saules pour garantir un bon taux de reprise. Ont ainsi été rajoutés le saule pourpre (S. purpurea) et le saule drapé (S. elaeagnos) en pied de berge et dans le caisson sur matériaux grossiers et filtrants. Dans les lits de plants et plançons les saules noircissant (S. myrsinifolia) et à trois étamines (S. triandra) ont été préférés.

Conformément au modèle naturel du torrent dont les berges sont couvertes de blocs et entrelacées de saules, des boutures sont insérées dans l'enrochement de pied de berge.

La partie inférieure du caisson n'est pas végétalisée. Les boutures auraient peu de chance de survivre à long terme en raison de la concurrence exercée par la végétation installée sur la partie supérieure.

En ce qui concerne les autres ligneux, la priorité a été accordée aux espèces présentes dans le secteur, disponibles en pépinière et présentant une bonne aptitude à la stabilisation des sols.

Il a été décidé de ne pas mettre en place de couverture herbacée pour garantir le caractère autochtone de cette dernière. Ce choix est rendu possible par les conditions suivantes:

- l'absence d'espèces exotiques envahissantes à proximité, susceptibles d'envahir le site;
- la présence d'un géotextile et d'une forte densité de ligneux permettant dès le départ une bonne résistance à l'érosion;
- l'utilisation de la terre végétale locale, préalablement stockée, contenant semences locales et rhizomes, et permettant une rapide recolonisation naturelle, notamment par les épilobes et pétasites (fig. 53).



Fig. 53 - L'ouvrage après une saison de végétation.

Enrochements de pied de berge et bas du caisson végétalisé

**Tab. 17 -** Liste des espèces utilisées sous forme de boutures.

Espèces	
Salix appendiculata	Saule appendiculé
Salix elaeagnos	Saule drapé
Salix purpurea	Saule pourpre

Lits de plants et plançons (dans le caisson et au-dessus)

**Tab. 18 -** Liste des espèces utilisées sous forme de plançons.

Espèces	
Salix appendiculata	Saule appendiculé
Salix myrsinifolia	Saule noircissant
Salix triandra	Saule à trois étamines

**Tab. 19** - Liste des espèces utilisées sous forme de plants.

Espèces	
Alnus viridis	Aulne vert
Salix myrsinifolia	Saule noircissant
Sambucus nigra	Sureau à grappes

#### Plantations en haut de berge

**Tab. 20 -** Liste des espèces utilisées sous forme de plants en haut de berge.

Espèces	
Acer pseudoplatanus	Érable sycomore
Prunus padus	Cerisier à grappes
Sorbus aucuparia	Sorbier des oiseleurs

# 4.2. Techniques purement végétales sur des cours d'eau de pente supérieure à 1 %, mais hors contexte montagnard

Les deux ouvrages présentés ici sont vieux d'une dizaine d'années. Ils ne concernent pas des cours d'eau de montagne à proprement parler, même si leur pente est supérieure à 1 % et leur transport solide important. Ils illustrent toutefois l'utilisation de techniques purement végétales qui peuvent s'appliquer sur des rivières de montagne présentant des conditions de pente et de transport solide similaires.

Il s'agit de l'Ardèche, à Pont-de-Labeaume, avec un ouvrage constitué de couches de branches à rejets sans protection de pied de berge ; et de l'Adour, à Montgaillard, avec un ouvrage associant épis en fascines, fascines de pied de berge et couches de branches à rejets.

#### 4.2.1. Chantier de Pont-de-Labeaume

Cet ouvrage a été réalisé en 1999 et est constitué de couches de branches à rejets sans ouvrage de protection de pied de berge.

Ce chantier présente un intérêt particulier, car l'ouvrage de protection de berge mis en place est en technique purement végétale, alors que la pente du profil en long (1,2 %) et le transport solide sont importants. De plus, la technique retenue, couches de branches à rejets sans protection de pied de berge, est originale.

#### 4.2.1.1. Présentation générale de l'ouvrage

#### Le site

Pays : France

Commune: Pont-de-Labeaume (Ardèche)

Altitude: 300 m

Latitude-longitude: 44°39'58" N, 4°17'23" E

Maître d'ouvrage : NC

Maître d'oeuvre : Centre de formation professionnelle for-

estière (CFPF)

Enjeu sécuritaire : terrain communal de loisirs Type de dégradation de berge : érosion générale

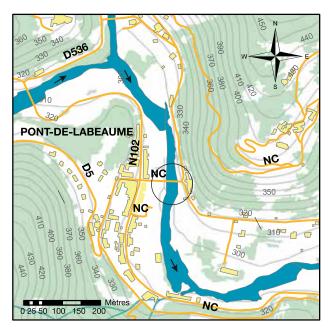


Fig. 54 - Plan de situation de l'ouvrage de Pont-de-Labeaume.

Le cours d'eau : l'Ardèche

Pente de profil en long : 1.2 % Débit moyen annuel : 17 m³/s

#### Contexte et enjeux

Cette zone avait été préalablement protégée par des enrochements qui n'avaient pas tenu. L'idée a été d'éviter tout point dur face aux contraintes d'arrachement très importantes développées par le cours d'eau. Le choix s'est ainsi porté sur la mise en place de couches de branches à rejets. Celles-ci ont été conçues sans protection de pied de berge afin de ne pas créer de point dur.

Cet ouvrage est situé dans un intrados de méandre, il n'est donc pas dans la situation la plus exposée. Il est néanmoins situé sur l'Ardèche, rivière de taille respectable, connaissant des crues importantes, un transport solide marqué et une pente supérieure à 1 %.

#### Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : couches de branches à rejets

Orientation de l'ouvrage : ouest

Emplacement de l'ouvrage : rive gauche Longueur de l'aménagement : 62 m

Date de création : 1999

Montant total de l'investissement : NC



Fig. 55 - L'ouvrage en mars 1999 après réalisation.



Fig. 56 - L'ouvrage en mai 2011. La végétation s'est généreusement implantée.

#### 4.2.1.2. Description technique de l'ouvrage

Cet ouvrage a été mis en place en 1999 (fig. 55). Il a résisté à plusieurs crues dont une forte (supérieure à la vicennale avec un débit instantané de 485 m³/s) en 2003.

Le profil de l'ouvrage est donné sur la figure 57. L'ouvrage comprend deux étages de couches de branches à rejets. Les couches de branches à rejets présentent une pente de 1V/3H. Elles sont constituées d'une densité de branches de 20 pièces au mètre linéaire, disposées perpendiculairement à la rivière. La partie inférieure des branches (plus gros diamètre) est enfoncée sous le niveau du lit pour être constamment en contact avec l'eau et pour éviter le déchaussement lors des crues. Le lit de branches est recouvert d'une couche de terre d'environ 5 cm d'épaisseur. Le tout est recouvert d'un géotextile coco de 740 g/m² (CFPF 1999).

Les pieux qui viennent fixer l'ensemble des couches de branches sont espacés de 80 cm dans les sens horizontaux et verticaux. La rangée inférieure des pieux est placée 20 cm au-dessus de la partie inférieure des branches.

Des fils de fer galvanisés sont tendus entre les pieux et fixés sur ceux-ci par des crampillons. Afin d'optimiser la reprise et le maintien des branches de saules, un second battage a été effectué une fois les pieux ligaturés (CFPF 1999).

Il est ainsi important de noter qu'une technique de génie végétal pure, sans protection de pied de berge, a pu résister aux crues tumultueuses de l'Ardèche pendant plus de dix ans (fig. 56).

#### 4.2.1.3. Végétation

Pas d'informations disponibles.

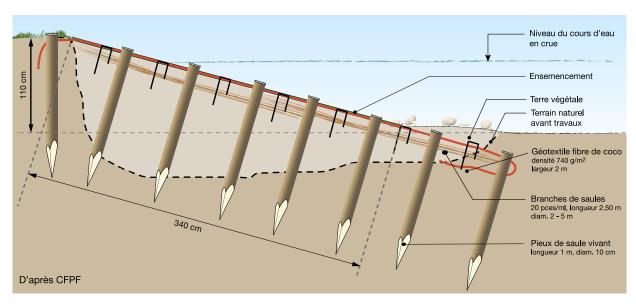


Fig. 57 - Coupe transversale sur les couches de branches à rejets.

#### 4.2.2. Chantier de Montgaillard

Le chantier de Montgaillard date de 1999. Il est construit sur un cours d'eau dynamique et la technique des épis en fascines est intéressante, car relativement peu utilisée.

#### 4.2.2.1. Présentation générale de l'ouvrage

#### Le site

Pays: France

Commune: Montgaillard (Hautes-Pyrénées)

Altitude: 445 m

Latitude-longitude: 43°07'11" N, 0°06'54" E

Maître d'ouvrage : Communauté de communes de la

Haute Bigorre

Maître d'œuvre : CFPF Enjeu sécuritaire : chemin

Type de dégradation de berge : érosion générale

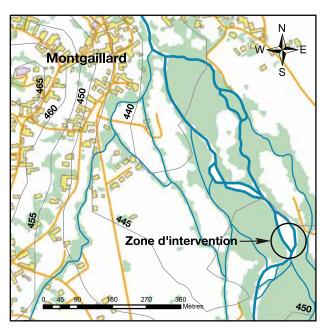


Fig. 58 - Plan de situation de l'ouvrage de Montgaillard.

#### Le cours d'eau : l'Adour

Pente de profil en long : > 1,4 %

Crue la plus importante depuis la construction de l'ou-

vrage:  $2003 (Q_{crue} = 30 \text{ m}^3.\text{s}^{-1})$ 

#### Contexte et enjeux

Il s'agit d'une zone à très forte valeur piscicole, et une érosion menaçait de voir le cours d'eau partir vers des terres agricoles (maïs) avec, en conséquence, une mise en suspension de matériaux fins et un risque d'arrivée d'intrants agricoles. Cet ouvrage a été réalisé à la demande de la Fédération de pêche. L'érosion menaçait également un chemin rural et des terres agricoles (fig. 59). L'Adour, sur le secteur de Montgaillard, est une rivière dynamique avec une pente moyenne supérieure à 1,4 % et un transport solide important ( $D_{84} = 156 \text{ mm}$ ).



Fig. 59 - La berge de l'Adour avant les travaux.

#### Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : épis en fascine + fascines de

berge et couches de branches à rejets

Orientation de l'ouvrage : ouest

Emplacement de l'ouvrage : rive droite en extrados

Longueur de l'aménagement : 70 m

Date de création : 2000

Montant total de l'investissement : NC

#### 4.2.2.2. Description technique de l'ouvrage

L'érosion, forte en extrados de méandre, ne permettait pas de mettre en place une simple technique végétale de type fascine en pied de berge. Cette dernière n'aurait pas résisté aux contraintes en présence. Il a donc été décidé de mettre en place une série d'épis, eux-mêmes constitués de fascines de saules fixées par deux rangées de pieux en châtaignier. Sur la berge elle-même sont installées des couches de branches à rejets, protégées par une fascine en pied (fig. 60).

#### **Fascines**

Les deux rangées de pieux sont espacées de 45 cm, les pieux sont longitudinalement espacés de 80 cm. Une première couche de branches anti-affouillement est placée sous la fascine. Puis, l'espace situé entre les deux rangées de pieux est rempli d'un mélange de branches de saules et de matériaux terreux. La mise en place des fascines se fait de l'aval vers l'amont du cours d'eau. La partie inférieure des branches (partie avec le plus gros diamètre) est placée à l'aval vers le talus, et recouvre l'extrémité fine des branches du fagot suivant.

Les fascines sont ligaturées sur chaque pieu au moyen d'un fil de fer recuit.

L'arrière de la fascine est remblayé et une seconde couche de branches anti-affouillement vient protéger la transition entre la fascine et les couches de branches à rejets. Ces espaces de transition entre techniques représentent en effet, d'une manière générale, des points de fragilité. Le géotextile est alors déroulé et les couches de branches mises en place selon les mêmes modalités décrites pour l'ouvrage de Pont-de-Labeaume (CFPF 2000).

#### L'avantage du fil de fer recuit, par rapport au fil de fer galvanisé, est de permettre son oxydation et donc sa disparition au bout de quelques années.

Pour les mêmes raisons, des cordes en fibre végétale peuvent aussi être employées.

#### Épis

Un épi est un ouvrage transversal au courant, ancré dans la berge, ne barrant qu'une partie du lit de la rivière et au moins partiellement submersible. Un épi étant toujours un obstacle à l'écoulement, il est généralement plus néfaste qu'utile s'il est isolé. C'est donc souvent une série d'épis successifs qui est réalisée. Un des objectifs de ce type de réalisation est d'obtenir à terme un comblement et une végétalisation progressifs des « casiers » constitués par les intervalles entre les épis (Degoutte 2006).

Les épis modifient les vitesses et la direction du courant sur les bords du cours d'eau. Aussi, selon leur implantation ou leur orientation, on peut définir les secteurs du

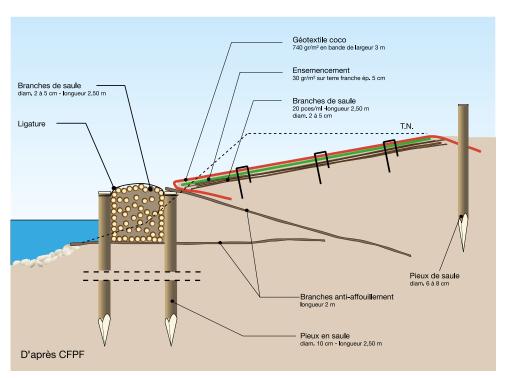


Fig. 60 - Profil type de l'ouvrage de Montgaillard.

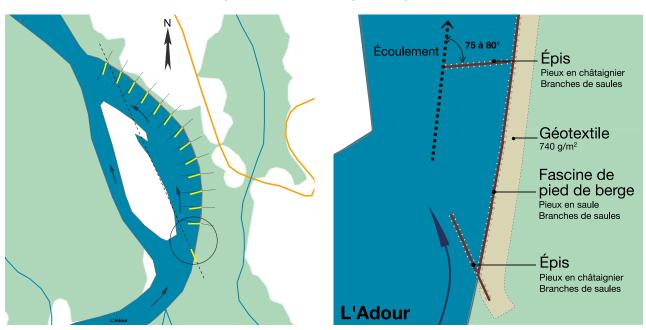


Fig. 61 - Principe de l'aménagement et disposition des épis.

Fig. 62 - Vue générale sur la berge restaurée.



Fig. 63 - Berge de l'Adour pendant les travaux (automne 1999). Remarquez la succession d'épis plongeants, végétalisés.

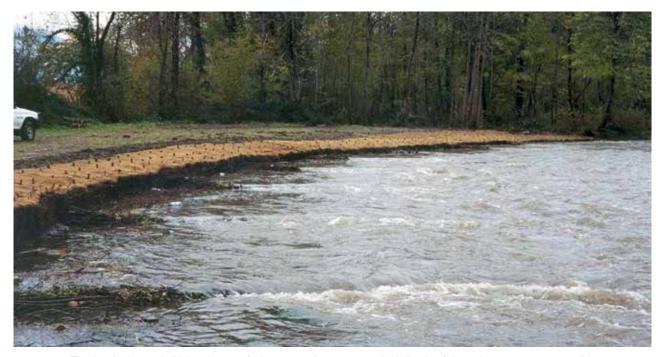


Fig. 64 - La berge de l'Adour juste après les travaux (automne 1999). L'effet des épis sur le courant est perceptible.



Fig. 65 - La berge de l'Adour deux ans après les travaux. En période de hautes eaux, les épis sont immergés.



Fig. 66 - La berge de l'Adour quatre ans après les travaux. Les épis sont toujours visibles.

lit que l'on souhaite approfondir par affouillement et ceux que l'on vise à remblayer par sédimentation.

Les épis mis en place à Montgaillard ne sont pas perpendiculaires à l'axe d'écoulement. Le premier épi (amont) d'une série est le plus sollicité par le courant et par les corps flottants. On réalise donc un premier épi à l'amont de l'ouvrage, orienté vers l'aval et baptisé épi de rejet ou épi déflecteur (fig. 61 et 62). Les épis situés plus en aval sont eux orientés vers l'amont, faisant un angle de 75 à 80° avec l'axe d'écoulement. L'objet de cet angle est de repousser vers l'intrados la fosse de dissipation qui se crée en crue à l'aval de l'épi. En effet, en crue, l'eau passe par surverse sur les épis et crée des perturbations importantes susceptibles de provoquer des érosions qu'il vaut mieux éloigner de la berge (fig. 64).

Des mesures avec une lunette de chantier sont nécessaires afin de caler l'ouvrage.

Les épis sont réalisés selon le même principe que les fascines (matériaux terreux exclus), les pieux sont cependant en châtaignier (essence peu putrescible et qui ne rejette pas).

La tête des épis doit être située un peu au-dessus du niveau des basses eaux. Ceci implique que ces épis présentent une pente importante (épis fortement plongeants vers le centre de la rivière). L'espacement entre les épis est de 1,5 fois leur longueur soit 9 m dans ce cas particulier (CFPF 2000).



Fig. 67 - La berge de l'Adour douze ans après les travaux. Le milieu alluvial est reconstitué et les traces d'une intervention ne sont quasiment plus perceptibles, critère absolu d'une intervention réussie.

#### Remarques générales

Cet ouvrage est réalisé en techniques végétales pures sur une rivière à pente élevée avec un transport solide important. L'ouvrage résiste depuis 2000, alors qu'il a connu une crue juste après les travaux et a supporté une crue légèrement inférieure à la décennale en 2003. Il est par ailleurs régulièrement totalement submergé, au moins une fois par an. Dix ans après, les épis sont toujours partiellement présents, des sédiments se sont déposés entre chaque épi, laissant se développer une strate herbacée comprenant quelques hélophytes. Son intégration paysagère et environnementale est excellente comme le montre la figure 67.

#### 4.2.2.3. Végétation

**Tab. 21 -** Liste des espèces utilisées sous forme de branches de saules.

Espèces	
Salix atrocinerea	Saule roux
Salix caprea	Saule marsault
Salix purpurea	Saule pourpre
Salix triandra	Saule à trois étamines

**Tab. 22 -** Liste des espèces utilisées sous forme de pieux.

Espèces	
Salix alba	Saule blanc
Salix fragilis	Saule fragile

#### 4.3. Enrochements végétalisés

L'enrochement végétalisé ne constitue pas une technique de génie végétal en tant que telle, car le végétal ne participe pas directement à la résistance mécanique de la berge (chap. I.3.1). Toutefois, les enrochements végétalisés correspondent à des modèles naturels sur certains torrents à forte pente, et leur utilisation peut ainsi se justifier dans ce cas.

Sur les rivières de plaine ou de piémont, les enrochements ne correspondent pas à la granulométrie des berges naturelles, ils sont à éviter au maximum sur le plan environnemental.

Aussi, les enrochements bruts s'avèrent être des zones préférentielles de développement des espèces exotiques envahissantes comme la renouée du Japon ou le buddleia (chap. II.6). Et la présence d'enrochements bruts constitue souvent des « verrues » sur le plan paysager.

Par ailleurs, dans les vallées alpines urbanisées, les ripisylves constituent parfois le seul corridor biologique permettant la circulation des espèces le long de la vallée. Or, lorsque les berges sont enrochées, l'absence de végétation entraîne une discontinuité des corridors biologiques. En effet, les températures élevées observées en été sur les rochers et l'absence de végétation rendent ces milieux peu propices à l'accueil et à la circulation des espèces animales et végétales.

Les rôles majeurs de corridor écologique, de rempart contre les exotiques envahissantes et de qualité paysagère assurés par les ripisylves amènent à se questionner sur la possible végétalisation de ces enrochements bruts. La meilleure solution sur le plan environnemental serait d'enlever les enrochements et de reconstruire des berges plus naturelles avec des techniques de génie végétal. Cependant, cette solution est parfois inenvisageable en raison des enjeux (infrastructures, etc.), de l'espace disponible et des contraintes hydrauliques (seuils, etc.). Aussi, la végétalisation d'enrochements présente un intérêt certain pour traiter l'énorme parc d'enrochements existant.

À ce jour, si des expériences existent à l'étranger (Italie, Autriche, Canada, etc.), la revégétalisation d'enrochement n'est que très peu utilisée en France et en Suisse. Seules quelques réalisations ponctuelles existent sur ce territoire. Il existe donc peu de retours d'expériences dans ce domaine, alors que les besoins peuvent être considérés comme importants au regard des longueurs de berges de cours d'eau enrochées sans végétation.

Si l'enrochement sur les rivières de plaine et de piémont est souvent un pis-aller sur le plan environnemental, lorsqu'on fait le choix d'en poser, autant le végétaliser. En effet, ils gagnent ainsi sur le plan de l'intégration paysagère et de l'accueil de la biodiversité, même si on ne retrouve pas la diversité que l'on peut observer sur une berge naturelle.

Nous abordons ainsi dans ce chapitre des expérimentations et chantiers menés sur des travaux de végétalisation d'enrochements existants et sur la végétalisation à l'avancement d'enrochements neufs.

## 4.3.1. Expérimentation sur les enrochements du seuil de l'Arve de Vougy-Marignier en Haute-Savoie



#### Revégétalisation d'enrochements

De fortes pressions anthropiques (digues de protection, remblai de la voie ferrée, autoroute, etc.) ont contribué à « chenaliser » l'Arve sur pratiquement 70 % de son linéaire (107 km). L'enfoncement généralisé du lit depuis les années 1970-1980 n'a fait qu'accroître ce phénomène. Ces modifications importantes du fonctionnement morphologique de la rivière ont nécessité la mise en place d'un grand nombre d'ouvrages de protection et de correction (seuils) à base d'enrochements. Ces enrochements totalisent un linéaire de 140 km.



Fig. 68 - Vue de la berge sud de l'Arve au niveau du seuil de Vougy-Marignier. État de l'enrochement avant les travaux de végétalisation.

Ce projet réalisé pendant l'hiver 2010-2011 a consisté à mettre en œuvre différents procédés de revégétalisation d'enrochements sur plusieurs parcelles expérimentales afin de comparer et d'évaluer la réussite de ces différentes techniques. Les résultats de l'expérimentation permettent de proposer des techniques pour la végétalisation d'enrochements existants, dans les cas où la suppression pure et simple des protections de berge apparaît impossible en raison des contextes locaux (espace disponible, contraintes mécaniques, enjeux à protéger).

Le linéaire concerné par le projet est constitué de 200 m d'enrochement sur chaque berge, chacune large de 8 m. L'expérimentation porte au total sur 3 200 m². Les deux berges sont traitées de manière identique avec cinq techniques de végétalisation différentes. La reprise végétative et la diversité floristique seront suivies afin d'évaluer la pertinence de chaque technique.

Les deux berges sont exposées respectivement nord et sud. L'influence de l'exposition est ainsi prise en compte.

Les espèces bouturées sont des saules et de la myricaire (*Myricaria germanica*) prélevés localement. Les espèces de saule mises en place sont, pour les boutures :

- Saule drapé (Salix elaeagnos);
- Saule pourpre (Salix purpurea);
- Saule faux daphné (Salix daphnoides);
- Saule à trois étamines (Salix triandra).

Pour les pieux, seul *Salix daphnoides* a été utilisé, unique espèce disponible à proximité dans les dimensions souhaitées.



Fig. 69 - Vue aérienne du seuil, depuis l'amont, en septembre 2010. La berge de gauche est orientée nord et celle de droite est orientée sud. L'impact paysager et la discontinuité du corridor alluvial apparaissent clairement.



Fig. 70 - Vue aérienne du seuil, depuis l'aval, en septembre 2011.

#### Placette n° 1 : forage de l'enrochement

Des forages ont été effectués entre les interstices à 2 m de profondeur (1 forage par 4 m², diamètre de 10 cm). Puis mise en place de pieux vivants de *Salix daphnoides* de plus de 3 m. Ensuite, injection de terre liquide uniquement autour du pieu (afin de colmater le forage), comprenant des éléments grossiers (présence significative de sable, avec limon ou argile pour la tenue de la terre et la capacité de rétention de l'eau). Enfin, une collerette de géotextile a été mise en place à la base de tous les pieux (fig. 71).



Fig. 71 - Placette n° 1 : développement d'un pieu de saule faux daphné en août de la première saison de végétation.

#### Placette n° 2 : garnissage des vides à la lance

Les vides sont comblés par projection dans les interstices de terre liquide, comprenant des éléments grossiers (proportion significative de sable, avec limons ou argiles), et bouturage avec une densité de 2 à 3 boutures standard par m² (fig. 72 et 73).



Fig. 72 - La lance garantit un remplissage des interstices en profondeur.



Fig. 73 - L'enrochement après le comblement des vides.

#### Placette n° 3 : garnissage des vides à la lance + géotextile coco

Cette placette est identique à la placette n° 2 en rajoutant un géotextile coco de fort grammage fixé à l'aide de clous plantés dans les blocs et de fil de fer.

#### Placette n° 4 : placage à la pelle mécanique

Les interstices entre les pierres sont comblés par placage de terre à la pelle mécanique. Des bouturages ont été réalisés avec une densité de 2 à 3 boutures par m² (fig. 74 et 75).



Fig. 74 - Placage de la terre à la pelle mécanique.

#### Placette n° 5 : placage à la pelle mécanique + géotextile coco

Cette placette est identique à la placette n° 4 en rajoutant un géotextile coco de fort grammage fixé à l'aide de clous plantés dans les blocs et de fil de fer.



Fig. 75 - Vue sur l'enrochement avec une partie plaquée et l'autre nue.

**Tab. 23 -** Coûts des différentes techniques : **(a)** placette n° 1 ; **(b)** placette n° 2 ; **(c)** placette n° 3 ; **(d)** placette n° 4 ; **(e)** placette n° 5 (s'agissant de la végétalisation d'enrochements existants, ces coûts n'incluent pas la fourniture et la mise en place des blocs).

(a) Placette n° 1	
Surface totale (m²)	160
Amont de la berge (1/3)	4 695 €
Forage	
Injection de « coulis terreux »	
Pieux vivants	
Ensemencement en 2 passes	
Aval de la berge (2/3)	1 403 €
Placage et recouvrement de terre	
Mise en place de plants (1/m²)	
Ensemencement en 2 passes	
Total	6 098 €
Ratio prix/m <sup>2</sup>	38 €

(b) Placette n° 2	
Surface totale (m²)	160
Amont de la berge (1/3)	2 109 €
Remplissage en profondeur des interstices	
Placage et recouvrement de terre	
Boutures (3/m²)	
Ensemencement en 2 passes	
Aval de la berge (2/3)	1 403 €
Placage et recouvrement de terre	
Mise en place de plants (1/m²)	
Ensemencement en 2 passes	
Total	3 512 €
Ratio prix/m <sup>2</sup>	22 €

(c) Placette n° 3	
Surface totale (m²)	160
Amont de la berge (1/3)	3 109 €
Remplissage en profondeur des interstices	
Placage et recouvrement de terre	
Boutures (3/m²)	
Ensemencement en 2 passes	
Géofilet coco	
Aval de la berge (2/3)	1 403 €
Placage et recouvrement de terre	
Mise en place de plants (1/m²)	
Ensemencement en 2 passes	
Total	4 512 €
Ratio prix/m <sup>2</sup>	28 €
(d) Placette n° 4	
Surface totale (m <sup>2</sup> )	160
Amont de la berge (1/3)	1 718 €
Placage et recouvrement de terre	
Boutures (3/m²)	
Ensemencement en 2 passes	
Aval de la berge (2/3)	1 403 €
Placage et recouvrement de terre	
Mise en place de plants (1/m²)	
Ensemencement en 2 passes	
Total	3 121 €
Ratio prix/m <sup>2</sup>	20 €
(e) Placette n° 5	
Surface totale (m <sup>2</sup> )	160
Amont de la berge (1/3)	2 718 €
Placage et recouvrement de terre	
Boutures (3/m2)	
Ensemencement en 2 passes	
Géofilet coco	
Aval de la berge (2/3)	1 403 €
Placage et recouvrement de terre	
Mise en place de plants (1/m²)	
Ensemencement en 2 passes	
Total	4 121 €
Ratio prix/m <sup>2</sup>	26 €

#### Création d'enrochements végétalisés à l'avancement

Les plançons utilisés doivent être suffisamment longs pour que les racines puissent aller chercher la terre et les nutriments derrière l'enrochement. En effet, les enrochements en eux-mêmes constituent un habitat avec une faible réserve hydrique et en nutriments pour les plantes. De plus, le fait que les racines se développent sous l'enrochement et pas dans celui-ci, évite sa déstabilisation éventuelle.

Lorsqu'on réalise un enrochement végétalisé, il est préférable d'utiliser une couche de transition plutôt qu'un géotextile synthétique pour protéger l'ouvrage contre l'érosion interne. En effet, les racines peuvent se développer à travers la couche de transition, ce qui n'est pas le cas avec un géotextile synthétique.

Sur l'Arve, à Vougy, pour corriger une érosion présente en rive gauche à l'aval du seuil, une partie de la berge a été protégée avec une technique mixte comprenant un enrochement de pied de berge surmonté par des lits de plants et plançons. L'enrochement de pied de berge a été végétalisé à l'avancement. Une couche de terre a été déposée au-dessus de chaque bloc, puis un plançon de saule faux daphné d'une longueur de 2,5 m a été mis en place tous les 2 m². Après quoi, les blocs supérieurs ont été mis en place et recouverts de terre. Un ensemencement de toute la zone a également été réalisé (fig. 76 et 77).



Fig. 76 - Mise en place de l'enrochement végétalisé en février 2011.



Fig. 77 - Le même endroit en septembre 2011.

## 4.3.2. Autre technique d'enrochement végétalisé à l'avancement

Si les enrochements végétalisés sont peu utilisés en France, ils le sont plus dans d'autres pays comme l'Italie, l'Autriche ou le Canada.

Les illustrations présentées ci-dessous proviennent de travaux menés par la société canadienne Terra Erosion Control (http://www.terraerosion.com/company.htm) qui est dirigée par Pierre Raymond.

Cette société pratique la mise en place d'enrochements végétalisés sur de grandes longueurs. Sur la figure 78, on peut voir la coupe type des ouvrages qu'elle met en place. Sur un premier lit d'enrochement protégé par une couche de transition, une tranchée est excavée et un géotextile déroulé. Puis, un lit de plançons est mis en place et recouvert de terre végétale (fig. 79). Un panneau d'OSB (oriented strand board ou « panneau à lamelles minces orientées ») est alors posé. Ce panneau a pour double objectif de protéger les boutures de toute blessure lors de la pose des rochers, et de conduire l'écoulement des eaux météoriques vers les racines à l'arrière de l'enrochement. Quatre ans après, le résultat est intéressant (fig. 81). À noter le grillage de protection contre les castors.

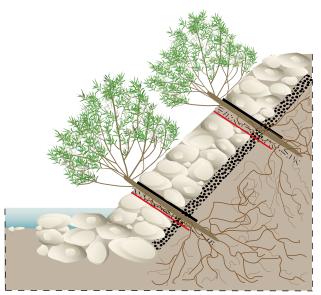


Fig. 78 - Coupe transversale sur un enrochement bouturé : en rouge, le géotextile biodégradable ; en noir, les panneaux d'OSB ; entre les deux, la terre végétale et les plançons. Les points noirs représentent la couche de transition.



Fig. 80 - Positionnement des enrochements sur la partie supérieure.



Fig. 79 - Mise en place des boutures et de la terre végétale.



Fig. 81 - L'ouvrage 4 ans après les travaux.

## 5. Ouvrages transversaux en bois

Le présent chapitre présente des ouvrages bois transversaux au cours d'eau. Les protections de berge ne seront pas directement abordées. Ces ouvrages assurent un rôle complémentaire aux techniques végétales de protection de berges dans le cadre de l'aménagement d'un cours d'eau de montagne. Ils contribuent principalement à stabiliser le profil en long du lit, complément souvent indispensable à la mise en œuvre des techniques de stabilisation de berges.

Contrairement à des techniques minérales plus lourdes, de type enrochement, le choix de réaliser ces ouvrages avec du matériau bois contribue à minimiser l'empreinte environnementale globale du chantier (bois de provenance local, etc.).

Le choix du type d'ouvrage répond à des critères multiples, il dépend notamment du contexte hydraulique, des matériaux disponibles, des compétences locales à disposition... La présentation des ouvrages bois n'exclut, par exemple, en rien la possibilité de réalisation de seuil en pierre s'inspirant d'un modèle de cours d'eau en steppool. Il s'agit d'une alternative qui écologiquement et économiquement peut être pertinente.

1

#### Avertissement aux lecteurs :

les ouvrages transversaux en bois constituent des seuils et sont donc susceptibles de modifier le transit sédimentaire. Ces ouvrages peuvent avoir un impact sur les fonctionnements hydromorphologique et écologique (non-franchissement par les poissons) du cours d'eau. Une étude globale du fonctionnement du cours d'eau et de son transport solide doit être conduite préalablement.

Parmi les ouvrages bois transversaux dans les cours d'eau de montagne, on rencontre principalement des seuils et des barrages. La terminologie utilisée pour définir l'ouvrage n'est pas toujours employée de la même manière par les différents gestionnaires.

Il est proposé d'adopter les définitions suivantes pour distinguer les seuils des barrages.

Un **seuil** est un ouvrage de taille modeste dont la plus grande hauteur mesurée à l'aplomb entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel (lit du cours d'eau) n'excède pas deux mètres.

Un **barrage** est un ouvrage dont la plus grande hauteur mesurée à l'aplomb entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel (lit du cours d'eau) est supérieure à deux mètres. Dans ce chapitre, seuls les ouvrages dont la hauteur n'excède pas six mètres seront présentés.

L'architecture de la structure du barrage nécessite généralement une étude de dimensionnement.

Cette distinction entre seuils et barrages est utilisée par Irstea dans son étude n° 18, « Équipements pour l'eau et l'environnement ».

Les barrages et les seuils en bois peuvent être différenciés par leurs dimensions, par l'organisation de leur structure interne ou encore par leur fonction dans le cours d'eau :

- calage du fond du lit;
- tenue des berges ;
- écrêteur de crue.

Deux modèles principaux sont distingués pour réaliser l'architecture de la structure :

- caisson en rondins de bois rempli de matériaux inertes agissant comme une construction « poids »;
- simple paroi, profondément ancrée dans les berges du cours d'eau.

Cette partie a été réalisée en s'appuyant sur un large retour d'expériences en France et plus largement sur l'ensemble de l'Arc alpin. Elle s'attache à faire une synthèse des principales techniques susceptibles d'être mises en œuvre dans des cours d'eau de montagne en s'appuyant notamment sur les travaux de Damien Roman dans son mémoire d'ingénieur: Les ouvrages bois dans les cours d'eau. État de l'art, application et dimensionnement.

#### 5.1. Seuils bois

#### **Avertissement aux lecteurs :**

les exemples de réalisation présentés dans cette partie ont pour certains été réalisés dans des cours d'eau de plaine. Ces réalisations constituent néanmoins actuellement les seules transposables au contexte montagnard et sur lesquelles on peut s'appuyer pour de futurs aménagements.



#### 5.1.1. Seuils bois classiques à simple paroi

La méthode courante pour réaliser un seuil à simple paroi consiste à assembler horizontalement des bois ronds les uns sur les autres avec des broches métalliques pour constituer le corps de l'ouvrage. Ce dernier doit être ancré dans les berges du cours d'eau sur une longueur minimale d'un mètre. Il peut être renforcé par des pieux verticaux battus contre sa face aval (fig. 1 et 2).

#### 5.1.1.1. Champ d'application

Les champs d'application de ces ouvrages sont multiples :

- la mise en place de seuils successifs permet de « dissiper » l'énergie d'un cours d'eau de forte pente en limitant les vitesses d'écoulement (effet de chutes successives), comme dans le cours d'eau Artilla dans le département du Rhône (fig. 1);
- sur des cours d'eau dont le lit connaît un processus d'incision ou d'enfoncement ponctuel, la mise en place de seuils permet de rehausser et fixer le profil en long en favorisant les dépôts en recul immédiat de chaque ouvrage, et ainsi de stabiliser les berges en amont;
- la mise en place d'un seuil peut également être dictée par la volonté de donner une direction particulière aux écoulements ;
- la mise en place d'un seuil à l'aval direct d'un ouvrage de plus grande dimension (barrage, pile de pont, etc.) peut être envisagée dans le but de limiter les phénomènes d'affouillement de ce dernier.

#### Remarques

Dans le cas d'un dénivelé important de lit à consolider, il est préférable de multiplier le nombre de seuils plutôt que d'édifier un ouvrage de hauteur de chute trop importante.

L'implantation peut se faire dans tous les sols meubles pour pouvoir ancrer l'ouvrage dans les berges et/ou dans le lit si battage de pieux, sous réserve d'absence de zone en glissement de terrain.

#### 5.1.1.2. Mode opératoire

Les rondins de bois composant ces ouvrages doivent être ancrés dans les berges d'au moins 1 m de chaque côté. Il faut prendre soin de bien adapter la dimension de la cuvette en fonction du niveau des hautes eaux afin que les ailes du seuil ne soient pas submergées.

La profondeur d'ancrage dans le lit du torrent de la paroi verticale constituant le corps d'ouvrage doit être d'au moins 0,5 fois la hauteur de l'ouvrage à la cuvette (0,5 hdev) (fig. 2), pour se prémunir des phénomènes de lessivage en cas d'affouillement du pied de l'ouvrage.

Dans la plupart des cas, les ailes permettant le centrage des écoulements sont réalisées au moyen d'une ou deux grumes qui prennent appui sur les pieux verticaux (fig. 3 et 5). Elles sont généralement clouées sur le bois supérieur. La durée de vie des pieux doit être considérée comme plus faible que le reste de l'ouvrage, puisqu'ils se trouvent dans des conditions de durabilité réduite. Les pieux sont généralement battus mécaniquement. Dans le cas de petits ouvrages, lorsque le diamètre des pieux est inférieur à 10 cm, le battage est fait manuellement.

Un géotextile peut être associé à la construction du seuil pour éviter les phénomènes de lessivage, en particulier lorsque la forme des grumes utilisées est irrégulière. Il doit être fixé au parement amont (fig. 4).

L'atterrissement (nom employé pour désigner les matériaux de remblai se situant à l'arrière de l'ouvrage) est réalisé avec les matériaux pris sur place. Lorsque le site présente un déficit de matériaux, il est possible d'effectuer un atterrissement même minimum avec des rémanents de branchages par exemple. Il est vivement conseillé de ne pas laisser un ouvrage « nu » exposé au passage d'une crue. Ceci pourrait conduire à sa ruine.

Les assemblages entre les grumes sont réalisés à l'aide de tiges métalliques (acier HA) de diamètre 10 à 12 mm battues manuellement. En théorie, les grumes doivent être pré-percées d'un diamètre inférieur de 1 à 2 mm de celui de la tige. En pratique, elles le sont au diamètre de la tige.



Fig. 1 - Succession de petits seuils à simple paroi réalisés dans le cours d'eau Artilla (Rhône - France).

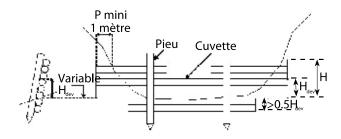


Fig. 2 - Schéma de principe d'un seuil bois classique avec des ailes.



Fig. 3 - Installation des pieux d'un seuil bois classique.



Fig. 4 - Installation d'un géotextile contre le parement amont de l'ouvrage.



Fig. 5 - Petits seuils rustiques en bois avec ailes fixées sur les pieux.

#### 5.1.1.3. Avantages et inconvénients

**Tab. 1 -** Avantages et inconvénients des seuils bois à simple paroi.

Seuils bois à simple paroi	
Avantages	Inconvénients
Investissement financier réduit (coût de la main-d'œuvre et de la fourniture minimisée)	Peu résistants à de fortes sollicitations, notamment impact des embâcles lors du passage de grosses crues
Mise en place manuelle dans des cours d'eau escarpés et dif- ficilement accessibles	Résistent mal à l'affouillement et aux phénomènes de lessivage
Oxygénation du milieu favorable à la faune aquatique et à l'autoé- puration du cours d'eau	Nécessitent des berges suffisam- ment meubles
N'entravent pas la migration piscicole (si faible hauteur de chute, h < 30 ou 50 cm suivant l'espèce et le débit)	Peu appropriés en zone de glissement

#### 5.1.1.4. Critères de pré-dimensionnement

**Tab. 2 -** Pré-dimensionnement des seuils bois à simple paroi.

Seuils bois à simple paroi		
Critères de pré-dimensionnement		
Hauteur maximum de l'ouvrage mesurée entre le sommet et le lit du cours d'eau	H ≤ 2 m	
Profondeur d'ancrage minimum des bois dans les berges	P ≥ 1 m	
Profondeur d'ancrage minimum de la paroi verticale dans le lit du cours d'eau	≥ 0.5 H <sub>dev</sub>	
Diamètre des pieux verticaux et des rondins horizontaux (généra- lement adapté à la disponibilité des bois locaux ainsi qu'à la hau- teur du lit du cours d'eau)	Ø min = 10 à 15 cm	
Diamètre des tiges métalliques (type fer à béton HA) pour assemblage des rondins	Ø = 12 mm	

## **5.1.2.** Variante 1 : petits seuils rustiques à simple paroi

#### 5.1.2.1. Champ d'application

Ces ouvrages rustiques et rapides à mettre en œuvre sont constitués de deux ou trois rondins superposés et assemblés à l'aide de broches métalliques (fig. 10).

Au niveau du parement aval, des pieux verticaux sont généralement présents pour renforcer la structure. Un dispositif de recalibrage des débits d'étiage est généralement prévu (fig. 6).

Ce type d'ouvrage est particulièrement adapté pour des cours d'eau à régime permanent ayant un lit relativement large (de 10 à 15 m).

Ces petits ouvrages de stabilisation du fond du lit du cours d'eau n'empêchent pas la migration de la faune piscicole.



Fig. 6 - Petit seuil rustique avec dispositif de recalibrage des débits.



Fig. 7 - Assemblage et préfabrication d'un seuil à partir de grumes en épicéa.

#### 5.1.2.2. Mode opératoire

Ce type d'ouvrage est réalisé par la mise en place de trois grumes l'une sur l'autre à l'aide de tiges métalliques type fer à béton HA 12 mm.

Un géotextile est généralement fixé sur le parement amont pour prévenir les phénomènes de lessivage (fig. 7).

Il est nécessaire de créer des ancrages dans les berges sur une profondeur d'un mètre minimum et d'installer les troncs transversalement au cours de l'eau.

Les pieux sont battus mécaniquement.

Ils doivent être positionnés tous les mètres et leur profondeur d'ancrage est d'1 m au minimum. Les pieux sont solidarisés aux troncs transversaux à l'aide d'acier à béton HA.

Dans le cas où les berges sont trop instables, il est préférable d'assurer l'ancrage de l'ouvrage par un calage en enrochements (fig. 8 et 9).



Fig. 8 - Calage de l'ouvrage en berge rive gauche par des enrochements.



Fig. 9 - Installation d'un seuil préfabriqué à la pelle mécanique.

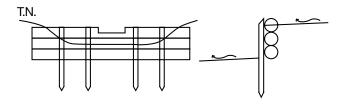


Fig. 10 - Schéma de principe d'un seuil rustique avec dispositif de recalibrage des débits.

#### 5.1.2.3. Avantages et inconvénients

Tab. 3 - Avantages et inconvénients des seuils rustiques.

Seuils rustiques	
Avantages	Inconvénients
Investissement financier réduit (coût de la main-d'œuvre et de la fourniture minimisée)	Ouvrage facilement contournable par les eaux
Mise en œuvre rapide et méca- nisable (suivant les conditions d'accessibilité du site)	Mauvaise résis- tance à l'affouil- lement et aux phénomènes de lessivage
Ouvrage pouvant être préfabriqué en atelier ou sur la berge	Ouvrage fortement limité en hauteur
N'entravent pas la migration pis- cicole (si faible hauteur de chute, h < 30 ou 50 cm suivant l'espèce et le débit)	

#### 5.1.2.4. Critères de pré-dimensionnement

Tab. 4 - Pré-dimensionnement des seuils rustiques.

Seuils rustiques	
Critères de pré-dimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage (2 à 3 rondins de bois)	H ≤ 50 à 60 cm
Profondeur d'ancrage minimum des bois dans les berges	P ≥ 1 m
Profondeur d'ancrage minimum des pieux verticaux dans le lit du cours d'eau	P ≥ 1 m
Diamètre des pieux verticaux (généralement adaptés à la dis- ponibilité des bois locaux)	Ø min = 10 à 15 cm
Diamètre des bois horizontaux (généralement adaptés à la dis- ponibilité des bois locaux et à la largeur du lit)	Ø min = 15 à 25 cm
Diamètre des tiges métalliques (acier à béton HA) pour assem- blage des rondins	Ø = 12 mm

#### 5.1.3. Variante 2 : seuils en arc de cercle

#### 5.1.3.1. Champ d'application

Ces ouvrages (fig. 11) présentent une structure de taille réduite. Ils sont constitués de pieux jointifs disposés en arc de cercle.

Grâce à leur forme incurvée, ils permettent de recentrer les écoulements vers l'axe du lit limitant ainsi l'érosion des berges. En effet, la trajectoire des écoulements en sortie d'ouvrage est perpendiculaire au support (fig. 12).

Il est à noter que ces seuils sont vulnérables aux phénomènes de déchaussement car les pieux ne sont pas solidarisés. Ils sont également vulnérables aux contournements à cause du manque d'ancrage dans les berges.



Fig. 11 - Seuil en arc de cercle.

#### 5.1.3.2. Mode opératoire

Les pieux sont battus mécaniquement sur une profondeur de 1 m au minimum à l'aide d'une cloche de battage. L'arc de cercle est positionné partie convexe vers l'amont. Une configuration inverse aurait tendance à diriger les écoulements vers les berges.

Un géotextile est généralement fixé sur le parement amont afin d'éviter une vidange du remblai (fig. 13). La création d'une fosse de dissipation protégée par des enrochements est nécessaire pour lutter contre l'affouillement en pied d'ouvrage.

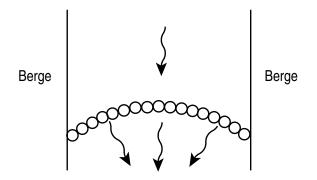


Fig. 12 - Schéma de principe d'un seuil en arc de cercle.



Fig. 13 - Installation d'un géotextile à l'amont du parement.

#### 5.1.3.3. Avantages et inconvénients

**Tab. 5** - Avantages et inconvénients des seuils en arc de cercle.

Seuils en arc de cercle	
Avantages	Inconvénients
Faible quantité de bois nécessaire	Facilement contour- nables par les eaux (pas d'ancrage dans les berges)
Mise en œuvre rapide et méca- nisable (suivant les conditions d'accessibilité du site)	Mauvaise résistance à l'affouillement
	Peu de recul sur ce type d'ouvrage car peu de réalisations
Adapté au traitement de petites ravines	Lame d'eau non centrée représen- tant une difficulté ponctuelle de fran- chissement pour les espèces piscicoles

#### 5.1.3.4. Critères de pré-dimensionnement

**Tab. 6 -** Pré-dimensionnement des seuils en arc de cercle.

50.0.0.		
Seuils en arc de cercle		
Critères de pré-dimensionnement		
Hauteur maximum de l'ouvrage	H ≤ 50 cm	
Profondeur d'ancrage minimum des pieux verticaux dans le lit du cours d'eau	P≥1 m	
Diamètre des pieux verticaux (généralement adaptés à la dis- ponibilité des bois locaux)	Ø min = 10 à 15 cm	

## 5.1.4. Variante 3 : seuils en « V » à simple paroi

#### 5.1.4.1. Champ d'application

Ces ouvrages rustiques sont simples et rapides à mettre en œuvre. Ils sont constitués de rondins superposés et disposés en « V », la pointe du « V » étant orientée vers l'amont. Des pieux en aval de l'ouvrage servent à caler et renforcer la structure. Un platelage amont peut consolider la structure et faciliter le transit des écoulements sur l'ouvrage.

La forme en « V » permet de recentrer les écoulements comme pour les seuils en arc de cercle (fig. 15).

Ce type d'ouvrage est particulièrement adapté pour corriger de petites ravines (fig. 14).

#### 5.1.4.2. Mode opératoire



Fig. 14 - Seuil en « V » dans une ravine.

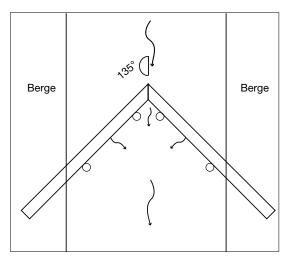


Fig. 15 - Schéma de principe d'un seuil en « V ».

Le lit de la rivière doit être nivelé pour faciliter la pose des rondins horizontaux qui doivent être ancrés dans les berges sur une profondeur de 1 m au minimum.

Les rondins disposés en « V », constituant le corps de l'ouvrage, sont assemblés par des tiges métalliques. Ils doivent être disposés de telle sorte que l'angle constitué par rapport au fil d'eau soit d'au moins 135° (fig. 15).

Les pieux verticaux sont battus mécaniquement et solidarisés au corps de l'ouvrage par des tiges métalliques.

Un géotextile peut être fixé sur le parement amont du corps de l'ouvrage contre l'atterrissement pour prévenir la vidange des fines.

Le platelage est constitué de rondins de faibles diamètres taillés en biseau, enfoncés dans le lit du cours d'eau et cloués sur le corps de l'ouvrage. La création d'une fosse de dissipation en enrochement est conseillée pour protéger l'ouvrage de l'affouillement, en raison du point faible que constitue la partie centrale du corps de l'ouvrage.

#### 5.1.4.3. Avantages et inconvénients

Tab. 7 - Avantages et inconvénients des seuils en « V ».

Seuils en « V »	
Avantages	Inconvénients
Investissement financier réduit (coût de la main-d'œuvre et de la fourniture minimisé)	Peu résistants à de fortes sollicitations, notamment à l'impact des chutes de blocs et au passage de laves torrentielles
Mise en œuvre pouvant être faite entièrement à la main	Résistant mal à l'affouillement et au lessivage de l'atterrissement
Recentrage des faibles débits en période d'étiage	Peu de recul sur ce type d'ouvrage car peu de réalisations

#### 5.1.4.4. Critères de pré-dimensionnement

Tab. 8 - Pré-dimensionnement des seuils en « V ».

Seuils en « V »	
Critères de pré-dimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage (2 à 3 rondins de bois)	H ≤ 50 cm
Profondeur d'ancrage minimum des bois dans les berges	P ≥ 1 m
Profondeur d'ancrage minimum des pieux verticaux dans le lit du cours d'eau	P ≥ 1 m
Diamètre des pieux verticaux (adaptés à la disponibilité des bois locaux)	Ø min = 10 à 15 cm
Diamètre des bois horizontaux (adaptés à la disponibilité des bois locaux et à la largeur du lit)	Ø min = 10 à 15 cm
Diamètre des tiges métalliques (type acier à béton HA) pour assemblage des rondins	Ø = 12 mm

#### 5.1.5. Seuils bois à doubles parois

Les caractéristiques sont identiques à celles développées pour les barrages à doubles parois (chap. II.5.2.1) avec une hauteur cuvette limitée à 2 m (fig. 16).



Fig. 16 - Seuil à doubles parois.

#### 5.2. Barrages en bois

## **5.2.1. Barrages à doubles parois (caissons bois)**

Un caisson est constitué d'un entrecroisement de longrines (rondins les plus longs et perpendiculaires au sens d'écoulement des eaux) et de traverses (rondins plus courts et parallèles au sens d'écoulement du cours d'eau). Le remplissage de l'ouvrage par des matériaux denses de natures diverses pris sur place assure sa stabilité (fig. 17 et 18).

Les caissons sont majoritairement dotés d'ailes dont la structure de construction variable est intégrée au corps de l'ouvrage. Ils se différencient néanmoins sur de nombreux aspects: nature des matériaux de remplissage, aménagement du parement extérieur, mode d'assemblage des éléments. Ils sont les seuls ouvrages dont la modélisation mécanique permet un dimensionnement selon les normes inspirés des règlements Eurocodes, vulgarisés par Benoît et al. dans Eurocode, calcul de structure en bois (2008).



Fig. 17 - Ouvrage caisson à doubles parois.

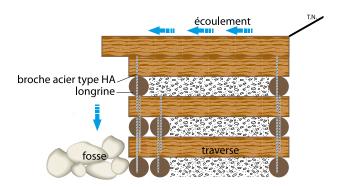


Fig. 18 - Coupe type d'un caisson à doubles parois.

#### 5.2.1.1. Champ d'application

Les barrages à doubles parois sont principalement utilisés pour corriger ou stabiliser le profil en long du cours d'eau. Ils sont généralement implantés en série comme les seuils. Sur des rivières dont le lit connaît un processus d'incision ou d'enfoncement ponctuel, la mise en place de barrages permet de rehausser et/ou de fixer le profil en long en favorisant les dépôts en amont de chaque ouvrage. La mise en place d'un barrage peut également être dictée par la volonté de donner une direction particulière à l'écoulement, d'éviter la divagation et de stabiliser les berges, si des enjeux de proximité nécessitent ce type de correction.

#### Remarques

La hauteur de chute étant importante, les ouvrages doivent être munis de dispositifs anti-affouillement, de type radiers, qui peuvent être réalisés en blocs de pierres ou avec un platelage bois.

Il est à noter qu'en cas de régimes hydrauliques violents, une construction en marches d'escalier est nécessaire pour limiter la hauteur maximale de la chute d'eau.

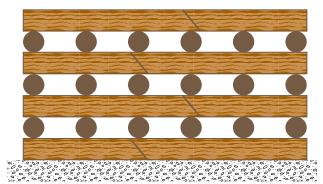


Fig. 19 - Montage d'un caisson avec les traverses alignées.

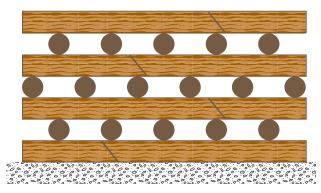


Fig. 20 - Montage d'un caisson avec les traverses alternées.

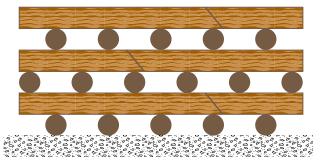


Fig. 21 - Montage d'un caisson débutant en bas avec les traverses.

#### 5.2.1.2. Mode opératoire

Les ouvrages à doubles parois se distinguent en premier lieu par l'architecture des bois constituant leur structure interne. Il est possible d'assembler les rondins en alignant les traverses verticalement les unes sur les autres (fig. 19) ou en les alternant régulièrement (fig. 20). Une structure avec des traverses alignées sera choisie afin de faciliter le remplissage des caissons, notamment lorsque cette opération est mécanisée.

Pour la plupart des ouvrages et afin de limiter les désordres structurels en cas d'affouillement, le montage de la structure débute par une série de longrines. Certaines réalisations débutent cependant par des traverses (fig. 21). Elles sont mises en œuvre sur des sols rigides et peu sujets à l'affouillement.

D'un point de vue du fonctionnement mécanique de l'ouvrage, les trois options sont équivalentes et doivent faire l'objet d'une étude de dimensionnement précise pour définir les différents paramètres du caisson (cotes externes, diamètre des bois et broches, etc.).

Par ailleurs, les ouvrages à doubles parois se distinguent par de nombreux aspects (parements, ailes, platelages, remplissage, assemblage, etc.) tels que détaillés ci-après.

#### **→**

#### Variantes de parements

De nombreux ouvrages ne font pas l'objet d'un traitement spécifique du parement aval. Ils sont alors bien souvent remplis avec les matériaux du site déposés en vrac la plupart du temps contre un géotextile (attention : le géotextile se dégrade sous l'effet des UV). Cependant, pour se prémunir sur le long terme des phénomènes d'érosion liés aux forces tractrices générées par les écoulements susceptibles de vidanger les éléments les plus fins du remblai du caisson, il est possible de protéger le parement aval avec du bois ou de la pierre suivant différentes méthodes présentées ci-après.

#### Parement en pierres

Les pierres sont soigneusement choisies et positionnées entre les rangs de longrines, de sorte à trouver le meilleur ajustement pour optimiser leur calage (fig. 22 et 23).

Ce type de parement est généralement rencontré dans les cours d'eau où les pierres, abondantes et de granulométrie adaptée, sont faciles à prélever.

Dans les secteurs fréquentés par le public, c'est l'aspect esthétique d'un tel parement qui peut être recherché. Par ailleurs, il est à noter qu'un parement en pierres apporte une bonne protection contre l'érosion de la face aval de l'ouvrage tout en lui assurant une bonne qualité drainante. Ce composite pierre et bois assure ainsi une préservation efficace de l'ouvrage contre sa dégradation prématurée par les agents biologiques. Son coût élevé reste sans doute le facteur limitant.



Fig. 22 - Barrage comprenant une cuvette avec parement en pierres à la Norma (Savoie - France).

#### Parement en bois

Les parements tout en bois peuvent être envisagés suivant trois méthodes distinctes représentées figure 23.

La méthode (b) consiste à intercaler des rondins de bois, appelés aussi bouche-trous, entre deux traverses parallèlement aux longrines. Suivant leur disponibilité sur le chantier, les bois de même diamètre que les traverses sont positionnés sur le même plan que les longrines (fig. 23b1) ou en retrait de celles-ci si leur diamètre est supérieur (fig. 23b2). Ces deux techniques offrent l'avantage d'une mise en œuvre rapide et facilitée lorsque l'on dispose d'une quantité suffisante de bois. Les rondins ainsi positionnés sont liaisonnés à la structure par des tiges métalliques de type fer à béton ou simplement cloués.

La **méthode (c)** se distingue par l'orientation des rondins positionnés parallèlement aux traverses sur toute la largeur de l'ouvrage (fig. 24). Cette solution nécessite de disposer d'une grande quantité de bois. En revanche, elle offre l'avantage de constituer une structure légère, de faible densité apparente. Son usage est à privilégier sur des sols peu portants.

La **méthode (d)** consiste à positionner des bois verticaux derrière les longrines. Elle présente l'avantage d'une mise en œuvre rapide et permet, le cas échéant, d'ancrer les bois, tels des pieux, dans le sol de fondation si les conditions de stabilité externe de l'ouvrage sont difficiles à obtenir comme illustré en figure 25.

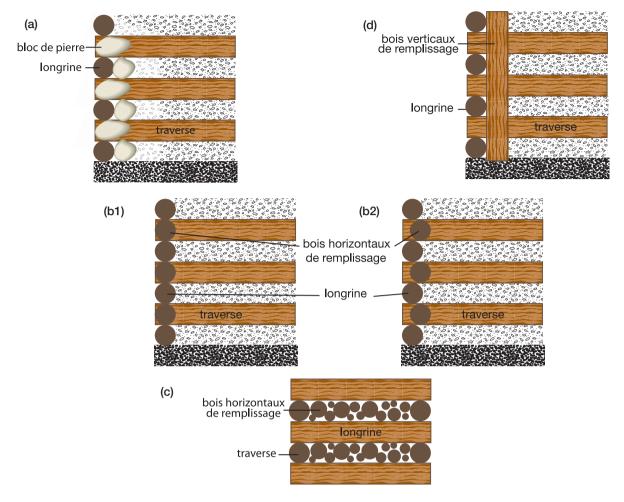


Fig. 23 - Représentation des différents types de parements utilisés.

#### Variantes d'ailes

La structure des ailes des barrages est généralement constituée sur le même principe que celle du corps de l'ouvrage, par un entrecroisement de traverses et de longrines.

Deux cas de figure peuvent se rencontrer dans le positionnement des longrines, ces dernières pouvant être soit positionnées horizontalement parallèlement à celles du corps de l'ouvrage (fig. 26), soit inclinées par rapport à l'horizontale d'un angle proche de 45° défini par le calcul hydraulique (fig. 28).

Dans le cas des ailes inclinées, les longrines sont ancrées dans le corps du barrage sur une longueur égale à la largeur de l'ouvrage.

Les ailes peuvent également être simplement réalisées par un ou plusieurs rondins de bois, lorsque le régime des écoulements ne nécessite pas une structure plus résistante (fig. 29).

De façon plus marginale, on rencontre d'autres types de structures avec des ailes réalisées en gabions métalliques (fig. 27). Ces structures mixtes présentent essentiellement l'avantage de garantir une meilleure durabilité aux ailes qui sont généralement des zones d'ouvrage de forte vulnérabilité vis-à-vis des dégradations biologiques.

En effet, les ailes sont les éléments de l'ouvrage les plus régulièrement soumis à de fortes variations hygrométriques et rarement protégées par un écoulement pérenne sur leur surface.



Fig. 24 - Barrage à doubles parois avec parement réalisé en rondins disposés parallèlement aux traverses.



Fig. 25 - Barrage à doubles parois avec parement réalisé avec des bois verticaux.



Fig. 26 - Barrage dont les ailes sont réalisées avec des longrines horizontales à Bordighera (Ligurie - Italie).

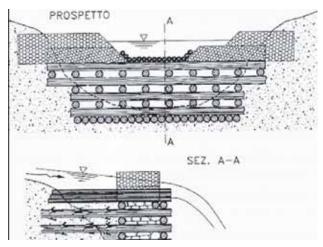


Fig. 27 - Barrage avec les ailes réalisées en gabions métalliques.

#### Variantes de platelages

La cuvette des barrages ainsi que les remontées d'ailes doivent être revêtues d'un platelage bois, afin d'éviter une infiltration massive des eaux de percolation susceptibles de générer des phénomènes de lessivage du corps de l'ouvrage.

Le platelage est généralement constitué par un assemblage de rondins de bois de sections constantes fixés sur la cuvette et les ailes par des vis ou tire-fond (fig. 33 et 34).

On rencontre également parfois des platelages constitués de rondins refendus sur la longueur et positionnés en quinconce ou non (fig. 30, 31 et 32).



Fig. 28 - Barrage dont les ailes sont réalisées avec des longrines inclinées à 45° (Sestrières - Piémont - Italie).



Fig. 29 - Barrage dont les ailes sont réalisées avec deux simples rondins de bois.



Fig. 30 - Barrage avec platelage en bois refendus sur la longueur.

Attention: les bois sciés sur la longueur se dégradent beaucoup plus rapidement que les bois refendus.



Fig. 31 - Platelage avec rondins refendus sur la longueur et disposés en quinconce.



Fig. 32 - Platelage avec rondins refendus sur la longueur et disposés dans le même sens.



Fig. 33 - Platelage avec rondins entiers disposés côte à côte.

#### Remplissage de l'ouvrage

Le remplissage du caisson par des matériaux dans l'espace constitué entre les deux parois est guidé par la disponibilité des matériaux sur place plus que par leur qualité.

Le risque de vidange des ouvrages est important lorsque les phénomènes d'affouillement de pied ou dans le corps de l'ouvrage ne sont pas traités (fig. 35).

Pour éviter les phénomènes de vidange des ouvrages, le traitement du parement aval doit être soigné tel que présenté précédemment et complété par un dispositif contre l'affouillement.

Ce dispositif peut être constitué par une fosse de dissipation d'énergie en enrochements (fig. 36). Le dimensionnement de la fosse de dissipation peut être effectué à partir des travaux d'Irstea (étude n° 18). En présence de sols fins, il est recommandé de poser les enrochements sur un géotextile ou sur une couche-filtre.

Cette fosse peut être complétée ou substituée par un platelage en rondins disposés en pied d'ouvrage au niveau de la chute d'eau. Cette disposition doit cependant être employée avec précautions dans des cours d'eau avec du transport solide où la durabilité des bois risque d'être réduite.



Fig. 34 - Barrage avec platelage en rondins entiers (haute vallée de Suze - Piémont - Italie).



Fig. 35 - Vidange d'un caisson à doubles parois suite à un important affouillement.



Fig. 36 - Création d'une fosse de dissipation de l'énergie hydraulique en pied d'un caisson bois.



#### Les assemblages

Afin de garantir une cohésion globale de la structure interne des ouvrages, il est nécessaire d'assurer d'une part une continuité efficace entre deux longrines successives, et d'autre part une liaison entre ces dernières et les traverses.

Les assemblages doivent être réalisés avec soin car ils sont généralement à l'origine des désordres constatés dans les structures. Ils constituent l'un des points de faiblesse de l'ouvrage.

Dans ce cas, trois techniques sont utilisées pour assurer la continuité mécanique de l'élément.

La première technique consiste à abouter deux longrines se trouvant sur un axe commun et de les liaisonner à la traverse par une broche métallique de type acier à béton HA. La coupe de jonction entre les deux pièces de bois peut être réalisée soit en « sifflet » (fig. 38a), soit à « mibois » (fig. 37 et 38c).

Toutes deux offrent les mêmes garanties d'un point de vue mécanique, mais il préférable d'utiliser la méthode de la coupe en « sifflet » pour les assemblages se trouvant dans des conditions de dégradation biologique élevées, car cette technique limite les zones de stagnation d'eau.

Une autre méthode consiste à assurer la continuité mécanique des longrines en les juxtaposant côte à côte sur une traverse et en les liaisonnant respectivement, comme dans les cas précédents, par des broches métalliques. Cette technique (fig. 38b) présente l'avantage de renforcer la structure de l'ouvrage au niveau de l'assemblage, mais présente l'inconvénient de créer un décalage parfois en mauvaise adéquation avec le profil que l'on souhaite donner à la structure.



Fig. 37 - Assemblage de deux longrines par une coupe à mi-bois.

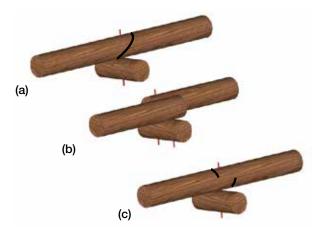


Fig. 38 - Représentation des différents modes d'assemblage de longrines couramment utilisés.

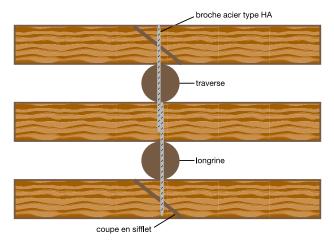


Fig. 39 - Détail d'un assemblage longrine-traverse par broche en acier.

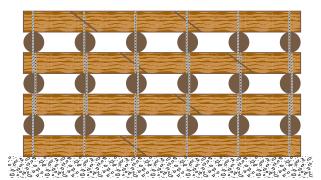


Fig. 40 - Représentation du montage idéal à adopter au niveau des assemblages.

#### Remarque

La technique (mi-bois) présentée (fig. 37) est simple et rapide, mais les découpes horizontales favorisent la stagnation de l'eau et donc l'apparition de champignons. D'autre part, l'assemblage présenté devrait être réalisé sur le même axe que les traverses.

Quel que soit le choix du type d'assemblage retenu, il est nécessaire de réaliser la liaison entre deux longrines au niveau d'une traverse par des broches métalliques d'un diamètre défini par l'étude de dimensionnement.

Ces broches doivent impérativement travailler en double cisaillement (fig. 39), ce qui confère à l'assemblage une

meilleure résistance mécanique conformément aux dispositions énoncées dans l'*Eurocode 5*.

Des ouvrages présentant des assemblages avec des « clameaux » peuvent également être rencontrés, notamment pour rabouter des longrines. Cette technique largement utilisée en Italie reste néanmoins peu conseillée et difficilement modélisable en dimensionnement mécanique.

L'utilisation des clameaux doit être réservée à l'ajustement des bois au montage. Ils seront retirés ensuite.

#### Montage type

Le montage type (fig. 40) permet d'optimiser la prévention des désordres susceptibles de nuire à la tenue de l'ouvrage. D'autre part, il est recommandé de positionner les traverses au niveau de la jonction entre deux longrines afin de faire travailler les tiges en double cisaillement. La cote de pince, c'est-à-dire la distance minimale entre le bout de la traverse et l'axe de la broche doit être respectée pour éviter l'effet de fendage (fig. 41).

#### Exemple d'assemblage à proscrire

La disposition figurant ci-dessous (fig. 42) présente l'avantage d'être simple et rapide à mettre en œuvre ; mais elle concentre les points de faiblesses sur un même axe. D'autre part, l'eau s'écoule difficilement au niveau de l'assemblage, ce qui favorise localement la rétention d'humidité et par conséquent le développement de champignons responsables de la dégradation du bois.



Fig. 41 - Assemblage par broche métallique en cours de dégradation par pourrissement du bois.



Fig. 42 - Montage des assemblages à proscrire.

#### 5.2.1.3. Avantages et inconvénients

**Tab. 9** - Avantages et inconvénients des barrages à doubles parois.

Barrages à doubles parois	
Avantages	Inconvénients
Ouvrage résistant à de fortes sollicitations (ex. : crue avec charriage et laves torrentielles)	Très consomma- teur en bois et en main-d'œuvre
Limitation des mouvements de terre puisque les matériaux de déblais peuvent être réutilisés en remblais	Mauvaise résis- tance à l'affouil- lement et au lessivage
Grâce aux ailes, stabilisation des berges et recentrage des écoulements	Mise en œuvre nécessairement mécanisée
Un retour d'expériences déjà important sur ce type de réalisation (et outils de dimensionnement)	Inadapté dans les rivières peuplées d'une faune pis- cicole migratrice
Hauteur de chute permettant une oxygénation efficace du cours d'eau	(sans passe à poissons) au vu de la hauteur de l'ouvrage

#### 5.2.1.4. Critères de pré-dimensionnement

**Tab. 10 -** Pré-dimensionnement des barrages à doubles parois.

Barrages à doubles	parois
Critères de pré-dimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage (au niveau de la cuvette)	$2 \text{ m} \le H \le 5 \text{ m}$
Profondeur d'ancrage minimum de l'ouvrage dans les berges	P ≥ 1 m
Largeur de la base de l'ouvrage	b ≥ H/2
Diamètre des longrines (généra- lement adapté à la disponibilité des bois locaux)	Ø min = 15 cm
Diamètre des traverses (généra- lement adapté à la disponibilité des bois locaux et à la largeur du lit)	Ø min = 15 cm
Diamètre des tiges métalliques (acier à béton HA) pour assem- blage des rondins	Ø = 12 mm

#### 5.2.2. Barrages à simple paroi

Ces ouvrages, tels que représentés (fig. 43 et 44), sont constitués de grumes entières empilées et disposées perpendiculairement au sens d'écoulement des eaux. Elles sont ancrées dans les berges du cours d'eau.

Le parement ainsi obtenu constitue le corps de l'ouvrage qui peut être doté ou non d'ailes.

Ce type d'ouvrage est couramment employé dans les Alpes suisses, mais également en Haute-Savoie, sous le nom de « radier », dans des cours d'eau à régime torrentiel.

Les barrages sont généralement associés à un dispositif anti-affouillement constitué d'un platelage en rondins de bois au niveau de la chute d'eau.

#### 5.2.2.1. Champ d'application

Le choix d'installer ce type d'ouvrage est généralement guidé par la disponibilité et la longueur des bois à proximité du site de construction.

Ce type d'ouvrage est généralement rencontré dans des ravines profondes et encaissées dont les berges du torrent ne sont pas trop éloignées, c'est-à-dire n'excédant pas une quinzaine de mètres en sommet d'ouvrage.

Il est également utilisé pour concourir au franchissement d'un cours d'eau par une piste (« radier » en Haute-Savoie). Dans ce cas, l'ouvrage est équipé au niveau de la cuvette d'un platelage en rondins de bois destiné à guider les eaux et améliorer le franchissement par les véhicules.

#### Remarques

La majorité des ouvrages rencontrés ont été réalisés à partir d'essences résineuses de type sapin ou épicéa (classé 2 ou 3) dans un environnement favorisant la dégradation biologique du bois.

Dans de telles conditions, le remplacement des ouvrages est à prévoir à moyenne échéance suivant les conditions (durée de vie moyenne 10 à 15 ans maximum).



Fig. 43 - Barrage à simple paroi avec dispositif anti-affouillement.

#### 5.2.2.2. Mode opératoire

Les pièces de bois sont choisies puis prélevées sur place. Leur diamètre souvent élevé, leur rectitude ainsi que leur longueur sont les principaux critères à prendre en considération au moment du choix des arbres. Les grumes ainsi sélectionnées sont empilées les unes sur les autres avec un fruit (rapport H/V avec H: l'horizontale et V: la verticale de l'ouvrage) de 0.1 à 0.2, puis ancrées dans les berges du torrent sur une longueur minimum de 2 m.

Des traverses, appelées tirants (élément de structure travaillant en traction destiné à ancrer l'ouvrage dans le terrain naturel), sont régulièrement intercalées dans le parement de l'ouvrage. De longueur variable, elles sont destinées à renforcer la stabilité externe de l'ouvrage. Elles sont liaisonnées au corps de l'ouvrage à une extrémité, alors que l'autre extrémité laissée libre est positionnée en limite du terrassement (fig. 45).

Des ouvrages dont les tirants sont parallèles au sens d'écoulement des eaux (Haute-Savoie) ou encore des ouvrages dont les tirants sont dirigés vers les berges (Suisse, Val de Suse) peuvent parfois être rencontrés. Ils forment ainsi un angle avec le fil d'eau se situant entre 10 et 45°.

L'atterrissement de l'ouvrage par du remblai, généralement issu des terrassements, se fait au fur et à mesure du montage de la structure.

Les liaisons entre les grumes sont assurées par des tiges d'acier d'un diamètre minimum de 16 mm suivant le principe du double cisaillement comme exposé plus haut. Ces assemblages peuvent également être renforcés par un câblage dans les zones les plus sollicitées.



Fig. 44 - Succession de barrages à simple paroi (Suisse).



Fig. 45 - Montage d'un barrage à simple paroi avec tirants d'ancrage.

#### 5.2.2.3. Avantages et inconvénients

**Tab. 11 -** Avantages et inconvénients des barrages à simple paroi.

Barrages à s	simple paroi
Avantages	Inconvénients
Ouvrage résistant à de fortes sollicitations (ex. : crue avec charriage et laves torrentielles)	Utilisation de grumes de grosses sections et de grandes longueurs
Limitation des mouve- ments de terre puisque les terrassements sont limités	L'ouvrage doit être équipé d'un dispositif anti- affouillement en raison de la hauteur de chute importante
Valorisation de bois locaux de grosses sections dans des zones difficiles à exploiter ou commerciale- ment inexploitables	Mise en œuvre nécessai- rement mécanisée
Faible déstabilisation des terrains en place lors de la mise en œuvre	Inadapté dans les rivières peuplées d'une faune pis- cicole migratrice
Terrassement limité	Peu de retour d'expé- riences sur ce type de réa- lisation car son utilisation est marginale
	Modélisation délicate de la structure en vue de réali- ser son dimensionnement mécanique

#### 5.2.2.4. Critères de pré-dimensionnement

**Tab. 12 -** Pré-dimensionnement des barrages à simple paroi.

Barrage à simple paroi		
Critères de pré-dimensionnement		
Hauteur de l'ouvrage (au niveau de la cuvette)	2 m ≤ H ≤ 5 m	
Profondeur d'ancrage minimum de l'ouvrage dans les berges	P ≥ 2 m	
Diamètre des grumes transversales	Ø min = 25 cm	
Diamètre des tirants	Ø min = 25 cm	
Diamètre des tiges métalliques (type fer à béton HA) pour réali- ser les assemblages	Ø = 16 mm	

# 6. Analyse comparative des diversités animales et végétales de différents types de berges aménagées et naturelles

## 6.1. Analyse contextuelle et présentation des objectifs

L'utilisation du génie végétal, outre ses facultés de lutte contre l'érosion, permet un bon retour des espèces indigènes et un bon taux de recouvrement de la végétation en comparaison avec des berges artificialisées. Le choix du génie végétal par les acteurs locaux est souvent justifié par une meilleure intégration écologique et paysagère. Comparativement au génie civil, il octroie aux écosystèmes une capacité de retour plus importante vers des systèmes sub-naturels et diversifiés. L'utilisation de ce type de technique permet par ailleurs de conserver une continuité dans les corridors biologiques, ce qui n'est pas le cas avec des techniques de génie civil de type enrochement. Le génie végétal est également préconisé pour une meilleure création de caches, de sous-berges et de systèmes racinaires favorables à la faune piscicole.

Cependant, ces arguments ont jusque-là été très peu étudiés et aucune étude n'a essayé de mettre en évidence une corrélation entre les types de matériaux utilisés pour ces ouvrages et les conditions d'accueil de la biodiversité.

L'étude présentée ci-dessous a été réalisée dans le cadre du projet Géni'Alp. Son objectif est de fournir aux gestionnaires de cours d'eau des outils pour prendre en compte les aspects liés à la biodiversité dans leurs choix techniques. Il est important d'apporter des éléments de connaissance sur les tendances en termes de biodiversité, susceptibles d'être obtenus en fonction du type d'ouvrage construit. Il s'agit d'avoir des informations quantitatives sur la capacité d'un ouvrage de protection de berge à s'intégrer à son environnement naturel. Ce type d'informations pourra être utile aux aménageurs qui pourront ainsi mieux appréhender les impacts à court et long terme de leurs ouvrages de protection de berge de cours d'eau.

Sont ici étudiées les diversités taxonomiques de la végétation, de la macrofaune benthique et de l'entomofaune, ces différents groupes de taxons étant des marqueurs importants de la qualité des écosystèmes. Sont ainsi successivement comparées :

 les diversités végétales de chacune des différentes techniques (génie civil, mixtes et végétales) et les berges naturelles;

- la diversité et la fréquence des espèces exotiques envahissantes sur chacune des différentes techniques (végétales, mixtes et génie civil) et les berges naturelles;
- les diversités de la macrofaune benthique de chacune des différentes techniques (végétales, mixtes et génie civil) et des berges naturelles;
- les diversités en genre de coléoptères des enrochements, enrochements de pied de berge et fascines.

## 6.2. Analyse de la diversité végétale

#### 6.2.1. Méthodologie

#### 6.2.1.1. Présentation des sites d'étude

L'échantillonnage réalisé lors de cette étude a permis d'identifier 317 espèces végétales sur 32 berges aménagées et 8 berges naturelles. La campagne de terrain fut réalisée en 2011. L'aire de répartition géographique de l'étude comprend la région Rhône-Alpes et la Suisse occidentale. Différentes techniques d'aménagement de berge ont été sélectionnées :

- berges purement minérales : ouvrages en enrochement (8 ouvrages);
- berges végétalisées avec enrochement de pied de berge : ouvrages mixtes associant techniques minérales et végétales (8 ouvrages) ;
- berges aménagées avec caissons végétalisés à doubles parois : ouvrage mixtes (8 ouvrages);
- berges entièrement végétalisées : ouvrages constitués de fascines de saule en pied de berge avec bouturage (8 ouvrages – fig. 1);
- berges sub-naturelles : non aménagées (saulaies basses – 8 berges).

L'objectif était de travailler sur des ouvrages situés en montagne et en altitude. Toutefois, en raison du faible nombre de réalisations d'ouvrages de génie végétal en altitude, les travaux ont porté sur des ouvrages situés à l'étage collinéen. L'altitude est un paramètre influant sur la composition des communautés végétales et animales. Aussi, de façon à pouvoir comparer les aménagements, les ouvrages ont été sélectionnés avec des altitudes proches, comprises entre 250 et 500 m; altitude à laquelle se situe la majorité des travaux de chenalisation et donc d'aménagements contre l'érosion.



Fig. 1 - Fascine de saules à Villard-Bonnot sur le Vorz (Isère - France).

L'âge des ouvrages apparaît également comme un critère important et structurant de la biodiversité. Les ouvrages récents présentent seulement les espèces végétales semées ou plantées, contrairement aux ouvrages plus anciens où d'autres espèces sont venues coloniser le milieu. Les sites sélectionnés concernent des ouvrages dont l'achèvement des travaux a eu lieu entre 2003 et 2008.

La longueur minimale des aménagements a été fixée à 25 mètres linéaires afin de pouvoir effectuer des relevés de biodiversité sur des longueurs suffisantes et comparables.

#### 6.2.1.2. Relevés floristiques

Chaque site a fait l'objet de relevés floristiques. La méthode d'analyse de la végétation est celle des points de contact. Cette méthode permet de prendre en compte la structuration verticale de la végétation (strates herbacée, arbustive et arborée). Les mesures ont été réalisées grâce à une tige de 2 m de long et 1 cm de diamètre. Elles ont été effectuées tous les 75 cm le long de trois transects de 22,5 m de long, tracés parallèlement à la rive et répartis de manière équidistante sur la largeur de l'aménagement (fig. 2). Cela représente quatre-vingt-dix mesures de végétation par site.

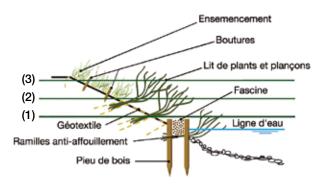


Fig. 2 - Coupe schématique d'une berge aménagée en fascines de saules, lits de plants et plançons et bouturage. Représentation des trois transects de prélèvement : (1) : transect inférieur ; (2) : transect médian ; (3) : transect supérieur (Cavaillé et al. 2010).

Le positionnement de ces trois transects (en bas, au milieu et en haut de berge) permet de prendre en compte la variabilité du cortège floristique sur toute la hauteur de la berge. En effet, la végétation des berges de cours d'eau est stratifiée, notamment en fonction de l'hygrométrie du sol et de la durée d'immersion plus importante en pied de berge qu'en haut de berge.

## **6.2.2.** Analyse de la diversité végétale ; résultats et discussions

#### 6.2.2.1. Biodiversité : génie civil et génie végétal

Les résultats suivants traduisent les différences qui existent entre les aménagements issus du génie végétal (toutes techniques confondues) et ceux issus du génie civil (enrochements) en terme de diversité taxonomique (fig. 3). On présente ici les moyennes obtenues pour les techniques issues du génie végétal (fascines de pied de berges avec boutures, caissons végétalisés, berges végétalisées avec enrochement de pied de berge) et celles obtenues pour les berges en enrochement.

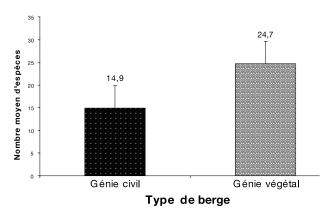


Fig. 3 - Histogramme des nombres moyens d'espèces végétales par rapport au type d'aménagement.

On constate une différence significative, de l'ordre d'un facteur 2, en faveur des aménagements issus du génie végétal. Ceux-ci accueillent en moyenne 29,1 espèces végétales alors que les aménagements issus du génie civil n'accueillent eux que 16,4 espèces végétales.

La nature du substrat des aménagements issus du génie civil (enrochements), peu propice à la colonisation végétale par manque de sol, explique cette différence.

## 6.2.2.2. Analyse comparative de la diversité floristique entre les différentes techniques d'aménagement et les berges naturelles

L'analyse comparative, réalisée entre l'ensemble des types de berges échantillonnés, est présentée sous forme d'un histogramme (fig. 4). Cette figure compare les nombres d'espèces végétales entre les différentes techniques d'aménagement (fascines de pied de berge avec boutures, caissons végétalisés, berges végétalisées avec enrochement de pied de berge et enrochement pur) et les berges naturelles. Les berges naturelles échantillonnées dans ce travail sont toutes des saulaies pionnières basses.

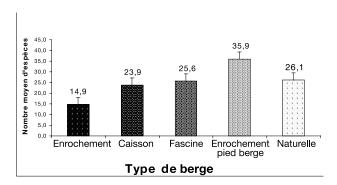


Fig. 4 - Nombre moyen d'espèces végétales par rapport à la technique d'aménagement de berge.

Des différences significatives apparaissent entre les berges en enrochement pur (14,9 espèces en moyenne) et le reste des techniques d'aménagement qui montrent un nombre d'espèces significativement plus élevé. Les ouvrages issus du génie végétal pur (fascine de saules et caisson végétalisé) ont un nombre d'espèces végétales équivalent (respectivement 25,6 et 23,9) et comparable avec celui des berges naturelles (26,1 espèces). Parmi les berges échantillonnées, la technique qui supporte le plus d'espèces végétales est l'enrochement de pied de berge avec haut de berge végétalisé, avec 35,9 espèces végétales en moyenne. Cette diversité légèrement supérieure s'explique par la présence en pied de berge d'un enrochement constituant une ouverture du milieu. Cette ouverture favorise la colonisation par de nouvelles espèces (rudérales, hélophytes, etc.) en plus de celles plantées ou semées.

Le protocole utilisé permet une analyse plus fine des différences de végétation en fonction de la hauteur de berge, la végétation étant structurée par le gradient hygrométrique et la fréquence d'inondation croissants vers le bas. Les

résultats sont présentés sous forme d'un histogramme comprenant les trois transects et les types de berges échantillonnées (fig. 5).

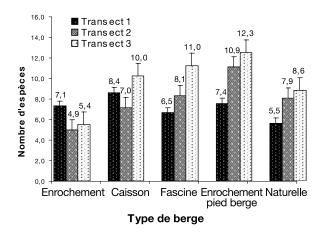


Fig. 5 - Nombre moyen d'espèces végétales présentes sur l'aménagement relativement à leur position sur la berge. Le transect 1 représente le pied de berge, le 2 la partie médiane et le transect 3 le haut de berge.

En ce qui concerne les berges aménagées, c'est pour les fascines que le nombre moyen d'espèces végétales est le plus faible en pied de berge. Cela s'explique par un taux de reprise élevé des fascines de saule installées en pied de berge couplé à des vitesses de croissance élevées. La constitution d'un couvert arbustif dense a pour conséquence d'homogénéiser les habitats représentés et de limiter la capacité d'accueil de nouvelles espèces végétales dans les strates inférieures. Pour les berges aménagées en enrochement et en enrochement de pied de berge avec un haut de berge végétalisé, la présence de zones pionnières en pied de berge limite le recouvrement des espèces arbustives. Les enrochements, situés à l'interface entre le milieu aquatique et les premières boutures, forment une ouverture qui constitue un second front de développement pour les espèces pionnières, colonisatrices néophytes et les hélophytes (Evette et Cavaillé 2011). La situation est comparable pour les caissons végétalisés qui sont généralement appuyés sur une base en enrochement ou en gabion (fig. 6). Cet enrochement de pied de berge au contact de l'eau constitue un nouvel habitat, différent de celui offert par la partie supérieure de la berge où les ligneux (majoritairement les saules) occupent une place prépondérante.

## Recueil d'expériences techniques - 6. Analyse comparative des diversités animales et végétales de différents types de berges aménagées et naturelles



Fig. 6 - Caisson végétalisé à Allinges sur le Pamphiot (Haute-Savoie - France).

On observe sur les ouvrages de type caisson végétalisé et ceux comprenant des enrochements de pied de berge : 1°) des espèces inféodées aux milieux humides comme, Juncus acutiflorus, Carex pseudocyperus, Phragmites australis ou Humulus lupulus ; 2°) des espèces prairiales comme Holcus mollis ; 3°) des espèces de lisière ou de sous-bois comme Ligustrum vulgare, Hedera helix, Lonicera xylosteum ou Crataegus monogyna ; 4°) des espèces rudérales Urtica dioica, Rubus sp, Tussilago farfara ; et même 5°) des ligneux des zones alluviales comme Populus nigra et Populus alba, espèces qui ne sont pas présentes sur les ouvrages purement végétaux en raison de la prédominance des saules.

Par ailleurs, sur les ouvrages mixtes avec enrochement de pied, la présence en haut de berge de ligneux à feuilles caduques permet la création d'une litière entre les enrochements et favorise la colonisation végétale par rapport aux berges constituées uniquement d'enrochements, où la création d'un substrat colonisable par les végétaux supérieur est beaucoup plus lente.

Enfin, les épisodes de sédimentation ont pour conséquence de combler les interstices entre les blocs et ainsi permettre la création d'un substrat limoneux propice à la colonisation par les espèces hélophytiques.

## 6.2.2.3. Analyse comparative de la diversité floristique entre les techniques issues du génie végétal et les berges naturelles.

Les résultats présentés ci-après retranscrivent le nombre moyen d'espèces végétales rencontré sur les aménagements issus du génie végétal et celui des berges naturelles (fig. 7). On observe un différentiel faible et non significatif entre ces deux moyennes, 24,7 espèces en moyenne pour les berges issues du génie végétal et 26,1 pour les berges naturelles.

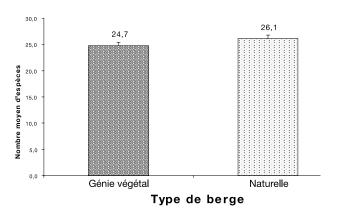


Fig. 7 - Histogramme du nombre moyen d'espèces végétales relativement au type de berge.

Ces résultats témoignent de la capacité des techniques de génie végétal et plus particulièrement des végétaux utilisés à s'implanter et à se développer facilitant également le recrutement de nouvelles espèces. Ce recrutement est essentiel pour l'aménagement, car il participe à son évolution et à sa complexification pour retrouver une composante dynamique propre aux écosystèmes naturels.

La faiblesse relative de la diversité végétale des berges naturelles observée ici s'explique par le type de berges échantillonnées. En effet, afin de se placer dans un contexte proche de celui du génie végétal, nous avons fait le choix de travailler sur des berges naturelles constituées de saulaies jeunes. Ces saulaies sont à un stade juvénile, et présentent donc une biodiversité relativement faible.

## 6.3. Les espèces exotiques envahissantes

## 6.3.1. Les berges de cours d'eau sont fortement colonisées par les espèces exotiques envahissantes

Outre les espèces inféodées aux milieux rivulaires, les berges de cours d'eau accueillent également les espèces opportunistes qui s'y installent et prolifèrent rapidement. L'augmentation de la fréquence des échanges anthropiques internationaux a permis le transport fortuit ou volontaire de nombreuses espèces à travers le monde. Certaines ont réussi à s'implanter dans ces nouveaux territoires, à s'y établir puis à proliférer, en provoquant des nuisances écologiques, économiques et sur la santé. Ces espèces sont appelées espèces exotiques envahissantes. Les scientifiques s'accordent actuellement à classer les invasions biologiques comme une des menaces majeures en terme d'érosion de la biodiversité locale (Thuiller 2007). Certains écosystèmes sont plus sensibles que d'autres à

l'invasion. C'est le cas des milieux perturbés comme les milieux rivulaires. Les berges de cours d'eau, en raison des dynamiques sédimentaires et des travaux d'endiguement, sont ainsi particulièrement affectées par les invasions biologiques. De plus, le cours d'eau fonctionne comme un vecteur de propagation, entraînant des semences et des fragments de rhizomes, multipliant ainsi les foyers d'invasion.

#### 6.3.2. Résultats et discussion

Sur les ouvrages de génie végétal, si des espèces exotiques envahissantes sont parfois présentes, aucune n'apparaît parmi les dix espèces les plus abondantes où l'on trouve principalement les saules et quelques graminées. Par contre, parmi les dix espèces les plus abondantes sur les enrochements, trois sont considérées comme exotiques envahissantes au moins potentiellement en France et en Suisse: Buddleja davidii, Robinia pseudoacacia et Parthenocissus inserta.



Fig. 8 - Enrochement colonisé par la renouée du Japon (Reynoutria japonica) à St-Geoire-en-Valdaine sur l'Ainan (Isère - France).

Le nombre d'espèces exotiques envahissantes recensées sur les différents types d'aménagements ne varie que très faiblement. On trouve entre 1,8 et 2,2 espèces exotiques envahissantes présentes en moyenne sur chaque type de berge aménagée. En revanche, il existe une différence significative entre les fréquences des espèces exotiques envahissantes (fig. 9). On constate ainsi que cette fréquence de rencontre est largement supérieure pour les aménagements issus du génie civil (42,5) que pour les aménagements issus du génie végétal (10) ainsi que pour les aménagement en enrochement de pied de berge et haut de berge végétalisé (11,3). La fréquence des espèces exotiques envahissantes sur les berges naturelles est sensiblement plus élevée (21,9). Ces résultats témoignent du fort potentiel invasif (capacité d'une espèce à dominer les communautés végétales du milieu) des plantes exotiques considérées. Ils rendent également compte de l'efficacité des techniques de génie végétal à permettre la colonisation rapide du milieu par les végétaux plantés.

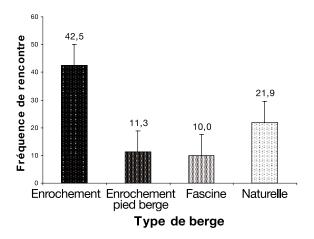


Fig. 9 - Histogramme des fréquences moyennes d'espèces exotiques envahissantes par rapport au type d'aménagement.

La présence d'espèces végétales exotiques envahissantes est souvent reliée à l'intensité des activités humaines. Les ouvrages étudiés ayant tous nécessité la réalisation de travaux, on peut supposer qu'ils ont tous été soumis à des expositions aux propagules (graines, rhizomes, boutures, etc.) équivalentes, ce qui expliquerait que tous les types d'ouvrages hébergent un nombre moyen de plantes exotiques envahissantes équivalent. En revanche, cette étude montre que les espèces exotiques envahissantes sont plus fréquentes sur les ouvrages issus du génie civil (enrochements) que sur les autres types d'ouvrage. Ce résultat peut s'expliquer par deux mécanismes. Les plantes exotiques envahissantes recensées sont caractérisées par une forte croissance qui leur donne un avantage compétitif dans les milieux pionniers. Les plantes exotiques envahissantes observées sur les ouvrages issus du génie civil (dénué initialement de toute végétation) ont ainsi trouvé un terrain propice pour exprimer leur potentiel invasif. Il est également démontré que l'abondance relative de ces plantes peut être expliquée par les interactions biotiques, notamment par les interactions de compétition. La présence d'espèces compétitrices sur les ouvrages de génie végétal - telles que les espèces du genre Salix dont la dynamique de croissance est forte - limite la vigueur et la propagation des espèces exotiques envahissantes présentes. Dans le cas des berges aménagées par des techniques de génie végétal, il apparaît que la forte densité de boutures de saules limite le développement des espèces exotiques envahissantes.

## 6.4. Analyse de la diversité de la macrofaune benthique

#### 6.4.1. Méthodologie

#### 6.4.1.1. Présentation des sites d'étude

La campagne d'hydrobiologie s'est déroulée au cours du mois d'octobre 2011 et a concerné 40 berges aménagées. Chacune d'entre elles a fait l'objet de prélèvements de macro-invertébrés benthiques. Comme pour la végétation, ces 40 échantillons sont répartis sur 5 types de berges : les enrochements, les enrochements de pied de berge, les caissons et les fascines. Les berges naturelles constituent le cinquième type de berge étudié et sert de référence. Les stations concernées sont également localisées en zone piémontaise de l'Arc alpin plus précisément en région Rhône-Alpes et en Suisse occidentale.

#### 6.4.1.2. Relevés des macro-invertébrés benthiques

Le protocole d'échantillonnage s'attache à décrire les différents habitats présents et les prélèvements sont réalisés uniquement dans la partie supérieure immergée de la berge. Les prélèvements ont été réalisés avec un surber de 1/20 de m² et de vide de maille de 500 µm.

#### 6.4.2. Résultats et discussions

Les résultats présents dans la figure 10 traduisent des différences en termes de nombres de taxons sur les différents types d'aménagements.

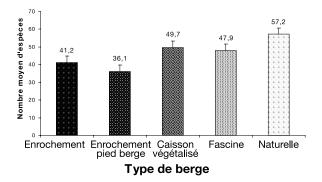


Fig. 10 - Nombre moyen de taxons relativement au type de berge échantillonnée.

En premier lieu, on note que les aménagements avec les diversités taxonomiques les plus faibles sont les enrochements et enrochements de pied de berge. Ce résultat peut s'expliquer par l'utilisation de structures purement minérales à l'interface entre le milieu aérien et aquatique. En effet, les blocs utilisés, de par leurs dimensions et leur nature minérale, n'offrent que peu de caches, aspé-

rités ou éléments nutritifs indispensables à l'implantation des populations de macro-invertébrés benthiques. On constate ici des différences significatives entre les enrochements (36,1 taxons en moyenne) et les aménagements en technique de génie végétal (47,9 pour les fascines et 49,7 pour les caissons). Ceci tend à confirmer que les matériaux utilisés pour l'aménagement des berges influencent de manière significative la qualité des habitats rivulaires et par conséquent les populations de macroinvertébrés. Ici, ce sont les végétaux utilisés (saules, bois mort, etc.) et leur développement racinaire qui influencent de manière positive le nombre moyen de taxons. Le nombre de taxons est le plus élevé sur les berges naturelles avec 57,2 taxons en moyenne. Ce résultat, bien que faiblement significatif, témoigne de l'impact des travaux d'aménagement sur les communautés benthiques. Les perturbations anthropiques fortes sont, d'une manière générale, dommageables pour les communautés benthiques en zone rivulaire.

## 6.5. Analyse de la diversité entomologique

#### 6.5.1. Méthodologie

#### 6.5.1.1. Présentation des sites d'étude

Le travail d'analyse de l'entomofaune s'est déroulé sur l'année 2009 et a concerné 15 aménagements de berges localisés en Rhône-Alpes. Les différentes techniques sélectionnées sont :

- berges purement minérales : ouvrages en enrochement (5 ouvrages);
- berges végétalisées avec enrochement de pied de berge et haut de berge végétalisé : ouvrages mixtes associant techniques minérales et végétales (5 ouvrages);
- berges entièrement végétalisées : ouvrages constitués de fascines de saule en pied de berge avec bouturage (5 ouvrages).

#### 6.5.1.2. Relevés entomologiques

L'analyse s'est focalisée sur un ordre d'insecte : les coléoptères. La pertinence du choix des coléoptères en tant que bio-indicateur de la diversité floristique, de l'intégrité des processus hydromorphologiques et des habitats rivulaires a été maintes fois démontrée (Boscaini et al. 2000). La diversité taxonomique des coléoptères constitue un bon indicateur de la diversité des habitats représentés. L'ordre des coléoptères présente une grande variabilité morphologique qui témoigne d'une variabilité importante dans les régimes trophiques et fonctionnels (détritivores, phytophages, pollinophages, prédateurs carnivores, pollinisateurs, décomposeurs). Cette grande diversité leur permet d'occuper des milieux très variés, et notamment, pour certains d'entre eux, d'être tolérants aux régimes de perturbation des habitats rivulaires (Van Looy et al. 2005).

L'échantillonnage des coléoptères aériens est basé sur un trait comportemental répandu chez les insectes : leur attirance pour le jaune. Beaucoup d'insectes volants, principalement les ordres des hémiptères, coléoptères et hyménoptères, sont attirés par la couleur jaune. L'échantillonnage a donc été réalisé grâce à des pièges type « cuvette jaune » couramment utilisés pour la détection des ravageurs et la protection des cultures (fig. 11). Deux pièges jaunes Flora<sup>®</sup> (Hébinger 1994) furent installés sur chaque site, sur le transect n° 2 (la partie médiane des berges).

6.5.2. Résultats et discussions

Le nombre moyen de genres de coléoptères aériens circulants sont présentés sur la figure 12. Ils sont répartis en fonction du type d'aménagement. Les aménagements issus des techniques de génie végétal comptent en moyenne 12,3 genres de coléoptères différents, 7,2 pour les aménagements en enrochement de pied de berge et seulement 3 pour ceux issus des techniques d'enrochement.

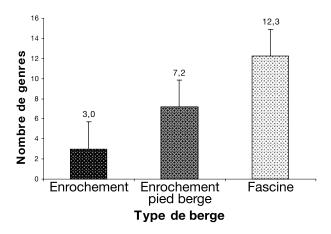


Fig. 12 - Histogramme du nombre moyen de genres de coléoptères sur chaque type d'aménagement (Cavaillé et al. 2010).

D'une manière générale, les populations de coléoptères et notamment les populations de carabes, sont sensibles à la structure de la végétation et à l'hétérogénéité des habitats.

En milieu rivulaire, les niveaux élevés de diversité spécifique constatés sont essentiellement expliqués par une diversité importante des habitats représentés (Tews et al. 2004). Cette hétérogénéité est entretenue par les épisodes hydrologiques, notamment les crues, et par leur capacité à renouveler les mosaïques d'habitats. Des travaux témoignent de l'influence de l'intensité de la crue et affirment que les crues de petite et moyenne tailles ont une



Fig. 11 - Pièges « cuvette jaune » Flora®.



Fig. 13 - Apoderus coryli.

## Recueil d'expériences techniques - 6. Analyse comparative des diversités animales et végétales de différents types de berges aménagées et naturelles

variabilité spatiale plus importante, créant ainsi plus d'hétérogénéité sur la berge (Helfield et al. 2007). En effet, les dégâts provoqués par une crue catastrophique ont pour conséquence de mettre le milieu à nu. Ceux provoqués par une crue de moindre ampleur engendrent une simple destructuration du milieu et ainsi une certaine hétérogénéité des habitats.

Les espèces utilisées dans les différentes techniques de génie végétal jouent un rôle important dans la diversité de l'entomofaune. Ainsi, la fascine de saule couplée au lit de plants et plançons permet la production d'une quantité importante de branches et de ramilles, notamment de saules. Or, le genre Salix dans son ensemble

constitue une source importante en nectar et pollen qui a pour avantage d'arriver très tôt dans l'année (févrieravril), au moment où ces ressources sont rares et difficiles à obtenir. Cette source de nourriture a pour effet d'attirer de nombreux insectes qui peuvent, à terme, s'installer de manière durable dans les saulaies. Il a par exemple été montré que 5 espèces de saules pouvaient abriter à elles seules 450 espèces d'insectes (Sommerville 1992).

Les saulaies reconstituées dans le cadre des aménagements de berges par des techniques de génie végétal présentent une biomasse élevée, ce qui explique une diversité plus importante en coléoptères observée sur les ouvrages issus du génie végétal par rapport à ceux comportant de l'enrochement.

#### 6.6. Conclusion

Cette étude a pour objectif finalisé de fournir aux gestionnaires des éléments de décision afin que soient pris en compte, dès la phase de projet, des préceptes concrets en termes de biodiversité spécifique potentielle de l'ouvrage futur. On peut avancer quelques recommandations, à l'endroit des gestionnaires, qui sont susceptibles d'impacter localement les ripisylves. Premièrement, il apparaît préférable de végétaliser les berges plutôt que de laisser faire une colonisation spontanée. En effet, cette dernière est lente sur les aménagements en enrochement purs et favorise l'avènement des espèces exotiques envahissantes. De plus, le développement des végétaux permet la création de potentielles caches, habitats et zones d'alimentation indispensables aux organismes affiliés aux milieux rivulaires (terrestres et aquatiques). Il est fortement recommandé de favoriser le développement d'habitats multiples et différenciés. La présence de plusieurs strates de végétation (herbacée, arbustive, arborée) est un bon moyen de diversifier les habitats. Il est également possible de favoriser le recrutement d'espèces hélophytiques soit en les implantant au départ (fascines d'hélophyte) soit en

réalisant des pieds de berge appropriés, dont le recouvrement arbustif et arboré serait faible à l'interface immédiate entre le cours d'eau et la berge et qui comporterait des zones de sédimentation propice à la formation d'un substrat colonisable. Les aménagements de type mixte comportant les enrochements en pied de berge sont un exemple de ces zones d'interfaces. L'utilisation de salicacées est également intéressante. Cette famille comprend le genre *Salix* dont les propriétés morpho-mécaniques (réseau racinaire développé, port arbustif, souplesse du bois) et physiologiques (croissance rapide, production importante de nectar et pollen) favorisent et facilitent la lutte contre l'érosion et le retour à un état de naturalité avancé.

Il faut néanmoins garder à l'esprit que toute stabilisation de berge va empêcher toute nouvelle érosion et donc bloquer la dynamique naturelle imposée par les régimes de perturbation. La succession végétale va ainsi se dérouler sans retour au stade pionnnier (Deymier et al. 1995; AFNOR 2005; Benoît et al. 2008; Roman 2009).