

Le génie végétal sur les berges de cours d'eau : des techniques aux multiples bénéfices

André Evette, Guillaume Piton, Philippe Janssen, Fanny Dommanget, Nadège Popoff, Delphine Jaymond, Camille Guilloteau, Solange Leblois, Sébastien De Danieli, Alain Recking, Delphine Jung, Anne Vivier, François-Marie Martin, Renaud Jaunatre, Éléonore Mira, Marie Didier

Sommaire

N°48

Dans les zones où la pression foncière est forte, l'espace disponible pour les forêts riveraines (ripisylves) est souvent réduit, et les endiguements et protections de berges associées sont fréquents. La place disponible pour la préservation ou la restauration d'un espace de mobilité pour le cours d'eau est ainsi souvent limitée. Des aménagements sont construits dans l'objectif de protéger les enjeux humains (habitations, infrastructures...) des risques d'érosion et d'inondation. D'une façon générale, les ouvrages de protection de berge sont de trois types : les ouvrages de génie civil constitués de maçonneries en pierre ou en béton, de gabions ou d'enrochements ; les ouvrages de génie végétal constitués de végétaux vivants et qui utilisent les caractéristiques des plantes pour protéger les berges contre l'érosion ; et les ouvrages mixtes qui associent ces deux techniques.

Le génie végétal fait l'objet de multiples travaux de recherche depuis de nombreuses années. Mais qu'est-ce que le génie végétal ? Quels sont les avantages des ouvrages en génie végétal pour la biodiversité par rapport à d'autres techniques ? Quelle est leur résistance mécanique ? Quelles préconisations peut-on formuler en ce qui concerne leur entretien ? Cette publication a pour objectif d'apporter des éléments de réponse à ces questions.

- 1 - Le génie végétal : définition et objectifs
- 2 - Un apport certain du génie végétal pour la biodiversité
- 3 - Résistance mécanique et entretien des ouvrages de génie végétal
- 4 - Bibliographie



© Sébastien De Danieli - INRAE

1 – Le génie végétal : définition et objectifs

Les berges de cours d'eau constituent des milieux d'interface qui accueillent une grande biodiversité floristique et faunistique. Ces milieux remplissent également un grand nombre de fonctions et services écologiques, comme les fonctions de corridor biologique, la dépollution, l'ombrage, les services récréatifs...

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

« Les solutions fondées sur la nature sont des actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés, pour relever directement les enjeux de société de manière efficace et adaptative tout en assurant le bien-être humain et des avantages pour la biodiversité » (UICN, 2016). Les techniques de génie végétal sur les berges de cours d'eau font partie des solutions fondées sur la nature (SFN) (Fernandes & Guiomar, 2018), en ce sens qu'elles cherchent à reproduire des modèles naturels aux bénéfices conjoints de la société et des écosystèmes. Ainsi ces techniques contribuent à au moins 6 des 7 grands défis sociétaux relevés par les SFN (UICN, 2020). Pour ce qui est du bien être humain, les techniques de génie végétal protègent les biens et les personnes situés à proximité de cours d'eau (Frossard & Evette, 2009), notamment en empêchant l'érosion des berges (voir 3. Résistance mécanique pour les ouvrages de génie végétal) ; elles contribuent aussi à l'atténuation des effets du changement climatique en étant moins gourmandes en énergies que les techniques de génie civil, en créant des îlots de fraîcheur et en stockant du carbone (von der Thannen *et al.*, 2017) ; de plus, le génie végétal constitue une filière économique verte (Rey & Labonne, 2015) et concourt donc au développement socio-économique du territoire ; par ailleurs, les techniques de génie végétal permettent le développement de végétaux vivants en lieu et place de matériaux minéraux (enrochements, béton) et la présence de végétation contribue à la bonne santé humaine (Laille *et al.*, 2013) ; le génie végétal, par la recréation d'une ripisylve fonctionnelle, va aussi agir en dépolluant l'eau (Symmank *et al.*, 2020). Enfin, le génie végétal va avoir

une action positive sur la qualité de l'environnement et la biodiversité. Ces techniques vont en effet permettre de restaurer une biodiversité proche de celles des berges naturelles (voir 2.1. Biodiversité accueillie par les différents types de berges aménagées), de restaurer la continuité écologique des berges (voir 2.2. Le génie végétal pour restaurer la continuité des berges), elles peuvent également aider à soutenir des espèces en danger (voir 2.3. Les protections de berge pour contribuer à la conservation d'espèces menacées) ou à contrôler les espèces exotiques envahissantes (voir 2.4. Le génie végétal et les invasions biologique).

Si on s'intéresse ici aux berges de cours d'eau, les principaux domaines d'utilisation du génie végétal concernent plus largement la lutte contre l'érosion du sol ou l'instabilité des talus, la réhabilitation d'un site (écologique, paysagère...), la lutte contre les espèces envahissantes ou même certaines protections contre les risques naturels ou le bruit (Frossard & Evette, 2009). Pour Schiechl et Stern (1996), les techniques de génie végétal assurent quatre fonctions principales : géotechnique, écologique, économique et esthétique. Le génie végétal peut être défini plus spécifiquement comme l'emploi d'herbes, arbustes, arbres et autres types de végétation dans des ouvrages d'ingénierie construits pour améliorer et protéger les talus et les berges des problèmes liés à l'érosion et aux glissements superficiels (Clark & Hellin, 1996; Schiechl & Stern, 1996). Il s'agit donc bien de solutions fondées sur la nature qui s'appuient sur les structures et processus des systèmes naturels (Fernandes & Guiomar, 2018). Au-delà des structures, on cherche également à s'inspirer des processus naturels en œuvre dans la recolonisation de sites fortement perturbés en ré-initiant les successions végétales. Le génie végétal est donc un outil pour passer des filtres (ou seuils) abiotiques comme des pentes fortes ou instables et/ou des processus érosifs et rétablir les trajectoires successionales, généralement en installant une végétation pionnière dont on favorise le développement (Polster, 2016; Rey *et al.*, 2019).

Pour certains auteurs un ouvrage ne rentre dans la définition du génie végétal que si la végétation y assure des fonctions structurales (stabilité, ancrage), et qu'elle n'intervient pas uniquement comme supplément (verdissement) d'une structure qui se suffit à elle-même sur le plan mécanique. Ainsi Schiechl and Stern (1996) stipulent que pour le génie biologique, les plantes et le matériel végétal constituent des matériaux de construction vivants en eux-mêmes ou en association

avec des matériaux inertes. De même, Bernard Lachat indique que le génie végétal exploite non seulement « comme modèle les capacités naturelles du végétal, mais il utilise ce dernier comme matériel de base à la construction d'ouvrages » (Lachat, 1994). Dans cet esprit, un ouvrage ne peut être qualifié de génie végétal que si les matériaux vivants sont utilisés comme base de sa construction (Adam *et al.*, 2008).

Certains auteurs différencient les techniques de stabilisation « biotechniques » (*biotechnical stabilization*) du génie biologique proprement dit (*soil bioengineering*) (Gray & Sotir, 1996). Pour ces auteurs, les techniques de stabilisation « biotechniques » combinent des structures inertes (blocs, grillage...) et des végétaux vivants sans que ces derniers n'assurent nécessairement

de rôle mécanique. Le génie biologique apparaît ainsi comme un sous ensemble du domaine biotechnique pour lequel les végétaux et leurs racines et tiges servent comme éléments structurants de l'ouvrage, assurant un vrai rôle mécanique.

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



© Sébastien De Daniell - INRAE

Figure 1. Caisson végétalisé une dizaine d'années après sa réalisation.

Les matériaux inertes sont parfois installés pour assurer la tenue de la berge en attendant que la végétation se développe et prenne le relai de la protection de la berge, comme c'est le cas pour les géotextiles biodégradables ou dans une certaine mesure pour les caissons en bois végétalisés (Fig. 1). Cependant, des matériaux inertes peuvent également être utilisés en complément de la végétation pour accroître la stabilité de la berge dans des zones à trop fortes contraintes. Par exemple, en rivière de montagne, des enrochements sont souvent utilisés en pied de berge afin de compléter l'ouvrage en génie végétal et ainsi augmenter la stabilité. Cette pratique peut notamment se justifier par la présence naturelle de blocs dans les berges de rivière de montagne. Dans ces milieux à fortes contraintes, les enrochements végétalisés correspondent en effet aux

modèles naturels de nombreux torrents à forte pente. Les techniques d'enrochements végétalisés peuvent alors être considérées comme des techniques de génie végétal en ce sens qu'elles copient les modèles naturels (Bonin *et al.*, 2013; Evette *et al.*, 2015).

S'agissant d'ouvrages vivants construits à l'interface entre la terre et l'eau, développer des techniques de génie végétal demande un savoir-faire particulier et interdisciplinaire. En effet, travailler avec des végétaux vivants exige de mobiliser des compétences en botanique (connaître les espèces), en écologie (savoir où et comment les utiliser) et en biologie (connaître leurs caractéristiques). La conception de l'ouvrage demande à prendre en compte les forces hydrauliques en présence qui dépendent de l'hydrologie du cours d'eau et de son transport solide. La prise en compte des

possibilités d'affouillement apparaît particulièrement importante. La conception de l'ouvrage est également un travail d'ingénierie où il faut connaître les matériaux utilisés, les agencer sur les profils et plans et prescrire les conditions techniques de leur mise en place. De même, le compartiment sol occupe une dimension supplémentaire à prendre en compte dans la mesure où la stabilité des talus et le développement des plantes demandent de respecter les règles géotechniques, et de s'appuyer sur la pédologie et la géologie. Par ailleurs,

les travaux sur les berges de cours d'eau peuvent être soumis à la loi sur l'eau. Enfin, les berges sont des lieux de forte présence humaine et d'attachements particuliers. La prise en compte des points de vue des riverains et des usagers exige d'avoir une démarche sociologique. Plutôt que d'avoir une vision dissociée de chacune de ces disciplines, il est nécessaire qu'elles se parlent et que la démarche soit intégrée, faisant du développement d'un ouvrage de génie végétal une démarche interdisciplinaire par essence (Fig. 2).

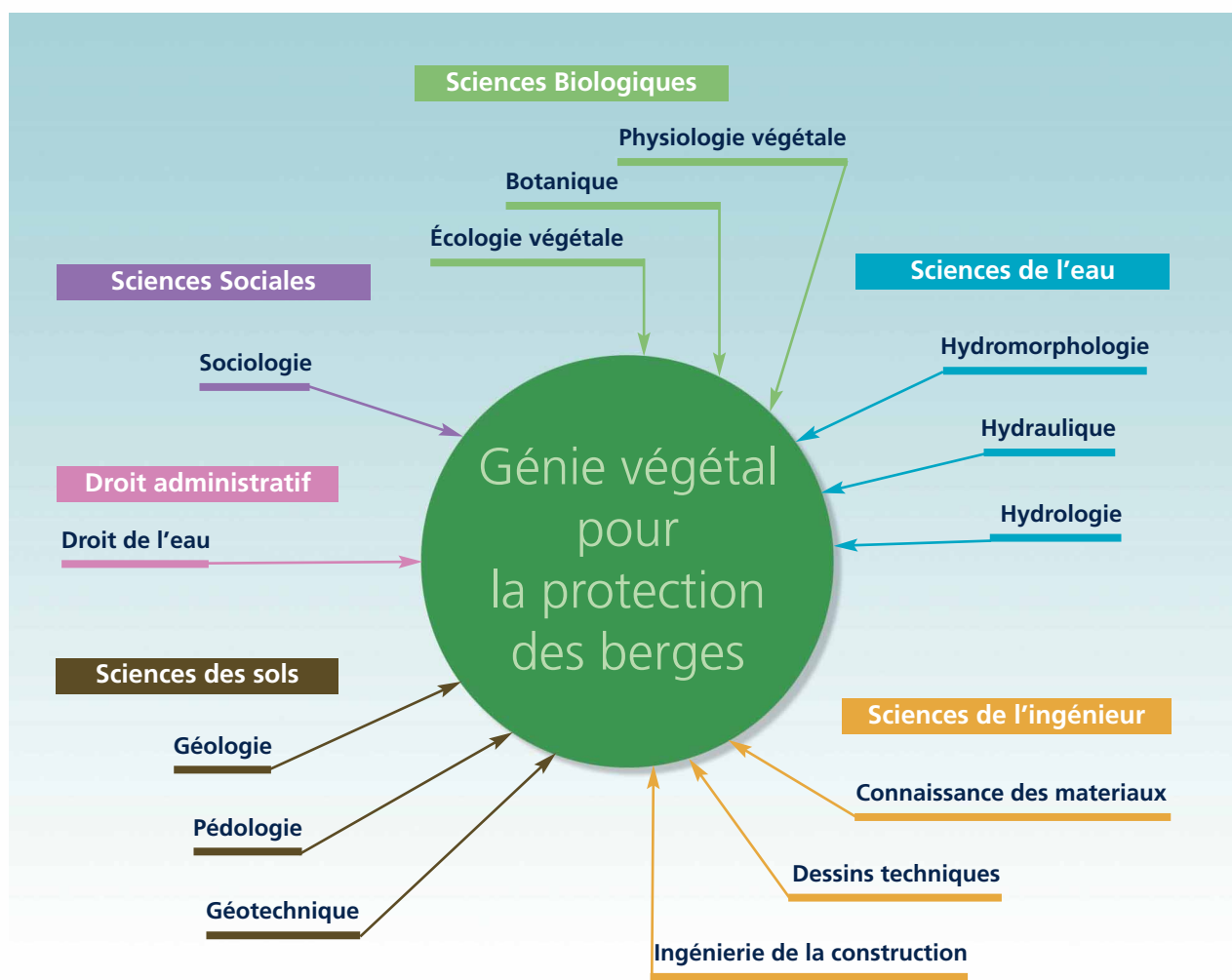


Figure 2. Le génie végétal en rivière, une approche interdisciplinaire à la croisée des sciences biologiques, de l'eau, de l'ingénieur, du sol... Modifié d'après Frossard, 2021.

BD GeniVeg, une base de données française sur le génie végétal

Depuis 2017, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) mène un projet de base de données recensant des ouvrages comportant des techniques de génie végétal en berge de cours d'eau. Ce projet, financé par l'Office français de la biodiversité (OFB), a une double vocation : communiquer largement afin de promouvoir le génie végétal à l'aide de retours d'expérience et analyser un grand nombre d'ouvrages afin de développer les connaissances sur ce sujet et donc d'améliorer l'utilisation des techniques de génie végétal (Jaymond *et al.*, 2021).

Une visualisation cartographique de la base de données est disponible en ligne (<https://genibiodiv.irstea.fr/base-de-donnees-des-ouvrages/>). Cette carte dynamique permet de voir rapidement les ouvrages recensés en France métropolitaine et en Outre-mer. Chaque ouvrage possède une fiche au format PDF décrivant ses principales caractéristiques et présentant quelques photos (avant, pendant et après la réalisation de l'ouvrage) (Fig. 3).

L'ajout d'ouvrages à la cartographie aura lieu tout au long du projet. Des communications techniques et scientifiques sur ce projet ont eu lieu (Leblois *et al.*, 2021) et d'autres suivront au cours des prochaines années.

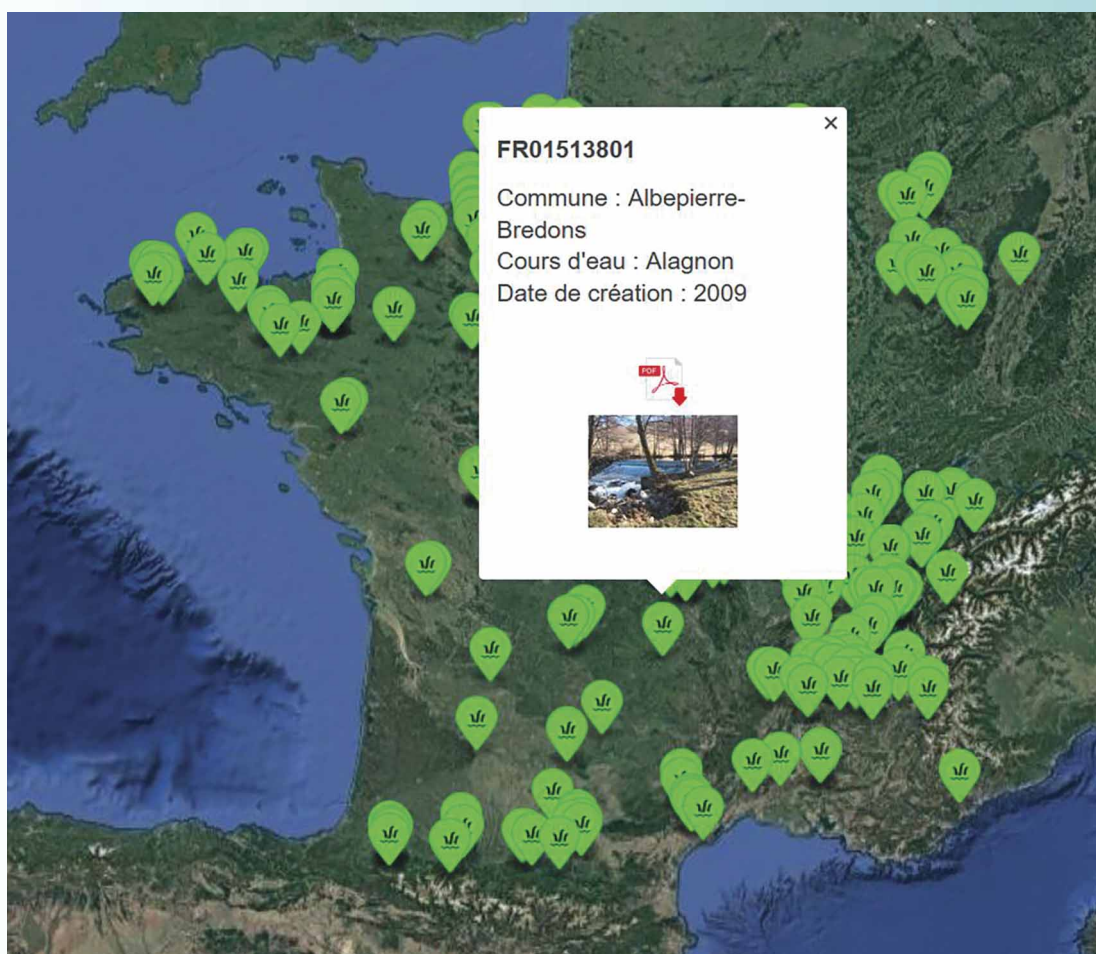


Figure 3. Vue des ouvrages de la base de données et sélection d'un ouvrage donnant accès à une fiche de synthèse en pdf (250 ouvrages disponibles en 2020).

2 – Un apport certain du génie végétal pour la biodiversité

2.1. Biodiversité accueillie par les différents types de berges aménagées

2.1.1. Partie terrestre de la berge

L'introduction active de végétaux pour stabiliser les berges des cours d'eau a un effet direct et indirect sur la biodiversité terrestre, en particulier sur les cortèges de plantes vasculaires. En utilisant des espèces indigènes, pionnières, appartenant souvent à la famille des salicacées, le génie végétal permet d'accélérer la recolonisation de la berge par des espèces nécessitant des conditions environnementales spécifiques et ainsi d'orienter la succession végétale vers les stades post-pionniers (Tisserant *et al.* 2020). En augmentant le couvert arbustif et arboré, le génie végétal augmente l'ombrage et favorise l'installation d'espèces sciaphiles ; en augmentant la biomasse végétale, le génie végétal favorise les apports en matière organique dans le sol et la constitution d'une litière tempérant les effets de la sécheresse et formant un lit de germination pour des espèces plus compétitives ; en augmentant les ressources disponibles (l'inflorescence des Saules est nectarifère) et les abris potentiels, le génie végétal permet l'installation d'espèces auxiliaires (pollinisateurs) et *in fine* l'accueil de cortèges d'espèces caractéristiques des ripisylves (oiseaux, chauve-souris) (Newsholme, 1992; Tisserant *et al.*, 2020). Concernant les oiseaux, des tronçons aménagés avec des techniques de génie végétal présentent une plus forte richesse spécifique que des tronçons en enrochements. Il semblerait également que les berges restaurées en génie végétal abritent plus d'espèces végétales menacées (comme l'Inule des fleuves) que les berges en enrochements (Schmitt *et al.*, 2018). Par ailleurs, l'utilisation d'espèces souvent qualifiées d'ingénieurs de l'écosystème, comme par exemple le Saule des vanniers (*Salix viminalis*), le Saule pourpre (*Salix purpurea*) ou le Saule à trois étamines (*Salix triandra*), permet de renforcer et/ou d'initier un ensemble de dynamismes hydro-géomorphologiques par leurs interactions avec les régimes sédimentaires et hydrauliques du site. Ces interactions favorisent l'évolution des formes fluviales, en permettant des dépôts localisés de sédiments fins mais aussi des graines des espèces hydrochores¹ associées. Prises dans leur ensemble, ces modifications physiques de l'environnement favorisent une plus grande hétérogénéité de conditions abiotiques, qui, *via* des processus de facilitation et d'amélioration de la qualité

de l'habitat riverain, vont permettre la cooccurrence d'un plus grand nombre d'espèces (Corenblit *et al.*, 2009; Gurnell *et al.*, 2012). Plusieurs études ont ainsi montré que, comparativement à des berges stabilisées par des enrochements, les techniques de génie végétal – caissons végétalisés, fascines – favorisaient une plus grande diversité d'espèces de plantes et un recouvrement plus important du sol par la végétation, renforçant par là même l'efficacité de l'ouvrage (Cavaillé *et al.*, 2015 ; Janssen, Cavaillé, Bray, *et al.*, 2019) (Fig. 4). Aussi, bien qu'encore peu d'études se soient penchées sur l'intérêt du génie végétal pour la faune terrestre, il a été montré que le développement de la végétation sur les berges favorisait l'avifaune nicheuse, en augmentant la mosaïque d'habitats favorables disponible pour ces espèces, particulièrement dans les paysages très artificialisés et monotones (Schmitt *et al.*, 2018). Enfin, non seulement le génie végétal favorise une plus grande diversité d'espèces terrestres, mais il permet également d'augmenter la complexité dans la composition des assemblages de plantes. En comparant les trajectoires des communautés végétales entre des ouvrages de génie végétal et des ouvrages de génie civil sur plus de 10 années, il a ainsi été montré que les communautés en place sur les enrochements étaient moins diversifiées, accueillait un couvert plus important d'espèces invasives et tendaient à rester « bloquées » en composition dans le temps. Inversement, les communautés en place sur les ouvrages constitués de fascines étaient plus diversifiées et changeaient en composition d'une manière comparable avec les trajectoires successionales observées en forêts alluviales, c'est-à-dire en favorisant l'installation d'espèces compétitives et tolérantes à l'ombre (Tisserant *et al.*, 2020) (Fig. 4). Du point de vue de la restauration écologique, le génie végétal peut donc être vu comme une solution de compromis entre la protection des berges contre l'érosion et le retour de la biodiversité riveraine, permettant un renforcement des capacités d'auto-organisation des écosystèmes riverains et engageant les communautés végétales dans une succession secondaire les rapprochant des structures naturelles.

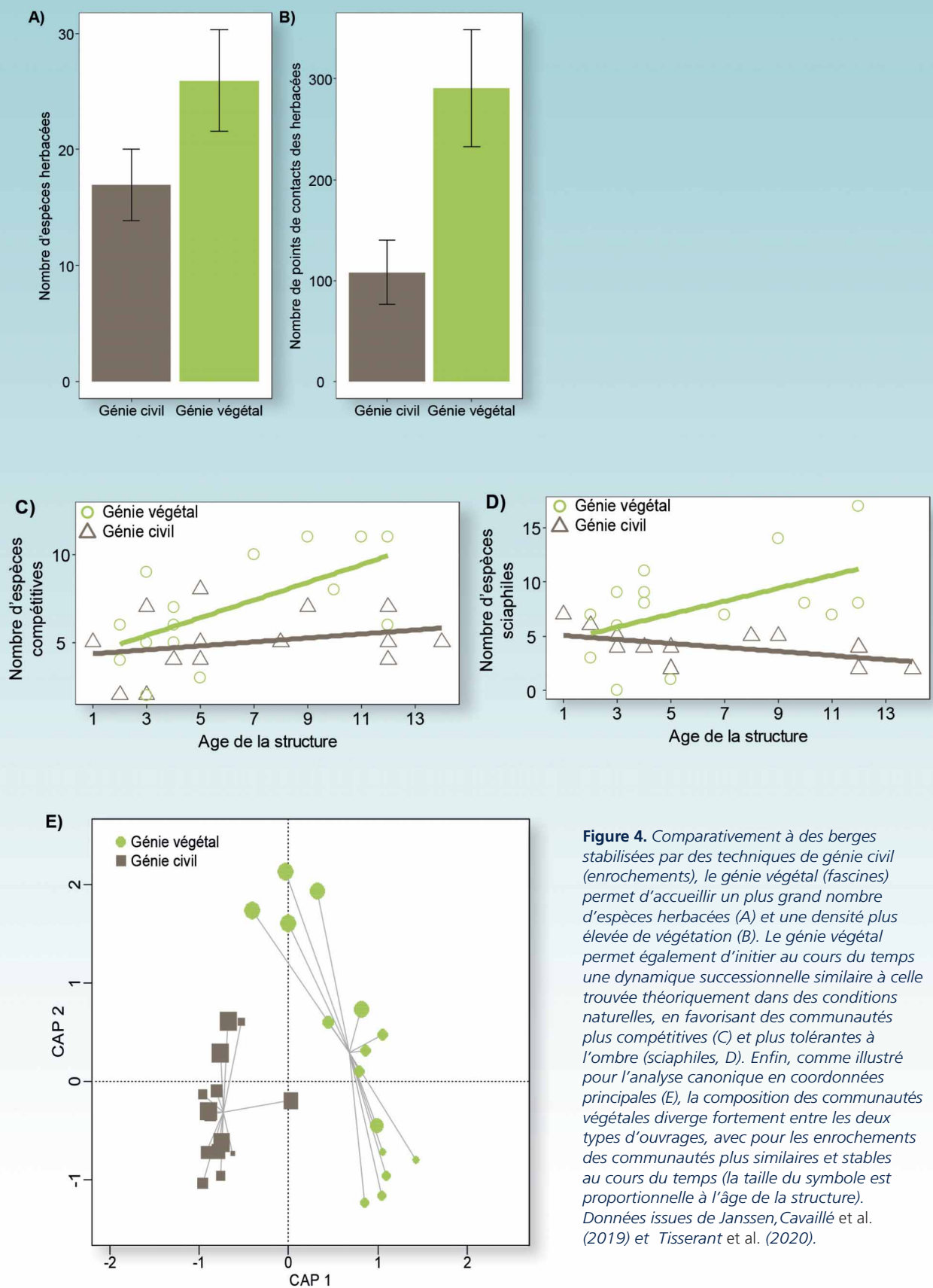
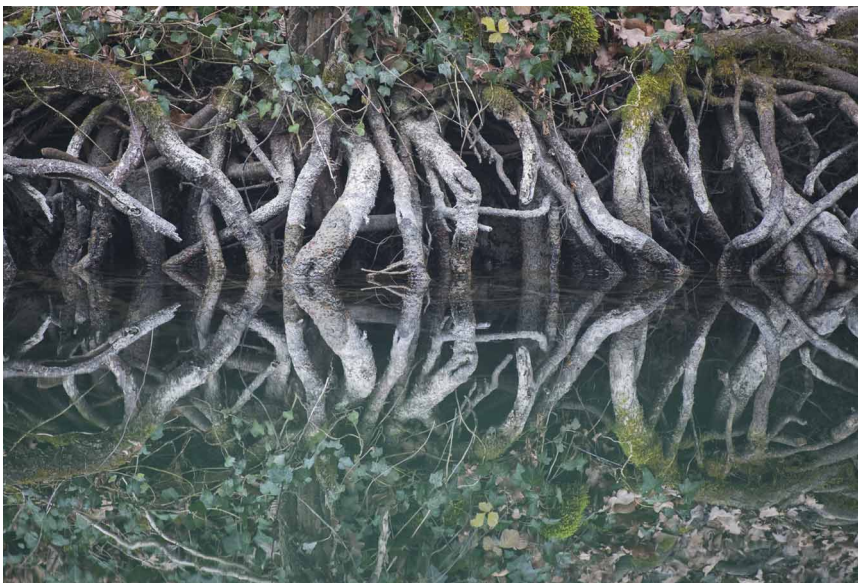


Figure 4. Comparativement à des berges stabilisées par des techniques de génie civil (enrochements), le génie végétal (fascines) permet d'accueillir un plus grand nombre d'espèces herbacées (A) et une densité plus élevée de végétation (B). Le génie végétal permet également d'initier au cours du temps une dynamique successionale similaire à celle trouvée théoriquement dans des conditions naturelles, en favorisant des communautés plus compétitives (C) et plus tolérantes à l'ombre (sciaphiles, D). Enfin, comme illustré pour l'analyse canonique en coordonnées principales (E), la composition des communautés végétales diverge fortement entre les deux types d'ouvrages, avec pour les enrochements des communautés plus similaires et stables au cours du temps (la taille du symbole est proportionnelle à l'âge de la structure). Données issues de Janssen, Cavallé et al. (2019) et Tisserant et al. (2020).

2.1.2. Partie aquatique de la berge

Au-delà de son intérêt plus visible pour la biodiversité terrestre de la berge, le génie végétal peut aussi profiter directement et indirectement à la biodiversité aquatique. Ainsi, l'introduction active de végétaux arbustifs et arborés pour stabiliser la berge va modifier les conditions environnementales jusque dans la partie immergée de la berge : en augmentant l'ombrage et donc en tempérant les variations de la température de l'eau, en augmentant et en diversifiant les apports en matière organique (feuilles, débris ligneux) dans la rivière au bénéfice des communautés de détritivores, en développant un réseau dense de racines à l'interface sol-eau et donc en diversifiant les conditions d'habitat dans le cours d'eau (Fig. 5). Aussi, les interactions hydro-géo-morphologiques entre la végétation riveraine et la charge solide vont favoriser les dépôts localisés de sédiments, l'accumulation de matières organiques et de nutriments, et la diversification des faciès d'écoulement. Cela va créer *in fine* une plus grande hétérogénéité des conditions d'habitat pour la faune aquatique et/ou pour l'installation de plantes macrophytes. Plusieurs études ont ainsi montré que les techniques de génie végétal

pures favorisaient une plus grande diversité de micro-habitats aquatiques mais aussi que ces habitats avaient un potentiel d'habitabilité pour la faune aquatique plus important (par exemple racines, litières, hydrophytes et bryophytes) (Cavaillé *et al.*, 2018; Sudduth & Meyer, 2006). Comparativement, les techniques de génie civil et les techniques mixtes ayant recours aux enrochements en pied de berge augmentent artificiellement la représentativité d'habitats aquatiques à faible potentiel biogène pour la faune aquatique (blocs, dalles) et vont favoriser des dépôts en couches épaisses de vases/limons/sables entre les blocs rocheux, diminuant un peu plus encore le potentiel d'attractivité écologique de la berge stabilisée. Dans ce sens, il a été montré que la richesse et l'abondance des macroinvertébrés benthiques et des poissons étaient supérieures au droit des ouvrages réalisés avec des techniques de génie végétal, comparativement à des ouvrages mixtes ou de génie civil (Janssen, Cavaillé, Bray, *et al.*, 2019; Pander *et al.*, 2017). La végétalisation des berges semble également favoriser les populations piscicoles juvéniles.



© Sébastien De Dantiel - INRAE

Figure 5. Réseaux de racines immergées, mises à l'air lors d'un étiage sévère.

De plus, en favorisant des apports réguliers de matière organique dans le cours d'eau, la végétalisation des berges favorise plus spécifiquement des groupes d'espèces spécialisées, comme c'est le cas des « broyeurs » et des « racleurs » chez les invertébrés. Le génie végétal, s'il n'est pas associé à des enrochements en pied de berge, permet ainsi de favoriser une plus grande étendue de microsites et de conditions de ressources, favorisant l'accueil d'un plus grand nombre

d'individus et d'une plus large diversité d'organismes aquatiques. Cependant, contrairement à la biodiversité terrestre qui bénéficie plus directement des efforts de restauration locaux, le retour de la biodiversité aquatique est soumis dans une large mesure au contrôle de paramètres régionaux (qualité de l'eau, occupation et utilisation des terres environnantes, taille du bassin versant amont), contraignant la colonisation de la berge stabilisée. En particulier, il a été montré que

le succès des opérations de restauration visant à améliorer la qualité des habitats aquatiques pour les macroinvertébrés benthiques variait en fonction du réservoir d'espèces disponible en amont et en aval, de la qualité de l'habitat hydro-morphologique régional et de la position du tronçon concerné au sein du réseau hydrographique (Janssen *et al.*, 2021) (Fig. 6). Ces études et d'autres suggèrent un bénéfice écologique plus important

des techniques de génie végétal pour la biodiversité aquatique au niveau des berges des petits cours d'eau, se trouvant dans un paysage avec une faible proportion d'espaces urbains. Plus généralement, cela suggère que les techniques d'ingénierie écologique ne peuvent pas à elles seules contrecarrer les effets négatifs sur la biodiversité aquatique d'une dégradation des conditions environnementales à plus large échelle.

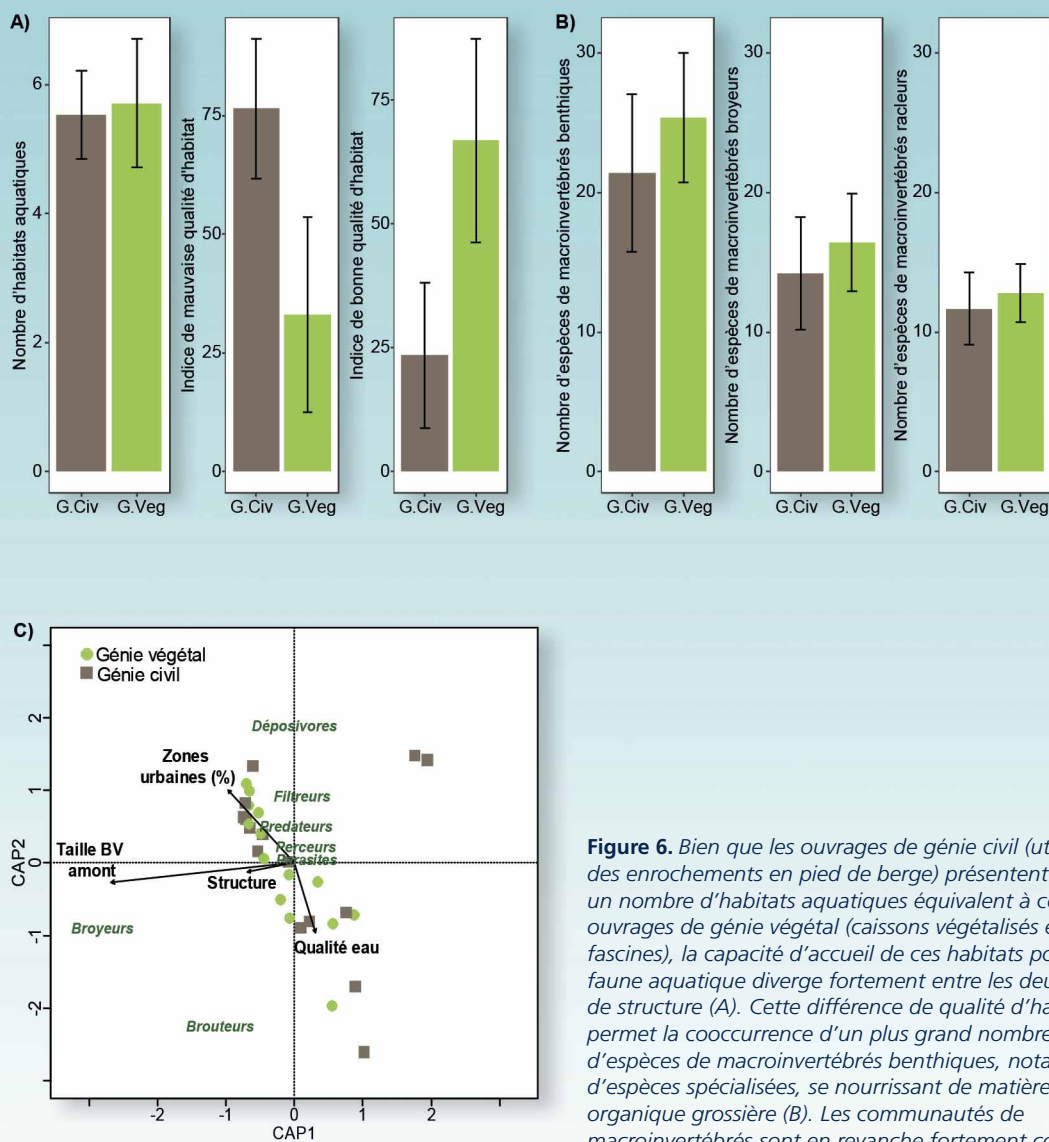


Figure 6. Bien que les ouvrages de génie civil (utilisant des enrochements en pied de berge) présentent parfois un nombre d'habitats aquatiques équivalent à celui des ouvrages de génie végétal (caissons végétalisés et fascines), la capacité d'accueil de ces habitats pour la faune aquatique diverge fortement entre les deux types de structure (A). Cette différence de qualité d'habitat permet la cooccurrence d'un plus grand nombre d'espèces de macroinvertébrés benthiques, notamment d'espèces spécialisées, se nourrissant de matière organique grossière (B). Les communautés de macroinvertébrés sont en revanche fortement contrôlées par des facteurs agissant à large échelle – qualité de l'eau, composition du paysage environnant, forme et taille du réseau hydrographique amont – rendant nécessaire la contextualisation de l'ouvrage pour en évaluer la plus-value écologique (C). Données issues de Janssen, Cavaillé, Vivier, et al. (2019) et Janssen et al. (2021).

Démarche de l'écoconception² appliquée au génie végétal

Si le génie civil présente certains avantages sur le génie végétal notamment en termes de résistance mécanique maximale ou d'outils de dimensionnement, le génie végétal présente aussi des atouts indéniables comme une augmentation de la résistance avec le temps, des capacités de déformation et d'adaptation, une matière première généralement peu coûteuse et locale. Dans le domaine environnemental, le génie végétal a des atouts certains, avec généralement une moindre dépense d'énergie fossile, une meilleure insertion paysagère, et aussi l'accueil d'une plus grande biodiversité associée au retour des fonctions écologiques de la ripisylve.

Pourtant, le génie végétal peut également induire une pollution du milieu qui peut être évitée en respectant certaines recommandations. En effet, aux matériaux végétaux vivants (plants, boutures et semences) et morts

(pieux, rondins, géotextiles), sont souvent associés d'autres matériaux potentiellement impactant pour les milieux. Les fils de fer sont souvent utilisés pour fixer les fascines ou couches de branches à rejets aux pieux. Outre le fer, ils contiennent souvent des métaux lourds en vue d'empêcher leur oxydation, ces fils de fer vont rester jusqu'à plusieurs décennies après la mise en place de l'ouvrage. De même les agrafes en fer à béton souvent utilisées pour fixer les géotextiles vont également perdurer sur les anciens ouvrages et peuvent ressortir du sol, c'est aussi parfois le cas pour les fers à bétons utilisés pour solidariser les rondins des caissons. Les fils de fer et agrafes vont rouiller et peuvent créer des pièges pour la faune ou les hommes (Fig. 7)



© André Evette - INRAE

Figure 7. Fils de fer et fer à bétons créant de potentiels pièges une vingtaine d'année après la construction d'un ouvrage.

Des matériaux plastiques sont également parfois utilisés pour tenir le sol sur les berges de cours d'eau. Ils peuvent être mélangés à des fibres végétales au sein de géotextiles, ou être utilisés seuls ou avec un grillage, au sein de géosynthétiques comme les géo-grilles (Fig. 8). Une partie de ces matériaux finira inévitablement dégradée dans les milieux aquatiques, il va sans dire que la contamination des cours d'eau par le plastique est à proscrire.

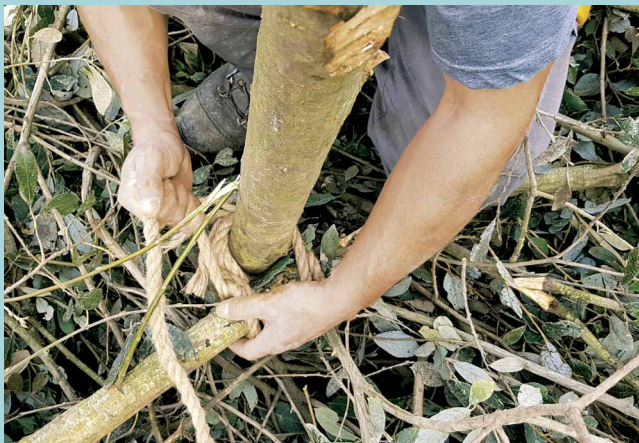
Pourtant d'autres solutions techniques existent, le fil de fer peut ainsi être avantageusement remplacé par des cordes en fibres végétales, les agrafes peuvent être en bois, et il existe aujourd'hui une large gamme de géotextiles en fibres végétales biodégradables (Fig. 9 et 10).

2 - Démarche responsable qui vise à délivrer des produits ou des services conçus en intégrant le souci de préserver l'environnement tout au long du cycle de vie.



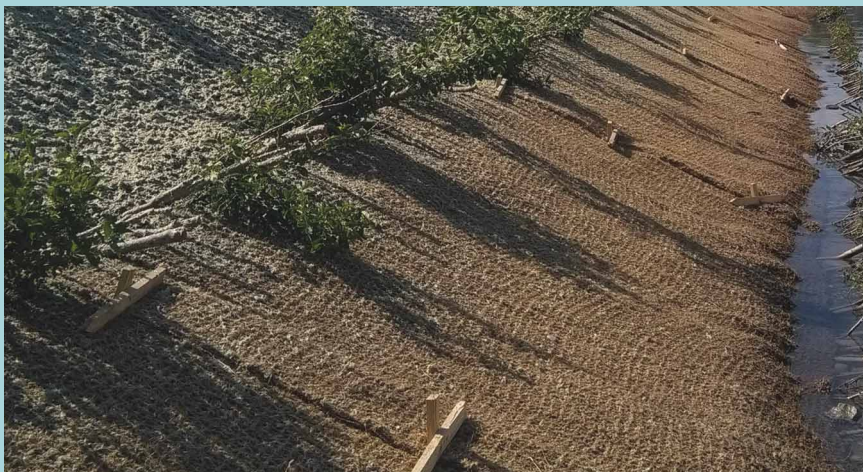
© André Evette - INRAE

Figure 8. Exemple d'utilisation de géo-grilles plastiques pour la stabilisation de berges de cours d'eau.



© Olivier Ziberlin - CFFPA Angers

Figure 9. Exemple d'utilisation de corde de chanvre pour maintenir une couche de branches à rejet et de coco pour fixer une fascine.



© Pierre Raymond - Terra Erosion Control

Figure 10. Exemple d'agrafes bois utilisées avec succès pour le maintien du géotextile en fibres végétales biodégradables.

2.2. Le génie végétal pour restaurer la fonction de corridor écologique des berges

Les corridors riverains fournissent un grand nombre de fonctions et services écologiques d'importance et notamment un rôle de corridor écologique. Les forêts riveraines sont même les seules bandes de végétation semi-naturelles qui subsistent dans de nombreux paysages agricoles ou urbanisés. La fonction de corridor assurée par les ripisylves apparaît centrale dans le rôle de conservation de la biodiversité des rivières et des milieux connexes. Ces corridors riverains servent ainsi aux animaux terrestres à passer d'une tache d'habitat favorable à une autre. Parallèlement et en lien avec ces corridors boisés, des diaspores hydrochores circulent en pied de berge, pendant que des animaux terrestres progressent sur les berges et que le vent et les oiseaux transportent des propagules par les airs. Le cours d'eau constitue ainsi un trait d'union entre l'amont et l'aval, mais peut constituer une frontière de part et d'autre de ses rives (Naiman *et al.*, 1993). Toutefois, les travaux de restauration menés sur ces

milieux le sont souvent sans une bonne connaissance de leurs structures et de leur fonctionnement, notamment en ce qui concerne les fonctions de corridor et leur connexion avec le paysage.

Des travaux récemment menés montrent cependant que comparativement aux enrochements, les techniques de génie végétal s'intègrent bien dans la continuité structurelle de leur environnement riverain. À l'inverse, les enrochements ont tendance à rompre durablement la continuité structurelle des berges (Martin *et al.*, 2020).

Si ces premiers travaux renseignent sur l'importance du génie végétal par rapport aux techniques de génie civil pour renforcer la connectivité structurelle³ des berges aménagées, un effort reste à faire pour comprendre comment ces ouvrages peuvent contribuer de manière effective au rétablissement de la circulation des espèces (et donc de la connectivité fonctionnelle).

2.3. Le génie végétal et les invasions biologiques

2.3.1 Le génie végétal pour prévenir les invasions biologiques ?

Une espèce exotique envahissante est une espèce introduite par l'homme en dehors de son aire de répartition naturelle (volontairement ou fortuitement) et dont l'implantation et la propagation menacent les écosystèmes, les habitats ou les espèces indigènes avec des conséquences écologiques et/ou économiques et/ou sanitaires négatives, selon la définition officielle adoptée par la France et l'Union européenne (<http://especes-exotiques-envahissantes.fr/definitions/>). Ces espèces peuvent constituer une menace pour la biodiversité, poser des enjeux de santé publique ou affecter les activités humaines. Les berges de cours d'eau sont des milieux particulièrement concernés par les invasions végétales. Dynamiques et soumises à de fortes perturbations, elles font partie des milieux les plus envahis à l'échelle du globe (Pyšek *et al.*, 2010). Par ailleurs, leur fonction de corridor favorisant les flux de graines et de propagules participe à leur invasibilité.

Les ouvrages de génie écologique, en rétablissant une continuité végétale dans les cordons rivulaires, soulèvent alors la question de leur rôle dans la propagation des espèces exotiques envahissantes. Cependant, des études récentes ont montré que les ouvrages de protection de berge mobilisant des techniques de génie végétal hébergeaient un couvert moins dense d'espèces

végétales exotiques envahissantes que des ouvrages de génie civil. Il a ainsi été observé une moindre abondance de plantes exotiques envahissantes sur les berges aménagées en génie végétal ou en génie mixte que sur celles aménagées en génie civil (Cavaillé *et al.*, 2013; Martin *et al.*, 2020). La densité des plantes exotiques envahissantes apparaît également moins importante sur les ouvrages de génie végétal que sur les berges en amont et en aval des ouvrages, alors que l'on observe l'inverse pour le génie civil (Martin *et al.*, 2020). Ainsi, différentes études montrent une forte représentation des espèces exotiques sur les enrochements par rapport aux berges naturelles (Schmitt & Symmank, 2017; Strayer David *et al.*, 2016) ou en génie végétal (Schmitt *et al.*, 2018). Une autre étude menée au Québec (Tisserant *et al.*, 2020) montre que les espèces indigènes spontanées sont significativement moins représentées sur les berges aménagées en génie civil que sur les autres types d'aménagements et leur présence tend à augmenter avec la naturalité des berges.

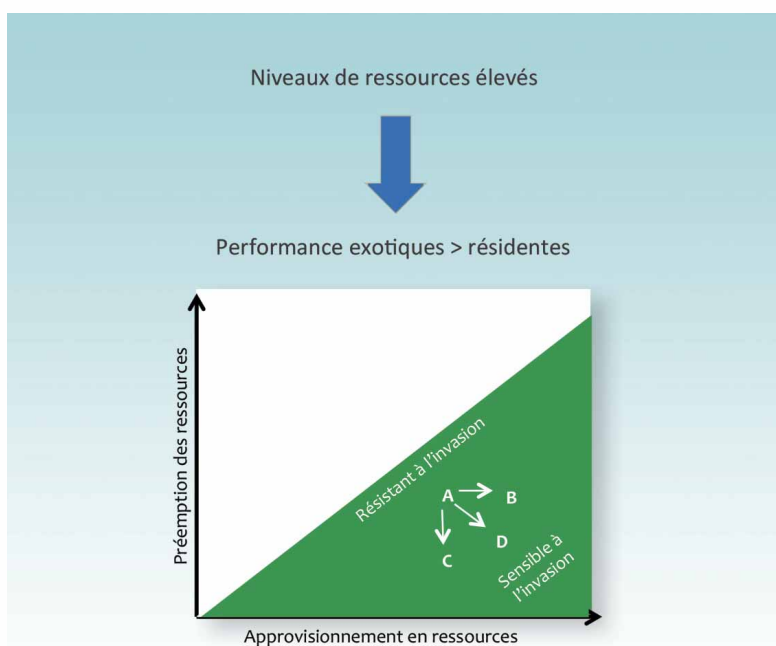
Dans le compartiment aquatique, les enrochements semblent proposer un habitat favorable à certains poissons exotiques de la famille des Gobiidae (Borcherding *et al.*, 2011). À l'inverse, on trouve des études où des mesures d'amélioration impliquant la présence de bois

mort bénéficient aux espèces natives (Schmitt *et al.*, 2018) et d'autres qui montrent un impact positif des berges plus naturelles sur les espèces cibles pour la conservation (Pander *et al.*, 2017). Néanmoins, une autre étude ne montre pas d'impact évident des différents types d'aménagement sur les populations de poissons allochtones (Schmitt & Symmank, 2017). En ce qui concerne les macroinvertébrés, si on trouve un peu plus d'espèces d'invertébrés benthiques autochtones sur les berges végétalisées, il semblerait que leur abondance et leur richesse dépendent plus du contexte hydrologique et paysager que des conditions locales (Janssen *et al.*, 2021).

2.3.2 Le génie végétal pour contrôler les espèces exotiques envahissantes ?

Ordinairement utilisé contre l'érosion des berges de cours d'eau, le génie végétal peut également constituer une solution intéressante pour contrôler les invasions

végétales. En effet, en rétablissant une pression de compétition et en réintroduisant une certaine biodiversité, les ouvrages de génie végétal permettent de limiter la vigueur et le développement des plantes exotiques indésirables. Les plantes exotiques envahissantes possèdent souvent des caractéristiques physiologiques leur permettant de profiter des opportunités offertes par les perturbations qu'elles soient naturelles comme les crues, ou anthropiques comme les remaniements de berges. Ces perturbations augmentent la disponibilité des ressources, par l'apport de nutriments, la mise à nu des sols ou la réduction de la biomasse végétale en place (Fig.11). Ainsi, les végétaux exotiques envahissants à forte capacité de dispersion ou à fort taux de croissance, comme les renouées asiatiques, vont bénéficier de ces conditions favorables pour exprimer leur potentiel compétitif et développer des populations monospécifiques. Une fois installées, ces espèces seront difficiles à contrôler.



D'après Davis *et al.* 2000

Figure 11. Schéma illustrant le rôle des perturbations dans la résistance à l'invasion d'une berge de cours d'eau par une plante exotique envahissante. Un milieu jusque-là résistant à l'invasion (A) peut devenir sensible à l'invasion (B, C ou D) par l'effet de deux facteurs intimement liés aux perturbations : l'augmentation du niveau de ressources (A vers B) et la diminution de la préemption des ressources par les espèces locales (A vers C). Chacun de ces deux effets peut individuellement diminuer la résistance à l'invasion et/ou se combiner.

Le génie végétal, en s'appuyant sur les mécanismes écologiques régulant l'assemblage des communautés (p.ex. compétition), peut contrôler l'établissement ou la dominance de ces espèces végétales exotiques envahissantes, par la restauration d'une communauté végétale compétitive, réduisant l'accès aux ressources des plantes exotiques indésirables. Les interventions peuvent être soit préventives, soit curatives.

Dans le cas du *Buddleja* (*Buddleja davidii* Franch.), arbuste originaire d'Asie, affectionnant les milieux rudéraux et produisant une forte quantité de graines, un semis précoce effectué à la suite d'un remaniement du sol peut permettre de stopper l'établissement de cette espèce. Un mélange d'espèces adaptées au contexte local, semées précocement, peut alors, par effet de priorité, limiter l'invasion de berges remaniées par le *Buddleja*. Les espèces ainsi semées vont s'installer

et utiliser les ressources (eau, espace, nutriments, lumière) préalablement au développement des plantules de *Buddleia*, affectant leur survie et réduisant leur développement (Dommanget *et al.*, 2021).

Dans le cas des renouées asiatiques (*Reynoutria* spp.), espèces affectionnant particulièrement les berges de cours d'eau et pour lesquelles les praticiens trouvent difficilement des solutions de gestion efficaces sur le long terme, le contrôle de massifs existants peut s'appuyer sur du bouturage et de la plantation d'espèces ligneuses concurrentes. Associées à des interventions de fauche régulières les premières années, ces techniques permettent de restaurer un couvert végétal compétitif limitant la lumière pour les renouées. Sans viser l'éradication, la restauration d'un couvert végétal filtrant la lumière disponible pour les renouées asiatiques, permet de limiter leur dominance dans les milieux riverains et par là-même, leurs impacts. Des tests ont été réalisés avec succès dans le cadre d'expérimentations de recherche et de manière empirique par des gestionnaires de cours d'eau, sous les conditions d'un suivi rigoureux les premières années visant à faucher de manière ciblée les tiges de renouées asiatiques (Dommanget *et al.*, 2015; Hoerbinger & Rauch, 2019).

Le choix des espèces concurrentes peut s'appuyer sur les mécanismes écologiques de hiérarchie compétitive ou de similarité limitante. Les espèces les plus efficaces pour limiter la performance des espèces exotiques ciblées doivent donc être choisies parmi celles capables de préempter de manière la plus efficace les ressources limitantes ou avoir un fonctionnement écologique au plus proche de l'espèce envahissante, respectivement. Ainsi pour les renouées asiatiques, des espèces à forte vitesse de croissance ont toute leur chance de développer rapidement un couvert filtrant la lumière, limitant le développement de ces espèces envahissantes. De même, des espèces disposant de capacités allélopathiques (effet phytotoxique réduisant la germination et la croissance des espèces végétales voisines) comme le sureau yèble ou la bourdaine peuvent aussi constituer de bonnes candidates (Dommanget *et al.*, 2019; Rouifed *et al.*, 2019).

Tous ces résultats constituent donc un argument complémentaire pour utiliser les techniques de génie végétal plutôt que l'enrochement, à savoir qu'ils contribuent à un meilleur contrôle du développement des espèces exotiques envahissantes et à un meilleur développement des espèces indigènes.

● 2.4. Le génie végétal et les techniques mixtes pour contribuer à la conservation d'espèces menacées

La restauration des espèces à fort enjeu de conservation passe d'abord par la restauration de leurs habitats. Cependant, l'anthropisation massive des cours d'eau et de leurs berges interdit souvent cette possibilité, notamment en ce qui concerne les bancs alluviaux et les espèces qui leur sont inféodées. Afin de maintenir certaines de ces espèces au sein de ces milieux anthropisés où les bancs sont réduits ou absents, des essais ont été réalisés sur des techniques couplant génie civil et végétation. Ainsi, l'artificialisation des berges de cours d'eau à l'aide de techniques d'ingénierie et notamment à l'aide d'enrochements crée parfois des micro-habitats susceptibles d'abriter les espèces ciblées. Des expérimentations in situ de techniques de végétalisation d'enrochements ont ainsi pu être développées (Evette *et al.*, 2015), et des essais ont été menés sur des espèces menacées à l'échelle Alpine : *Myricaria germanica* (Evette *et al.*, 2015; Lavaine *et al.*, 2011) et *Typha minima* (Popoff *et al.*, 2021). Les résultats ont notamment permis de développer des chantiers expérimentaux d'installation de ces espèces dans des ouvrages de protection de berge (Fig. 12).

Le projet « Isère Amont » (<https://symbhi.fr/nos-territoires/le-gresivaudan/isere-amont/>), visant principalement à mener des travaux de confortement des digues de l'Isère entre les communes de Pontcharra et Grenoble, fut initié en 2004 par le Syndicat mixte des bassins hydrauliques de l'Isère (SYMBHI). La réalisation des travaux a impacté plusieurs espèces protégées dont la petite massette (*Typha minima* Hoppe), une espèce classée sur la liste rouge de la flore menacée en Rhône-Alpes. Ces impacts ont donc fait l'objet de mesures compensatoires dans le cadre d'une dérogation pour le déplacement ou la destruction d'espèces protégées, afin de restaurer les populations de petite massette initialement présentes avant les travaux. Les individus impactés ont fait l'objet de mesures de transplantations dans la zone d'emprise des chantiers. Plusieurs sites ont donc été sélectionnés, dont des ouvrages de protection des berges en enrochement et en technique mixte de génie végétal (Fig. 13).



Figure 12. Présence de *Myricaria germanica* dans une zone très perturbée sur un enrochement à l'aval d'un seuil plus de 4 ans après leur mise en place.

En 2015, des populations de petite massette ont été réintroduites sur trois types de berges le long de l'Isère : des berges « naturelles » (défrichées et remaniées en pente douce), une berge en enrochement et une berge alliant enrochement et technique de génie végétal (appelée technique mixte).

Cette expérimentation a permis de mettre en évidence que la petite massette pouvait se maintenir et croître (dans une moindre mesure) sur les enrochements et les ouvrages de génie végétal qui peuvent donc servir de refuge à cette espèce menacée (Fig. 13). On voit sur cette figure, que si les plants de petite massette

transplantés se développent mieux sur les berges naturelles, ils arrivent néanmoins à se maintenir sur des enrochements ou des techniques mixtes associant enrochements de pied de berge et génie végétal. Ceci corrobore les observations faites sur le terrain, d'apparitions spontanées de populations de petite massette sur des ouvrages de protection de berges similaires. Ce cas de figure ne concerne pas l'ensemble des espèces inféodées aux bancs alluviaux. Le maintien de ces habitats via le maintien de la dynamique naturelle des cours d'eau reste la meilleure solution pour la conservation de ces espèces.

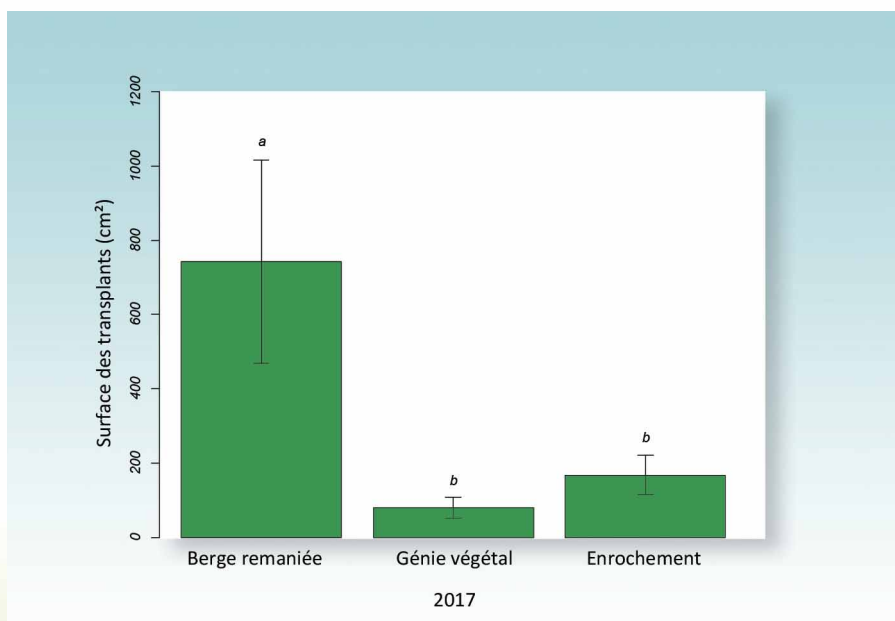


Figure 13. Surface moyenne des populations transplantées de *T. minima*, selon les différents types de berges utilisés. Les barres d'erreurs sont des erreurs standards, les lettres différentes correspondent à des différences significatives statistiques.

Au début des années 2000, les berges de la Loire de l'île de Nantes ont été restaurées en recréant des conditions favorables au développement de l'Angélique des estuaires (*Angelica heterocarpa*, J. Lloyd 1859) associée

à des travaux de transplantation. En dépit des contraintes très fortes générées par les marées, ces travaux ont permis le développement de cette espèce protégée (Fig. 14).

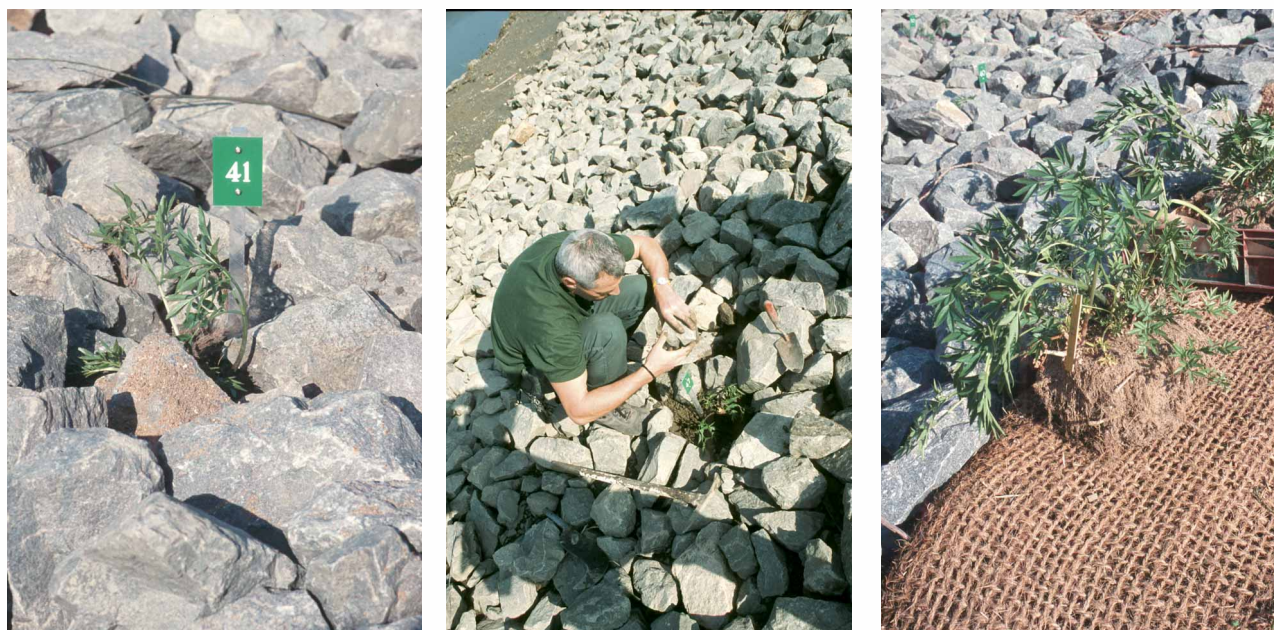


Figure 14. Plantation des angéliques dans leur nouveau substrat après un séjour au jardin botanique de Nantes.

Dans le cadre du projet « Protéger », visant à promouvoir et développer des techniques de génie végétal pour la protection des berges en Guadeloupe, *Lonchocarpus roseus* (Mill.) DC., fait partie des espèces à potentiel pour le génie végétal étudiées. Cet arbre de la famille des fabacées, strictement ripicole est en danger critique d'extinction à l'échelle régionale (liste rouge UICN 2019). Les résultats d'expérimentations conduites *ex situ* ont mis en évidence une compatibilité de l'utilisation de cette espèce avec certaines techniques de génie végétal et son intégration, sous forme de plantule, sur les futurs chantiers permettront d'étendre son aire de répartition aujourd'hui extrêmement restreinte.

Il est ainsi parfois possible d'associer aux autres fonctions de la berge restaurée (et notamment la fonction de protection contre l'érosion), une fonction de conservation vis-à-vis d'espèces protégées ou en régression. L'idée est d'avoir une approche pragmatique de soutien de populations en danger par l'utilisation de micro-habitats adaptés dans un milieu fortement anthropisé. Ce type d'approche innovante pose parfois des problèmes d'acceptation sociale, et demande un travail pédagogique particulier auprès des gestionnaires, des concepteurs et des naturalistes.

Centre de ressource génie écologique et réseaux d'acteurs

Le génie écologique permet, en tant que Solution fondée sur la nature (SFN), la création de milieux naturels, la restauration de milieux dégradés et l'optimisation de fonctions assurées par les écosystèmes. Il s'agit de l'ensemble des actions qui, grâce à l'intervention humaine, contribue à « réparer » certains écosystèmes et certaines fonctionnalités. Préservation de la biodiversité, adaptation au changement climatique, prévention des risques naturels, amélioration du cadre de vie : les projets de génie écologique sont dits « multi-bénéfices ».

Le Centre de ressources génie écologique est un dispositif multipartenarial et collaboratif visant l'accompagnement technique et la montée en compétences des professionnels du génie écologique. Il est animé par l'OFB et s'adresse à un panel varié d'acteurs de la biodiversité : maîtres d'ouvrage, bureaux d'études, entreprises de travaux, collectivités, services de l'État, associations, instituts de recherche, etc.

Il s'appuie sur 3 moyens d'actions indissociables pour mobiliser les acteurs : **animation de réseaux** (évaluation des besoins, organisation d'événements techniques, coordination de projets...) ; **accompagnement technique** (conseil, formation...) ; **production et mise à disposition de ressources** techniques et scientifiques (méthodes et outils, retours d'expériences, agendas, annuaires...).

À travers cet outil, tout acteur du génie écologique peut participer ou s'inscrire aux journées d'échanges techniques, et s'inscrire aux formations ; tout acteur peut également proposer ou consulter des retours d'expériences, de la documentation, et des événements à venir sur le thème.

L'ensemble des actions et productions du Centre de ressources est mis en visibilité sur un site internet dédié, accessible à tous les professionnels : www.genieecologique.fr.

La filière du génie végétal s'est structurée ces dernières années autour d'associations dédiées. Outre le Centre de ressource Génie écologique décrit ci-dessus, les professionnels se sont regroupés au sein d'associations pour promouvoir et faire avancer ces techniques :

■ L'AGéBio, Association française pour le génie végétal, a pour but de promouvoir l'utilisation des techniques de génie biologique ou de génie végétal, <https://www.agebio.org/> ;

■ L'UPGE, Union professionnelle du génie écologique participe au développement et à la structuration de la filière génie écologique, <http://www.genie-ecologique.fr/> ;

■ L'AFIE, Association française interprofessionnelle des écologues a pour objectifs de promouvoir la profession d'écologue et plus généralement le professionnalisme en environnement et de favoriser la prise en compte des lois de l'écologie dans l'aménagement du territoire et la gestion des milieux naturels, <https://afie-asso.fr/> ;

■ le réseau REVER, Réseau d'échanges et de valorisation en écologie de la restauration, a pour but d'organiser et de favoriser les relations entre gestionnaires, praticiens, étudiants et scientifiques œuvrant dans les domaines de l'écologie de la restauration et/ou de la restauration écologique <https://reseau-rever.fr/> ;

■ L'A-IGÉco est l'Association fédérative des acteurs de l'ingénierie et du génie écologiques, elle promeut le développement d'une ingénierie écologique et d'un génie écologique de qualité technique et scientifique, et fédère notamment les associations présentées ci-dessus <http://a-igeco.fr/>.

À noter également les réseaux régionaux de gestionnaires de milieux aquatiques regroupés au sein de « Réseaux Rivières », <https://reseauxrivers.org/>, et qui se rejoignent autour d'un objectif commun : promouvoir une gestion globale et durable des milieux aquatiques et de l'eau. Ces acteurs du territoire sont incontournables dans le domaine du génie végétal en rivière. Parmi eux, l'Association Rivière Rhône Alpes Auvergne (ARRA²) œuvre pour l'essor et l'amélioration des techniques de génie végétal, <https://www.arraa.org/>.

3 – Résistance mécanique et entretien des ouvrages de génie végétal

3.1. Une résistance qui augmente avec le temps

Si la résistance des ouvrages de génie civil est maximale lors de leur mise en place, il en va tout autrement de celle des ouvrages de génie végétal dont la résistance est minimale lors de leur installation, et augmente graduellement grâce au développement des végétaux (Fig. 15). Le développement des végétaux va ainsi contribuer au renforcement de la stabilité de la berge par le développement des systèmes racinaires qui vont

maintenir le sol, et par les parties aériennes qui vont freiner le courant à proximité du sol (effet peigne) et/ou se coucher contre la berge et protéger celle-ci (effet tapis). Ce développement est très rapide lors de la seconde saison de végétation durant laquelle les biomasses aériennes et racinaires des saules peuvent augmenter respectivement jusqu'à 10 et à 20 fois (Lavaine, 2013).

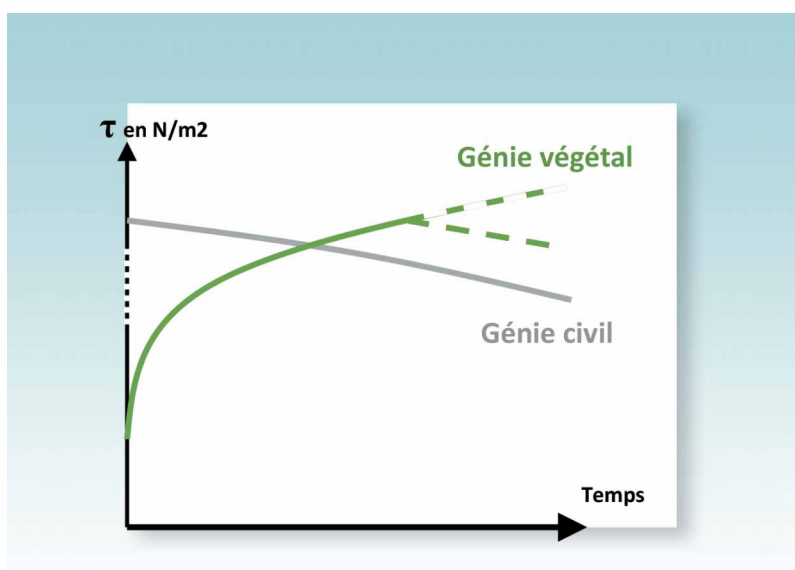


Figure 15. Schéma illustrant la résistance mécanique des ouvrages au cours du temps. La résistance des ouvrages de génie civil diminue au cours du temps, celle du génie végétal augmente très fortement les premières années.

Il est important de savoir qu'un ouvrage de génie végétal ne cède pas à cause des forces exercées par le courant sur la partie aérienne (tronc, tiges et feuilles). En effet celles-ci ne sont pas assez puissantes pour arracher les plantes dès lors qu'elles ont pu développer leur

système racinaire. En fait, un ouvrage de génie végétal cède généralement suite à l'érosion du substrat en lien avec les parties racinaires des plantes, sous l'effet des circulations d'eau.

3.2. Enseignements des modèles réduits en canal

Dans la conception des ouvrages de protection de berge en génie végétal, les critères de conceptions d'ordre hydraulique se limitent généralement à un calcul de la force tractrice $\tau = \rho g R j$ (N/m^2). Cette contrainte est le produit du poids volumique de l'eau $\rho g = 9810 N/m^3$, par le rayon hydraulique R (m) (qui correspond approximativement à la hauteur d'eau moyenne) et par la pente j (m/m). La force tractrice se calcule donc en un point précis du cours d'eau et pour une crue donnée. Elle

peut ensuite être comparée à des valeurs de résistance d'ouvrages issues de la littérature (voir par exemple les tableaux fournis par Lachat [1994], guide Geni'Alp 2013 [<http://ouvrage.geni-alp.org/>], et Leblais *et al.* [2016]). Les valeurs de résistance sont issues de relevés de terrain sur des ouvrages existants, leur tenue ou leur ruine après le passage de diverses crues permettant d'identifier des valeurs seuils au-delà desquelles il a été constaté que les ouvrages n'ont pas résisté.



© Sébastien De Danieli - INRAE

Figure 16. Canal hydraulique expérimental pour documenter les processus d'endommagement du génie végétal.

Les détails des mécanismes hydrauliques et géomorphologiques amenant un ouvrage à être détérioré puis ruiné n'avaient toutefois été ni décrits, ni observés jusqu'au travail récent de Recking *et al.* (2019). Des fascines de saule miniatures ont été construites dans un canal hydraulique de pente 2 % et de 6 m de long au laboratoire du centre INRAE de Grenoble (Fig. 16). Des ouvrages protégeant les berges en extrados de coudes plus ou moins marqués ont été soumis à de multiples crues. De nombreuses dispositions constructives ont été testées afin de mettre en évidence leur effet sur la résistance de l'ouvrage et le développement des processus d'endommagement. On retient les leçons suivantes de ces travaux :

- il n'a jamais été observé l'arrachement des fascines sans un affouillement préalable généralisé de l'ouvrage. Le processus d'endommagement de l'ouvrage est donc d'abord lié à l'érosion des matériaux entourant la fascine avant de concerner les tiges de saules. Sur les rivières connues pour générer des problèmes d'affouillements, il est donc primordial de porter une attention forte à la lutte contre ces derniers en complément des précautions liées à un bon ancrage de l'ouvrage par des pieux fichés dans le lit de la rivière ;
- plus le coude protégé est marqué, plus l'intensité d'affouillement l'est aussi et donc moins la fascine est résistante. On adaptera donc l'effort et le soin dans la protection contre les affouillements au caractère plus ou moins marqué du coude protégé. Il est intéressant de noter que le calcul de la force tractrice ne prend pas en compte cet aspect et qu'un critère complémentaire est probablement nécessaire ;
- quatre points de faiblesses préférentiels ont été observés (Fig. 17) :
 - les fascines qui n'avaient pas été ancrées en profondeur dans la berge en amont et en aval, en général *via* la mise

en place de blocs rocheux dans leur continuité, ont été érodées au niveau des extrémités et finalement contournées. Il est important de noter que la tête aval de la fascine doit faire l'objet d'autant de soin que la tête amont : les turbulences et recirculations de courant localisées à la jonction de l'ouvrage avec la berge ayant un fort pouvoir d'érosion,

- le pied des fascines construites sur des matériaux à faible cohésion a très souvent été sous-cavé (érosion sous le corps de la protection). La présence de pieux et de diverses aspérités génèrent de la turbulence qui finit par creuser sous les ouvrages si les matériaux de pied sont mobiles. La mise en place d'enrochements devant la fascine en assez grande quantité pour tapisser la fosse d'affouillement est une solution efficace mais coûteuse. Des tests réalisés avec des ramilles anti-affouillement (boutures de saule fichées sous et dépassant la fascine) ont démontré des performances intermédiaires entre la fascine nue et les enrochements. Le sous-cavage est alors limité par la réduction des vitesses d'écoulement au droit de l'ouvrage due à l'accroissement de la rugosité et par l'effet couvrant des ramilles protégeant le substrat en formant un tapis végétal,
- les talus surplombants les fascines n'étaient pas couverts de géotextile ou protégés par d'autres techniques de génie végétal. Ils ont donc naturellement été soumis à des érosions de surface,
- des tests ont été menés pour identifier l'effet de la mise en place de fascines non continues : les écoulements turbulents pénètrent et occupent immédiatement les ruptures dans la continuité de la protection et des érosions préférentielles y apparaissent très rapidement. Assurer la continuité de l'ouvrage aux jonctions entre boudins ou autour de points durs est donc aussi de première importance ;

■ la dernière leçon apprise est que l'endommagement de l'ouvrage s'accélère fortement quand plusieurs processus érosifs se rencontrent (Fig. 18) : un début de contournement amont peut par exemple persister et évoluer lentement s'il est isolé. Si par contre le pied de la fascine commence aussi à s'affouiller, les courants pénétrant en amont risquent de trouver un cheminement jusqu'à l'affouillement de pied. Le contournement de

l'ouvrage avec circulation d'eau derrière la fascine est alors capable de la vider rapidement. L'ouvrage est alors ruiné. Le suivi des ouvrages et la mise en œuvre de petites opérations de réparation semblent donc préférables à une position attentiste : *in fine*, c'est probablement tout l'ouvrage qu'il faudra refaire dans l'urgence.

● 3.3. Entretien et suivi des ouvrages de génie végétal

Comme on peut le voir sur les expérimentations en canal, la dégradation des ouvrages peut être plus ou moins progressive, et un suivi et une détection précoce des débuts de défaillance est utile pour éviter la ruine des ouvrages. S'agissant de milieux vivants, une attention particulière doit ainsi être portée aux ouvrages surtout les premières années. La sécheresse est en effet un des facteurs majeurs d'échec. Une irrigation éventuelle et la bonne reprise des végétaux doivent ainsi être surveillées de près. Ce suivi ainsi que d'éventuelles reprises sur les 1 à 3 premières saisons de végétation peuvent être prévus au marché de travaux et donc se faire en appui avec l'entreprise ayant réalisé ceux-ci. Cette vigilance sur la bonne tenue de l'ouvrage les premières années est très importante pour engager ces ouvrages de génie écologique sur une trajectoire assurant leur bonne stabilité, en effet des défaillances précoces rendent la rupture plus probable (Jaymond *et al.*, 2021; Leblois *et al.*, 2021). Il peut ainsi être utile de ré-intervenir sur les ouvrages pour y conforter d'éventuels

débuts de défaillance, en replantant des boutures, des pieux... Un bon suivi de la végétation permettra également une détection précoce de l'arrivée d'espèces exotiques envahissantes, et leur éradication avant qu'elles ne prolifèrent.

Dans un second temps, on peut chercher à maintenir des tiges de petits diamètres par un recépage régulier pour maintenir leur flexibilité. En effet, les tiges de gros diamètres (supérieures à 3 à 5 cm) perdent leur flexibilité et ne se couchent plus lors des crues. Alors que les tiges de petits diamètres se couchent sur la berge pour fournir un effet tapis, les tiges de plus gros diamètres restent rigides et non seulement ne protègent plus le sol par effet tapis, mais créent en plus des turbulences qui peuvent générer des érosions préjudiciables aux ouvrages.

Enfin, sur les petits cours d'eau, lorsqu'il existe des risques d'inondation, notamment en milieu urbain, on peut être amené à intervenir régulièrement de façon à empêcher l'obstruction de celui-ci (Fig. 19).

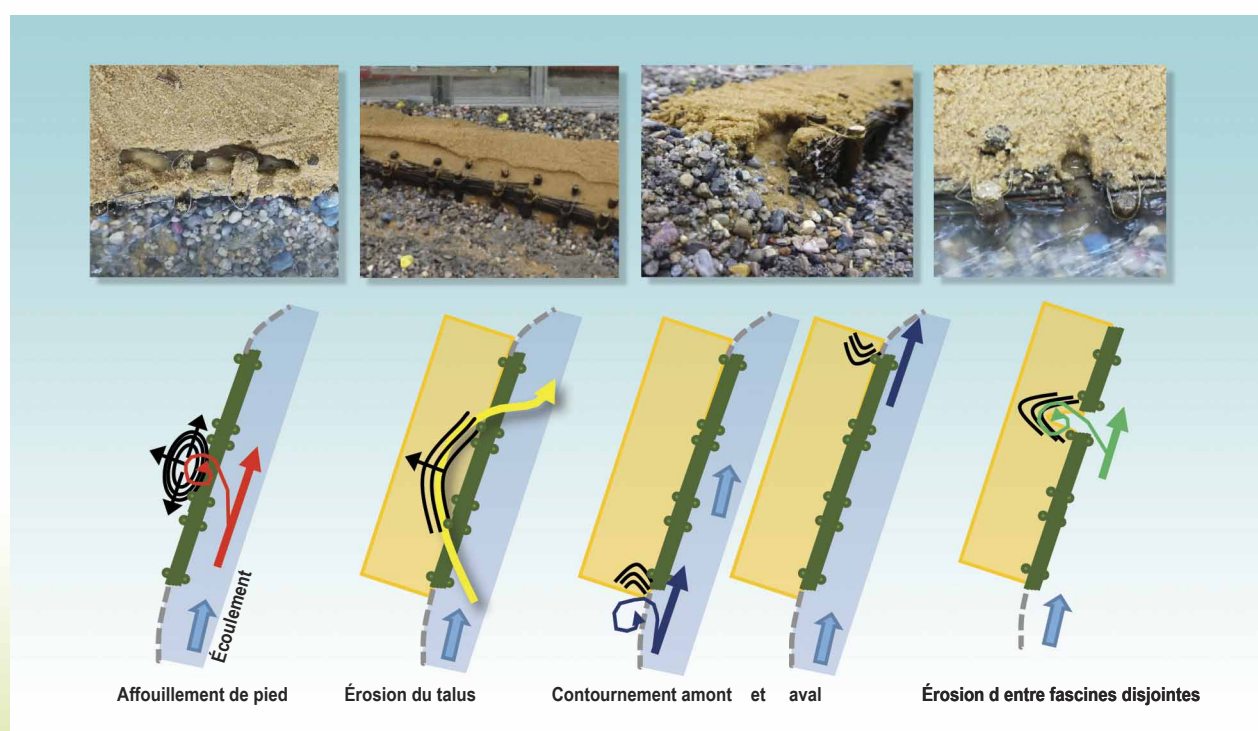


Figure 17. Processus élémentaires d'endommagement.

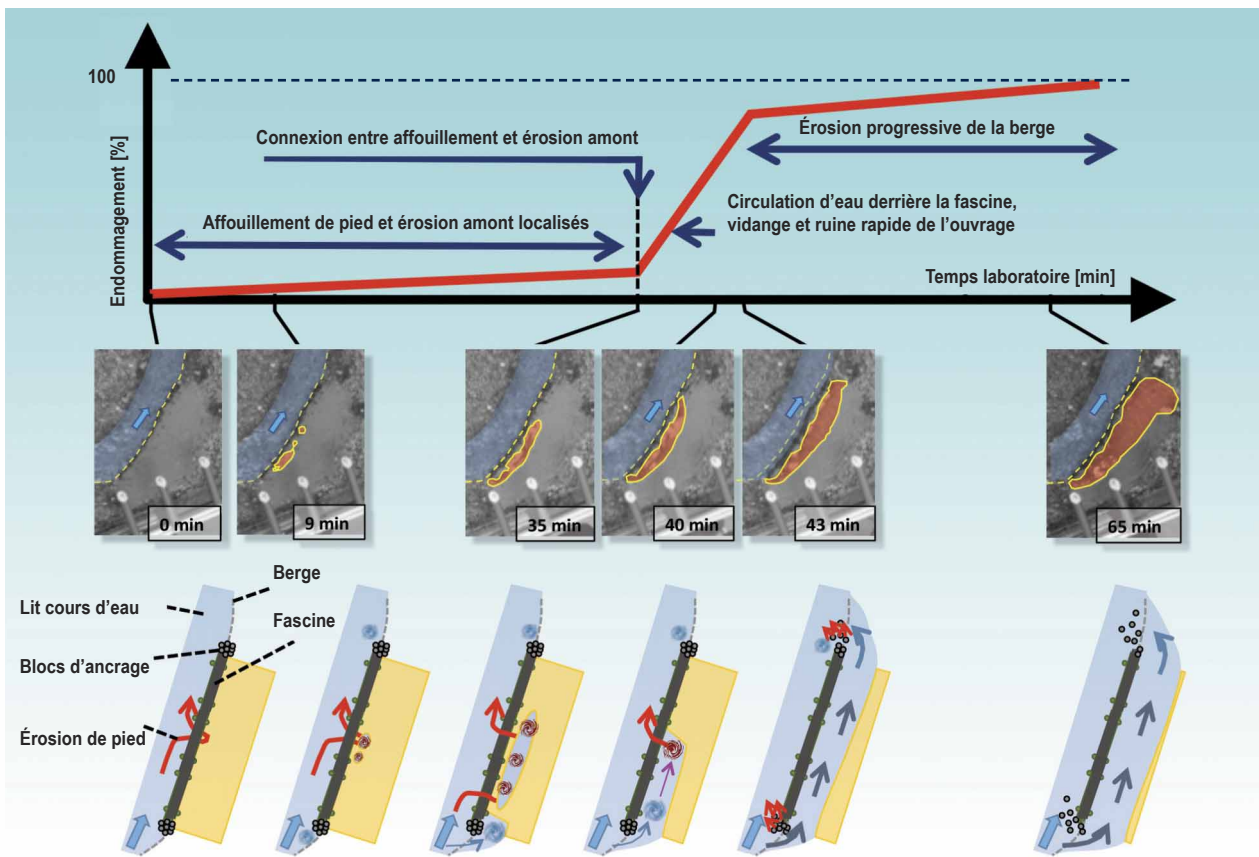


Figure 18. Évolution temporelle des phases principales de la ruine d'un ouvrage : processus localisés, connexion entre les érosions, ruine rapide. L'échelle de temps est celle du laboratoire, très accélérée par rapport à la dynamique réellement observée sur site, le processus étant d'autant plus lent que l'ouvrage est grand, que les matériaux de la berge sont résistants à l'érosion et que les dispositions constructives de l'ouvrages ont été soignées.



© André Evette – INRAE

Figure 19. Illustration d'un ouvrage pouvant réduire la section d'écoulement d'un petit cours d'eau en milieu urbain.

Films sur le génie végétal

L'OFB et INRAE ont développé de courts films de vulgarisation sur le génie végétal à destination du grand public et des professionnels.

Ces films sont en ligne sur un site internet dédié au génie végétal : <https://genibiodiv.inrae.fr/>.

■ Film 1: Le génie végétal pour la protection des berges de cours d'eau

<https://genibiodiv.inrae.fr/genie-vegetal-en-video/film-genie-vegetal-pour-la-protection-des-berges-de-cours-deau/>

■ Film 2: Réalisation d'un ouvrage de génie végétal pour restaurer une berge

<https://genibiodiv.inrae.fr/genie-vegetal-en-video/film-genie-vegetal-realisation-dun-ouvrage-pour-restauration-une-berge/>

■ Film 3: Le génie végétal en torrent de montagne

<https://genibiodiv.inrae.fr/genie-vegetal-en-video/film-genie-vegetal-le-genie-vegetal-en-torrent-de-montagne/>



© Sébastien De Daniell - INRAE

Figure 20. Ouvrage de génie végétal (technique mixte sur un torrent de montagne).

Le génie végétal en Outre-mer

Si le génie végétal a connu un fort essor en France métropolitaine depuis une trentaine d'années, un effort est aujourd'hui porté pour le développement de ces techniques en Outre-mer.

On peut ainsi noter le projet « Protéger » pour la promotion et le développement du génie écologique dans les rivières de Guadeloupe <https://genie-vegetal-caraibe.org/>. Ce projet porté par le Parc national de Guadeloupe prévoit quatre phases. La première permet de mieux connaître les cortèges floristiques des berges et de sélectionner des espèces locales susceptibles d'être utilisées en génie végétal. La seconde phase consiste à caractériser les aptitudes de ces espèces à être utilisées en génie végétal grâce à des expérimentations et à leur mise en place dans des chantiers pilotes. Les phases 3 et 4 sont dédiées au développement d'une filière de génie écologique et à la diffusion des résultats au sein du territoire et au-delà.

Mais la Guadeloupe n'est pas le seul territoire ultra-marin à avancer sur le génie végétal pour la protection des berges de rivière. Des chantiers ont par exemple déjà été réalisés ces dernières années en Martinique ou en Nouvelle-Calédonie. Enfin, un projet de développement de génie végétal sur les rivières de la Réunion est en cours d'élaboration.

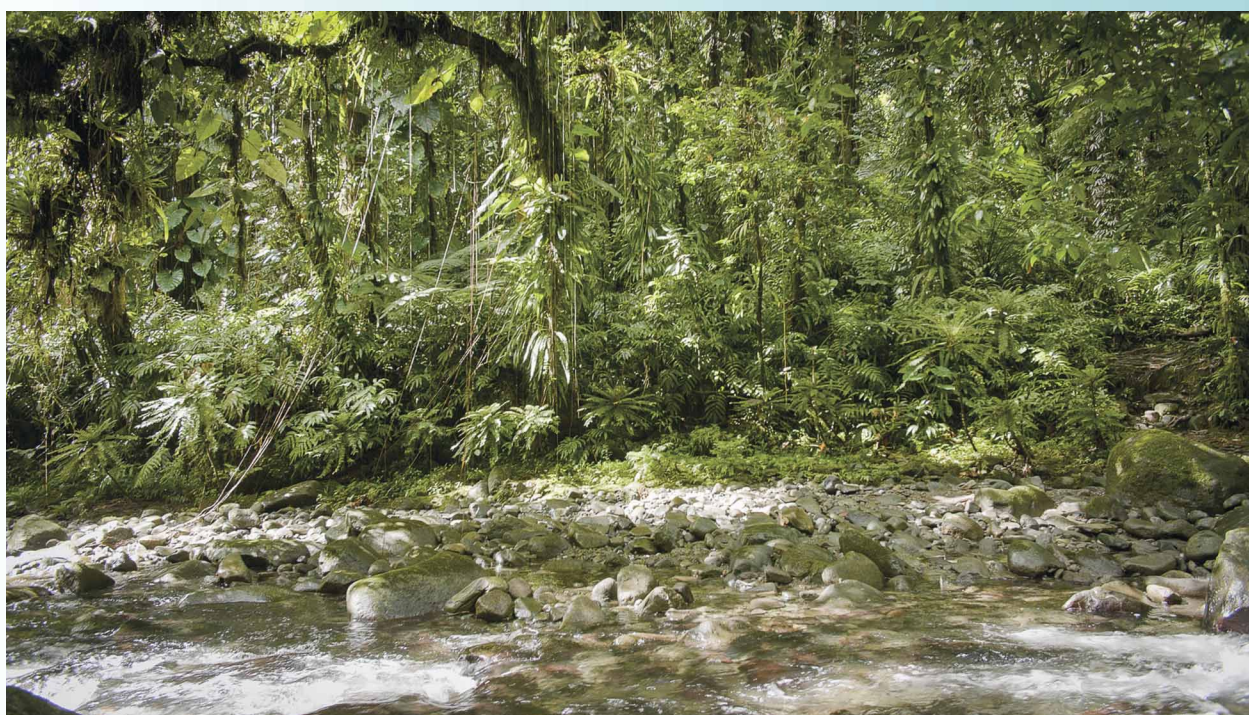


Figure 21. *Berge d'une rivière de Guadeloupe.*

Bibliographie

- Adam, P., Debiais, N., Gerber, F., & Lachat, B. (2008). Le génie végétal, *Un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques*. Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables. La Documentation française.
- Bonin, L., Evette, A., Frossard, P. A., Prunier, P., Roman, D., & Valé, N. (2013). *Génie végétal en rivière de montagne, Connaissances et retours d'expériences sur l'utilisation d'espèces et de techniques végétales : végétalisation de berges et ouvrage bois*.
- Borchering, J., Staas, S., Krüger, S., Ondračková, M., Šlapanský, L., & Jurajda, P. (2011). Non-native Gobiid species in the lower River Rhine (Germany): recent range extensions and densities. *Journal of Applied Ichthyology*, 27(1), 153-155. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2010.01662.x>
- Cavaillé, P., Dommanget, F., Daumergue, N., Loucougaray, G., Spiegelberger, T., Tabacchi, E., & Evette, A. (2013). Biodiversity assessment following a naturalness gradient of riverbank protection structures in French prealps rivers. *Ecological Engineering*, 53(0), 23-30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.105>
- Cavaillé, P., Ducasse, L., Breton, V., Dommanget, F., Tabacchi, E., & Evette, A. (2015). Functional and taxonomic plant diversity for riverbank protection works: Bioengineering techniques close to natural banks and beyond hard engineering. *Journal of Environmental Management*, 151(0), 65-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.028>
- Cavaillé, P., Dumont, B., Van Looy, K., Flourey, M., Tabacchi, E., & Evette, A. (2018). Influence of riverbank stabilization techniques on taxonomic and functional macrobenthic communities [journal article]. *Hydrobiologia*, 807(1), 19-35. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3380-3>
- Clark, J., & Hellin, J. (1996). *Bio-engineering for Effective Road Maintenance in the Caribbean*. Natural Resources Institute.
- Corenblit, D., Steiger, J., Gurnell, A. M., & Naiman, R. J. (2009). Plants intertwine fluvial landform dynamics with ecological succession and natural selection: *A niche construction perspective for riparian systems*. *Global Ecology and Biogeography*, 18(4), 507-520. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00461.x>
- Dommanget, F., Breton, V., Forestier, O., Poupart, P., Daumergue, N., & Evette, A. (2015). Contrôler des Renouées invasives par les techniques de génie écologique : retours d'expérience sur la restauration de berges envahies. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, 70(suppt 12 « Espèces invasives »), 215-228.
- Dommanget, F., Evette, A., Piola, F., Rouifed, S., & Brasier, W. (2019). État de l'art des techniques de génie végétal pour contrôler les renouées. *Science Eaux & Territoires, Renouées envahissantes - Connaissances, gestions et perspectives(27)*, 74-79. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2019.1.13>
- Dommanget, F., Jaunatre, R., Evette, A., Douce, P., Jacob, F., & Huyghe, G. (2021). Prévenir et gérer l'invasion par le Buddleia. *Sciences Eaux & Territoires*, (76). <https://doi.org/10.14758/set-revue.2021.HS.05>
- Evette, A., Baz, F., Cavaillé, P., Frossard, P., & Raymond, P. (2015). Quelles techniques pour végétaliser des enrochements de berges de cours d'eau ? *Sciences Eaux & Territoires, Hors Série*. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2015.HS.02>
- Fernandes, J. P., & Guiomar, N. (2018). Nature-based solutions: The need to increase the knowledge on their potentialities and limits. *Land Degradation & Development*, s 29(6), 1925-1939. <https://doi.org/10.1002/ldr.2935>
- Frossard, P. A., & Evette, A. (2009). Le génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière : une tradition millénaire en constante évolution. *Ingénieries - Eau Agriculture Territoires, Numéro Spécial : Ecologie de la restauration et ingénierie écologique*, 99-109.
- Frossard, P. (2021). Le Génie Végétal: un concept pluridisciplinaire [http://www.geni-alp.org/principes.php?pag=genievegetal\(16/12/2021\)](http://www.geni-alp.org/principes.php?pag=genievegetal(16/12/2021))
- Gray, D., & Sotir, R. (1996). *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization - A Practical Guide for Erosion Control*. John Wiley and Sons, Inc.
- Gurnell, A. M., Bertoldi, W., & Corenblit, D. (2012). Changing river channels: The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. *Earth-Science Reviews*, 111(1-2), 129-141. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.11.005>

- Hoerbinger, S., & Rauch, H. P. (2019). A Case Study: The Implementation of a Nature-Based Engineering Solution to Restore a Fallopia japonica-Dominated Brook Embankment. *Open Journal of Forestry*, 9, 183-194. <https://doi.org/10.4236/ojfor.2019.93009>
- Janssen, P., Cavaillé, P., Bray, F., & Evette, A. (2019). Soil bioengineering techniques enhance riparian habitat quality and multi-taxonomic diversity in the foothills of the Alps and Jura Mountains. *Ecological Engineering*, 133, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.017>
- Janssen, P., Cavaillé, P., Vivier, A., & Evette, A. (2019). Le génie végétal favorise une plus grande diversité de microhabitats aquatiques et de macroinvertébrés benthiques. *Techniques Sciences Méthodes*, (9), 55-64. <https://doi.org/10.1051/tsm/201909055>
- Janssen, P., Dommange, F., Cavaillé, P., & Evette, A. (2021). Does soil bioengineering benefits aquatic biodiversity? An empirical study of the relative influence of local and regional drivers on benthic macroinvertebrate assemblages. *Ecological Engineering*, 168, 106287. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106287>
- Jaymond, D., Evette, A., Bray, F., Leblois, S., Jung, D., Vivier, A., & Dorget, C. (2021). BD GeniVeg : une base de données française sur les ouvrages de protection de berges en génie végétal, *Science Eaux & Territoires. Article hors-série*, 6. <https://doi.org/10.14758/set-revue.2021.HS.07>
- Lachat, B. (1994). *Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales*. Ministère de l'Environnement.
- Laille, P., Provendier, D., Colson, F., & Salanié, J. (2013). Les bienfaits du végétal en ville. *Synthèse des travaux scientifiques et méthode d'analyse*, Angers, Plante & Cité.
- Lavaine, C. (2013). *Évaluation des capacités biotechniques de boutures de Salicaceae et Tamaricaceae sur un gradient de sécheresse*. Thèse de doctorat. École normale supérieure de Lyon-ENS LYON].
- Lavaine, C., Evette, A., Piégay, H., Lachat, B., & Brahic, P. (2011). Les Tamaricaceae en génie végétal. *Science Eaux & Territoires, article hors-série*. DOI : <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2011.HS.04>
- Leblois, S., Evette, A., Jaymond, D., Piton, G., & Recking, A. (2021). Processus et causes de défaillance de 223 ouvrages de génie végétal sur les berges de rivière. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 28(2), 105-120, <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.16954>.
- Leblois, 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 / Improvement of the sizing methods of riverbank bioengineering following an empirical approach. *Sciences Eaux & Territoires, Hors Série*. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2016.HS.05>
- Martin, F.-M., Janssen, P., Bergès, L., Dupont, B., & Evette, A. (2020). Higher structural connectivity and resistance against invasions of soil bioengineering over hard-engineering for riverbank stabilisation. *Wetlands Ecology and Management*. <https://doi.org/10.1007/s11273-020-09765-6>
- Naiman, R. J., Decamps, H., & Pollock, M. (1993). The Role of Riparian Corridors in Maintaining Regional Biodiversity. *Ecological Applications*, 3(2), 209-212. <https://doi.org/10.2307/1941822>
- Newsholme, C. (1992). *Willows: the genus Salix*. Batsford.
- Pander, J., Mueller, M., Knott, J., Egg, L., & Geist, J. (2017). Is it worth the money? The functionality of engineered shallow stream banks as habitat for juvenile fishes in heavily modified water bodies. *River research and applications*, 33(1), 63-72. <https://doi.org/10.1002/rra.3065>
- Polster, D. (2016). *Natural processes restoration of drastically disturbed sites*. *Journal American Society of Mining and Reclamation*, 5(2), 77-90. <http://dx.doi.org/10.21000/JASMR16020077>
- Popoff, N., Jaunatre, R., Le Bouteiller, C., Paillet, Y., Favier, G., Buisson, M., Meyer, C., Dedonder, E., & Evette, A. (2021). Optimization of restoration techniques: In-situ transplantation experiment of an endangered clonal plant species (*Typha minima* Hoppe). *Ecological Engineering*, 160, 106130. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106130>.
- Pyšek, P., Bacher, S., Chytrý, M., Jarošík, V., Wild, J., Celesti-Grapow, L., Gassó, N., Kenis, M., Lambdon, P. W., & Nentwig, W. (2010). Contrasting patterns in the invasions of European terrestrial and freshwater habitats by alien plants, insects and vertebrates. *Global ecology and biogeography*, 19(3), 317-331. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00514.x>

- Recking, A., Piton, G., Montabonnet, L., Posi, S., & Evette, A. (2019). Design of fascines for riverbank protection in alpine rivers: Insight from flume experiments. *Ecological Engineering*, 138, 323-333. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.019>
- Rey, F., Bifulco, C., Bischetti, G. B., Bourrier, F., De Cesare, G., Florineth, F., Graf, F., Marden, M., Mickovski, S. B., & Phillips, C. (2019). Soil and water bioengineering: Practice and research needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration. *Science of the total environment*, 648, 1210-1218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.217>
- Rey, F., & Labonne, S. (2015). Resprout and Survival of Willow (*Salix*) Cuttings on Bioengineering Structures in Actively Eroding Gullies in Marls in a Mountainous Mediterranean Climate: A Large-Scale Experiment in the Francon Catchment (Southern Alps, France). *Environmental Management*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0542-9>
- Rouifed, S., Piola, F., Avoscan, C., & Dommange, F. (2019). Écologie chimique : quelles applications pour la gestion des renouées ? *Sciences Eaux & Territoires, Hors série*. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2019.1.17>
- Schiechl, H. M., & Stern, R. (1996). *Ground Bioengineering Techniques. For Slope Protection and Erosion Control*. Blackwell Science.
- Schmitt, K., Schäffer, M., Koop, J., & Symmank, L. (2018). River bank stabilisation by bioengineering: potentials for ecological diversity. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 6(4), 262-273. <https://doi.org/10.1080/23249676.2018.1466735>
- Schmitt, K., & Symmank, L. (2017). The potential of alternative technical-biological bank protection measures on federal waterways – An applied research approach. *River Sedimentation - Proceedings of the 13th International Symposium on River Sedimentation, ISRS 2016*,
- Strayer David, L., Kiviat, E., Findlay Stuart, E. G., & Slowik, N. (2016). Vegetation of riprapped revetments along the freshwater tidal Hudson River, New York. *Aquatic sciences (Electronic ed.)*, 78(3), 605-614. <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0445-0>
- Sudduth, E., & Meyer, J. (2006). Effects of Bioengineered Streambank Stabilization on Bank Habitat and Macroinvertebrates in Urban Streams. *Environmental Management*, 38(2), 218-226. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-004-0381-6>
- Symmank, L., Natho, S., Scholz, M., Schröder, U., Raupach, K., & Schulz-Zunkel, C. (2020). The impact of bioengineering techniques for riverbank protection on ecosystem services of riparian zones. *Ecological Engineering*, 158, 106040. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106040>
- Tisserant, M., Janssen, P., Evette, A., González, E., Cavallé, P., & Poulin, M. (2020). Diversity and succession of riparian plant communities along riverbanks bioengineered for erosion control: a case study in the foothills of the Alps and the Jura Mountains. *Ecological Engineering*, 152, 105880. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105880>
- UICN. (2016, 6 au 10 septembre 2016). Résolution 69, Définition des solutions fondées sur la nature (WCC-2016-Res-069). Congrès mondial de la nature, Honolulu, Hawaii, États-Unis d'Amérique. .
- UICN. (2020). *Orientations générales d'utilisation de Standard mondial de l'UICN pour les solutions fondées sur la nature* (Vol. Première édition). UICN.
- von der Thannen, M., Hoerbinger, S., Paratscha, R., Smutny, R., Lampalzer, T., Strauss, A., & Rauch, H. P. (2017). Development of an environmental life cycle assessment model for soil bioengineering constructions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-15. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1369460>





Rédaction

André Evette, Guillaume Piton, Philippe Janssen, Fanny Dommanget, Nadège Popoff, Delphine Jaymond, Camille Guilloteau, Solange Leblois, Sébastien De Danieli, Alain Recking, Delphine Jung, Anne Vivier, François-Marie Martin, Renaud Jaunatre, Éléonore Mira, Marie Didier

Relecture

Christine Saint-Andrieux (DRAS, OFB)

Édition

Béatrice Gentil-Salasc (OFB)

Création et mise en forme graphiques

Béatrice Saurel (saurelb@free.fr)

Citation

Evette A. *et al.*, 2022. Le génie végétal sur les berges de cours d'eau : des techniques aux multiples bénéfiques. Office français de la biodiversité. Collection *Comprendre pour agir*. 28 pages.

Contact

anne.vivier@ofb.gouv.fr

Mentions légales

Éditeur : Office français de la biodiversité (OFB) - 12, cours Lumière - 94300 Vincennes

Imprimeur : Estimprim - ZA À la Craye - 25110 Autechaux Gratuit

Achévé d'imprimer en octobre 2022

Dépôt légal à parution

ISSN print : 2607-060X

ISBN web : 978-2-38170-155-4

ISBN print : 978-2-38170-156-1

La reproduction à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite à condition que la source soit dûment citée. La reproduction à des fins commerciales, et notamment en vue de la vente, est interdite sans permission écrite préalable.

La collection **Comprendre pour agir** accueille des ouvrages issus de travaux de recherche et d'expertise mis à la disposition des enseignants, formateurs, étudiants, scientifiques, ingénieurs et des gestionnaires concernés par la biodiversité.

Derniers numéros parus

- 29 - Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques : connaissances pratiques et expériences de gestion - Vol. 3 Expériences de gestion (bis) (mai 2018)
- 30 - La prévision à moyen et long terme de la demande en eau potable : bilan des méthodes et pratiques actuelles (janvier 2019)
- 31 - Les bénéfices liés à la préservation des eaux souterraines : pourquoi et comment leur donner une valeur monétaire ? (novembre 2018)
- 32 - Lutter contre les micropolluants dans les milieux aquatiques : quels enseignements des études en sciences humaines et sociales ? (septembre 2018)
- 33 - Agro-écologie et Trame verte et bleue : des synergies à valoriser (avril 2019)
- 34 - Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons et macrocrustacés dans les départements insulaires ultramarins - Principes et méthode (décembre 2019)
- 35 - Bresle - Oir - Scorff - Nivelle. Trois décennies d'observations et de recherche sur les poissons migrateurs (mai 2020)
- 36 - Dimensionnement de la compensation *ex ante* des atteintes à la biodiversité - État de l'art des approches, méthodes disponibles et pratiques en vigueur (mai 2020)
- 37 - Histoire et impacts environnementaux de l'orpillage en Guyane - Clefs de compréhension des tensions actuelles (juin 2020)
- 38 - Bilan pour l'action de la stratégie nationale pour la biodiversité 2011-2020 : synthèse de l'évaluation (juillet 2020)
- 39 - Trame noire, méthodes d'élaboration et outils pour sa mise en œuvre (mars 2021)
- 40 - Les ressources de la prospective au service de la biodiversité - Comment mobiliser les futurs pour les politiques publiques de biodiversité ? (septembre 2021)
- 41 - Le traitement des eaux usées domestiques dans les départements d'outre-mer. (septembre 2021)
- 42 - Micropolluants émis par les usages domestiques et l'artisanat : changer les pratiques pour mieux préserver l'eau - Retours d'expériences et recommandations à l'intention des collectivités (décembre 2021)
- 43 - Conduire un diagnostic « micropolluants » sur un territoire urbain - Retour d'expérience méthodologique du dispositif national « lutte contre les micropolluants des eaux urbaines » (mars 2022)
- 44 - Micropolluants émis par le secteur de la santé : prendre soin aussi de l'eau - Retours d'expériences et recommandations à l'intention des acteurs hospitaliers et de la santé (avril 2022)
- 45 - Les espèces exotiques envahissantes : connaissances pratiques et expériences de gestion (ter). Volume 4 (mai 2022)
- 46 - La marque *Esprit parc national* - Synthèse de l'étude évaluative (juin 2022)
- 47 - Empreinte biodiversité importée de la France : état de l'art (octobre 2022)
- 48 - Le génie végétal sur les berges de cours d'eau : des techniques aux multiples bénéfiques (octobre 2022)

