



Quelles techniques pour végétaliser des enrochements de berges de cours d'eau ?

A. Evette, P. Cavaillé, F. Baz, P.A. Frossard, P. Raymond

► To cite this version:

A. Evette, P. Cavaillé, F. Baz, P.A. Frossard, P. Raymond. Quelles techniques pour végétaliser des enrochements de berges de cours d'eau ?. Sciences Eaux & Territoires, 2015, Hors série (19), 7 p. 10.14758/SET-REVUE.2015.HS.02 . hal-01140257

HAL Id: hal-01140257

<https://hal.science/hal-01140257>

Submitted on 9 Apr 2015

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

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

Sciences Eaux & Territoires

La revue d'Irstea

Article hors-série numéro 19

Quelles techniques pour végétaliser des enrochements de berges de cours d'eau ?

André EVETTE, Frank BAZ,
Paul CAVAILLÉ,
Pierre-André FROSSARD
Pierre RAYMOND

www.set-revue.fr
**Sciences Eaux
& Territoires**

La revue d'Irstea



Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea

Article hors-série numéro 19 – 2015

Directeur de la publication : Jean-Marc Bournigal

Directeur éditorial : Nicolas de Menthiera

Comité éditorial : Daniel Arnault, Louis-Joseph Brossollet, Denis Cassard, Camille Cédra, Thomas Curt, Alain Dutartre, André Evette, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Bruno Héroult, Ghislain Huyghe, Alette Maillard, Emmanuelle Jannès-Ober, Cédric Laize, Jean-Michel Laya, André Le Bozec, Christel Prudhomme, Christian Romaneix pour le CINOV TEN et Michel Vallance.

Rédactrice en chef : Caroline Martin

Secrétariat de rédaction et mise en page : Valérie Pagneux

Infographie : Françoise Peyriguer

Conception de la maquette : CBat

Contact édition et administration : Irstea-DP2VIST

1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030

92761 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – Fax : 01 40 96 61 64

E-mail : set-revue@irstea.fr

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution

N°ISSN : 2109-3016

Photo de couverture : © S. De Danielli (Irstea)



Quelles techniques pour végétaliser des enrochements de berges de cours d'eau ?

Les enrochements de berge de rivière constituent un pis-aller sur le plan environnemental et le génie végétal lui est préférable. Toutefois, lorsque les contraintes imposent d'avoir recours à des enrochements, il est préférable de les végétaliser pour des raisons paysagères, écologiques et parfois mécaniques. De même pour les enrochements existants, s'il n'est pas possible de les enlever ou de les remplacer par des techniques végétales, il est préférable de les végétaliser. Un rappel des différentes techniques de végétalisation ainsi que des résultats d'expérimentation nous sont présentés ici.

La protection des berges et les enrochements

Il est important de laisser aux cours d'eau leur capacité de divagation tant sur les plans hydrogéomorphologique qu'écologique. Pour leur bon fonctionnement, et notamment pour le maintien de leur biodiversité et de leur capacité de transport solide, les cours d'eau doivent rester libres de se déplacer sur les plans verticaux et horizontaux. Toutefois, lorsque des enjeux liés aux biens et aux personnes doivent être protégés de l'érosion induite par les crues, il apparaît nécessaire de protéger les berges.

Dans les siècles qui nous précèdent et de façon plus accélérée au vingtième siècle, les cours d'eau ont fait l'objet de nombreux travaux de rectification et d'endiguement. Dans ce cadre, les berges ont été très largement protégées à l'aide de maçonneries ou d'enrochements. Il existe donc aujourd'hui un important « parc » de berges enrochées. Ces enrochements ne correspondent pas aux structures naturelles des berges des rivières de plaine et posent un certain nombre de problèmes pour le bon fonctionnement du cours d'eau, notamment en ce qui concerne la biodiversité. Ces enrochements constituent des milieux minéraux qui peuvent atteindre des températures élevées en été. Et s'ils peuvent accueillir certaines espèces rupicoles, ils ne correspondent pas aux milieux naturellement en place sur les berges. Alors

que les berges naturelles de cours d'eau avec leur ripisylve, constituent des zones très riches en biodiversité, les berges enrochées sont beaucoup plus pauvres. Ces dernières ne présentent donc généralement pas d'intérêt particulier sur les plans floristique et faunistique. De plus, les enrochements bruts s'avèrent être des zones préférentielles de développement des espèces invasives comme la renouée du japon (*Reynoutria japonica*) ou le buddleia (*Buddleja davidii*). Et la présence d'enrochements bruts constitue souvent des « verrues » sur le plan paysager.

Les rôles majeurs de support de biodiversité, de corridor écologique, de rempart contre les espèces 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...), de l'espace disponible, des coûts engendrés ou des contraintes hydrauliques (seuils...). Aussi, la végétalisation d'enrochements présente un intérêt certain pour traiter l'énorme parc d'enrochements existant.

Pourquoi végétaliser des enrochements ?

Il est important de rappeler que la décision de végétaliser les enrochements doit être le résultat d'une réflexion *in situ* et d'un cadrage technique, afin de tirer le meilleur parti des avantages non négligeables des enrochements végétalisés par rapport aux enrochements secs :

- sur le plan écologique, ils permettent le retour d'une certaine biodiversité (plantes, entomofaune, avifaune...), le maintien d'une partie des fonctions de corridor de la ripisylve et un moindre développement des espèces exotiques envahissantes. Après quelques années, la litière amenée par les ligneux contribue à l'apparition d'autres espèces animales et végétales ;
- sur le plan paysager, la végétalisation des enrochements permet de leur donner une apparence plus naturelle et de mieux les intégrer à leur environnement ;
- sur le plan mécanique, la présence de végétation contribue généralement à la résistance mécanique de l'ouvrage en ralentissant la vitesse du courant à proximité de la berge et en fixant le sol présent sur ou entre les enrochements. La végétation permet également de piéger les sédiments. La présence des tiges et des racines qui s'agencent autour des blocs contribue également à renforcer la structure de l'enrochement. À noter que si la végétation stabilise généralement les enrochements, elle apparaît comme un facteur déstructurant pour les ouvrages maçonnés.

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, c'est aussi le cas dans les zones de plaine très urbanisées ou dans certaines grandes plaines céréalières. Or, lorsque les berges sont enrochées, l'absence de végétation donc de couvert, entraîne une discontinuité des corridors biologiques. En plus, 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 techniques d'enrochements végétalisés

Les techniques d'enrochements diffèrent notamment par la granulométrie, l'arrangement et l'épaisseur de blocs. Dans tous les cas, il est possible de procéder à la végétalisation de ces enrochements, soit au fur et à mesure de leur mise en place, soit *a posteriori*.

Un certain nombre de recommandations générales sont décrites dans la littérature. Une attention particulière doit être portée à protéger l'écorce des boutures. En effet, la partie vivante de la bouture se situe juste sous l'écorce et est facilement abîmée par les frottements ou l'écrasement au contact du rocher. Les boutures ou pieux doivent être installés perpendiculairement à la berge, ils doivent être suffisamment longs de manière à s'enfoncer dans la terre derrière les enrochements. Ces boutures vont donc traverser le géotextile ou la couche de transition qui vont éviter l'érosion interne de l'enrochement par arrachement des matériaux fins situés sous les blocs. D'une manière générale, quand 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. Dans la mesure du possible et au moins pour les boutures situées sur la partie inférieure de la berge, on cherchera à ce que ces dernières atteignent le niveau moyen des eaux. Les enrochements constituent en effet des milieux particulièrement drainants, où la chaleur est accumulée par les roches exposées au soleil et où les risques de sécheresse sont importants.

On peut distinguer deux techniques principales de végétalisation d'enrochements : la mise en place de boutures dans les interstices et l'utilisation de lits de plants et plançons.

La première se fait soit à l'avancement (pose de blocs, mise en place de terre, puis de boutures), soit après la pose des enrochements. Une fois les enrochements mis en place, de la terre ou des sédiments fins sont mis en place dans les interstices. Puis, les boutures sont enfoncées après avoir fait un pré-trou à l'aide d'un fer à béton, d'une barre à mine ou d'un outil approprié (foreuse...). Les boutures doivent être enfoncées suffisamment pour éviter d'être complètement déchaussées lorsque les premières crues vont emmener les matériaux des joints. Cette contrainte peut être diminuée par la mise en place d'un géotextile.

La pose de lits de plants et plançons peut se faire à l'avancement, auquel cas on pose une première couche d'enrochements, puis les végétaux sur lesquels on verse des matériaux terreux, avant de reposer la couche d'enrochements suivante. Il est aussi parfois possible d'installer des lits ou paquets de branches *a posteriori* en soulevant les blocs avec une pelle mécanique et en intercalant les végétaux, cette méthode réclame toutefois des conditions et une technicité particulières.

À noter une technique qui préconise d'enlever certains blocs et les remplacer par des sacs de géotextile contenant de la terre et d'où dépassent des plants ou boutures. Une fois les sacs mis en place, des blocs sont reposés au-dessus pour protéger ce sac de terre, en prenant soin de ne pas abîmer les boutures et de les laisser dépasser.

Une autre méthode consiste à recouvrir la totalité des enrochements d'une couche de terre de plusieurs dizaines de centimètres, puis la végétaliser avec des techniques de génie végétal classiques telles qu'ensemencement, plantation, bouturages... Une attention particulière doit cependant être apportée aux risques de dessèchement des plants et boutures lié à l'enrochement sous-jacent qui peut fonctionner comme un drain.

Dans les techniques mixtes associant enrochements de pied de berge et génie végétal sur la partie supérieure, il peut également être avantageux de végétaliser l'enrochement.

Enfin, comme dans toute technique végétale, il est préférable de diversifier les espèces utilisées. Ainsi, il est recommandé d'ajouter des plants d'autres genres ligneux en complément des boutures de différentes espèces de saules. Cette diversification constitue également une sécurité supplémentaire dans la reprise des végétaux, quand on est en présence de conditions de croissances difficiles (substrat grossier et filtrant).

À ce jour, la revégétalisation d'enrochements n'est que très peu utilisée en France et en Suisse. Seules quelques

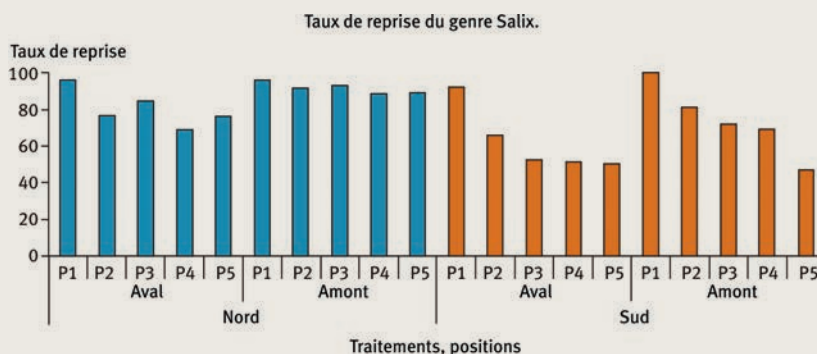
❶ Vue aérienne de l'aménagement avant les travaux, depuis l'amont du seuil (septembre 2010). L'impact paysager et la discontinuité du corridor alluvial apparaissent clairement.



❷ Vue aérienne de l'aménagement avant les travaux, depuis l'aval du seuil (septembre 2011) : l'impact de la sécheresse estivale sur la reprise des végétaux en rive d'exposition sud (berge de gauche) est visible.



❸ Taux de reprise des boutures de saules sur les différentes placettes, un taux d'échec de 30 à 50 % tel qu'il est observé sur la partie sud de l'aménagement est fréquent (Schiechtel, 1996). À noter que la technique de forage de l'enrochement avec mise en place de pieux permet un taux de reprise proche de 100 %.



réalisations ponctuelles existent sur ces territoires. Il y a 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, essentiellement minérales et dépourvues de végétation.

La végétalisation d'enrochements : le cas des enrochements du seuil de Marignier sur l'Arve

De fortes pressions anthropiques (digues de protection, remblai de la voie ferrée, autoroute...) ont contribué à « chenaliser » l'Arve sur pratiquement 70 % de son linéaire (107 km). Ces modifications importantes du fonctionnement morphologique de la rivière ont nécessité la mise en place d'un grand nombre d'ouvrages de protections et de corrections (seuils) à base d'enrochements. Ces enrochements totalisent un linéaire de 140 km.

Végétalisation d'enrochements existants

Ce projet réalisé pendant l'hiver 2010/2011 a consisté à mettre en œuvre différents procédés de végétalisation d'enrochements sur plusieurs parcelles expérimentales (photos ❶ et ❷).

Il suivait les objectifs suivants :

- tester, évaluer et comparer différentes techniques de végétalisation d'enrochements ;
- favoriser la biodiversité et reconstitution partielle du corridor biologique ;
- contribuer à limiter les plantes exotiques envahissantes ;
- augmenter l'intégration paysagère.

Le linéaire concerné par le projet est constitué de 200 mètres d'enrochements sur chaque berge, elles-mêmes larges de 8 mètres. L'expérimentation porte sur un total de 3 200 m². Les deux berges ont été traitées de manière identique avec cinq techniques de végétalisation différentes. La reprise végétative a été suivie afin d'évaluer la pertinence de chaque technique.

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

Les espèces bouturées sont des saules (*Salix sp*) et de la myricaire d'Allemagne (*Myricaria germanica*) prélevés localement. Les espèces de saule mises en place par bouturage sont :

- *Salix eleagnos* (saule drapé),
- *Salix purpurea* (saule pourpre),
- *Salix daphnoides* (saule pruineux),
- *Salix triandra* (saule à trois étamines).

Et pour les pieux, seul *Salix daphnoides* a été utilisé pour des raisons de disponibilité dans les dimensions souhaitées. Des plants d'autres espèces ligneuses ont été mis en place en haut de berge, par simple plantation.

Dans le choix des espèces utilisées pour la végétalisation d'enrochements, il est important de s'assurer de leur tolérance à des substrats grossiers et filtrants.

Les différentes techniques utilisées

Cinq techniques différentes ont été testées, chaque technique a été testée deux fois sur chaque berge (figure ❸).

Placette 1 : forage de l'enrochement

Des forages ont été effectués à 2 mètres de profondeur (entre les interstices), 1 forage par 4 m² (diamètre 10 cm) dans lequel ont été mis en place des pieux vivants de *Salix daphnoides* de plus de 3 mètres. De la terre liquide a été injectée autour du pieu (afin de colmater le forage). Cette terre était composée d'éléments grossiers avec une présence significative de sable, mais contenait également des limons et argiles pour la tenue de la terre et la capacité de rétention en eau. Cette technique est très chère (tableau 1), mais permet un taux de reprise proche de 100 %.

Placette 2 : garnissage des vides à la lance

Les vides sont comblés par projection de terre liquide dans les interstices, 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. Les taux de reprise sont assez bons (de 66 à 91 %), notamment en berges exposées sud.

Placette 3 : garnissage des vides à la lance + géotextile coco tissé

Cette placette est identique à la placette 2 en rajoutant un géotextile coco de fort grammage fixé à l'aide de clous et de fil de fer. Les taux de reprise sont du même ordre que sur la parcelle 2, on n'observe pas d'effet net du géotextile.

Placette 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. Les taux de reprise vont de 51 à 89 %.

Placette 5 : placage à la pelle mécanique + géotextile coco tissé

Cette placette est identique à la placette 4 en rajoutant un géotextile coco de fort grammage, fixé à l'aide de clous et de fil de fer.

La création d'enrochements végétalisés à l'avancement

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 surmontée 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 2,50 m a été mis en place tout les 2 m². Après quoi, les blocs supérieurs étaient mis en place et recouverts de terre. Un ensemencement hydraulique de toute la zone a également été réalisé (photos 3 et 4).

L'exemple de la rivière Columbia

(Province de Colombie britannique, Canada)

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

Les travaux réalisés sur la rivière Columbia en Colombie britannique ont été réalisés sur un long linéaire avec des techniques originales.

1 Coût détaillé des différentes techniques de végétalisation d'enrochements existants.

	Technique utilisée	Coût au m ²
Placette 1	Forage, injection de « coulis terreux », mise en place de pieux vivants, ensemencement en 2 passes et pose d'un géotextile coco	47 €
Placette 2	Remplissage des interstices, placage et recouvrement de terre, mise en place de boutures (3/m ²) et ensemencement en 2 passes	21 €
Placette 3	Remplissage des interstices, placage et recouvrement de terre, mise en place de boutures (3/m ²), ensemencement en 2 passes et pose d'un géotextile coco	31 €
Placette 4	Placage et recouvrement de terre, mise en place de boutures (3/m ²) et ensemencement en 2 passes	17 €
Placette 5	Placage et recouvrement de terre, mise en place de boutures (3/m ²) et ensemencement en 2 passes et pose d'un géotextile coco	27 €

3 Enrochement végétalisé à l'avancement, à sa mise en place en février 2011.



© A. Evette (Irstea)

4 Enrochement végétalisé à l'avancement en septembre 2011 : une crue a érodé une partie de la terre.



© A. Evette (Irstea)

⑤ À gauche, vue de l'ouvrage au moment des travaux (2006).
 ⑥ Au centre, vue de l'ouvrage quatre ans après (2010).
 ⑦ À droite, vue de l'ouvrage sept ans après (2013).
 À noter un grillage de protection contre les castors qui peuvent causer des dégâts importants sur les boutures et qui est resté en place cinq ans avant d'être enlevé.



© Pierre Raymond Terra Erosion Control Ltd

Ainsi, trois techniques d'enrochements végétalisés ont été mises en place sur un linéaire de 960 m sur la rivière Columbia, dans le cadre d'un projet de réhabilitation de berge sur un site industriel. La berge est exposée à l'est.

Les espèces bouturées sont les suivantes :

- *Salix bebbiana*,
- *Salix scouleriana*,
- *Salix exigua*,
- *Salix lasiandra*,
- *Populus balsamifera ssp. trichocarpa*,
- *Cornus sericea*.

Elles ont toutes été prélevées localement.

La création d'enrochements végétalisés à l'avancement

La première technique utilise des couches de lits de plançons mises en place sur de grandes longueurs. Sur un premier lit d'enrochements protégé par une couche de transition, une tranchée est excavée et un géotextile déroulé. Puis, un lit de plançons est mis en place (20 boutures/m linéaire) et recouvert de terre végétale. 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, ce qui favorise la reprise des boutures. Les taux de reprise (estimés visuellement) durant la première année étaient 93 %. Après la septième année, ils se sont stabilisés à approximativement 63 %, notamment en raison de la sélection naturelle dans la compétition pour l'espace (loi d'auto-éclaircie) (photos ⑤, ⑥ et ⑦).

La deuxième technique utilise des tubes de plastique (normalement utilisés comme drain) pour protéger les boutures lors de la pose des enrochements ; trois boutures sont placées dans chaque tube qui sont posés deux par deux. Les tubes servent aussi à conduire l'écoulement des eaux météoriques vers les racines. À noter que les tubes sont coupés sur leur longueur avant l'installation, pour permettre la croissance en diamètre. Il est plutôt conseillé de se servir de tubes de carton épais (ou tubes de coffrage cartonnés qui sont biodégradables). Les taux de reprise (estimation visuelle) durant la première année étaient de 60 % ; après la septième année, elle était réduite à approximativement 50 %, partiellement en rai-

son de la sélection naturelle dans la compétition pour l'espace, mais aussi à une inondation immédiatement après l'installation qui a submergé les boutures avant même leur croissance initiale.

Végétalisation d'enrochements existants

La troisième technique est utilisée sur des berges existantes constituées de gravier grossier, cailloux et galets. Elle consiste à utiliser une pelle mécanique pour créer une ouverture dans la berge et y insérer les boutures par paquets avec une densité de 20 boutures par mètre linéaire (photo ⑧). Les taux de reprise (estimation visuelle) durant la première année étaient de 85 % ; après la septième année, ils ont chuté à 60 % pour les mêmes raisons de compétition pour l'espace, précédemment évoquées. Cette technique peut également être utilisée avec des berges constituées de blocs de plus gros diamètre.

Il est à noter qu'un amendement du sol a été ajouté pour les trois techniques utilisées. Cet amendement est composé d'un engrais biologique 4NPK accompagné, de mycorhizes pionnières, de tourbe et d'un complexe d'acide humique. Cet amendement a pour objectif de préserver l'humidité, favoriser la croissance des plants et restaurer le fonctionnement biologique des sols dégradés.

Conclusion

L'importance du parc d'enrochements bruts existant pose la question de son maintien, son remplacement par des techniques végétales ou de sa végétalisation.

Les résultats des travaux présentés ci-dessus permettent notamment de proposer des techniques pour la végétalisation d'enrochements existants, dans les cas où la suppression pure et simple des protections de berges apparaît impossible, en raison des contextes locaux (espace disponible, contraintes mécaniques, enjeux à protéger, coûts). Parmi les techniques testées sur l'Arve, le simple recouvrement par de la terre associé à un ensemencement et bouturage est la moins coûteuse. L'effet bénéfique du géotextile ne ressort pas clairement de cette expérimentation, même si ce dernier est connu pour améliorer les conditions de milieu et retenir le sol les premières années, avant d'être remplacé par les plantes en croissance. La technique de forage et plantation de plançons est très chère, mais permet des taux de reprise très élevés.

© Pierre Raymond Terra Erosion Control Ltd



③ Insertion de boutures dans des berges composées de gravier grossier, cailloux et galets. À gauche, réalisation au printemps 2006 ; au centre et à droite, situation en août 2014.

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, il est préférable de les végétaliser. En effet, ils gagnent ainsi sur les plans de la résistance mécanique, 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. La végétalisation d'enrochements permet également de limiter le développement des plantes invasives (buddleia, renouées...) qui, faute de concurrence, ont tendance à proliférer sur les enrochements bruts.

Rappelons que l'intention des auteurs n'est pas de promouvoir les enrochements végétalisés et encore moins les enrochements bruts. Simplement, si l'on est contraint d'avoir recours à des enrochements, il est préférable de les végétaliser pour des raisons paysagères, écologiques et parfois mécaniques.

Sur une berge de rivière et sur les plans écologique et géomorphologique, le mieux est de ne pas intervenir. Si une protection de berge est cependant nécessaire, on étudiera d'abord la possibilité d'utiliser une technique végétale. Si cette dernière n'est pas adaptée, on s'orientera vers une technique mixte. Les techniques en enrochement ne doivent être retenues que si les solutions précédentes ne peuvent être appliquées.

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. Toutefois, les enrochements végétalisés correspondent à des modèles naturels sur certains torrents à forte pente. Les techniques d'enrochements végétalisés peuvent ainsi se justifier dans ce cas, ou lorsque les contraintes mécaniques dépassent les capacités de résistance du génie végétal. ■

Remerciements

Les expérimentations et le travail qui ont permis de conduire à la rédaction de cet article ont bénéficié de l'appui financier du programmes de recherche Interreg IVA France-Suisse Géni'Alp et du conseil général de Haute-Savoie.

Les auteurs

André EVETTE et Paul CAVAILLÉ

Irstea, UR EMGR, Écosystèmes montagnards
2 rue de la Papeterie – BP 76
F-38402 St-Martin-d'Hères – France
✉ andre.evette@irstea.fr
✉ paul.cavaille@irstea.fr

Franck BAZ

Syndicat mixte d'aménagement de l'Arve
et de ses abords
300 chemin des prés moulins
F-74800 Saint-Pierre-en-Faucigny – France
✉ fbaz@sm3a.com

Pierre-André FROSSARD

Hepia Genève – Filière Gestion de la nature Rte
de Presinge 150 – CH-1254 Jussy – Suisse
✉ pierre-andre.frossard@hesge.ch

Pierre RAYMOND

Terra Erosion Control Ltd 2304 Silver King
Rd. Nelson – British Columbia – Canada
✉ pierre@terraerosion.com

EN SAVOIR PLUS...

- **BONIN, L., EVETTE, A., FROSSARD, P.-A., PRUNIER, P., ROMAN, D., VALÉ, N., 2013, *Génie végétal en rivière de montagne, Connaissances et retours d'expériences sur l'utilisation d'espèces et de techniques végétales : végétalisation de berges et ouvrage bois*, 321 p., <http://ouvrage.geni-alp.org/content/t%C3%A9l%C3%A9chargements>**
- **GRAY, D., SOTIR, R., 1996, *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization - A Practical Guide for Erosion Control*, New York, John Wiley and Sons, Inc., 378 p.**
- **SCHIECHTL, H.M., STERN, R., 1996, *Water Bioengineering Techniques for Watercourse, Bank and Shoreline Protection*, Blackwell Science, 186 p.**
- **THE CITY OF CALGARY, 2012, Design guidelines for erosion and flood control projects for streambank and riparian stability restoration, 233 p., http://www.calgary.ca/UEP/Water/Documents/Water-Documents/Design_Guidelines_For_Streambank_Stability_and_Riparian_Restoration.pdf**
- **ZEHL, H., 2007, *Génie biologique, manuel de construction*, Société suisse du génie biologique et Fédération européenne pour le génie biologique, 441 p.**