

# Sciences Eaux & Territoires

La revue d'Irstea

Article hors-série numéro 27

## Amélioration des méthodes de dimensionnement des ouvrages de génie végétal en berges de cours d'eau par une approche empirique

Solange LEBLOIS, André EVETTE, Alain RECKING et Gilles FAVIER


[www.set-revue.fr](http://www.set-revue.fr)

### Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea

Article hors-série numéro 27 – 2016

Directeur de la publication : Jean-Marc Bournigal

Directeur éditorial : Nicolas de Menthière

Comité éditorial : Daniel Arnault, Louis-Joseph Brossollet, Denis Cassard, Camille Cédra, Thomas Curt, Alain Dutartre, André Évette, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Bruno Héroult, Ghislain Huyghe, Emmanuelle Jannès-Ober, Cédric Laize, Jean-Michel Laya, André Le Bozec, Aliette Maillard, Thierry Mougey, Christel Prudhomme, Christian Romaneix pour le CINO V 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](mailto:set-revue@irstea.fr)

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution – N°ISSN : 2109-3016

Photo de couverture : © A. Evette



## Amélioration des méthodes de dimensionnement des ouvrages de génie végétal en berges de cours d'eau par une approche empirique

Entre terre et eau, les berges sont des milieux d'une grande richesse floristique et faunistique qui jouent un rôle majeur de corridors biologiques. Si l'érosion des berges est un phénomène naturel qui contribue à la dynamique et à la diversité des cours d'eau, des ouvrages de protections restent néanmoins nécessaires lorsque des enjeux humains doivent être protégés. La protection des berges par des ouvrages de génie végétal est une solution écologique et économique, mais la faiblesse des éléments de dimensionnement de ces techniques reste encore un frein à leur développement. En s'appuyant sur la littérature et sur l'analyse d'une vingtaine de sites, cet article s'intéresse ici à l'amélioration des méthodes de dimensionnement des ouvrages de génie végétal en berges de cours d'eau par une approche empirique.



Le génie végétal en berge de rivière permet de pallier les problèmes d'érosion, de glissement de terrain ou encore d'affouillement en utilisant des plantes vivantes et en imitant les modèles naturels.

Le succès d'un ouvrage est très lié à son contexte environnemental, qu'il s'agisse du climat, de la qualité du sol, de l'exposition, des variables hydrologiques et des autres paramètres stationnels. Ainsi le choix des espèces et des techniques doit être adapté à chaque situation. Ceci a pour conséquence une forte spécificité de chacun des ouvrages et une forte variabilité d'un ouvrage à un autre.

Le choix des protections de berges par des techniques végétales répond généralement à un savoir d'experts construit sur une approche empirique. En effet, les éléments de dimensionnement de ces ouvrages, notamment en fonction des contraintes hydrauliques qu'ils subissent, restent encore très fragmentaires. L'absence d'éléments de dimensionnement de ces techniques constitue l'un des principaux freins à leur développement.

L'amélioration des méthodes de dimensionnement des ouvrages de génie végétal peut être conduite par une approche empirique en confrontant les techniques utilisées par le passé avec les contraintes érosives qu'elles ont subies lors des crues. À l'heure actuelle, la contrainte tractrice est le paramètre le plus utilisé pour caractériser

la résistance des ouvrages de génie végétal face aux forces hydrauliques. La contrainte tractrice est la force tangentielle due à l'eau qui s'exerce par unité de surface du lit (ou des berges), en  $N/m^2$ . Pour autant, seul un faible nombre de mesures de ce paramètre a été trouvé dans la littérature en ce qui concerne les ouvrages de génie végétal, et l'évolution de ces valeurs au cours du temps (la résistance des ouvrages augmentant généralement avec le temps) n'a été que peu étudiée.

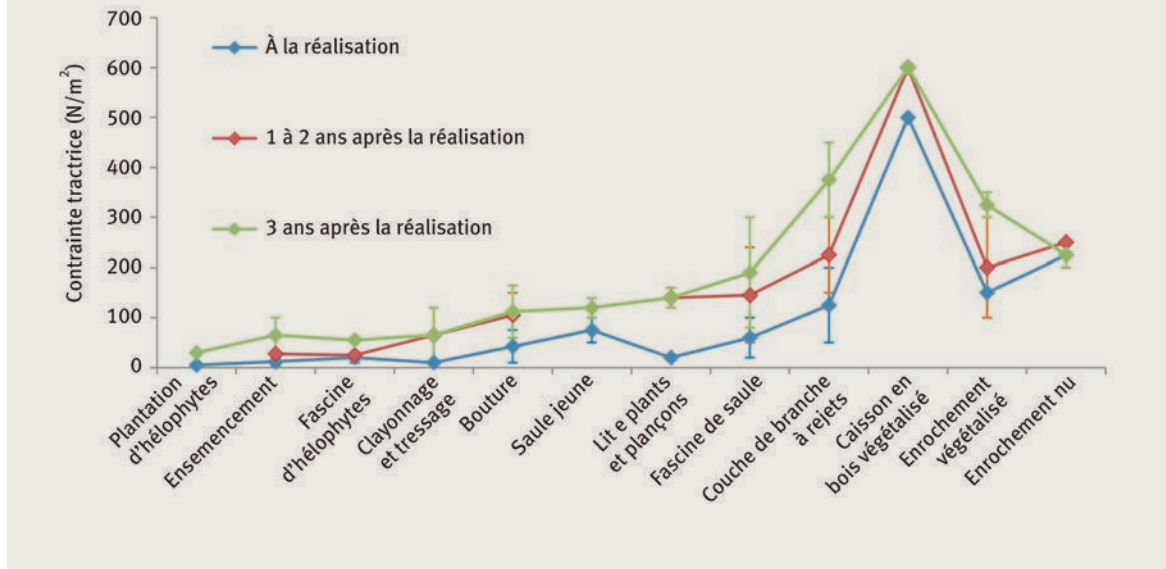
L'objectif de cet article est donc, dans un premier temps de faire le point sur les valeurs de résistances déjà publiées, puis dans un second temps d'en élargir le panel.

### État des connaissances

Des valeurs de contraintes tractrices sont disponibles dans la littérature, mais avec des incertitudes importantes qui limitent la portée de leur utilisation.

Les valeurs issues de la littérature sont rassemblées dans le graphique de la figure 1. Les carrés représentent la moyenne des valeurs trouvées dans la littérature pour chaque technique et les barres verticales délimitent les valeurs maximales et minimales observées. On peut constater sur le graphique que la résistance de l'ensemble des ouvrages issus du génie végétal augmente avec le temps. On voit bien que certaines

1 Évolution de la résistance des ouvrages de génie végétal avec le temps à partir de valeurs moyennes et visualisation de la dispersion des valeurs (les barres verticales délimitent les valeurs maximales et minimales observées).



méthodes sont moins adaptées à de fortes contraintes que d'autres. En haut de l'échelle, on retrouve par exemple les caissons en bois végétalisés et les couches de branches à rejets ; à l'inverse, les ensemencements et les plantations d'hélophytes ne pourront résister qu'à de plus faibles contraintes tractrices. On peut ici observer un manque de données et de valeurs, car ce graphique montre que les caissons peuvent résister à de bien plus importantes contraintes que les couches de branches à rejets, ce qui d'après les retours d'expérience n'est pas forcément le cas.

### Limites des valeurs issues de la littérature

Les ouvrages de génie végétal sont généralement moins résistants que les autres techniques (enrochements...) juste après leur construction, du fait qu'ils sont alors directement exposés aux crues sans que les végétaux n'aient pu développer leur appareil racinaire (stabilisation du sol) et caulinaire (ralentissement de l'eau, effet tapis). Mais dans de bonnes conditions, les ouvrages vont se développer, et la résistance de l'ouvrage de génie végétal tend à augmenter au fil des années, jusqu'à atteindre un maxima. Il est donc intéressant de connaître la résistance des ouvrages aux contraintes hydrauliques en fonction de leur âge. Ce repère temporel est parfois manquant pour les valeurs trouvées dans la littérature. À la vue des valeurs trouvées, on constate aussi que les connaissances sont faibles sur la résistance de ces ouvrages sur le plus long terme (au-delà de trois ans).

La très grande variété de techniques et la grande possibilité de variations sur chaque technique et chaque site rendent encore plus complexe le dimensionnement des ouvrages de génie végétal. Par exemple, on sait que de nombreux ouvrages possèdent des enrochements en pied de berge, qui en toute logique renforcent l'ouvrage.

Mais la présence ou non de ceux-ci, ainsi que leur hauteur ne sont pas précisées dans la littérature, ce qui peut mener à des valeurs de contrainte tractrice plus élevées que ce à quoi la seule partie végétale de l'ouvrage aurait pu résister.

Comme le confirme Gerstgraser (1998) dans son article, il existe de multiples valeurs, mais il est souvent complexe de connaître leur provenance, ou bien l'ancienneté de l'ouvrage correspondant. De plus, les valeurs ne sont souvent pas mesurées (très complexe) mais calculées.

Dans l'idéal, pour le dimensionnement, il s'agit de trouver une valeur limite à laquelle l'ouvrage cède. Dans les faits, ceci est compliqué car tant que l'ouvrage tient, on peut supposer qu'il aurait pu supporter une plus grande contrainte tractrice, et s'il cède, il est extrêmement complexe d'en déceler les causes ; causes qui ne sont probablement pas uniquement ou forcément dues à une contrainte tractrice trop forte comme (Oplatka, 1998) l'a déjà précisé dans ses travaux. On appelle dans la suite de l'article, valeurs limites, les valeurs maximales de contraintes pour lesquelles l'ouvrage a tenu, donc avant arrachement.

On remarque que seul un très faible nombre de contraintes tractrices a été calculé sur des ouvrages qui ont cédé. Et il est nécessaire d'insister sur le faible nombre de valeurs présentes dans la littérature qui limite fortement leur portée.

### Approche utilisée

L'approche utilisée est empirique et consiste au recueil d'observations sur la bonne tenue ou la destruction des ouvrages lors de crues importantes. Au travers de celle-ci, notre objectif est de définir de nouvelles valeurs limites de contraintes tractrices afin de compléter celles déjà présentes dans la littérature.

❶ Rupture d'une longrine sur un caisson végétalisé à cause du trop gros diamètre du tronc.



Un point important dans la démarche est de bien définir ce que l'on considère comme une rupture de l'ouvrage. Le choix a été fait de définir un ouvrage rompu comme un ouvrage qui a été endommagé fortement. À l'inverse, on dira que l'ouvrage a tenu s'il a permis de stopper l'érosion pour laquelle il a été mis en place, et que son rôle de protection de berge de rivière a donc été efficace. Par exemple, après quinze ans, une fascine aura évolué et ne sera plus présente sous la forme de fascine, mais plutôt d'un couvert peu dense arboré de saules. Même si la berge peut s'être légèrement déplacée au droit de l'ouvrage, on ne considère pas cela comme une rupture s'il n'y a pas de marque majeure d'érosion. On peut aussi citer l'exemple des caissons en bois végétalisés. Il arrive que des longrines (traverses en rondin posées parallèlement au cours d'eau) se dégradent avec le temps ou subissent des contraintes à cause de l'important diamètre atteint par les troncs des espèces plantées entre les étages du caisson (photo ❶). Ceci peut mener à la rupture partielle d'une longrine, mais on ne considèrera pas pour autant que l'ouvrage ait cédé.

La contrainte tractrice est une force par unité de surface parallèle à la paroi (lit ou berge de rivière) qui peut entraîner le départ de grains de sol, et donc une érosion. Une approche purement mécaniste aurait nécessité de calculer les contraintes exactes exercées au droit de chaque ouvrage. Ce type de calcul suppose une modélisation numérique complexe (au moins en deux dimensions) de chaque tronçon, et nécessiterait surtout des données non disponibles sur la plupart des sites (topographie complète du secteur). Il était donc hors de la portée de cette étude, et c'est pourquoi nous avons opté pour une approche géomorphologique, qui a consisté à calculer la contrainte moyenne du lit. Cette approche est légitimée par le fait que cette contrainte est représentative du tronçon (un calcul fin de la contrainte auprès de l'ouvrage ne serait pas forcément plus représentatif étant donné les fortes incertitudes de ce type de calcul) et surtout,

elle commande la réponse sédimentaire du tronçon, en favorisant la formation des bancs sédimentaires, le méandrement du lit mineur et l'attaque des ouvrages.

L'équation de Manning-Strickler est utilisée uniquement sur des ouvrages pour lesquels on a pu calculer le coefficient de rugosité  $K$  à partir de données récoltées sur le terrain en période de crue, sur un secteur similaire et proche des secteurs sur lesquels se situent les ouvrages. La formule de Manning est très fiable si elle est utilisée pour des conditions hydrauliques pas trop éloignées de celles utilisées pour caler le coefficient  $K$ .

Par contre, lorsqu'il n'est pas possible de caler le coefficient  $K$  sur la réalité, et que le  $D_{84}$  (l'ouverture théorique du tamis telle que 84 % des particules ont un diamètre inférieur) de la surface du lit est disponible, la hauteur d'eau en crue peut être calculée à l'aide de la VPE (*Variable Power Exponent*). Et enfin, quand on ne connaît que le débit, la hauteur d'eau peut être calculée à l'aide de l'hypothèse du Froude unitaire (et de l'équation de conservation de la masse).

Durant l'étude, 21 sites ont été étudiés dans ou aux environs de l'arc alpin français et suisse. L'étude a permis de calculer 51 nouvelles valeurs de contraintes tractrices dont 5 sur des ouvrages qui ont rompu.

## ❶ LE CALCUL DE LA FORCE TRACTRICE

Les valeurs de contraintes moyennes sont calculées à l'aide de la formule suivante :

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

- $\tau$  = force tractrice [N/m<sup>2</sup>]
- $\rho$  = masse volumique de l'eau [kg/m<sup>3</sup>]
- $g$  = accélération de pesanteur [m.s<sup>-2</sup>]
- $j$  = perte de charge linéaire [m/m]
- $R$  = rayon hydraulique [m] = (surface mouillée)/(périmètre mouillé)

Le rayon hydraulique  $R$  lors de la pointe de crue est un paramètre clé à déterminer et nécessite la connaissance de la hauteur d'eau durant la crue. Lorsque le débit est connu, la hauteur d'eau peut être estimée à partir de la vitesse de l'écoulement accessible par trois méthodes différentes suivant les données disponibles :

- équation de Manning-Strickler
- *variable power exponent equation* (VPE)
- l'hypothèse de Froude unitaire

Pour rappel voici l'équation de Manning-Strickler :

$$U = K \times R^{2/3} \times j^{1/2}$$

- $U$  = la vitesse d'écoulement [m/s]
- $K$  = le coefficient de rugosité (ou de Strickler)

La *Variable Power Exponent* (VPE) équation :

$$\frac{U}{\sqrt{gJR}} = \frac{2.5 \left(\frac{R}{D_{84}}\right)}{\sqrt{1+0.15 \left(\frac{R}{D_{84}}\right)^{5/3}}}$$

- $D_{84}$  = ouverture théorique du tamis telle que 84 % des particules ont un diamètre inférieur [m]

Le nombre de Froude :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$$

L'hypothèse de Froude unitaire a été vérifiée sur de nombreux cours d'eau en crue et implique :

$$U = \sqrt{gh}$$

Le graphique de la figure 2 rassemble à la fois les valeurs limites issues de la littérature et les valeurs calculées durant l'étude.

Ce graphique permet de visualiser les nouvelles valeurs maximales de contrainte tractrice calculées pour des ouvrages de plus de trois années. Sur les trois premières années, on peut constater que les valeurs trouvées durant l'étude, pour les caissons en bois végétalisés, et les couches de branches à rejet, sont plus faibles que les valeurs qui étaient déjà établies. Ce résultat permet de s'interroger sur ces quelques valeurs extrêmement élevées présentées dans la littérature. Sur des ouvrages de type lit de plants et plançons et fascine de saule, l'étude a permis d'établir de nouvelles valeurs limites de contrainte tractrice sur ces trois premières années.

Sur ce graphique, on peut constater que la majorité de l'ensemble des calculs ont été effectués sur des ouvrages de moins de cinq ans. Nombre de ces données correspondent à des sites liés au projet Géni'Alp (projet récent : <http://geni-alp.org/>) qui a notamment consisté à tester des ouvrages de génie végétal dans des conditions inédites, soit sur des rivières ou torrents à forte pente (5 à 10%), d'où les importantes contraintes tractrices.

Un récapitulatif des valeurs limites de contraintes tractrices est présenté dans le tableau 1. Les valeurs en gras sur ce tableau correspondent aux valeurs de contrainte tractrice calculées durant la présente étude qui sont supérieures à celles calculées auparavant. Elles correspondent ainsi à de nouvelles valeurs limites plus élevées que celles issues de la littérature. Les valeurs soulignées sont des valeurs pour lesquelles les ouvrages ont cédé. On peut observer une rupture de fascine en pied de berge sur la photo 2.

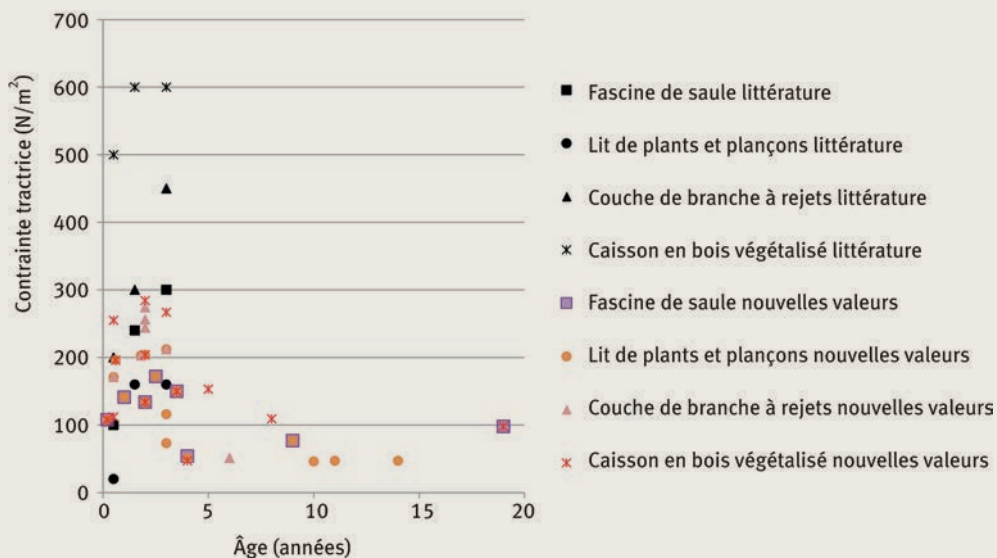
Les nouvelles valeurs établies pour les ouvrages de plus de quatre ans peuvent paraître faibles par rapport aux



2 Rupture de fascine en pied de berge.

valeurs limites pour des ouvrages plus récents. Ceci ne veut pas dire que les ouvrages s'affaiblissent au cours du temps. Bien au contraire, puisqu'une des forces du génie végétal est que les ouvrages se renforcent généralement avec le temps. Ces valeurs sont plus faibles car nous avons moins d'échantillons sur des ouvrages anciens. De plus, les sites plus anciens sur lesquels nous avons travaillé sont des sites à faible pente et donc faibles contraintes (très peu d'ouvrages ont été construits sur des rivières à forte pente dans un passé récent).

2 Ensemble des valeurs de contraintes tractrices en fonction de l'âge de l'ouvrage. Les valeurs limites extraites de la littérature sont représentées en noir et toutes les valeurs calculées durant l'étude sont représentées en couleur.



### ▶ Limites de l'étude

De façon générale, la méthode est simple à mettre en place et gagnerait à être élargie à un grand nombre d'échantillons. Pour aller plus loin, et établir de nouvelles valeurs limites, on pourrait concentrer l'effort d'échantillonnage sur des ouvrages situés dans des rivières à forte pente, et qui ont subi de grosses crues.

Dans l'étude, on s'est placé à l'échelle de l'ensemble de l'ouvrage. On a pu constater en allant sur le terrain que même si des techniques identiques sont utilisées, deux ouvrages ne sont généralement pas dimensionnés de la même manière. Ainsi un lit de plants et plançons, avec un enrochement en pied de berge qui a été monté jusqu'à la hauteur de la crue décennale, pourra vraisemblablement résister à des crues plus fortes qu'un même ouvrage dont la hauteur de l'enrochement n'est qu'à la hauteur de la crue annuelle. Cette différence n'est jamais relevée, ni associée aux valeurs calculées. Ainsi la hauteur à laquelle un ouvrage est placé sur la berge et qui va conditionner la résistance de ce dernier, n'est pas prise en compte dans le présent calcul de la contrainte tractrice. Cependant, l'objectif étant de pouvoir comparer les techniques dans une approche globale sur la résistance mécanique du génie végétal, il est nécessaire de procéder à ce type de simplification.

Le choix de l'utilisation de la contrainte tractrice peut être débattu. Cette métrique est la plus couramment utilisée en rapport avec le transport solide sur le fond du lit des cours d'eau. Elle permet de trouver, par exemple, le diamètre des sédiments qui se déplacent dans une rivière en fonction de la vitesse d'écoulement. La contrainte tractrice ne tient cependant pas compte de la végétation qui peut se trouver sur les berges, et notamment à la transition avec la zone non aménagée, qui est bien souvent une cause de rupture ou de contournement de l'ouvrage). Elle ne tient pas compte non plus des dégâts qui peuvent être causés par les érosions. Par exemple, lors de la visite d'un caisson en bois végétalisé ayant cédé, il est apparu des dégradations liées aux érosions locales (affouillements), plutôt qu'à l'effet d'arrachement par contraintes hydrauliques.

De plus, comme cela a déjà été dit, un ouvrage ne cédera que rarement dans son entier à cause d'une trop forte contrainte tractrice. Il peut céder dans son entier dans le cas de très fortes crues, si le fond du lit est complètement déstabilisé. En revanche, l'ouvrage cédera souvent à cause de faiblesses locales dépendantes de la contrainte tractrice. En effet, plus celle-ci est importante, plus la probabilité d'apparition d'un désordre est élevée.

#### ① Récapitulatif des valeurs limites de contraintes tractrices en fonction de l'âge. Les nouvelles valeurs limites sont en gras et les valeurs de rupture d'ouvrage sont soulignées. Les chiffres entre parenthèse renvoient aux références d'où sont issues les valeurs. Les lettres renvoient au cours d'eau concerné.

Techniques	Contrainte tractrice [N/m <sup>2</sup> ]					
	Moins de 1 an après la réalisation	1 à 2 ans après la réalisation	3 à 4 ans après la réalisation	5 à 6 ans après la réalisation	3 à 4 ans après la réalisation	9 ans et plus après la réalisation
Plantation d'hélophytes	5 <sup>(8)</sup>		30 <sup>(8)</sup>			
Ensemencement	20 <sup>(2)</sup>	30 <sup>(2)</sup>	100 <sup>(6)</sup>			
Fascine d'hélophytes	30 <sup>(8)</sup>	30 <sup>(2)</sup>	60 <sup>(8)</sup>			
Clayonnage et tressage	10 <sup>(2)(8)</sup>	120 <sup>(9)</sup>	120 <sup>(1)(5)(9)</sup>			
Bouture	75 <sup>(7)</sup>	150 <sup>(1)</sup>	165 <sup>(1)</sup>			
Saule jeune (moins de 2 ans)	100 <sup>(4)</sup>		140 <sup>(7)</sup>			800 (20 ans) <sup>(7)</sup>
<b>Lit de plants et plançons jusqu'en pied de berge</b>	<b>108<sup>(h)</sup></b>	<b>134<sup>(h)</sup></b>	<b>150<sup>(h)</sup></b>			
<b>Lit de plants et plançons avec fascine de saule en pied de berge</b>	<b>141<sup>(i)</sup></b>	<b>172<sup>(i)</sup></b>	<b>116<sup>(f)</sup></b> (rupture fascine)			
Lit de plants et plançons avec enrochement en pied de berge	<b>196<sup>(b)</sup> ; 37<sup>(k)</sup></b>	<b>204<sup>(b)</sup></b>	<b>212<sup>(b)</sup></b>			<b>77<sup>(a)</sup></b>
Fascine de saule en pied de berge	<b>141<sup>(i)</sup> ; 50<sup>(k)</sup></b>	240 <sup>(9)</sup> ; <b>116<sup>(f)</sup></b>	> 300 <sup>(7)</sup>			<b>98<sup>(e)</sup></b>
Couche de branches à rejets avec enrochement en pied de berge	<b>244<sup>(c)</sup></b>	300 <sup>(2)(7)(9)</sup>	450 <sup>(2)</sup>	<b>51<sup>(a)</sup></b>		
Caisson en bois végétalisé	500 <sup>(2)</sup>	60 <sup>(2)</sup>	600 <sup>(2)</sup>	<b>153<sup>(g)</sup></b>	<b>109<sup>(d)</sup> ; 381<sup>(j)</sup></b>	<b>98<sup>(e)</sup></b>
Enrochement végétalisé	200 <sup>(8)</sup>	300 <sup>(2)</sup>	350 <sup>(2)</sup>			
Enrochement nu	250 <sup>(8)</sup>	250 <sup>(8)</sup>	250 <sup>(8)</sup>			

1 : (Faber, 2004) ; 2 : (Venti *et al.*, 2003) ; 3 : (Florineth, 1982, 1995) ; 4 : (Adam *et al.*, 2008) ; 5 : (Gerstgraser, 1998) ; 6 : (Witzig, 1970) ; 7 : (Lachat, 1994) ; 8 : (Schiechl et Stern, 1996) ; 9 : (Gerstgraser, 2000).

a : Arve ; b : Avignon d'Anzeindaz ; c : Bens ; d : Dadon ; e : Gelon ; f : Guiers vif ; g : Néphaz ; h : Pamphiot ; i : Petite Gryonne ; j : Volane ; k : Isère.

D'autres phénomènes, que le calcul de contrainte tractrice ne prend pas en compte, peuvent être à l'origine de la rupture de l'ouvrage, ainsi une mauvaise conception de l'ouvrage, avec par exemple, des ouvrages construits en talus de forte pente et hauteur et cédant par glissement dû à des infiltrations d'eau souterraine, ou encore la mortalité des plantes, ou le contournement de l'ouvrage par la rivière. On peut aussi souligner ici que la contrainte tractrice est très complexe à mesurer sur le terrain.

Pour finir, on peut également souligner que la sinuosité n'a pas été prise en compte dans l'approche globale choisie, et que la contrainte a été calculée en lit de rivière et non sur les berges. On ne peut pas négliger les incertitudes qui existent autour des calculs à cause des multiples approximations faites.

Au vu de ces informations, il paraît important de rappeler que ces valeurs ne sont donc à prendre qu'à titre indicatif.

## Conclusion

L'amélioration des méthodes de dimensionnement des ouvrages de génie végétal passe notamment par la mesure de nouvelles valeurs de contraintes tractrices. Avant la construction d'un ouvrage, le concepteur cherche en effet à évaluer la valeur de contrainte tractrice qui pourra être supportée par l'ouvrage. Les valeurs limites de ces contraintes, issues de la littérature et de cette étude, peuvent alors aider au choix des techniques à mettre en place.

Ces valeurs de contraintes tractrices ne sont pas mesurées, mais calculées à partir de données récoltées sur le terrain et sur des bases de données géographiques qui comportent leur propre incertitude. De même, l'approche globale utilisée engendre certaines imprécisions. De plus, le concept de contrainte tractrice n'inclut pas tous les facteurs qui peuvent entraîner la rupture d'un ouvrage. C'est pourquoi les valeurs de contraintes tractrices doivent être utilisées avec précaution, et être vues simplement comme un indicateur supplémentaire dans l'aide au dimensionnement et non une base. On ne dimensionne en effet pas un ouvrage constitué de matériaux vivants comme on peut le faire avec des techniques de génie civil pur. Ces valeurs ne remplaceront ainsi jamais une analyse précise du site et un dimensionnement adapté à chaque emplacement d'ouvrages.

Elles permettent néanmoins d'avancer et de préciser le domaine d'application de ces différentes techniques de génie végétal.

Pour aller plus loin, il serait intéressant de réaliser ces mesures à plus grande échelle, et sur des ouvrages susceptibles de subir de fortes contraintes comme celles que l'on peut trouver sur des rivières de montagne. Il serait aussi intéressant d'élargir le panel des valeurs concernant les ouvrages qui ont cédé. Dans la même optique, une analyse des causes de rupture pourrait être très instructive, ainsi qu'une approche plus fine des processus par des analyses mécaniques fines à l'échelle d'un ouvrage, ce qui impliquerait de couvrir l'ouvrage étudié de capteurs. ■

## Les auteurs

### Solange LEBLOIS

Université Grenoble Alpes, Irstea, UR EMGR,  
2 rue de la Papeterie, BP 76,  
F-38402 St-Martin-d'Hères, France  
École polytechnique Fédérale de Lausanne,  
section science et ingénierie de l'environnement,  
Route Cantonale, 1015 Lausanne, Suisse  
✉ [solange.leblois@irstea.fr](mailto:solange.leblois@irstea.fr)

### André EVETTE et Gilles FAVIER

Université Grenoble Alpes, Irstea, UR EMGR,  
2 rue de la Papeterie, BP 76,  
F-38402 St-Martin-d'Hères, France  
✉ [andre.evette@irstea.fr](mailto:andre.evette@irstea.fr)  
✉ [gilles.favier@irstea.fr](mailto:gilles.favier@irstea.fr)

### Alain RECKING

Université Grenoble Alpes, Irstea, UR ETGR,  
2 rue de la Papeterie, BP 76,  
F-38402 St-Martin-d'Hères, France  
✉ [alain.recking@irstea.fr](mailto:alain.recking@irstea.fr)

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Franck Baz, Pierre-André Frossard et tous ceux qui ont contribué à l'acquisition de données pour ce travail.

## EN SAVOIR PLUS...

- ▣ ADAM, P., DEBIAIS, N., GERBER, F., LACHAT, B., 2008, *Le génie végétal, Un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques*, Paris, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, La Documentation française, 290 p.
- ▣ 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*, Grenoble, 318 p., <http://ouvrage.geni-alp.org/>
- ▣ GERSTGRASER, CH., 1998, Uferstabilisierungen mit Pflanzen: Was halten sie aus ? *Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft*, 50(7-8), p. 180-187.
- ▣ MALAVOI, J.-R., GARNIER, C.-C., LANDON, N., RECKING, A., BARAN, P., 2011, *Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*, Onema, 219 p., [http://www.onema.fr/IMG/pdf/Transport\\_Solides\\_BD.pdf](http://www.onema.fr/IMG/pdf/Transport_Solides_BD.pdf)
- ▣ OPLATKA, M., 1998, Stabilität von weidenverbauungen an flussufer. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich (156), p. 10-195.