



Effacité et résistance de techniques de protection de berges en génie végétal

Effectiveness and resistance of streambank stabilisation projects using bioengineering techniques

Alexandre Peeters ^a, Geoffrey Houbrechts ^a, Eric Hallot ^a, Jean Van Campenhout ^a, Gisèle Verniers ^b, François Petit ^a

^a Université de Liège, Laboratoire d'hydrographie et de géomorphologie fluviale – Clos Mercator, 3 - B11, 4000, Liège, Belgique.

^b Université de Namur, Unité de Recherche en Biologie Environnementale et Évolutive – Rue de Bruxelles, 61, 5000 Namur, Belgique.

RÉSUMÉ

Un ensemble de dix-neuf ouvrages de protection de berges en génie végétal a fait l'objet d'un suivi à court et long termes sur plusieurs rivières de Wallonie. Les aménagements, dont la mise en place remonte pour certains à 20 ans, ont dans l'ensemble bien rempli leur rôle de stabilisation de berge, même si plusieurs d'entre eux sont aujourd'hui partiellement détruits. Dans certains cas, l'endommagement des aménagements a conduit à une reprise de l'érosion de la berge à protéger. Le facteur principal de dégradation des ouvrages est l'énergie de la crue destructrice. Elle est quantifiée par la valeur de puissance spécifique limite, qui représente la valeur maximale de puissance à laquelle l'ouvrage peut résister. Déterminée sur la base des observations de terrain, elle est de l'ordre de 130 W/m² pour des fascines, 65 W/m² pour des peignes, 200 W/m² pour des caissons et 150 W/m² pour des épis végétaux. Toutefois d'autres facteurs d'échec font en sorte que l'aménagement est dégradé avant d'être détruit par les crues, ce qui le rend vulnérable pour des puissances spécifiques moins importantes. Les facteurs de dégradation mis en évidence sont (i) une mauvaise reprise de la végétation liée à un problème d'exposition, à des coupes non gérées et aux dégâts provoqués par les animaux s'attaquant aux plantations (bétail et rongeurs), (ii) des défauts de conception des aménagements (remplissage inadéquat, mauvais dimensionnement) et (iii) une mauvaise prise en compte des caractéristiques géomorphologiques de la rivière. Ainsi, outre la puissance spécifique, un deuxième facteur important à prendre en compte est la quantité de Matières En Suspension (MES) disponible, étant donné que la plupart de ces ouvrages nécessitent un remplissage par des sédiments fins.

Mots clés : protection de berges, génie végétal, fascine, peigne, caisson, épis, puissance spécifique, Matière En Suspension.

ABSTRACT

Nineteen streambank stabilisation projects using bioengineering techniques were monitored in the short and the long term on several rivers in Wallonia. Most of the bank protections, installed between 3 and 20 years ago, were effective, although many of them are now partially destroyed. In some cases, damage to the protective structure has led to a renewed erosion of the bank. The main factor of degradation is the magnitude of stream discharge, which is quantified by the critical stream power (the maximum power value at which the bank protection can resist). Permissible stream power thresholds were determined empirically, and are in order of 130 W/m² for fascine, 65 W/m² for tree revetment, 200 W/m² for cribwall and 150 W/m² for groynes system. Nevertheless, several factors might undermine the bank protection before its flood destruction, which lead to a lower threshold of critical power. The deterioration factors highlighted are (i) a poor vegetation recovery due to lack of sunlight, unmanaged cutting, and damage caused by animals (livestock and rodents), (ii) an inadequate design or filling, and (iii) a lack of consideration of fluvial processes, such as unit stream power and Total Suspended Solids (TSS) as most of these structures require filling with fine sediments. As a result, this study underlined the importance of characterising the geomorphological context in addition to the regular hydrological technical factors prior to the bank stabilisation project.

Keywords: streambank stabilisation, bioengineering, fascine, tree revetments, cribwall, groynes, unit stream power, Total Suspended Solids.

INFORMATION SUR L'ARTICLE

Article soumis le 04 septembre 2017.

Reçu sous sa forme révisée le 23 décembre 2017.

Définitivement accepté le 02 février 2018.

*Auteur correspondant. Tél : +32 4 366 53 28

Courriels :

A.Peeters@uliege.be (A. Peeters)

G.Houbrechts@uliege.be (G. Houbrechts)

Eric.Hallot@uliege.be (E. Hallot)

Jean.VanCampenhout@uliege.be

(J. Van Campenhout)

Gisele.Verniers@unamur.be (G. Verniers)

Francois.Petit@uliege.be (F. Petit)

1. Introduction

L'érosion des berges est un des processus du fonctionnement hydromorphologique d'un cours d'eau qu'il convient de préserver (European Commission, 2000 ; Newson et Large, 2006). Néanmoins, lorsque des zones à forts enjeux (habitations, voies de communication, etc.) sont menacées, il est parfois nécessaire de lutter contre l'érosion des berges (Schmidt et al., 2013). Dans le cas où il n'est pas possible d'intervenir directement sur la cause de

l'érosion, des techniques de protection de berges peuvent alors être mises en œuvre. La stabilisation des berges peut se faire à l'aide des techniques classiques du génie civil (enrochements, gabions, etc.) ou bien grâce aux techniques du génie végétal (Schiechl et Stern, 1997). Ces dernières visent à préserver au maximum le caractère naturel des berges en utilisant des éléments naturels (végétaux) pour les protéger (Rey et al., 2015 ; Verniers et al., 2009).

Les techniques du génie végétal reposent sur le principe que la végétation mise en place augmente la stabilité de la berge (Thorne, 1990 ; Pollen, 2006). Cette stabilité s'appuie sur le développement du système racinaire des éléments végétaux (Gray et Sotir, 1996 ; Reubens et al., 2007 ; Evette et Frossard, 2009) et de leur appareil caulinaire qui favorisent un faible taux d'humidité grâce à l'interception par le couvert végétal et à l'évapotranspiration (Simon et Collison, 2002). De plus, lorsque la végétation de berge est développée, elle entraîne, suite à l'augmentation de rugosité, une réduction des vitesses et des tensions de cisaillement s'exerçant sur la berge (Li et Eddleman, 2002). Comparées aux techniques du génie civil, les techniques végétales favorisent la recolonisation des espèces indigènes, le rétablissement d'un écosystème fonctionnel et la biodiversité du cordon rivulaire (Cavaillé et al., 2013). Enfin, elles maintiennent une qualité paysagère des berges (Li et Eddleman, 2002).

Il existe différentes techniques végétales de protection de berges (Lachat, 1994) qui peuvent être classées selon leur niveau de résistance (Schiechl et Stern, 1997) ou selon la zone protégée (Allen et Leech, 1997). Le choix de la technique à utiliser pour stabiliser une berge dépend principalement de son contexte environnemental, caractérisé par le climat, l'exposition, les variables hydrologiques, la forme du tracé de la rivière, la nature et la structure de la berge, etc. (Schiechl et Stern, 1997). L'efficacité de l'ouvrage dépend non seulement de la disponibilité en eau et en lumière pour que la végétation se développe, mais elle dépend également de la résistance de l'ouvrage face aux crues (Evette et al., 2009) et de leur aptitude à piéger les sédiments en suspension (Schiechl et Stern, 1997 ; FISRWG, 1998).

Évaluer l'efficacité d'un aménagement en technique végétale implique de tenir compte de son âge. En effet, à partir de sa mise en place, l'ouvrage connaît d'abord une période de fragilité relative qui correspond à la phase initiale de croissance végétale (Evette et al., 2009). Par la suite, lorsque le système racinaire des arbustes, des boutures et des semences est développé, la berge est en principe stabilisée et peut résister aux forces d'érosion durant les périodes d'immersion (Evette et Frossard, 2009). Il est généralement considéré que l'ouvrage possède une résistance accrue après 3-4 périodes de végétation (Li et Eddleman, 2002). C'est pour pallier cette phase initiale de fragilité que les ouvrages comprennent des éléments tels que des pieux, des rondins et des géotextiles biodégradables. Lorsque ces éléments se dégradent avec le temps, ils perdent leur fonction de protection contre les contraintes physiques. Ce rôle de protection est alors assuré par la végétation qui a recolonisé la berge. Ainsi, lorsqu'un ouvrage est endommagé ou détruit, la berge peut néanmoins être stabilisée, pour autant que la végétation ait eu le temps de se développer (Batier, 2004).

Ceci souligne la nécessité de prendre en compte deux principes essentiels pour évaluer l'efficacité d'un ouvrage de stabilisation de berge. Tout d'abord, l'évaluation porte non seulement sur la structure de l'ouvrage, mais aussi et surtout sur la stabilité de la berge, la structure de l'ouvrage ayant vocation à s'effacer progressivement (Evette et al., 2013). Ensuite, il est indispensable que le suivi se fasse sur le long terme, afin de déterminer la pérennité des aménagements et d'évaluer leur impact sur l'hydrosystème. Dans certains cas, comme pour les rivières à faible et moyenne énergie, le temps de résilience de l'hydrosystème peut être relativement long (Bravard, 1998 ; Petit et al., 2005). Malheureusement, les suivis de projets de réhabilitation sur le long terme sont peu fréquents (Kondolf et Micheli, 1995 ; Anstead et al., 2012) et, lorsqu'ils existent, ils concernent généralement une courte durée (Simon et Steinemann, 2000). Dans le domaine du génie végétal, on notera les études de Batier (2004) et de Evette et al. (2013) effectuées sur une période

d'environ 10 ans, ainsi que celle de Anstead et Boar (2010) pour laquelle le suivi était compris entre 10 et 20 ans.

L'évaluation de l'efficacité des ouvrages repose généralement sur des indicateurs déterminés par une approche empirique mettant en relation la résistance des aménagements avec les contraintes qu'ils ont subies lors des événements hydrologiques (Lebois et al., 2016). Cette approche permet de déterminer un seuil d'admissibilité, qui représente la valeur maximale de l'indicateur de contrainte à laquelle un ouvrage peut résister. De cette façon, lorsque la contrainte qui s'exerce sur l'aménagement se trouve au-delà du seuil d'admissibilité, l'aménagement n'est théoriquement pas suffisamment résistant. Parmi les différents indicateurs, c'est la tension de cisaillement qui est le plus souvent utilisée (Gray et Sotir, 1996 ; Gerstgraser, 1999 ; Fischenich, 2001 ; Sotir et Fischenich, 2001 ; Frothingham, 2007 ; Lebois et al., 2016 ; Evette et al., 2017). Notons que plusieurs de ces études tiennent compte de l'âge de l'aménagement pour définir les seuils d'admissibilité.

D'autres indicateurs permettent de quantifier la résistance des ouvrages aux forces d'érosion. Ainsi, l'analyse effectuée par Veller et Doyle (2001) porte sur la puissance brute exercée au droit des ouvrages. Il en est de même pour le suivi de l'efficacité de caissons végétalisés réalisé par Krymer et Robert (2014).

Dans le cadre de notre étude, l'approche utilisant les puissances spécifiques a été privilégiée car elle constitue un moyen efficace pour quantifier la capacité de travail des cours d'eau et, contrairement aux tensions de cisaillement qui sont plus difficiles à estimer *a posteriori*, elle représente un indicateur pratique pour caractériser la résistance des aménagements lors des crues (Schmitt et al., 2001). De plus, elle renseigne sur la capacité de réaction et d'adaptation des rivières en réponse aux travaux d'aménagement (Brookes, 1988 ; Brookes et Shields, 1996 ; Petit et al., 2005, 2008).

En Wallonie, plusieurs projets expérimentaux de protection de berge en techniques végétales ont été mis en place à partir des années 1990 par les gestionnaires des cours d'eau non navigables (SPW-DCENN ; Lambot, 2001). Plusieurs de ces projets ont fait l'objet d'un suivi s'étendant jusqu'à 10 ans après travaux (Hallot et al., 2007 ; Verniers et al., 2009), voire jusqu'à 20 ans après travaux (Peeters et al., 2016). Cet article dresse le bilan des aménagements qui ont été suivis sur le long terme, ainsi que d'autres aménagements mis en place plus récemment. L'efficacité de ces projets est évaluée du point de vue de la résistance des ouvrages et de la stabilité des berges face aux crues et à leur puissance spécifique.

2. Type d'ouvrages étudiés

Bien que la conception et la mise en œuvre des aménagements traités dans cette étude soient largement inspirées des guides techniques de références (Lachat, 1994 ; Verniers, 1995 ; Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 1997 ; Jund et al., 2003), elles possèdent néanmoins des particularités techniques qui sont le résultat des expérimentations effectuées en Wallonie (Lambot, 2001). Les quatre types d'ouvrages les plus fréquemment utilisés en Wallonie sont les fascines, les peignes, les caissons et les épis végétaux.

La « fascine » (fig. 1A) est une protection du pied de berge réalisée avec des branches de saules vivants, assemblées en fagots et fixées par une rangée de pieux (fascine simple) ou disposées par couches successives entre deux rangées de pieux (fascine double). C'est une technique efficace qui apporte une protection mécanique immédiate, capable de résister à de fortes contraintes hydrauliques (Verniers et al., 2009). Elle peut être combinée à la mise en place de géotextile et de boutures ou à d'autres techniques de protection de l'ensemble du talus de berge. Des branches en-dessous et en-arrière des fagots de saules peuvent être placées pour limiter l'effet

d'affouillement. Des galets ou des matériaux terreux sont également parfois ajoutés dans le but de lester les fascines (Verniers et al., 2009). Lorsque les tensions de cisaillement sont trop importantes, elles peuvent être combinées avec des enrochements disposés en pied de berge (Sotir et Fischenich, 2001).

Destiné à protéger le pied de berge également, le « *peigne* » (fig. 1B) est quant à lui constitué par un entassement de grosses branches et d'arbres solidement attachés de manière à former un ensemble végétal capable de piéger les éléments en suspension dans l'eau (Verniers, 2009). Son efficacité dépend de l'apport en sédiments fins, donc de l'occurrence de crues qui le submergent et de la quantité de Matières En Suspension (MES) transportée par la rivière. Les six peignes analysés dans cette étude sont des peignes inertes, composés de troncs et de branches d'épicéa. Des boutures de saule sont parfois mises en place sur le peigne. Leur reprise dépend du remplissage du peigne. C'est pourquoi il est conseillé d'ajouter des matériaux terreux au remplissage végétal du peigne pour des rivières à faible charge en suspension.

Destiné à stabiliser l'ensemble de la berge, le « *caisson* » (fig. 1C) est une structure en rondins de bois, composée de deux rangées longitudinales et parallèles de rondins (longrines) sur lesquels sont cloués, perpendiculairement aux premiers, d'autres rondins (moises). Les essences utilisées sont généralement le mélèze, l'épicéa ou le douglas. Le caisson est rempli de matériaux terreux, au moins dans la partie frontale (Verniers et al., 2009). De par sa structure en bois, il offre une armature de soutien au talus et, de ce fait, une stabilisation immédiate. Des boutures de saules et des plantations (aulne principalement) sont réalisées sur les différents étages définis par les moises. Les plantes reprennent ensuite la fonction

de stabilisation au fur et à mesure du développement du réseau racinaire et de la décomposition des rondins. Afin d'assurer une protection du remplissage du caisson pendant les premières années durant lesquelles la végétation est peu développée, un géotextile est disposé entre les longrines de manière à envelopper ce remplissage. Le géotextile se décomposant après 3 à 5 ans, le remplissage est alors stabilisé par le système racinaire de la végétation qui s'y est développée.

Enfin, les « *épis végétaux* » (fig. 1D) sont des ouvrages transversaux au courant, implantés depuis la berge et s'étendant sur une partie du lit de la rivière. Ce sont des techniques dites indirectes car elles permettent de protéger une berge en déviant le courant. Selon leur implantation et leur orientation, les épis permettent soit d'approfondir, soit de remblayer une partie du lit. Le caractère hémiperméable des épis en technique végétale permet un aménagement subsistant des contraintes hydrauliques moins importantes, tout en augmentant la capacité de sédimentation par rapport à un épi en dur (Verniers et al., 2009).

3. Présentation des zones d'étude

L'ensemble des cours d'eau étudiés (fig. 2 et tab.1) appartient au bassin hydrographique de la Meuse, à l'exception de la Sûre (ID-11) qui est un affluent de la Moselle. Le choix des sites d'étude a été réalisé dans le but d'avoir une diversité des aménagements et des régions naturelles, ce qui suppose des contextes géomorphologiques variés qui couvrent une large gamme de puissances spécifiques (entre 9 et 147 W/m² pour le débit de plein bord ; Petit et al., 2005) et une fourchette de concentration en MES étendue (entre 26 et 2618 mg/l

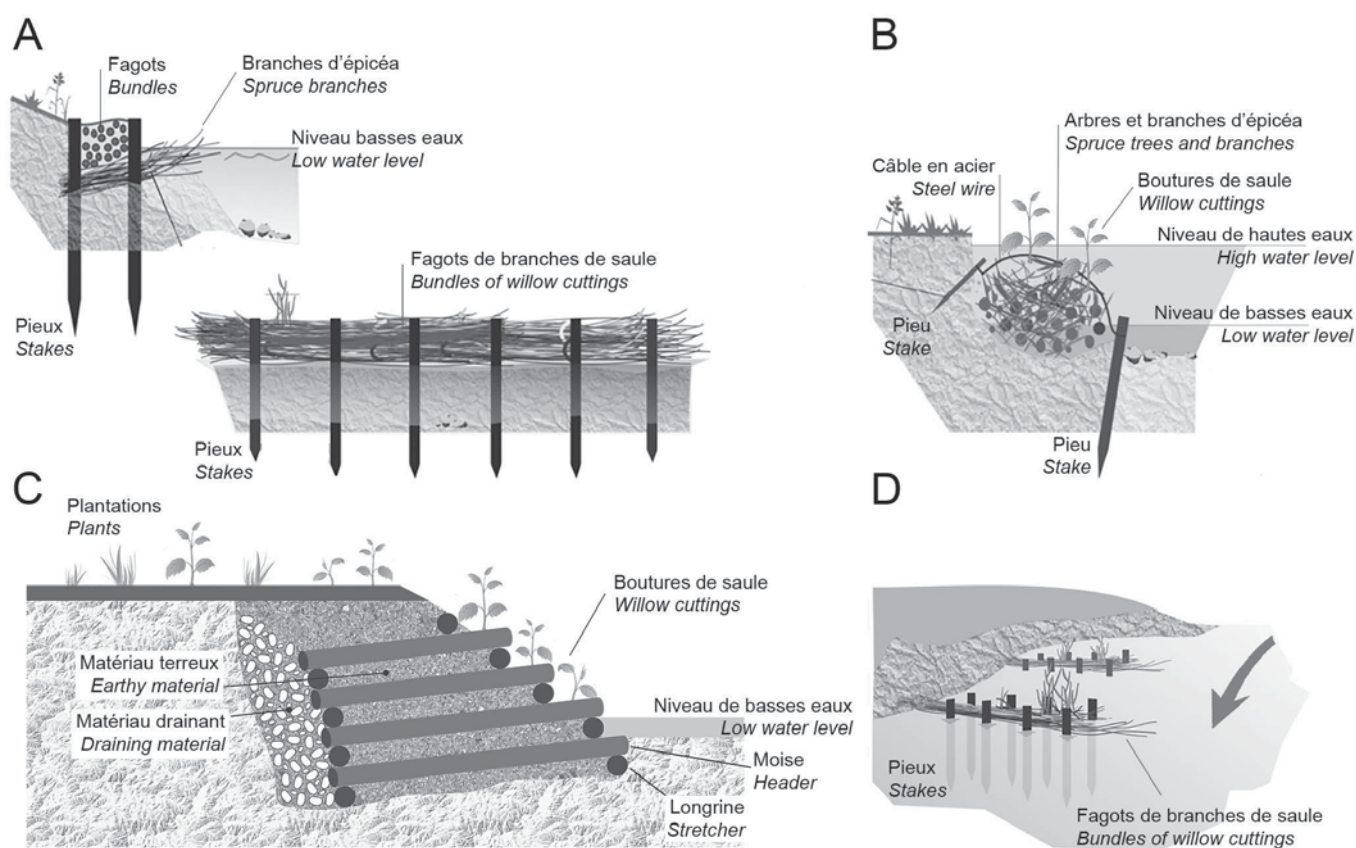


Fig. 1 – Ouvrages de protection de berge en génie végétal couramment utilisés en Wallonie (modifié depuis Verniers et al., 2009).

A. Fascine ; B. Peigne ; C. Caisson ; D. Système d'épis.

Fig. 1 – Commonly used stream bank protection using bioengineering in Wallonia (modified from Verniers et al., 2009).

A. Fascine ; B. Tree revetment ; C. Cribwall ; D. System of groynes.

pour le débit à plein bord ; Van Campenhout et al., 2013). Le débit à plein bord est pris comme débit de référence afin de comparer les rivières entre elles du point de vue de leur puissance spécifique et de leur concentration en MES. La valeur de concentration en MES pour le débit à plein bord est obtenue à partir de la relation établie sur la base de prélèvements réalisés pour différents débits et dont les concentrations en MES sont mesurées (Van Campenhout et al., 2013).

Parmi cette sélection, ce sont les rivières ardennaises qui possèdent les puissances spécifiques les plus importantes (entre 51 et 147 W/m² pour le débit à plein bord). Elles possèdent un tracé généralement subrectiligne, avec une ébauche d'une succession seuil-mouille (Petit et al., 2015). Elles sont régulièrement en contact avec leurs versants. Leur charge de fond, relativement grossière, est composée de galets provenant du substratum paléozoïque, et est caractérisée par un aplatissement marqué (Houbrechts et al., 2012). Du fait de la nature imperméable du substratum et de la faible couverture de sol, les crues possèdent un temps de réponse relativement rapide (Petit, 1995 ; Gischer et al., 2012).

Précisons que plusieurs rivières s'écoulent majoritairement en Ardenne avant de traverser d'autres régions naturelles, ce qui leur confère des caractéristiques héritées de leur région d'origine en ce qui concerne leur charge caillouteuse et leur régime hydrologique (Petit et al., 2008). C'est le cas de la Rulles, de la Lesse, de l'Eau Noire et, dans une moindre mesure, de l'Eau Blanche. Néanmoins, la traversée des autres régions, caractérisées par un substratum moins résistant, se marque par un changement de sinuosité ou

de style fluvial. Ainsi, la Rulles en Lorraine (Ansart – ID-14) développe des méandres libres bien formés dans les formations marneuses du Secondaire. Il est en de même pour la Lesse (Villers-sur-Lesse – ID-15) dans la traversée de la dépression schisteuse de Famenne, où elle tend à évoluer vers une ébauche de tressage, avec des déplacements de méandres sur plusieurs dizaines de mètres en une vingtaine d'années (Petit et al., 2008). Ces régions (Ardenne, Lorraine, Fagne, Famenne et Condroz) sont dans l'ensemble caractérisées par des concentrations en MES inférieures à 200 mg/l pour le débit à plein bord. Notons que pour les bassins forestiers du Sud de l'Ardenne et de Lorraine, ces valeurs sont inférieures à 50 mg/l (Van Campenhout et al., 2013).

Les rivières comprises dans l'Entre-Vesdre-et-Meuse possèdent des puissances spécifiques de l'ordre de 60 W/m² et font preuve d'une dynamique très active puisque des érosions latérales atteignant localement 0,5 m/an ont été observées sur la Berwinne (Mols, 2004) ainsi que sur la Gueule (Stam, 2002). Elles sont caractérisées par des quantités en MES de l'ordre de 550 mg/l pour le débit à plein bord, en raison d'une occupation du sol essentiellement constituée de prairies et de quelques cultures de maïs (Van Campenhout et al., 2013).

Les rivières à charge sablo-limoneuse de Hesbaye sont quant à elles caractérisées par des concentrations importantes en MES (jusqu'à 2 618 mg/l pour le débit à plein bord sur le Geer à Bergilers – ID-13), ce qui s'explique par une épaisse couverture de loess et une occupation du sol composée majoritairement de cultures (Van Campenhout et al., 2013). Elles montrent des puissances très faibles,

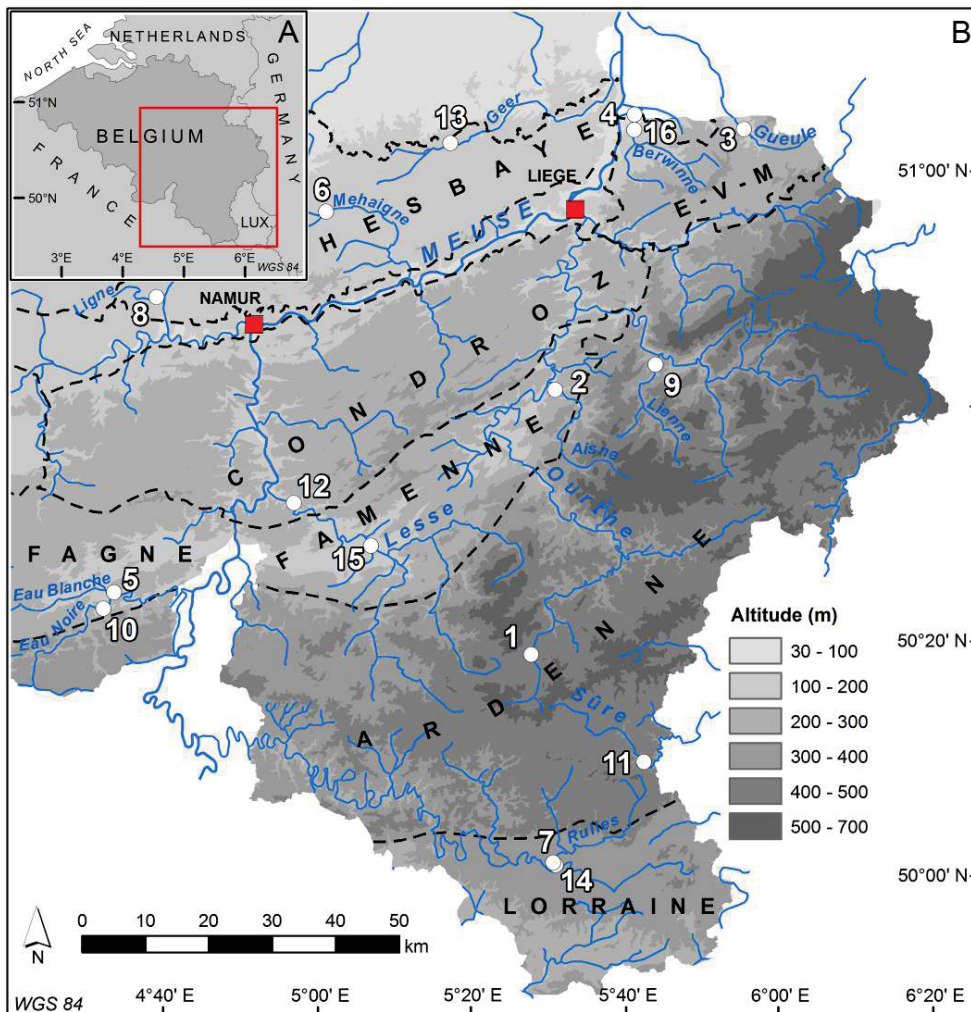


Fig. 2 – Localisation des sites d'étude.
A. Situation. B. Sites d'étude et régions géomorphologiques. Le numéro d'identification (ID) réfère au Tableau 1. E-V-M signifie Entre-Vesdre-et-Meuse.

Fig. 2 – Location of the study sites.
A. Situation. B. Study sites and geomorphological regions. The identification (ID) numbers refer to Table 1. E-V-M means Entre-Vesdre-et-Meuse.

Tab. 1 – Caractéristiques des sites d'étude.

Site	ID	Région	A (km ²)	Qb (m ³ /s)	MES (mg/l) pour Qb	ω (W/m ²) pour Qb	D50 du lit (mm)	Type d'ouvrage
Ourthe (Moircy)	1	Ardenne	74	12,5	62	69	64	Fascine
Aisne (Juzaine)	2a	Ardenne	183	23,8	170	91	92	Fascine
Gueule (Plombières)	3	Entre-Vesdre-et-Meuse	111	16	573	58	40	Fascine
Berwinne (Berneau)	4a	Entre-Vesdre-et-Meuse	127	17	561	67	50	Fascine
Aisne (Juzaine)	2b	Ardenne	183	23,8	170	91	92	Peigne
Berwinne (Berneau)	4b	Entre-Vesdre-et-Meuse	127	17	561	67	50	Peigne
Eau Blanche (Nismes)	5	Fagne	249	29	110	43	46	Peigne
Mehaigne (Ambresin)	6	Hesbaye	195	12	257	9	0,15	Peigne
Rulles (Ansart)	7	Lorraine	220	24,3	26	18	41	Peigne
Ligne (St-Martin)	8	Hesbaye	91	11	N/A	54	Lit caillouteux	Peigne
Lienne (Chession)	9	Ardenne	139	16,5	99	147	79	Caisson
Eau Noire (Petigny)	10	Fagne	214	36,9	167	98	95	Caisson
Sûre (Radelange)	11	Ardenne	209	32	44	51	42	Caisson
Lesse (Furfooz)	12a	Condroz	1286	131	207	69	48	Caisson
Geer (Bergilers)	13	Hesbaye	123	7	2618	20	Lit sableux	Caisson
Rulles (Ansart)	14	Lorraine	220	24,3	26	18	41	Caisson
Lesse (Furfooz)	12b	Condroz	1286	131	207	69	48	Épis
Lesse (Villers/Lesse)	15	Famenne	1019	99,5	162	57	66	Épis
Berwinne (La Folie)	16	Entre-Vesdre-et-Meuse	122	17	561	67	49	Épis

Tab. 1 – Characteristic of the study sites.

inférieures à 20 W/m² (Geer à Bergilers – ID-13 et Mehaigne à Ambresin – ID-6), à l'exception de la Ligne (à Saint-Martin – ID-8). Cette faible énergie explique la grande stabilité de leur tracé, sans changement notable au niveau des méandres. Seule la présence d'embâcles latéraux agissant tels des déflecteurs peut entraîner localement une érosion de berge, voire une méandration secondaire (Petit, 1975).

L'ensemble des sites est caractérisé par des berges dont la composition est à dominance limoneuse (limono-argileux et limono-sableux). Des lentilles caillouteuses sont localement présentes, sauf sur les cours d'eau de la Hesbaye.

4. Méthodes

4.1. Évaluation de l'état de l'aménagement et de la stabilité de la berge

Les observations de terrain ont été réalisées pour des conditions de basses eaux. Pour chaque aménagement de protection de berge, les éléments suivants ont été relevés :

(i) l'état de l'ouvrage (toujours en place, partiellement détruit, complètement détruit ou non visible) et l'importance de la sédimentation au sein de l'aménagement (ouvrage rempli et/ou recouvert de sédiments fins, partiellement évidé ou complètement évidé) ;

(ii) l'état de la berge (stabilisée, érosion localisée ou généralisée) et l'importance de l'éventuelle érosion (mesure du recul par rapport à la position des aménagements) ;

(iii) le développement de la végétation au sein de l'ouvrage et de la berge : présence d'une végétation ripicole distincte, son étendue (limitée au talus et/ou à la crête de la berge), sa composition (strate herbacée, strate arbustive et/ou strate arborée, présence de ligneux plantés et d'espèces invasives), et la nécessité ou non d'un entretien (coupe, recepage) ;

(iv) les éventuelles répercussions à plus large échelle, comme une érosion de la berge opposée, une érosion/aggradation du fond du lit ou encore une migration du train de méandres. Lorsque de telles répercussions sont identifiées sur le terrain ou sur des prises de vues aériennes, elles sont quantifiées par comparaison diachronique de levés topographiques, lorsqu'ils existent.

Les informations relatives aux aspects techniques des ouvrages ont été fournies par les gestionnaires de cours d'eau du SPW-DCENN. Leurs connaissances de terrain et leurs archives ont également permis de déterminer le moment de la destruction de certains aménagements, ce qui s'est avéré essentiel pour l'analyse des crues et l'identification des crues destructrices.

4.2. Analyse des crues subies par les aménagements et de leur puissance spécifique

Pour chaque site étudié, les débits enregistrés à la station limnigraphique la plus proche ont été mis à disposition par le SPW-DCENN. Dans le cas où un affluent notable se trouve entre le site étudié et la station limnigraphique, les valeurs de débits ont été calculées à partir du rapport des superficies des bassins versants selon la formule proposée par la DIREN Rhône-Alpes pour les bassins versants inférieurs à 2000 km² (Bravard et Petit, 2000) :

$$q = Q(a/A)^{0,8} \quad [1]$$

où q = débit recherché (en m³/s), Q = débit à la station (en m³/s), A = superficie du bassin-versant à la station (en km²) et a = superficie du bassin-versant au site étudié (en km²).

Les hydrogrammes ont permis d'identifier les crues que les ouvrages ont subies depuis leur mise en place. L'intensité de ces crues est caractérisée par trois indicateurs : (i) le débit, (ii) la récurrence et (iii) la puissance spécifique.

Pour évaluer l'intensité de la crue, il est d'abord nécessaire d'identifier le « débit à plein bord », soit sur base des observations



de terrain en période de hautes eaux, soit sur base des données disponibles pour les rivières wallonnes (Petit et al., 2005 ; Petit et al., 2008 ; Houbrechts et al., 2015). Le débit de la crue étudiée (Q) est ensuite mis en relation avec le débit à plein bord (Qb) sous forme d'un rapport (Q/Qb).

Bien que l'analyse porte sur l'ensemble des crues subies par les aménagements, nous avons sélectionné trois crues de référence qui sont mises en relation avec l'état de l'ouvrage et la stabilité de la berge : (i) la première crue subie par l'aménagement dont le débit est égal ou supérieur au débit à plein bord car l'aménagement est davantage vulnérable durant les 3 à 5 premières années qui suivent son installation ; (ii) la crue qui présente la valeur de débit maximale pour laquelle l'aménagement a résisté ; (iii) dans le cas où l'ouvrage est endommagé, la crue qui a provoqué sa destruction. Néanmoins, lorsque la date de destruction de l'aménagement n'est pas connue, on considère que la crue destructrice est la crue la plus importante subie par l'aménagement depuis sa mise en place.

Le calcul de la « récurrence » des événements est basé sur la méthode de Gumbel (Gumbel, 1941) à la fois sur les séries partielles et annuelles. Les séries partielles sont utilisées pour déterminer la récurrence d'événements relativement fréquents, fixée inférieure à 5 ans. Par contre, la détermination d'événements plus rares, supérieurs à 5 ans, nécessite l'utilisation des séries annuelles car les écarts entre les deux méthodes sont importants au-delà de 5 ans (Petit et Daxhelet, 1989). Les séries partielles interviennent donc pour le calcul de la récurrence du débit à plein bord, qui est généralement comprise entre 0,4 et 1,5 ans pour les rivières de Wallonie (Petit et Daxhelet, 1989 ; Petit et al., 2008).

Quant à la « puissance spécifique » (ω exprimée en W/m^2), elle est déterminée par :

$$\omega = (g \cdot \rho \cdot Q \cdot S) / w \quad [2]$$

avec Q le débit (en m^3/s), w la largeur du lit (en m), S la pente longitudinale (en m/m), ρ la masse volumique du fluide (en kg/m^3) et g l'accélération de la pesanteur (en m/s^2).

La pente longitudinale est calculée sur base d'un levé topographique des laisses de crue pour le niveau de plein bord (ou légèrement inférieur), et ce pour un secteur centré sur l'aménagement et dont la longueur correspond à au moins 14 fois la largeur à plein bord (Leopold et al., 1964 ; Gob et al., 2014).

La largeur considérée pour le calcul de la puissance spécifique est déterminée à partir de la moyenne des largeurs au plein bord mesurées le long du secteur aménagé (sur base de levés topographiques ou, à défaut, au décimètre sur le terrain). Les mesures étant effectuées avec un pas de distance égal à la largeur au plein bord, le nombre de mesures dépend de la longueur du secteur aménagé.

Signalons que, lors des événements débordants, l'énergie disponible pour l'érosion des berges est uniquement fournie par le débit s'écoulant à la verticale du lit mineur. Or, le calcul de la puissance spécifique tient compte du débit total de la rivière car la part du débit qui s'écoule dans la plaine alluviale est difficilement quantifiable, ce qui entraîne une légère surestimation de la puissance pour les événements débordants.

Enfin, pour comparer les valeurs de puissances spécifiques avec les valeurs de la littérature utilisant d'autres indicateurs, les équations suivantes ont permis d'effectuer les conversions nécessaires :

$$\omega = \Omega / w \quad [3]$$

avec Ω la puissance brute (en W/m) et w la largeur du lit (en m).

$$\omega = \tau \cdot u \quad [4]$$

avec τ la tension de cisaillement totale (en N/m^2) et u la vitesse moyenne du courant (en m/s).

5. Résultats

La Figure 3 montre l'état des différents ouvrages de protection de berge sur la base de leur âge et de la puissance spécifique des crues qu'ils ont subies. Pour chaque site, l'état de la berge et de la protection de l'aménagement est indiqué pour les crues caractéristiques décrites ci-dessus. Cette représentation sous la forme de trajectoire d'évolution permet de déterminer la limite de résistance des aménagements en fonction de leur ancienneté.

Parmi les ouvrages de pied de berge, les « fascines » constituent une option de stabilisation efficace (tab. 2 et fig. 3A). Entre 15 et 20 ans après leur installation, les berges à protéger sont aujourd'hui stabilisées et occupées par une végétation bien développée, comme le montre l'exemple sur l'Aisne – ID-2a (fig. 4). L'analyse des événements hydrologiques montre que les fascines ont résisté à des crues relativement importantes, supérieures à la crue décennale et pour lesquelles la puissance spécifique a atteint $134 W/m^2$. La fascine de l'Aisne – ID-2a (fig. 4) a même résisté à deux crues exceptionnelles ($T > 70$ ans) qui ont atteint $300 W/m^2$, l'une d'entre elles se présentant moins de 2 ans après les travaux d'aménagement. Toutefois, il faut préciser que cette fascine avait été renforcée par des enrochements disposés en pied de berge, ce qui a favorisé sa résistance face aux contraintes fournies par les crues.

Seule la fascine sur la Berwinne à Berneau – ID-4a (fig. 5) a été endommagée par des crues dont la puissance spécifique était supérieure à $100 W/m^2$ ($153 W/m^2$ maximum), provoquant une légère reprise d'érosion au niveau du pied de berge (de l'ordre de 50 cm en 16 ans). Cependant, cette destruction était due à un défaut de conception, lié au remplissage d'une partie de la fascine par du matériau caillouteux, en plus des fagots de saules. À l'inverse du matériau argilo-limoneux, le matériau caillouteux est facilement érodable du fait de sa faible cohésion. L'évacuation du remplissage caillouteux par les crues a provoqué une déconnexion entre la fascine et la berge, ce qui a entraîné la mort de la fascine par dessèchement des fagots. Néanmoins, le reste de la berge a pu être stabilisé par une végétation arbustive, dont le développement a été favorisé par l'importante sédimentation sur le talus de la berge (jusqu'à 30 cm en 16 ans, d'après le relevé de plusieurs échelles graduées installées sur la berge). Cette sédimentation a été favorisée par les concentrations importantes en MES de la Berwinne atteignant $561 mg/l$ pour le débit à plein bord (tab. 1).

En ce qui concerne la position de l'ouvrage dans le méandre, il apparaît que tant les fascines situées en secteur rectiligne, e.g. l'Ourthe – ID-1 (fig. 3A), que les fascines disposées dans les zones de fortes contraintes hydrauliques des méandres, e.g. la Gueule – ID-3 (fig. 3A), ont résisté à plusieurs crues et sont toujours en place après 15-20 ans. Le cas de la Gueule indique que les protections par fascines peuvent convenir pour des angles d'attaque relativement prononcés (angle formé entre le courant et la berge à protéger ; Knighton, 1998), et ce pour des puissances d'au moins $130 W/m^2$.

Le suivi des « peignes » installés en pied de berge présente un bilan moins positif que celui des fascines. En effet, seuls deux des six peignes étudiés ont permis de stabiliser la berge efficacement (tab. 3 et fig. 3B). Les quatre autres ont été endommagés, voire complètement détruits, comme l'illustre la Figure 6 sur l'Aisne – ID-2b, ce qui a localement entraîné une reprise d'érosion de la berge à protéger. La cause de destruction des peignes est la puissance des crues qu'ils ont subies, comme l'illustre la Figure 3B, où il apparaît que les peignes ne conviennent pas pour des rivières à forte énergie telles que l'Aisne – ID-2b, dont la crue destructrice a développé une puissance spécifique proche de $300 W/m^2$ ($T = 70$ ans). Par contre, ils sont davantage adaptés aux cours d'eau de faible énergie, tels

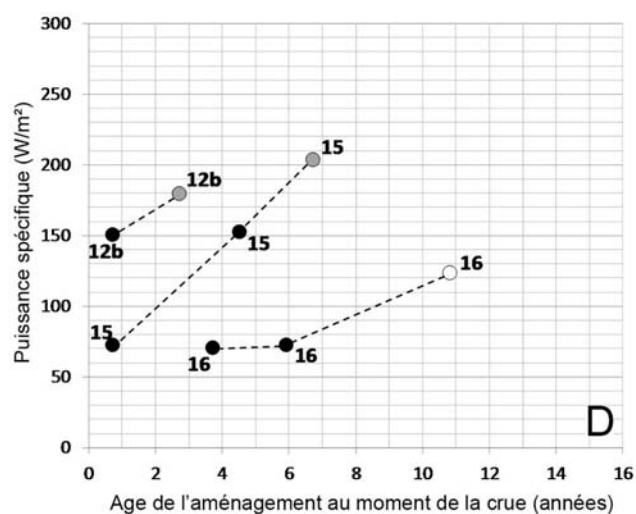
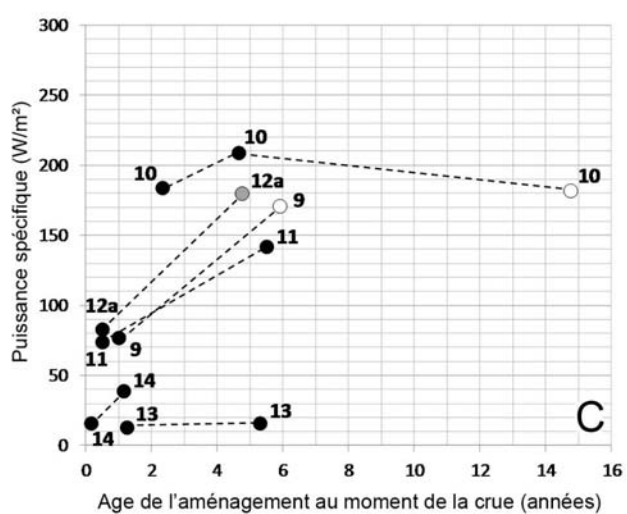
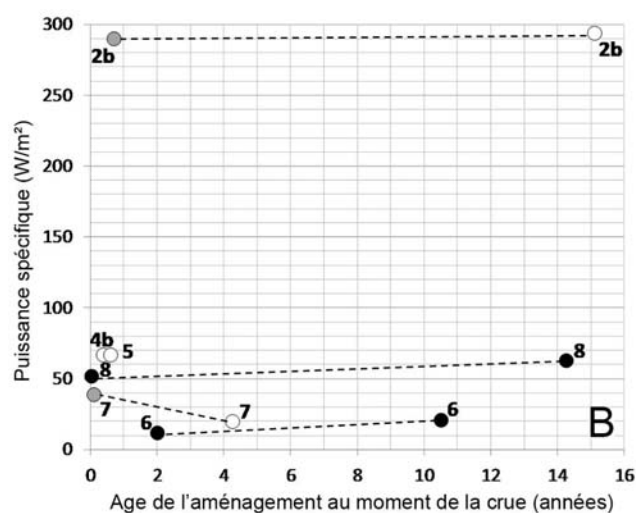
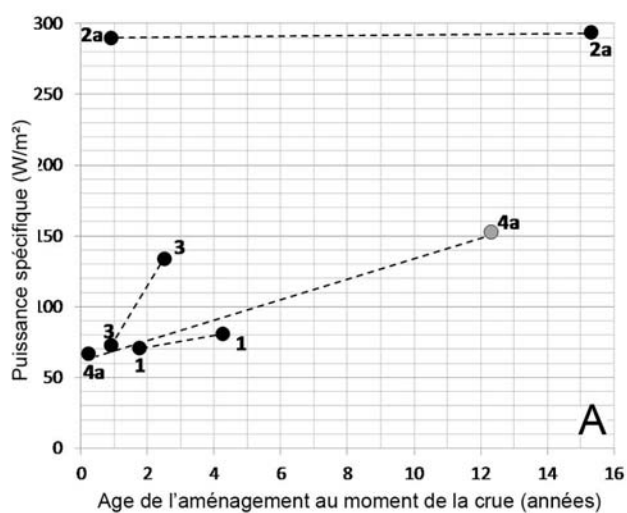


Fig. 3 – État des ouvrages de protection de berge en relation avec leur âge et la puissance spécifique des crues qu'ils ont subies.

A. Fascine. B. Peigne. C. Caisson. D. Système d'épis. 1. Ouvrage en bon état et berge stabilisée ; 2. Ouvrage dégradé mais berge stabilisée ; 3. Ouvrage dégradé et berge en cours d'érosion. Le numéro d'identification (ID) réfère au Tableau 1.

ID-1. Ourthe (Moircy) ; ID-2. Aisne (Juzaine) ; ID-3. Gueule (Plombières) ; ID-4. Berwinne (Berneau) ; ID-5. Eau Blanche (Nismes) ; ID-6. Mehaigne (Ambresin) ; ID-7. Rulles (Ansart) ; ID-8. Ligne (St-Martin) ; ID-9. Lienne (Chession) ;

Fig. 3 – State of the bank protections in relation to their age and the unit stream power of flood events.

A. Fascine. B. Tree revetment. C. Cribwall. D. System of groynes. 1. Structure in good condition and bank stabilized; 2. Structure damaged but bank stabilized; 3. Structure damaged and bank erosion. The identification (ID) numbers refer to Table 1.

ID-10. Eau Noire (Petigny) ; ID-11. Sûre (Radelange) ; ID-12. Lesse (Furfooz) ; ID-13. Geer (Bergilers) ; ID-14. Rulles (Ansart) ; ID-15. Lesse (Villers-sur-Lesse) ; ID-16. Berwinne (La Folie).

Tab. 2 – État des protections de berge par fascine et caractéristiques des crues subies.

Site	ID	Date de mise en place	Crue destructrice (ou crue la plus importante)				État de la berge	État de l'aménagement	Causes de la destruction
			Q (m³/s)	Q/Qb	T (ans)	ω (W/m²)			
Ourthe (Moircy)	1	1998	14,7 (2/01/2003)	1,2	25	81	Stabilisée	Bon état	Aucune
Aisne (Juzaine)	2a	2001	77 (5/06/2016)	3,2	76	294	Stabilisée	Bon état	Aucune
Gueule (Plombières)	3	1996	37,1 (14/09/1998)	2,3	16	134	Stabilisée	Bon état	Aucune
Berwinne (Berneau)	4a	2000	38,9 (29/07/2012)	2,3	32	153	Pied en cours de légère érosion	Détruit	Contraintes hydrauliques, remplissage inadapté

Tab. 2 – State of the fascine bank protections and flood characteristics.





Fig. 4 – Aisne à Juzaine (ID-2a) : fascine 15 ans après sa mise en place. Vue vers l'aval.

Fig. 4 – Aisne at Juzaine (ID-2a): fascine 15 years after installation. Downstream view.



Fig. 5 – Berwinne à Berneau (ID-4a) : berge stabilisée, fascine détruite et légère reprise d'érosion du pied de berge 16 ans après les travaux. Les flèches blanches montrent les piquets de l'ancienne fascine.

Fig. 5 – Berwinne at Berneau (ID-4a): stabilized bank, damaged fascine and renewed erosion of the bank toe 16 years after installation. White arrows show the stakes of the remnant fascine.

que la Mehaigne (ID-6) et la Ligne (ID-8), où ils ont résisté à des crues de respectivement 21 et 63 W/m².

Plusieurs facteurs interviennent dans le processus de fragilisation des peignes, ce qui entraîne un abaissement du seuil d'admissibilité de la puissance spécifique. Il est toutefois difficile de quantifier cet abaissement pour un seul facteur donné car les effets des multiples facteurs de fragilisation s'exerçant sur un même peigne ne peuvent pas être dissociés. Parmi ces facteurs, le faible remplissage en sédiments fins rend le peigne plus vulnérable face aux crues. Dès lors, l'utilisation du peigne n'apparaît pas judicieuse sur les cours d'eau présentant de faibles quantités en MES. C'est une des causes possibles pour laquelle le peigne installé sur la Rulles – ID-7 s'est dégradé, cette rivière possédant une concentration en MES de 26 mg/l (pour le débit à plein bord). En revanche, la technique a bien fonctionné sur les rivières de Hesbaye, e.g. Mehaigne – ID-6 et Ligne – ID-8 (tab. 3), qui sont caractérisées par des concentrations en MES plus importantes. Une deuxième cause d'échec est l'angle d'attaque entre le courant et la berge à protéger. Plus cet angle est prononcé, plus le peigne est vulnérable. Ainsi, les peignes mis en place sur la Rulles (ID-7), l'Eau Blanche (ID-5) et la Berwinne (ID-4b) ont été endommagés par des crues relativement modestes, dont la puissance était de respectivement 39 W/m², 67 W/m² et 67 W/m². Ils possèdent un angle d'attaque de respectivement 45°, 80° et 75°. À l'inverse, le peigne installé sur la Ligne (fig. 7), dans une encoche d'érosion en secteur rectiligne, a résisté aux crues évoquées ci-dessus. De même, les peignes de la Mehaigne – ID-6 (tab. 3) qui se trouvent dans des secteurs de faible concavité ont résisté aux différentes crues (jusqu'à 21 W/m²), et seules les zones soumises à de fortes contraintes hydrauliques (rive opposée à un affluent, concavité plus marquée) ont subi de légers dégâts. Une troisième cause d'échec est la mauvaise reprise des boutures de saule mises en place sur le peigne. Dans le cas de la Rulles (ID-7), outre un problème d'exposition (ouvrage face au Nord), les saules ont fait l'objet de coupes trop régulières provoquées par les castors, les riverains et le bétail, la clôture étant trop proche du peigne. Enfin, parmi les facteurs de réussite, le retalutage de la berge est nécessaire avant la mise en place du peigne, ce qui a été le cas pour la Ligne (ID-8) mais pas pour la Berwinne (ID-4b).

Malgré la difficulté de dissocier les effets des multiples facteurs de fragilisation s'exerçant sur un même peigne, on peut néanmoins affirmer que : (i) les peignes installés sur des tronçons rectilignes, avec retalutage préalable de la berge, peuvent résister à

Tab. 3 – État des protections de berge par peigne et caractéristiques des crues subies.

Site	ID	Date de mise en place	Crue destructrice (ou crue la plus importante)				État de la berge	État de l'aménagement	Causes de la destruction
			Q (m ³ /s)	Q/Qb	T (ans)	ω (W/m ²)			
Aisne (Juzaine)	2b	2000	76 (13/02/2002)	3,2	70	294	En cours d'érosion	Majoritairement détruit	Contraintes hydrauliques, faible sédimentation
Berwinne (Berneau)	4b	2000	17 (11/07/2000)	1	0,6	67	En cours d'érosion	Détruit	Contraintes hydrauliques, angle d'attaque
Eau Blanche (Nismes)	5	2013	45,1 (25/12/2013)	1,6	2	67	En cours d'érosion	Partiellement détruit	Contraintes hydrauliques, angle d'attaque
Mehaigne (Ambresin)	6	2006	21,1 (7/01/2011)	1,8	10	21	Stabilisée	Bon état général (localement évidé)	Aucune
Rulles (Ansart)	7	2010	53,3 (14/11/2010)	2,2	8,2	39	En cours d'érosion	Partiellement détruit	Contraintes hydrauliques, angle d'attaque, faible sédimentation, éclaircissement insuffisant
Ligne (St-Martin)	8	2002	12,9 (23/06/2016)	1,2	N/A	63	Stabilisée	Bon état	Aucune

Tab. 3 – State of the tree revetments bank protections and flood characteristics.

des puissances atteignant au moins 50 W/m^2 pour un peigne non rempli en sédiments fins et 65 W/m^2 pour un peigne rempli de sédiments fins ; (ii) lorsque l'angle d'attaque est supérieur à 45° et en l'absence de remplissage du peigne par des fines, des puissances de $40\text{-}65 \text{ W/m}^2$ semblent suffisantes pour détruire les ouvrages.

Destinés à protéger l'entièreté de la berge, les « caissons » étudiés se sont avérés être une option de stabilisation efficace. Entre 7 et 20 ans après leur installation, les berges à protéger sont aujourd'hui stabilisées mais une reprise d'érosion est néanmoins observée pour deux des six sites étudiés (tab. 4 et fig. 3C).

Comme pour les autres types d'ouvrage, la cause principale de destruction des caissons est la puissance des crues qu'ils ont subies, bien que d'autres facteurs favorisent leur dégradation préalablement à leur destruction par les crues. La définition d'une valeur limite de puissance spécifique relative à la résistance des caissons est rendue délicate du fait de la diversité de conception des caissons du point de vue de leur dimensionnement et de leur

remplissage. Néanmoins, il apparaît que, jusqu'à 5 ans après leur installation, plusieurs caissons ont résisté à des crues dont la puissance spécifique était comprise entre 140 W/m^2 et 180 W/m^2 . Le caisson de l'Eau Noire (ID-10) a même résisté à une puissance de 209 W/m^2 . Au-delà de 5 ans, plusieurs caissons ont été endommagés pour des crues de même importance : 171 W/m^2 pour la Lienne (ID-9) et 182 W/m^2 pour l'Eau Noire (ID-10). Ces crues sont survenues au moment où le géotextile biodégradable, protégeant initialement le remplissage des caissons, était décomposé. A ce stade, c'est la végétation qui est censée prendre le relais de protection. Dans le cas de la Lienne (ID-9), la végétation n'a pas pu se développer en raison du mauvais éclaircissement de la berge et de la présence de castors sur le site peu de temps après la mise place du caisson. Dès lors, en l'absence d'un système racinaire fixant le remplissage du caisson, ce dernier s'est évidé. Dans le cas de l'Eau Noire – ID-10 (fig. 8), la destruction du caisson est davantage attribuée à sa vétusté car elle est survenue près de 15 ans après son installation, et ce pour une crue de plus faible importance (184 W/m^2) que la crue maximale survenue auparavant (209 W/m^2). Le seuil d'admissibilité de la puissance spécifique a dès lors probablement diminué en lien avec la vétusté, l'absence d'entretien ou peut-être une mauvaise conception. En effet, la structure du caisson, composée de rondins de mélèze, était en cours de pourrissement et localement délabrée par le système racinaire des aulnes qui s'y développent. Ajoutons qu'en raison de l'absence de recepage, les aulnes ont atteint une taille importante et présentent aujourd'hui un risque de basculement associé au recul de la berge, ce qui devrait par conséquent endommager davantage la structure du caisson.

Parmi les facteurs d'échec, outre les problèmes liés au mauvais éclaircissement de la berge et à l'impact des castors sur le développement de la végétation, trois défauts de conception sont mis en évidence. Le premier concerne le remplissage inadapté du caisson. En effet, les caissons de la Lesse (ID-12a) et de la Lienne (ID-9) ont été évidés de leur remplissage car ils étaient constitués d'un matériau caillouteux prélevé dans le lit mineur, peu cohésif et drainant, ne constituant pas un substrat favorable au développement de la végétation. Les autres caissons n'ont pas connu ce problème car ils étaient remplis par du matériau argilo-limoneux cohésif. Le second facteur d'échec concerne le dimensionnement du caisson. Un profil en escalier trop vertical, comme pour les caissons de la



Fig. 6 – Aisne à Juzaine (ID-2b) : peigne détruit 15 ans après sa mise en place et berge en cours d'érosion.

Vue vers l'amont. Les flèches blanches montrent les piquets métalliques de l'ancien peigne.

Fig. 6 – Aisne at Juzaine (ID-2b): tree revetments destroyed 15 years after installation and bank erosion.

Upstream view. The white arrows show the metal stakes of the remnant tree revetments

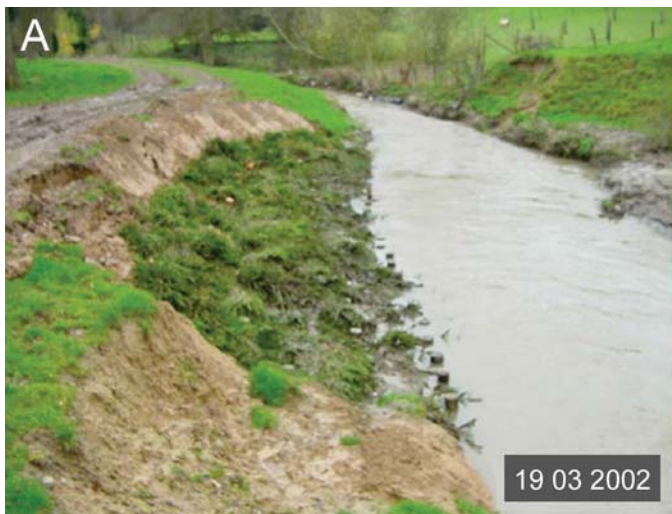


Fig. 7 – Peigne sur la Ligne à Saint-Martin (ID-8).

Vue vers l'aval. A. Juste après sa mise en place ; B. Développement des boutures de saule sur le peigne 21 mois après leur mise en place.



Fig. 7 – Tree revetments on the Ligne at Saint-Martin (ID-8).

Downstream view. A. Just after installation; B. Development of the willow cuttings 21 months after installation.

Tab. 4 – État des protections de berge par caisson et caractéristiques des crues subies.

Tab. 4 – State of the cribwall bank protections and flood characteristics.

Site	ID	Date de mise en place	Crue destructrice (ou crue la plus importante)				Etat de la berge	Etat de l'aménagement	Causes de la destruction
			Q (m ³ /s)	Q/Qb	T (ans)	ω (W/m ²)			
Lienne (Chession)	9	2005	37,3 (9/01/2011)	2,3	9,1	171	Reprise d'érosion	Partiellement détruit et évidé	Contraintes hydrauliques, remplissage inadapté, castor
Eau Noire (Petigny)	10	1996	68,5 (7/01/2011)	1,9	6,6	182	Reprise d'érosion	Partiellement détruit et évidé	Contraintes hydrauliques, mauvais dimensionnement
Sûre (Radelage)	11	1997	88,4 (3/01/2003)	2,8	31	142	Stabilisée	Bon état	Aucune
Lesse (Furfooz)	12a	1998	346 (3/01/2003)	2,6	30	180	Stabilisée	Partiellement détruit et évidé	Contraintes hydrauliques, mauvais dimensionnement, remplissage inadapté
Geer (Bergilers)	13	2003	5,48 (4/08/2008)	0,8	N/A	15	Stabilisée	Bon état	Aucune
Rulles (Ansart)	14	2009	53,3 (14/11/2010)	2,2	8,2	39	Stabilisée	Bon état	Aucune



Fig. 8 – Caisson sur l’Eau Noire à Petigny (ID-10).

A. Pendant sa mise en place en 1996 (photo L.-M. Petiau) ; B. Plantation d’aulnes sur le caisson (photo L.-M. Petiau) ; C. Caisson détruit 20 ans après son installation ; D. Détail des rondins endommagés.

Fig. 8 – Cribwall on the Eau Noire at Petigny (ID-10).

A. During its installation in 1996 (photo L.-M. Petiau); B. Alder planting on the cribwall (photo L.-M. Petiau); C. Ruined cribwall 20 years after installation; D. Detail of the damaged logs.

Lesse (ID-12a) et de l’Eau Noire – ID-10 (fig. 8), ne fournit pas d’espaces suffisamment larges sur les étages, ce qui ne favorise pas le développement de la végétation (fig. 8). En revanche, lorsque le caisson possède un profil moins vertical, avec des marches d’escalier relativement larges, la végétation dispose d’un espace suffisant sur chaque étage pour se développer. Ce dispositif s’est avéré efficace sur la Sûre – ID-11 (fig. 9), où la végétation s’est bien développée : boutures de saule sur l’étage inférieur, aulnes sur l’étage

intermédiaire et divers arbustes sur l’étage supérieur. Le troisième facteur d’échec concerne le diamètre des moises. Si les rondins possèdent un diamètre trop élevé (supérieur à 25 cm dans le cas du caisson de la Lesse – ID-12a), alors les espaces entre les longrines sont relativement larges, ce qui favorise l’entrée de l’eau dans le caisson en période de hautes eaux, et par conséquent la vidange du matériau de remplissage. Ce problème n’a été observé que sur les caissons qui comportaient un remplissage caillouteux.

Parmi les facteurs de réussite, on remarquera que l'ensemble des caissons a été installé sur une assise solide qui favorise leur stabilité : blocs d'enrochement, charge caillouteuse grossière ou roche en place. Enfin, il importe que le diamètre des moises soit inférieur à 25 cm, afin de ne pas favoriser l'entrée de trop grande quantité d'eau dans le caisson en période de crue, ce qui faciliterait l'érosion de son contenu.

Les sites dont les berges ont été protégées par la technique des « épis » peuvent être différenciés selon le rapport entre la longueur des épis et la largeur du lit au plein bord. Ce rapport est de 1/10 pour les épis de la Lesse – ID-12b et ID-15 (fig. 10) et de 2/3 pour le plus grand des épis de la Berwinne (ID-16). Ces systèmes en épis se différencient également par leur remplissage. Les épis de la Lesse sont composés de branchages de saule alors que ceux de la Berwinne comprennent des arbres entiers (épicéas) en plus des branches de saule.

Bien que les épis de la Lesse (ID-12b et ID-15) aient été partiellement détruits en 2003 pour une crue relativement puissante (~200 W/m²), ils ont résisté auparavant à des crues dont la puissance était de l'ordre de 150 W/m² (tab. 5). La période qui a précédé leur destruction a été suffisamment longue pour que la végétation puisse se développer sur les sédiments accumulés entre les épis, ce qui a permis de stabiliser la berge. Il en est de même pour la Berwinne (ID-16), où les épis ont résisté à plusieurs crues légèrement débordantes, dont la puissance spécifique a atteint 71 W/m². Ils ont ensuite été recouverts par l'accumulation des sédiments fins et grossiers provoquée par des crues plus importantes ($\omega = 124 \text{ W/m}^2$).

La sédimentation provoquée par les épis a été efficace pour les trois sites étudiés, en particulier pour la Berwinne (ID-16), ce qui

est à mettre en relation avec les concentrations en MES, qui sont de l'ordre de 160-200 mg/l pour la Lesse et 560 mg/l pour la Berwinne pour le débit à plein bord.

Dans le cas de la Berwinne (ID-16), la mise en place des épis, qui étaient surdimensionnés, a entraîné une profonde modification du milieu, avec un auto-ajustement du cours d'eau, qui est toujours en cours 16 ans après les travaux, et ce sur un linéaire de plus de deux fois la longueur du secteur d'intervention (Hallot et al., 2013). Le décalage du train de méandre a ainsi modifié les faciès d'écoulement en amont et en aval des épis, et a également entraîné de nouvelles zones d'érosion. Le site connaît une dynamique importante directement liée à l'occurrence des crues, à tel point que la berge à protéger connaît aujourd'hui une reprise d'érosion. Notons que les castors sont relativement actifs sur ce site. Bien qu'ils aient dans un premier temps stabilisé le développement de la végétation des épis en s'attaquant aux saules (recepape), ils ont par la suite mis à mal la végétation rivulaire d'une partie de la berge à protéger. L'impact des castors sur la pérennité des épis n'a pas pu être établi par la suite car les épis ont été recouverts par un dépôt de galets.

6. Discussion

D'une manière générale, il est difficile d'attribuer une seule et unique cause d'échec à un projet de stabilisation de berges par technique végétale car sa réussite repose sur de nombreux facteurs relevant des processus fluviaux, de la croissance des végétaux, de la conception et de la mise en œuvre du projet, etc. (Li et Eddleman, 2002). Néanmoins, pour les chantiers suivis dans cette étude, il apparaît que les contraintes hydrauliques des crues sont la

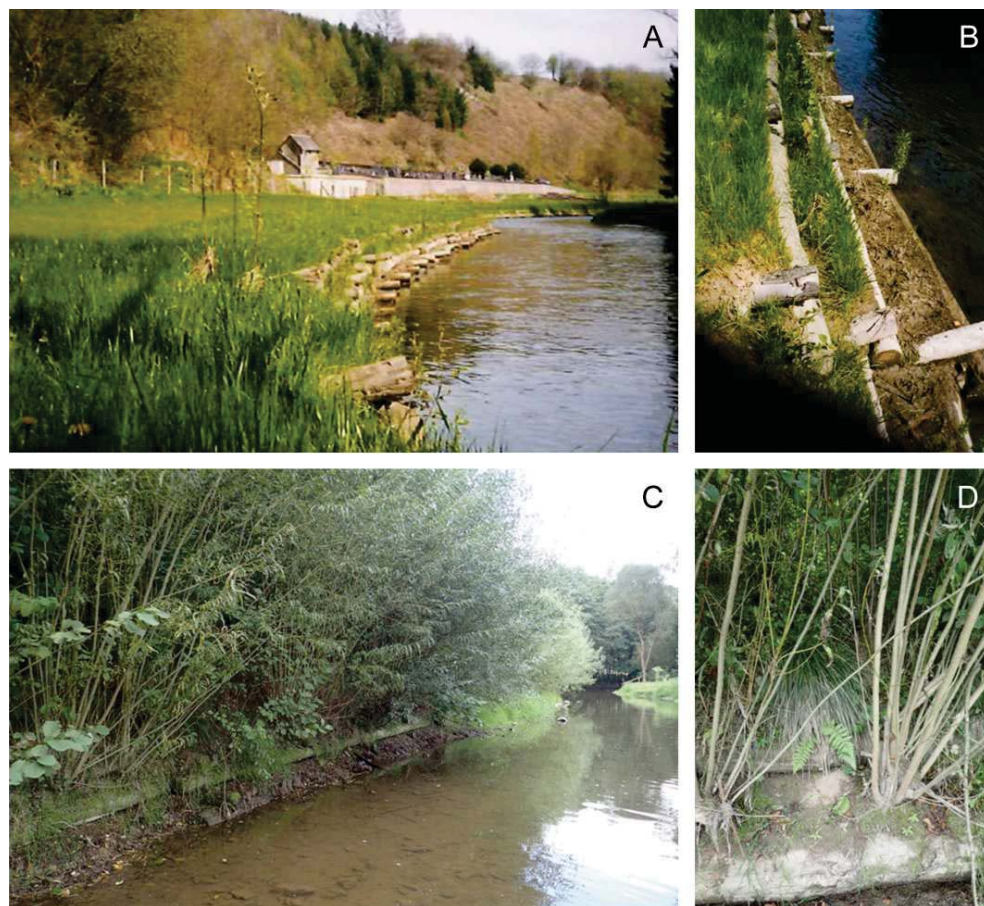


Fig. 9 – Caisson sur la Sûre à Rademange (ID-11).

Vue vers l'amont. A. Pendant sa mise en place en 1997 (photo D. Genin) ; B. Plantations sur les marches d'escalier (photo D. Genin) ; C. Caisson végétalisé 19 ans après son installation ; D. Détail des saules de l'étage inférieur.

Fig. 9 – Cribwall on the Sûre at Rademange (ID-11).

Upstream view. A. During its installation in 1997 (photo D. Genin); B. Plantations on the steps (photo D. Genin); C. Vegetated cribwall 20 years after installation; D. Detail of willows on the lower step.



Fig. 10 – Épis composés de branchages sur la Lesse à Villers-sur-Lesse (ID-15).

Vue vers l'amont. A. Pendant leur mise en place en 1996 ; B. 20 ans après leur mise en place. La flèche blanche montre l'extension d'un des épis détruits.

Fig. 10 – Brushwood groynes on the Lesse at Villers-sur-Lesse (ID-15).

Upstream view. A. During their installation in 1996; B. 20 years after their installation. The white arrow shows the limit of one of the remnant groyne.

principale cause de destruction des aménagements. C'est pourquoi nous tentons de définir ci-dessous des seuils d'admissibilité de puissances spécifiques pour les quatre techniques analysées, en comparant les résultats fournis par cette étude avec ceux de la littérature. Par ailleurs, il apparaît que plusieurs facteurs d'échec font en sorte que les aménagements sont dégradés avant leur destruction par la crue. Ils sont synthétisés dans le Tableau 6 et détaillés ci-dessous par type d'ouvrage. Enfin, sur base de l'analyse de l'état des aménagements de protection de berge sur le long terme, un modèle conceptuel de leur évolution a été construit pour chacune des quatre techniques (fig. 11).

Les « fascines » offrent une très bonne résistance aux forces hydrauliques, ce qui avait déjà été démontré par Gerstgraser (1999) sur base d'une analyse extensive de la littérature et des tests effectués en flume. D'après notre étude, les fascines ont pu résister à de fortes puissances spécifiques, de l'ordre de 130 W/m². Néanmoins, comme l'indique le modèle de la Figure 11, la valeur de puissance spécifique admissible est légèrement inférieure pour la période de 2-3 ans qui fait suite à la mise en place de la fascine (75 W/m² au minimum) car la végétation n'y est pas encore développée. Par ailleurs, des fascines dont le pied était renforcé de blocs ont résisté à des puissances de l'ordre de 300 W/m². Ces valeurs sont inférieures à celles mises en évidence par Sotir et Fischenich (2001). Leur synthèse, basée sur des mesures empiriques réalisées pour différents types de fascine, fournit des valeurs limites de vitesse et de tension de cisaillement qu'un ouvrage peut supporter, ce qui permet de déduire la puissance spécifique critique. Ainsi, pour une fascine vivante sans renforts, elle vaut 245 W/m². Lorsqu'une assise en enrochements est disposée au pied de la fascine, la puissance spécifique admissible est de 542 W/m². Il n'est pas étonnant que les valeurs rapportées par Sotir et Fischenich (2001) soient supérieures à celles observées dans cette étude, car elles sont calculées au niveau de la berge aménagée et non sur l'ensemble de la section d'écoulement. Plus récemment, Evette et al. (2017) ont réalisé des estimations de vitesses et de tensions de cisaillement de crues subies par des ouvrages en génie

Tab. 5 – État des protections de berges par épis et caractéristiques des crues subies.

Site	ID	Date de mise en place	Crue destructrice (ou crue la plus importante)				Etat de la berge	Etat de l'aménagement	Causes de la destruction
			Q (m ³ /s)	Q/Qb	T (ans)	ω (W/m ²)			
Lesse (Furfooz)	12b	2000	346 (3/01/2003)	2,6	30	180	Stabilisée	Partiellement détruit	Contraintes hydrauliques
Lesse (Villers/Lesse)	15	1996	339 (3/01/2003)	3,4	44	204	Stabilisée	Détruit	Contraintes hydrauliques
Berwinne (La Folie)	16	2001	37,3 (5/01/2012)	2,2	24	124	Reprise d'érosion	Enfouis	Contraintes hydrauliques, castor

Tab. 5 – State of the groyne bank protections and flood characteristics.

Tab. 6 – Facteurs d'échec de projets de stabilisation de berge.

Technique	Facteurs d'échec					
	Puissance spécifique (estimation minimale de valeur limite en W/m ²)	Concentration en MES (valeur limite en mg/l)	Angle d'attaque (valeur limite en °)	Remplissage inadapté	Éclaircissement insuffisant	Autres
Fascine	130	non	non	oui	oui	non
Peigne	65	~ 200	~ 45	non	oui	Berge non retalutée
Caisson	200	non	non	oui	oui	Mauvais dimensionnement castor
Épis	150	> 160	non	non	oui	Castor

Tab. 6 – Factors contributing to the failure of bank protection.

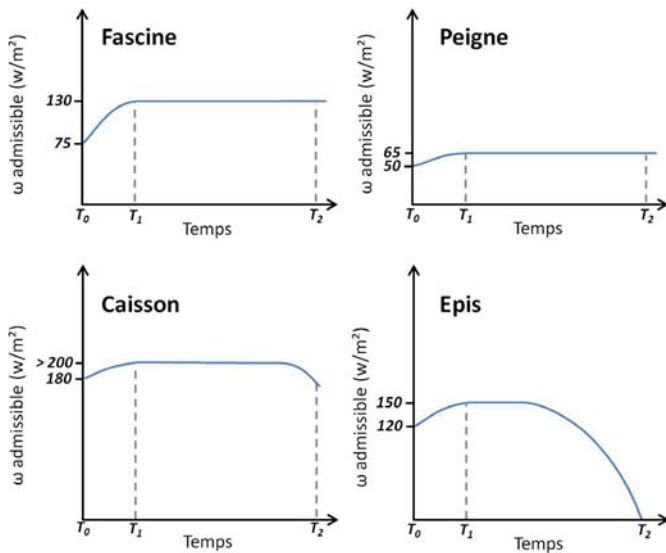


Fig. 11 – Modèle conceptuel de l'évolution de la résistance des aménagements de protection de berge en technique végétale.

ω = estimation minimale de la puissance spécifique admissible ; T_0 = Mise en place de l'aménagement ; T_1 = Aménagement végétalisé ($T_0 + 2-3$ ans) ; T_2 = État de l'aménagement sur le long terme ($T_0 + 12-15$ ans).

Fig. 11 – Conceptual model showing the evolution of the resistance of streambank stabilisation using bioengineering techniques.

ω = Minimum estimate of permissible stream power; T_0 = Bank protection installation; T_1 = Vegetated bank protection ($T_0 + 2-3$ years); T_2 = Long term evolution of the bank protection ($T_0 + 12-15$ years).

végétal sur des cours d'eau de montagne à forte énergie. Leurs estimations de vitesse d'écoulement maximale et de tension de cisaillement permettent de calculer une puissance spécifique maximale égale à 238 W/m², ce qui est semblable à la valeur fournie par Sotir et Fischenich (2001). Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues pour les fascines de cette étude. Cependant, à l'exception de l'Aisne (ID-2) pour laquelle l'aménagement est renforcé par des enrochements en pied de berge, les rivières étudiées ne sont pas capables de fournir de telles puissances spécifiques. Les puissances maximales atteintes (jusqu'à 153 W/m²) correspondent à des crues dont la récurrence est comprise entre 16 et 32 ans.

Le seul facteur de dégradation des fascines mis en évidence dans cette étude est leur remplissage inadapté par du matériau caillouteux facilement érodable (peu cohésif). L'évacuation de ce remplissage par les crues provoque une déconnexion entre la fascine et la berge, ce qui entraîne un risque de dessèchement des fagots, comme l'ont montré précédemment Evette et al. (2007) et Anstead et Boar (2010). Un mauvais éclaircissement de la berge, ne garantissant pas un bon développement végétal de la fascine, constitue un facteur d'échec récurrent (Sotir et Fischenich, 2001) mais il n'a pas fait défaut pour les fascines analysées dans cette étude. Enfin, bien que l'angle d'attaque entre le courant et la berge à protéger peut constituer un facteur de diminution du seuil d'admissibilité, comme le précise Batier (2004), les cas documentés dans cette étude n'ont pas permis de le démontrer.

Parmi les ouvrages de pied de berge, l'utilisation du « peigne » n'apparaît pas judicieuse sur les cours d'eau à forte énergie car sa destruction est favorisée (Dave et Mittelstet, 2017) et la sédimentation au sein de l'ouvrage n'est pas facilitée (Jund et al., 2003). Il semble donc que les peignes conviennent mieux pour des cours d'eau de plus faible énergie, qui comportent une charge en suspension importante. Les cas documentés dans cette étude ont montré que, pour des conditions optimales (tronçon rectiligne, berge retalutée), ils peuvent résister à des puissances atteignant

au moins 65 W/m² pour des peignes remplis en sédiments fins et 50 W/m² pour des peignes non encore remplis (fig. 11). Ces valeurs limites sont inférieures pour des secteurs à concavité prononcée, où des dégâts ont été occasionnés par des crues de 39 W/m². L'analyse de Veller et Doyle (2001), portant sur douze peignes installés sur des rivières de la Colombie Britannique (Canada), situe cette limite vers 50 W/m² pour les secteurs rectilignes. Cependant, pour les secteurs où l'angle d'attaque du courant par rapport à l'aménagement est supérieur à 45°, cette limite se trouve alors vers 30 W/m² (Veller et Doyle, 2001). Ceci rejoint nos observations et confirme que les peignes conviennent pour stabiliser des petites anses ou niches d'érosion, mais pas pour stabiliser une berge à concavité prononcée de méandre (Jund et al., 2003).

Enfin, la technique des peignes est uniquement adaptée aux cours d'eau qui transportent beaucoup d'alluvions fines lors des crues car le peigne nécessite un remplissage en sédiments fins (Jund et al., 2003). C'est probablement une des raisons pour lesquelles cette technique a bien fonctionné sur les rivières de Hesbaye, qui sont caractérisées par des concentrations en MES relativement importantes. Malgré le faible nombre de sites étudiés et la difficulté de dissocier les effets des multiples facteurs de fragilisation s'exerçant sur un même peigne, une valeur limite peut être définie grossièrement vers 200 mg/l de concentration en MES (pour le débit à plein bord). Ainsi, la mise en place d'un peigne ne pourrait être envisagée que sur des rivières dont les concentrations en MES sont supérieures à cette limite. Tenant compte des valeurs seuils de puissance spécifique, de concentration en MES et d'angle d'attaque, l'efficacité potentielle de la mise en place d'un peigne est définie à la Figure 12.

Parmi les autres facteurs favorables à la réussite d'un projet de stabilisation de berge par peigne, on citera le retalutage nécessaire de la berge avant à la mise en place du peigne, ce qui avait déjà été constaté par Veller and Doyle (2001).

Les « caissons » sont, d'après la littérature, la technique en génie végétal la mieux adaptée aux rivières à forte énergie (Lachat, 1994 ; Li et Eddleman, 2002 ; Krymer et Robert, 2014). Ils peuvent être installés sur des pentes de berge élevées et ils possèdent une très bonne résistance à l'érosion (Evette et al., 2007). Dans le cas

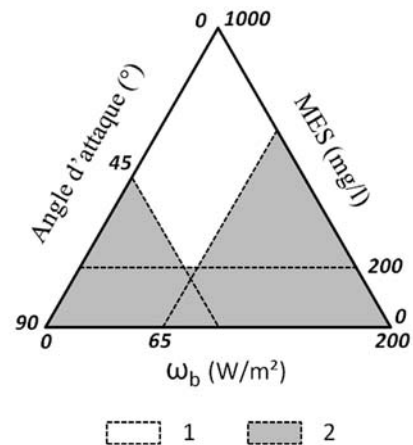


Fig. 12 – Diagramme définissant l'efficacité potentielle d'un projet de protection de berge par peigne.

1. Bonne efficacité potentielle ; 2. Mauvaise efficacité potentielle. ω_b = Puissance spécifique pour le débit à plein bord ; MES = Concentration des Matières En Suspension pour le débit à plein bord.

Fig. 12 – Diagram defining the potential effectiveness of a tree revetment bank protection.

1. High potential effectiveness; 2. Low potential effectiveness. ω_b = Unit stream power at the bankfull stage; MES = Total Suspended Solids at the bankfull stage.

des caissons analysés dans cette étude, leur évolution peut être synthétisée dans le modèle de la Figure 11 :

(i) dès sa mise en place (T_0), le caisson peut résister à des crues relativement importantes (puissance spécifique admissible de l'ordre de 180 W/m^2) grâce à sa structure en rondins et à sa couverture en géotextile ;

(ii) après 2 à 3 ans (T_1), le caisson est davantage résistant car il est renforcé par la végétation qui s'y est développée. Il peut résister à des crues dont la puissance spécifique est supérieure à 200 W/m^2 ;

(iii) au-delà de 5 ans, bien que le géotextile de protection soit décomposé, le caisson conserve sa bonne résistance grâce à la végétation. Néanmoins, il se peut que le système racinaire de la végétation ne prenne pas le relais de protection, soit à cause du remplissage inadapté en matériau caillouteux, soit en raison d'une mauvaise reprise de la végétation (mauvais éclaircissement et impact des castors), ce qui diminue sa résistance ;

(iv) enfin, une diminution de la résistance du caisson peut être observée après une petite quinzaine d'années (T_3) en raison de sa vétusté, comme pour le caisson de l'Eau Noire (ID-10) où les rondins étaient en cours de pourrissement et brisés par le système racinaire de la végétation ligneuse.

Cette valeur seuil de 200 W/m^2 de puissance spécifique est intéressante et peut être comparée avec les valeurs issues de la littérature, bien que ces dernières soient généralement exprimées par la tension de cisaillement. Ainsi, Lebois et al. (2016) fournissent une tension de cisaillement issue de la littérature égale à 500 N/m^2 pour un caisson de moins d'un an, et à 600 N/m^2 pour un caisson de plus d'un an, ce qui est très élevé. Par contre, ils obtiennent pour les caissons qu'ils ont étudiés un cas de rupture pour une valeur de 381 N/m^2 et un cas de résistance pour 153 N/m^2 . Malheureusement, sans valeurs de vitesses d'écoulement, il n'est pas possible de convertir ces valeurs de tension de cisaillement en puissance spécifique. Evette et al. (2017) fournissent, quant à eux, des valeurs de vitesses et de tensions de cisaillement estimées pour des cours d'eau de montagne à forte énergie, ce qui permet d'en déduire la puissance spécifique. Trois des aménagements qu'ils ont suivis ont résisté à des crues dont la puissance spécifique estimée a atteint $360\text{-}380 \text{ W/m}^2$. Ces valeurs limites dépassent de loin les valeurs limites mises en évidence sur les rivières wallonnes. Il faut toutefois préciser que :

(i) les rivières analysées dans notre étude ne sont pas capables d'atteindre de telles puissances spécifiques, les puissances maximales (jusqu'à 209 W/m^2) correspondant à des crues dont la récurrence est déjà supérieure à la crue décennale ;

(ii) les rivières analysées par Evette et al. (2017) ont été suivies sur une durée de 5 ans, alors que celles traitées dans cette étude ont été suivies sur une plus longue durée, et que les cas de rupture des aménagements sont survenus à partir de 5 ans après leur installation ;

(iii) la conception des caissons n'est pas la même pour les deux études, les caissons de notre étude ne comportant pas systématiquement une assise en enrochements, ni de géotextile synthétique dans la partie inférieure du caisson.

Les facteurs de dégradation des caissons étudiés sont liés à une mauvaise reprise de la végétation et à un défaut de conception. Dans le premier cas, outre un mauvais éclaircissement de l'ouvrage, le développement de la végétation peut également être compromis par les dégâts provoqués par les castors. Dès lors, il faut veiller à ce que le caisson possède les conditions optimales d'ensoleillement pour que la végétation puisse s'y développer. Il est également parfois nécessaire d'installer des dispositifs de protection contre les castors (clôtures, manchons grillagés, gaines en plastique, etc.). En ce qui concerne les défauts de conception, c'est le remplissage inadapté du

caisson qui est le plus récurrent. L'utilisation de matériaux argilo-limoneux s'est avérée être plus efficace que l'emploi de galets. Ces derniers sont peu appropriés car ils sont peu cohésifs et donc sujets à l'affouillement. De plus, de par leur granulométrie et leurs conditions hygrométriques, ils ne constituent pas un substrat dans lequel la végétation peut facilement s'enraciner. Les matériaux caillouteux peuvent néanmoins être disposés au contact entre la berge et le caisson, sous la forme d'une chemise drainante, comme le préconisent Lachat (1994) et Evette et al. (2013). Néanmoins, ce rôle de drainage peut être pris en charge par le système racinaire des plantes. Le reste du caisson doit être rempli de matériaux argilo-limoneux bien compactés (Lachat, 1994). La verticalité trop prononcée du caisson représente également un défaut de conception car la végétation dispose de trop peu de place sur étages pour se développer. Il faut donc préférer lui donner un profil en marches d'escalier, offrant davantage d'espace disponible pour l'enracinement. Précisons également que les moises ne doivent pas avoir un diamètre supérieur à 25 cm afin de ne pas favoriser l'entrée de l'eau dans le caisson en période de crue, ce qui provoquerait la vidange de son contenu. Les valeurs généralement préconisées sont comprises entre 15 à 30 cm (Lachat, 1994 ; Krymer et Robert, 2013), voire inférieures à 15 cm (Evette et al., 2013).

Enfin, pour favoriser la stabilité du caisson, il faut qu'il soit mis en place sur une assise solide ne devant pas subir de déformations (Lachat, 1994 ; Verniers et al., 2009), ce qui a été respecté pour les six caissons étudiés.

Les systèmes composés « d'épis végétaux » ont une durée de vie limitée en fonction de l'occurrence des crues qu'ils subissent (fig. 11). Ils constituent néanmoins des aménagements efficaces. L'important est qu'ils restent en place suffisamment longtemps pour que la sédimentation se fasse entre les épis et que la végétation s'installe sur les sédiments accumulés. Un des facteurs clés de l'efficacité des épis est la capacité du cours d'eau à fournir des sédiments fins, qui se traduit par sa concentration en MES. Les ouvrages en épis que nous avons étudiés se sont montrés tous efficaces de ce point de vue, et ce pour des rivières dont la concentration en MES était supérieure à 160 mg/l (pour le débit à plein bord). Davantage de sites d'étude sur des rivières à plus faible charge en suspension, permettrait d'estimer une limite de concentration en MES en-dessous de laquelle la mise en place des épis n'est pas recommandée.

Concernant la résistance que les épis peuvent développer face aux crues, il apparaît que ces derniers peuvent résister à des crues dont la puissance est de l'ordre de 150 W/m^2 mais qu'ils peuvent être endommagés pour des crues dont la puissance est supérieure à $180\text{-}200 \text{ W/m}^2$. Le cas de la Berwinne (ID-16) présente une puissance admissible moins importante (destruction pour 124 W/m^2) car les épis étaient surdimensionnés par rapport à la largeur du cours d'eau. Evette et al. (2013) font également état d'un chantier de dispositif en épis qui s'est avéré efficace. Réalisés sur une rivière à forte pente des Hautes-Pyrénées caractérisée par un transport solide important, ces épis ont favorisé une sédimentation en pied de berge, sur laquelle s'est installée une végétation herbacée. Ils précisent que, dix ans après les travaux, les épis sont toujours partiellement présents et qu'ils ont été régulièrement submergés, notamment par une crue légèrement inférieure à la crue décennale survenue 3 ans après les travaux. Cependant, ces crues ne sont pas caractérisées en fonction de leur énergie, ce qui ne permet pas de les comparer avec les aménagements de notre étude.

L'avantage des épis est qu'ils permettent de définir des secteurs du lit que l'on souhaite approfondir par affouillement ou d'autres que l'on vise à remblayer par sédimentation (Evette et al., 2013). En effet, de par leur emprise, leur orientation et leur longueur (par

rapport à la largeur du cours d'eau), les épis modifient les vitesses et la direction du courant du cours d'eau. Dans certains cas où le dimensionnement des aménagements ne tient pas suffisamment compte des caractéristiques du cours d'eau, l'impact des épis peut s'avérer nul ou disproportionné. Dans le cas de la Berwinne (ID-16), les épis surdimensionnés ont certes protégé la berge pendant près de 15 ans. Cependant, ils ont surtout entraîné des répercussions morphologiques du cours d'eau sur plus de deux fois la longueur du secteur d'intervention (Hallot et al., 2013). Cette dynamique a provoqué 15 ans plus tard une reprise d'érosion de la berge à protéger (Peeters et al., 2016).

7. Conclusion

Les aménagements de protection de berges mis en place il y a 10-20 ans ont dans l'ensemble bien rempli leur rôle, même si plusieurs d'entre eux sont aujourd'hui partiellement détruits. Il est primordial que les aménagements restent en bon état pendant les premières années qui suivent leur installation, le temps que la végétation puisse s'y développer et stabiliser la berge par son système racinaire. Toutefois, dans certains cas, une reprise d'érosion de la berge a été observée plusieurs années après la mise en place de l'aménagement. L'analyse des crues subies par les aménagements a permis de définir des valeurs limites de puissance spécifique auxquelles les ouvrages peuvent résister. Par cette approche empirique il apparaît que les fascines peuvent supporter des puissances de l'ordre de 130 W/m², 65 W/m² pour les peignes, 200 W/m² pour les caissons et 150 W/m² pour les épis végétaux. Cependant, d'autres facteurs font en sorte que les aménagements peuvent être dégradés avant leur destruction par la crue, ce qui les rend vulnérable pour des puissances spécifiques moins importantes. Les facteurs de dégradation mis en évidence sont (i) une mauvaise reprise de la végétation liée à un problème d'exposition, à des coupes non gérées et à la présence d'animaux pouvant nuire aux plantations, (ii) des défauts de conception des aménagements (remplissage inadapté, mauvais dimensionnement) et (iii) une mauvaise prise en compte des caractéristiques de la rivière (énergie, concentration en MES).

Enfin, cette analyse met en évidence l'importance de caractériser le contexte géomorphologique des rivières soumises à intervention. En effet, en plus des facteurs hydrologiques classiques (régime et niveau des eaux) et des paramètres techniques liés à l'aménagement, il faut tenir compte des facteurs géomorphologiques, tels que les concentrations en MES et la puissance du cours d'eau.

Remerciements

Les auteurs remercient la DCENN (Direction des Cours d'Eau non navigables) du SPW (Service Public de Wallonie) pour le financement de cette étude, ainsi que pour la mise à disposition des données hydrologiques et des nombreux documents techniques relatifs aux ouvrages suivis.

Références

Agence de l'Eau Rhin-Meuse (1997) – Guide de restauration des rivières, 62 p.

Allen H.H., Leech J.R. (1997) – Bioengineering for Streambank Erosion Control, Report 1: Guidelines. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station Technical Report, EL-97-8. 90 p.

Anstead L., Boar R.R. (2010) – Willow spiling: review of streambank stabilisation projects in the UK. *Freshwater Reviews*, 3, 33-47.

Anstead L., Boar R.R., Tovey N.K. (2012) – The effectiveness of a soil bioengineering solution for river bank stabilisation during flood and drought conditions: two case studies from East Anglia. *Area*, 44, 479-488.
DOI : 10.1111/j.1475-4762.2012.01132.x

Batier P. (2004) – Bilan de dix années de protections des berges en génie végétal, bassin de la Touques, 1994-2004, CATER Basse-Normandie - Association P.A.R.A.G.E.S., 33 p.

Bravard J.-P. (1998) – Le temps et l'espace dans les systèmes fluviaux, deux dimensions spécifiques de l'approche géomorphologique. *Annales de Géographie*, 107 (599), 3-15.
DOI : 10.3406/geo.1998.20830

Bravard J.-P., Petit F. (2000) – Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris, 221 p.

Brookes A. (1988) – Channelized Rivers, perspectives for environmental management. Wiley, New York, 326 p.

Brookes A., Shields D.A. (Eds.) (1996) – River channel restoration: guiding principles for sustainable projects. John Wiley and Sons, 458 p.

Cavaillé P., Dommanget F., Daumergue N., Loucougaray G., Spiegelberger T., Tabacchi E., Evette A. (2013) – Biodiversity assessment following a natural gradient of riverbank protection structures in French prealps rivers. *Ecological Engineering*, 53, 23-30.
DOI : 10.1016/j.ecoleng.2012.12.105

Dave N., Mittelstet A.R. (2017) – Quantifying Effectiveness of Streambank Stabilisation Practices on Cedar River, Nebraska. *Water*, 9 (12), 930.
DOI : 10.3390/w9120930

European Commission (2000) – Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23rd October 2000: Establishing a framework for community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities L* 327, 1-72.

Evette A., De Danieli S., Labonne S., Sardat N., Crosaz Y. (2007) – Synthèse et bilan critique des réalisations de génie écologique pour la maîtrise de l'érosion en rivière. Irstea, Grenoble, 99 p.

Evette A., Frossard P.A. (2009) – Les végétaux ont du génie. *Espaces Naturels*, 26, 35-37.

Evette A., Frossard P.A., Vale N., Lebois S., Recking A. (2017) – Oser le génie végétal en rivière de montagne – Retour d'expérience sur les ouvrages Géni'Alp. *Sciences, Eaux et Territoires*, article hors-série n° 32, 6 p.

Evette A., Labonne S., Rey F., Liebault F., Jancke O., Girel J. (2009) – History of Bioengineering Techniques for Erosion Control in Rivers in Western Europe. *Environmental Management*, 43, 972-984.
DOI : 10.1007/s00267-009-9275-y

Evette A., Roman D., Barré J.-B., Cavaillé P., Espinasse F. (2013) – Recueil d'expériences techniques. In Bonin L., Evette A., Frossard P.-A., Prunier P., Roman D., Valé N. *Génie végétal en rivière de montagne – Connaissances et retours d'expériences sur l'utilisation d'espèces et de techniques végétales : végétalisation de berges et ouvrages bois*. Grenoble, 63-145.

FISRWG, Federal Interagency Stream Restoration Working Group (1998) – Stream corridor restoration: Principles, processes, and practices. GPO Item no. 0120-A; SuDocs no. A 57.6/2: EN 3/PT.653. ISBN-0-934213-59-3.

Fischenich C. (2001) – Stability thresholds for stream restoration materials. Technical report EMRRP SR-29, Vicksburg, MS: USACE ERDC, Environmental Laboratory, 10 p.

Frothingham K.M. (2007) – Evaluation of stability threshold analysis as a cursory method of screening potential streambank



- stabilisation techniques. *Applied Geography*, 28 (2), 124-133.
DOI : 10.1016/j.apgeog.2007.07.006
- Gerstgraser C. (1999)** – The effect and resistance of soil bioengineering methods for streambank protection. In *Proceedings of the International Erosion Control Association 29th Conference, IECA Conference on Feb. 22-26, Nashville, Tennessee, USA, 389-391.*
- Gischer L., Hallot E., Houbrechts G., Van Campenhout J., Petit F. (2012)** – Analyse des débits en période de tarissement : Essai d'une typologie régionale appliquée à des rivières du bassin de la Meuse (Belgique). *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 59, 59-80.
- Gob F., Bilodeau C., Thommeret N., Belliard J., Albert M.-B., Tamisier V., Baudoin J.-M., Kreutzenberger K. (2014)** – Un outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau pour l'application de la DCE en France (CARHYCE). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 20, 1, 57-72.
DOI : 10.4000/geomorphologie.10497
- Gray D., Sotir R. (1996)** – *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilisation – A Practical Guide for Erosion Control.* John Wiley and Sons, Inc., New York, 400 p.
- Gumbel E.J. (1941)** – The return period of flood flows. *The Annals of Mathematical Statistics*, 12 (2), 163-190.
DOI : 10.1214/aoms/1177731747
- Hallot E., Houbrechts G., Peeters A., Van Campenhout J., Petit F. (2007)** – Convention relative au suivi géomorphologique de chantiers de techniques végétales d'aménagement de berges. Rapport d'activité, Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale, ULg, 91 p.
- Hallot E., Peeters A., Houbrechts G., Verniers G., Petit F. (2013)** – Suivi à long terme d'un chantier de protection de berge par techniques végétales : la Berwinne à la Folie. Actes du colloque : « La restauration hydromorphologique des cours d'eau : premiers enseignements du projet Walphy ». Namur, 15-17 octobre 2013, 55.
- Houbrechts G., Levecq Y., Peeters A., Hallot E., Van Campenhout J., Denis A.-C., Petit F. (2015)** – Evaluation of long-term bedload virtual velocity in gravel-bed rivers (Ardenne, Belgium). *Geomorphology*, 251, 6-19.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.05.012
- Houbrechts G., Van Campenhout J., Levecq Y., Hallot E., Peeters A., Petit F. (2012)** – Comparison of methods for quantifying active layer dynamics and bedload discharge in armoured gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 1501-1517.
- Jund S., Paillard C., Kleiber E. (2003)** – Retour d'expérience des travaux réalisés en techniques végétales sur les cours d'eau français. Guide technique – Rapport général et fiches techniques, Sinbio, Les études des Agences de l'Eau, 59 p. + fiches.
- Knighton D. (1998)** – *Fluvial Forms & Processes: A New Perspective.* London: Arnold, 383 p.
- Kondolf G.M., Micheli E.R. (1995)** – Evaluating stream restoration projects. *Environmental Management*, 19 (1), 1-15.
DOI : 10.1007/BF02471999
- Krymer V., Robert A. (2014)** – Stream restoration and cribwall performance: a case study of cribwall monitoring in Southern Ontario. *River Research and Applications*, 30, 865-873.
DOI : 10.1002/rra.2684
- Lachat B. (1994)** – Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales. Ministère de l'Environnement, France, 143 p.
- Lambot F. (2001)** – Les techniques de génie végétal dans les cours d'eau. In « La gestion intégrée des cours d'eau : l'apport des techniques végétales ». Division de l'Eau, Direction des Cours d'eau non navigables, 91-97.
- Lebois S., Evette A., Recking A., Favier G. (2016)** – Amélioration des méthodes de dimensionnement des ouvrages de génie végétal en berges de cours d'eau par une approche empirique. *Sciences Eaux et Territoires, Article hors-série n° 27.*
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P. (1964)** – *Fluvial Processes in Geomorphology.* Freeman W.H. (Ed.), San Francisco, 522 p.
- Li M.-H., Eddleman K.E. (2002)** – Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods. A biotechnical streambank stabilisation design approach. *Landscape and Urban Planning*, 60, 225-242.
DOI : 10.1016/S0169-2046(02)00057-9
- Mols J. (2004)** – Dynamique fluviale en réponse aux changements d'affectation du sol des bassins versants de l'Euregio Meuse-Rhin. Mémoire DEA Sciences, Univ. Liège, 55 p.
- Newson M.D., Large A.R.G. (2006)** – 'Natural' rivers, 'hydromorphological quality' and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 1606-1624.
- Peeters A., Van Campenhout J., Petit F., Houbrechts G. (2016)** – Évaluation de l'efficacité d'aménagements de protection de berges en technique végétale en lien avec la puissance spécifique des cours d'eau et recommandations de gestion. Convention SPW-DCENN, rapport final, 83 p.
- Petit F. (1975)** – Zone de dépôts et points d'érosion dans les méandres et les sinuosités du Geer inférieur. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 11, 129-145.
- Petit F. (1995)** – Régime hydrologique et dynamique fluviale des rivières ardennaises. In: Demoulin A. (Ed.), *L'Ardenne : Essai de Géographie Physique. Hommage au Professeur A. Pissart*, University of Liège, Belgium, 194-223.
- Petit F., Daxhelet C. (1989)** – Détermination du débit à pleins bords et de sa récurrence dans différentes rivières de Moyenne et de Haute Belgique. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 25, 69-84.
- Petit F., Hallot E., Houbrechts G., Levecq Y., Mols J., Peeters A., Van Campenhout J. (2008)** – La typologie et les caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau wallons. Actes du colloque La gestion physique des cours d'eau : Bilan d'une décennie d'ingénierie écologique, Namur, 10-12 octobre 2007, 7-16.
- Petit F., Hallot E., Houbrechts G., Mols J. (2005)** – Evaluation des puissances spécifiques de rivières de moyenne et de haute Belgique. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 46, 37-50.
- Petit F., Houbrechts G., Peeters A., Hallot E., Van Campenhout J., Denis A.-C. (2015)** – Dimensionless critical shear stress in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 250, 308-320.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.09.008
- Pollen N. (2006)** – Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: accounting for soil shear strength and moisture. *Catena*, 69, 197-205.
- Reubens B., Poesen J., Danjon F., Geudens G., Muys B. (2007)** – The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees*, 21, 385-402.
- Rey F., Crosaz Y., Cassotti F., De Matos M. (2015)** – Génie végétal, génie biologique et génie écologique : concepts d'hier et d'aujourd'hui. *Science Eaux et Territoires*, 16, 4-9.
- Schiechl H.-M., Stern R. (1997)** – *Water Bioengineering Techniques: for Watercourse, Bank and Shoreline Protection.* Wiley-Blackwell, Oxford, 186 p.
- Schmidt L., Bravard J.P., Rey F. (2013)** – Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement,...) et mieux gérer les

- formes fluviales. In: Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat B. (coord.), 84-93.
- Schmitt L., Maire G., Humbert J. (2001)** – La puissance fluviale : définition, intérêt et limites pour une typologie hydro-geomorphologique de rivières. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 45 (2), 201-224.
- Simon A., Collison J.C. (2002)** – Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 527-546.
- Simon K., Steinemann A. (2000)** – Soil bioengineering: Challenges for planning and engineering. *Journal of Urban Planning and Development*, 126 (2), 89-102.
DOI : 10.1061/(ASCE)0733-9488(2000)126:2(89)
- Sotir R.B., Fischenich C. (2001)** – Live and inert fascine streambank erosion control. Technical Notes, ERDC TN-EMRRP-SR-31, U.S. Army Corps of Engineers Engineering Research and Development Center, Vicksburg, MS., 8 p.
- Stam M.H. (2002)** – Effect of land-use and precipitation changes on floodplain sedimentation in the nineteenth and twentieth centuries (Geul River, The Netherlands). Special Publications of the International Association of Sedimentologists, 32, 251-267.
- Thorne C.R. (1990)** – Processes and mechanisms of river bank erosion. In: *Vegetation and Erosion*, Thornes J.B. (Ed.), John Wiley & Sons, Chichester, 125-144.
- Van Campenhout J., Denis A.-C., Hallot E., Houbrechts G., Levecq Y., Peeters A., Petit F. (2013)** – Flux des sédiments en suspension dans les rivières du bassin de la Meuse : proposition d'une typologie régionale basée sur la dénudation spécifique des bassins versants. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 61, 15-36.
- Veller J.-C., Doyle P.F. (2001)** – Field performance of conventional tree revegetation bank protection. *Canadian Water Resources Journal*, 26 (1), 91-105.
- Verniers G. (1995)** – Aménagement écologique des berges des cours d'eau. *Techniques de stabilisation*, Presses universitaires de Namur, 84 p.
- Verniers G., Petit F., Hallot E., Houbrechts G. (2009)** – Techniques végétales : conception, application et recommandations, DCENN, 62 p.

Abridged English version

Stream bank erosion is a key geomorphological process of the fluvial ecosystem, but it is also a potential threat to economic developments (loss of land, damage to property and infrastructure). Therefore, measures might be taken to mitigate erosion and to stabilize banks. Compared to the hard engineering stabilisation techniques, bioengineering methods rely on the use of live plants through (i) efficient root systems stabilizing the eroding streambank, and (ii) well-developed stems providing a protection against flood flow erosion by slowing water velocities adjacent to the banks. Bioengineering techniques have a capacity to increase their resistance over time and to self-regenerating thanks to the growth of vegetation (Evette et al., 2009). However, the stabilisation may be vulnerable during the first years after installation due to the poor growth of vegetation. Hence strengthening components such as stakes or coir geotextile rolls can be used to compensate for this early stage of weakness. When these strengthening components are deteriorating, the vegetation takes on the role of bank protection.

Assessing the effectiveness of a stream bank protection project refers not only to the monitoring of the overall condition of the protective structure, but also and above all to the evaluation of bank stability. In addition, post-project evaluation must be carried out over the long term to cover the period during which the protective structure is degrading. However, the lack of post-construction evaluation is a common problem, and those concerning the long term are even scarcer. This study provides such a long-term monitoring in evaluating the resistance of nineteen stabilisation projects up to twenty years post-construction.

Undertaken in Wallonia (Belgium) from the nineties, the bank stabilisation projects were performed according to four techniques: fascine, tree revetment, cribwall and system of groyne. They are located on streams belonging to the Meuse basin, with the exception of the Sûre site which is an affluent of the Moselle. All the sites spread over the Ardennes region and its neighboring regions, which implies a diversity of geomorphological contexts, resulting in a wide range of unit stream powers (from 9 to 147 W/m² at the bankfull stage) and Total Suspended Solids (TSS, from 26 to 2,618 mg/l at the bankfull stage).

The methodology was based on (i) the assessment of the stream bank stability and (ii) the analysis of the characteristics of the floods

likely to have destabilized the protected bank. Stream bank stability was assessed under low water conditions, focusing on the overall condition of the protective structure, the presence of vegetation stabilizing the bank and the potential morphological impacts on a larger scale. The analysis of flood characteristics was based on three parameters: the discharge (and its ratio to the bankfull discharge), the flood recurrence intervals and the unit stream power. Compared to shear stress, unit stream power has the advantage of being easy to determine. It is a simple function of slope, discharge and width. Unit stream power was calculated for three characteristic discharges: (i) the first post-construction discharge which is equal or higher than the bankfull discharge, (ii) the maximum discharge value at which the bank protection have resisted and (iii) the discharge that caused the destruction of the bank protection. Note that if the date of destruction is not known, the maximum post-construction discharge is then considered to be the destructive discharge.

The objective was to determine for each technique a permissible stream power threshold, i.e., the maximum power value at which the bank protection can resist. Additional values from the literature have supplemented the values calculated in this study, although they were not systematically expressed in terms of unit stream power. The values of shear stress and of stream power could be converted into unit stream power using respectively the permissible velocity and the width, when they were available.

The results have shown that most of the bank protection projects were effective, although many protective structures are now partially destroyed. In some cases, damage to the protective structure has led to a renewed erosion of the bank. It is difficult to attribute a single cause of failure to a bank stabilisation project because its success depends on many factors related to fluvial processes, plant growth, project design and implementation, etc. Nevertheless, the most common cause of failure is the magnitude of stream discharge. On the other hand, it appears that several factors are causing the protective structure to be degraded before their destruction by the flood. The causes of degradation and the permissible stream power thresholds are presented below for each technique.

The four studied "fascines" proved to be an effective protection against erosion, as already shown by several authors. Although a renewed erosion was observed at one of the monitored sites, its

bank is now stabilized thanks to the root system of the vegetation. We highlighted a permissible stream power threshold of 130 W/m^2 , which should be somewhat lower for the early stage (immediately after completion). Moreover, fascine strengthened by rock ripraps at their toe are even more resistant to floods (permissible stream power threshold higher than 300 W/m^2). A common factor of failure is the inadequate filling of the fascine with pebbles (between the bundles and the bank). The latter is not cohesive enough and they are likely to be eroded, which would disconnect the fascine from the bank, leading to a risk of the fagots drying out.

Among the six "tree revetment" projects studied, only two were effective. The four others were degraded or even destroyed, which reactivated the bank erosion. The permissible stream power threshold is of the order of 65 W/m^2 . Floods were the main cause of failure but several factors have degraded the bank protections before their destruction. The two main factors of degradation were the lack of sedimentation within the structure and the sharp flow angle of attack. We showed that the tree revetment protection were effective only on rivers with high TSS, as most of these structures require filling with fine sediments. Despite the low number of studied sites, we would place this limit around 200 mg/l (TSS at the bankfull stage). Several protective structures were damaged on sites characterized by a sharp angle of attack between the flow and the tree revetment. Sites with an angle of 45° may suffer damage for smaller floods ($\sim 30 \text{ W/m}^2$).

"Cribwall" are used to protect the whole bank and their robustness make them suitable for high energy streams. They are even more

resistant 2-3 years post-installation when the vegetation is well developed. We highlighted a permissible stream power threshold of 200 W/m^2 . However, two of the six studied cribwall were damaged for similar stream power values, which caused a slight renewed of bank erosion. The first one was damaged after fifteen years due to its advanced state of deterioration (logs broken and rotting) while the second one was rapidly wrecked on account of the poor vegetation recovery (due to the lack of sunlight and the damages caused by beaver). We identified other deterioration factors related to an inadequate filling (pebbles instead of silty material) or an unsuited design (profile too vertical without steps wide enough to allow vegetation to grow).

The monitored system of "vegetated groyne" have protected the bank effectively by deviating the stream flow towards the opposite bank. Their permissible stream power threshold is 150 W/m^2 for the first few years post-project period. Their resistance subsequently decreases in relation with the occurrence of floods, until their destruction. Nevertheless they remain effective, provided that the vegetation has had time to settle on the bank. As for tree revetment technique, system of groyne are more effective on rivers with high TSS.

We conclude from this study that the geomorphological context must be characterized prior to the stream bank stabilisation project. In addition to the regular hydrological factors and the technical parameters of the protective structure, geomorphological parameters such as TSS and unit stream power must also be taken into account.