



Solutions Naturelles sans Structures Rigides. Guide technique **Office Français de la Biodiversité et Institut National de** **Recherche pour l'agriculture, l'alimentation et** **l'environnement.**

Marie Didier, Sarah Menoli, André Evette, Pierre-André Frossard, Anne Vivier

► To cite this version:

Marie Didier, Sarah Menoli, André Evette, Pierre-André Frossard, Anne Vivier. Solutions Naturelles sans Structures Rigides. Guide technique Office Français de la Biodiversité et Institut National de Recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.. OFB, Office Français de la Biodiversité; INRAE. 2025. <hal-05215778>

HAL Id: hal-05215778

<https://hal.science/hal-05215778v1>

Submitted on 20 Aug 2025

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

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



HAL Authorization



Génie végétal

**SOLUTIONS
NATURELLES SANS
STRUCTURES
RIGIDES**

DIDIER Marie,
MENOLI Sarah,
EVETTE André,
FROSSARD Pierre-André,
VIVIER Anne



OFB
OFFICE FRANÇAIS
DE LA BIODIVERSITÉ

INRAE

Remerciements

Cet ouvrage n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide, l'engagement et le soutien des différents co-auteurs, qui ont chacun, à leur échelle, contribué à son élaboration. Leurs regards, critiques et suggestions ont indéniablement enrichi le propos. Nous souhaitons ainsi exprimer notre profonde gratitude à *Sarah Menoli*, en premier lieu.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à *Anne Vivier*, qui a accordé sa confiance au projet dès son commencement et l'a soutenu tout au long des trois années de travaux. C'est grâce à son engagement et son appui constant que ce guide a pu voir le jour. Nous lui sommes profondément reconnaissants pour son investissement et son accompagnement sans faille.

Marie Didier et André Evette
INRAE Grenoble
Le 12 Février 2025

Comment citer ?

Didier, M., Menoli, S., Evette, A., Frossard, P-A. et Vivier, A. Solutions Naturelles sans Structures rigides. Guide technique par l'Office Français de la Biodiversité avec l'Institut National de Recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, 73 pages.

SOMMAIRE

	Introduction	3
	Le génie végétal à travers le temps : de la tradition à l'innovation	3
	Mise en garde	5
1	La composante végétale au service du génie végétal	6
	L'organisation spatio-temporelle de la végétation riveraine	7
	La répartition transversale de la végétation	8
2	Le choix des techniques en génie végétal	10
	Le rôle fonctionnel de la végétation comme clé du choix technique	10
	Principes de sélection des principales techniques de génie végétal	11
3	Les principales techniques de génie végétal : Techniques à base de plantes hélophytes	13
	Plantations et banquettes d'hélophytes	13
	Fascines d'hélophytes	20
4	Les principales techniques de génie végétal : Techniques à base de plantes ligneuses	26
	Plantations de ligneux	26
	Couche de branches à rejets	33
	Lits de plants et plançons	39
	Déclinaison avec géotextile	45
	Déclinaison avec pieux	48
	Tressage vivant	49
	Peignes et Treillis de Branches.	56
	Déclinaison de Prueckner.	65
	Conclusion	67
	Références	69

Le génie végétal à travers le temps : de la tradition à l'innovation

Depuis des temps immémoriaux, les plantes ont été utilisées pour la protection des sols. Les premières communautés sédentaires y sont parvenues par le moyen le plus simple : l'utilisation de matériaux de l'environnement. Dès cette époque, il a fallu trouver des moyens de stabiliser et de protéger les portions du territoire qui avaient été modifiées par divers phénomènes naturels. Pour ce faire, on a utilisé des matériaux locaux tels que la pierre, le bois et les plantes, ce qui constitue la première application des techniques de stabilisation du sol par le génie végétal au sens le plus large du terme (Schiechtl & Stern, 1996, 1997). Dès l'antiquité, de nombreuses cultures ont su tirer parti des végétaux pour stabiliser les berges des cours d'eau, les ruisseaux et lacs ; et protéger les terres agricoles contre l'érosion (Evette et al., 2009). Au Moyen Âge, alors que ni les matériaux de construction modernes ni les

machines de construction n'étaient utilisés, les rivages et les berges étaient stabilisés et protégés avec succès par l'utilisation de plantes vivantes et de matériaux végétaux ; en France et aux Pays-Bas, même les canaux navigables étaient maintenus en bon état grâce aux mêmes méthodes (Schiechtl & Stern, 1997). De nombreux documents anciens, tels que des gravures et des manuscrits, illustrent ces pratiques ancestrales, qui reposaient sur une observation fine de la nature et un respect des cycles végétaux. On retrouve ainsi des traces très anciennes de clayonnage en Europe, à titre d'exemple en 1624 (Figure 1) ou encore de matelas de saules sur le fleuve Mississippi au 20ème siècle (Figure 2). L'utilisation des végétaux pour la protection précède de loin les premiers traités sur le sujet.



Figure 1: Clayonnage, Esaias Van de Velde (1587/91-c1630), « The Great Flood of January 10, 1624 or Repairing the Broken Dike on the River Lek by Vianen », 1624.



Figure 2: Matelas de saule - Un groupe de travailleurs du département d'ingénierie des États-Unis déplaçant des nattes de saule dans la rivière ; celles-ci étaient la base des barrages en ailes sur le fleuve Mississippi, vers 1920, University of Wisconsin-La Crosse, Murphy Library, Special Collections.

Ces savoir-faire ancestraux, fondés sur l'observation fine de la nature et le respect des cycles végétaux, ont pourtant été largement oubliés, notamment durant "les Trente Glorieuses". Ils ont été redécouverts au siècle dernier et adaptés aux enjeux modernes, mêlant connaissances scientifiques récentes (sur les aspects biologiques et techniques et sur la nature et les propriétés des matériaux de construction) et traditions pour répondre aux besoins actuels.

Aujourd'hui, l'utilisation du génie végétal s'inscrit pleinement dans les politiques nationales et internationales visant à promouvoir des pratiques durables et respectueuses des écosystèmes. En lien avec des documents tels que les *Standards of Practice to Guide Ecosystem Restoration* (Nelson et al., 2024), récemment publiés, cette approche s'aligne sur les objectifs de restauration et de préservation des milieux naturels, fixés par des conventions internationales comme la Stratégie de l'Union européenne pour la biodiversité à l'horizon 2030 et les engagements pris lors de la Décennie des Nations Unies pour la restauration des écosystèmes (2021-2030). Ces textes encouragent

la mise en œuvre de techniques douces et respectueuses des dynamiques naturelles, dans lesquelles le génie végétal peut jouer un rôle clé sur les cours d'eau en rétablissant les fonctionnalités écologiques de leurs berges tout en luttant contre l'érosion. Le génie végétal fait partie de ce qu'on appelle les « Solutions fondées sur la Nature » (SfN) (Preti et al., 2022). L'Union Internationale pour la conservation de la nature (UICN) les définit comme : "Les actions visant à protéger, gérer durablement et restaurer les écosystèmes naturels ou modifiés qui répondent aux défis sociétaux de manière efficace et adaptative, en fournissant simultanément des avantages pour le bien-être humain et la biodiversité" (UICN, 2016).

L'encadrement de ces pratiques repose sur des critères stricts visant à intégrer les caractéristiques locales des écosystèmes tout en minimisant l'empreinte humaine sur l'environnement. Le génie végétal, en tant que méthode privilégiée pour la stabilisation et la restauration des berges, se doit de répondre à des standards précis, tels que le choix d'espèces adaptées, et l'intégration des contraintes hydrauliques et sédimentaires.

Mise en garde

La mise en œuvre d'ouvrages de génie végétal doit être strictement réservée à la protection des biens et des personnes lorsque ces enjeux sont immuables et nécessitent une protection en raison de leur importance. Dans ces cas, le recours au génie végétal est justifié. Toutefois, il est crucial de reconnaître que l'érosion est un processus naturel nécessaire au bon fonctionnement des cours d'eau tant sur les plans écologiques que géomorphologiques. Ainsi sur des terrains présentant des enjeux mineurs, l'érosion peut et doit être acceptée, les protections de berges ne doivent pas être systématiques mais réservées aux seuls cas où l'ampleur des enjeux impose de stabiliser.

La protection des berges s'inscrit dans une démarche plus globale d'aménagement du territoire, dépassant la simple sauvegarde d'un site d'intérêt. Cette problématique doit être envisagée à l'échelle d'un cours d'eau et de son bassin versant ou à minima d'une section de rivière et une réflexion en amont est indispensable. Cette réflexion doit se faire indépendamment du choix des techniques, car bien que la protection de zones à fort enjeu contre l'érosion soit légitime, elle doit s'insérer dans une stratégie plus large de préservation de l'espace de mobilité du cours d'eau sur tout son linéaire. Cette approche garantit une recharge sédimentaire suffisante et contribue au maintien de l'équilibre sédimentaire, un élément fondamental pour la gestion durable des cours d'eau dans le cadre des politiques d'aménagement du territoire.

1- La composante végétale au service du génie végétal

La stabilisation par génie végétal implique l'utilisation de matériaux vivants - **la végétation**. Les parties des plantes elles-mêmes, c'est-à-dire les racines, les tiges, les graines ou même le plant entier, servent d'éléments structuraux et mécaniques principaux dans un système de protection des pentes ou des berges (Lachat, 1994; Schiechl & Stern, 1997). Des boutures vivantes et des plantes enracinées sont implantées dans le sol selon diverses configurations et arrangements géométriques (Figure 3) de manière à agir comme des renforcements du sol, des drains hydrauliques ou des barrières contre les mouvements de masse (Gray & Sotir, 1996).



Figure 3 : Exemples de parties végétales servant d'éléments structurants pour des aménagements de protection (graines, boutures, plançons ou plante entière) © N. Daumergue et S. De Danieli.

L'organisation spatio-temporelle de la végétation riveraine

Dans la plaine alluviale, l'écosystème fluvial s'organise spatialement autour de trois dimensions interdépendantes (Figure 4) :

- **Dimension longitudinale** : Elle est définie par un flux principalement unidirectionnel d'énergie et de matière, s'écoulant de l'amont vers l'aval. Ce flux est influencé par des gradients discontinus étroitement liés aux caractéristiques du lit fluvial, telles que la pente, la granulométrie ou encore la sinuosité du cours d'eau (Poff & Ward, 1989). Le climat peut également avoir une influence dans les bassins versants présentant de grandes différences d'altitudes.
- **Dimension latérale** : Les variations saisonnières du niveau des eaux induisent une dynamique latérale des chenaux, qui joue un rôle clé dans le recrutement des espèces alluviales et la redistribution des nutriments. Située selon un axe transversal au chenal, cette dimension est marquée par des échanges bidirectionnels d'énergie et de matière. Lors des crues ou des fluctuations hydriques saisonnières liées aux précipitations et à la fonte des neiges, des interactions s'opèrent entre le lit mineur, le lit majeur et la plaine alluviale. Ces échanges favorisent le transport de sédiments, de nutriments et de matière organique, essentiels au développement de la végétation (Junk et al., 1989; Maiolini & Bruno, 2007).
- **Dimension verticale** : Cette dimension se réfère aux transferts hydriques entre le lit mineur, l'aquifère et la zone hyporhéique, ainsi qu'aux variations du niveau de la nappe phréatique (Maiolini & Bruno, 2007; Datry et al., 2008).



Figure 4: Structure riveraine résultant des quatre descripteurs majeurs de l'écosystème : longitudinal, latéral, vertical et temporel. La répartition de la végétation varie selon les conditions de stabilité : herbacées sur les zones récemment remaniées, arbustives sur les zones intermédiaires plus stables, et arborées sur les secteurs où la stabilité s'est installée durablement. ©S. De Danieli.

Les différentes dimensions de l'hydrosystème peuvent être positionnées dans cet espace tridimensionnel délimité par ces trois descripteurs majeurs (Pautou et al., 1996). La végétation riveraine est principalement répartie en fonction des gradients hydriques présents le long de l'axe transversal, c'est-à-dire du niveau d'humidité existant, mais également par des variations locales de granulométrie, de température et de concentration en nutriments (Schiechtl & Stern, 1997; Sangalli, 2019). En parallèle, des facteurs longitudinaux tels que le régime des précipitations, les processus géomorphologiques, la pente et les conditions hydrauliques viennent moduler cette répartition (Sangalli, 2019).

Un système alluvial naturel se distingue par une dynamique intrinsèque, étroitement liée à l'alternance et à l'intensité des crues (Adam et al., 2008; Gurnell et al., 2016). Cette dynamique influe directement sur l'évolution de la végétation, apportant de ce fait une **dimension temporelle**. Corenblit et al. (2007) décrivent ce processus en tant que « *succession biogéomorphologique fluviale* ». Telle que décrite par ses auteurs, cette succession fait référence aux changements dans la composition et la structure des écosystèmes riverains au fil du temps en réponse à des interactions complexes entre les processus biotiques et les processus géomorphologiques le long d'un cours d'eau. Cette approche reconnaît l'importance de la végétation et des processus écologiques dans la dynamique morphologique des rivières.

Bien que l'ensemble de ces processus ne soit pas l'objet principal de ce guide, ils constituent une base essentielle pour comprendre les critères de sélection des espèces et des techniques employées en génie végétal. Chaque type de végétation remplit un rôle complémentaire au sein de l'écosystème, et ses caractéristiques spécifiques en matière de propagation et d'utilisation influencent directement les stratégies de restauration mises en œuvre.

La répartition transversale de la végétation

Entre les crues, les périodes de stabilité permettent à la végétation de se développer et d'initier la succession écologique. Ce processus temporel décrit l'évolution progressive des communautés végétales qui colonisent les milieux alluviaux. Les premières espèces végétales à s'installer sont généralement les herbacées pionnières des alluvions, comme les hélophytes (dans les zones sujettes à la submersion fréquente), caractérisées par leurs excellentes capacités de régénération et de colonisation des milieux jeunes ou récents. Si les sédiments restent en place sans trop de perturbation pendant un certain temps, les premières espèces ligneuses à bois tendre, telles que les saules, s'installent. Les boisements pionniers sont susceptibles de changer les conditions d'écoulement et de favoriser l'accrétion de sédiments et *de facto* la forme des bancs. Si cette période de stabilité s'étend sur plusieurs années, voire des décennies, la végétation continue d'évoluer à travers des stades successifs et typiques de la succession végétale (Figure 5). Les espèces pionnières de bois tendre cèdent progressivement leur place à des espèces pionnières de bois dur, jusqu'à atteindre le stade mature, stade forestier, qui est souvent représenté par des frênaies, hêtraies ou chênaies à basse altitude selon les conditions climatiques, édaphiques locales et selon la taille et la position du cours d'eau (Piégay et al., 2003; Adam et al., 2008; Corenblit et al., 2007; Labroche et al., 2021; Boyer et al., 2023) (à consulter : Corenblit et al., 2020).

Parallèlement à cette dynamique temporelle, la zonation transversale désigne l'organisation spatiale de la végétation perpendiculairement au cours d'eau. Elle est déterminée par des gradients écologiques influencés par la distance à la nappe phréatique, la fréquence et la durée de submersion, l'intensité des contraintes hydrodynamiques (traction, charriage), ainsi que l'ensoleillement ou l'humidité des sols. Ces facteurs définissent des bandes distinctes où certaines espèces sont plus adaptées que d'autres : les hélophytes colonisent les zones basses fréquemment inondées, les arbustes et arbres pionniers s'établissent en retrait sur des niveaux moins

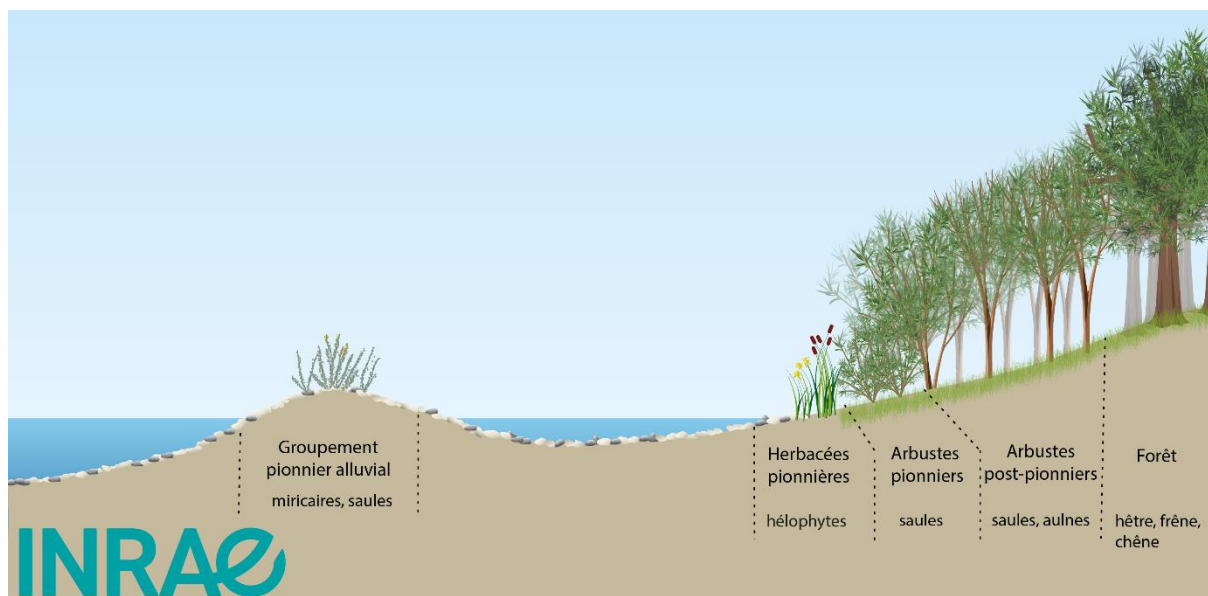


Figure 5: Organisation transversale de la végétation riveraine en fonction du gradient d'humidité et de stabilité. Les hélophytes colonisent les secteurs les plus proches de l'eau et instables. Plus en retrait, les arbustes pionniers (saules) et post-pionniers (saules, aulnes) s'installent sur des sols plus stables, suivis par la forêt mature composée de frênes, hêtres, et chênes. Les groupements pionniers alluviaux peuvent occuper les bancs alluviaux, les zones les plus instables et susceptibles d'être inondées.

contraints, et les formations plus matures se développent en haut de berge ou dans les zones rarement touchées par les crues.

Les communautés végétales qui composent la ripisylve s'organisent donc en strates herbacée, arbustive et arborée, la dynamique (établissement, colonisation et extinction) est régie à la fois par la succession dans le temps et par la variation des paramètres physiques, chimiques et biologiques induite par le régime de perturbation (Naiman & Décamps, 1997). La compréhension conjointe de ces dynamiques permet de guider le choix des espèces à implanter dans un projet de restauration. Il est important de souligner que dans la nature, ces zones sont rarement strictement délimitées : les transitions sont progressives et certaines espèces peuvent s'étendre sur plusieurs bandes écologiques. L'approche de la sélection des plantes pour les différentes zones ne peut donc pas être trop rigide (Schiechl & Stern, 1997).

Dans le cadre de restauration, le choix du matériel végétal et de la strate ciblée est essentiel. Une couverture dense et serrée de végétation herbacée, par exemple, constitue l'une des meilleures protections contre l'érosion pluviale et éolienne superficielle, tandis qu'une végétation ligneuse à racines profondes est plus efficace pour atténuer ou prévenir les ruptures de stabilité massives et profondes (Gray & Sotir, 1996).

2- Le choix des techniques en génie végétal

Le rôle fonctionnel de la végétation comme clé du choix technique

Origine des végétaux et Végétal local

Pour toute mesure de restauration par le génie végétal impliquant l'achat de végétaux (espèces ligneuses ou herbacées), il est essentiel de vérifier leur provenance et leur qualité afin d'assurer la réussite du projet et de limiter les risques d'introduction d'espèces non adaptées ou invasives.

*Dans la mesure du possible, il est recommandé de privilégier des plants labellisés **Végétal Local**, garantissant leur origine et leur adaptation aux conditions du milieu.*



Le rôle fonctionnel de la végétation, défini par les traits biotechniques¹ qu'elle doit offrir, oriente largement le choix des espèces et leur gestion sur un site à restaurer. Cette définition, essentielle dès la phase de conception, influence directement la technique adoptée, les coûts, la préparation du terrain et le calendrier des interventions (Bayfield, 1995; Venti et al., 2003). La plupart des techniques nécessitent plusieurs saisons pour permettre à la végétation de se développer et d'atteindre son efficacité maximale. Elles impliquent également des exigences de gestion prolongée (voir parties 3 et 4 de ce guide).

Les espèces herbacées et ligneuses, grâce à leurs caractéristiques spécifiques, sont employées de manière ciblée dans divers contextes pour stabiliser les sols et les berges. Leur contribution à la stabilité est directement proportionnelle à leur développement (Venti et al., 2003), offrant des rôles distincts. Par exemple, la **strate herbacée**, composée d'espèces dont les racines s'étendent généralement sur 20 à 50 cm de profondeur, est capable d'assurer une protection efficace des couches superficielles du sol grâce à une couverture végétale dense (Florineth, 2004). La **strate arbustive ou arborée** renforce les sols plus en profondeur (Bayfield, 1995). Leur système racinaire peut atteindre plusieurs mètres, permettant de stabiliser les terrains instables, soumis à des contraintes mécaniques plus importantes, notamment. Les parties aériennes des plantes vont également augmenter la rugosité des berges en fonction de leur importance, réduisant ainsi la vitesse et les contraintes du courant à proximité du sol.

La capacité des végétaux à stabiliser le sol peut être évaluée à travers leur résistance moyenne à la traction (ou contrainte tractrice), un indicateur clé pour quantifier leur efficacité dans la stabilisation des sols. Le Tableau 1 illustre ces valeurs en fonction des groupes végétaux, mettant en évidence leur rôle distinct dans les approches de restauration écologique. En fonction des conditions spécifiques du site, on choisira d'utiliser une strate herbacée et directement arbustive/arborée si des forces mécaniques importantes sont en jeu, comme des pentes plus raides ou des fortes forces érosives pour garantir une stabilisation optimale.

¹ Caractéristiques des plantes utiles à leur utilisation en génie végétal

Tableau 1: Gamme de résistance à la traction en fonction du type de végétation considéré

	Contrainte tractrice (N/m²)	Référence
Herbacées (dont héliophytes)		
• à la mise en place	30-50	Adam et al. (2008)
• développées	50-80	
Arbustes		
• jeunes	50-100	Venti et al. (2003); Adam et al. (2008)
• développés, sous la forme de couverture diffuse	150-300 (max. 450)	

Principes de sélection des principales techniques de génie végétal

La sélection des techniques de génie végétal repose sur une approche à la fois pragmatique, technique et scientifique, tenant compte des spécificités de chaque site et des objectifs de stabilisation ou de restauration écologique. Il n'existe pas de solution universelle : le choix des méthodes doit être adapté à la situation et basé sur une analyse approfondie des facteurs environnementaux et des contraintes techniques.

La question est alors de savoir comment réaliser une revégétalisation et une protection contre l'érosion de manière rapide et économique tout en obtenant une couverture de sol adéquate. L'objectif est d'atteindre une couverture végétale de 75 à 95 % après au moins un an, avec des plantes saines et en pleine croissance (Florineth, 2004). Le Tableau 2 d'aide à la décision proposé dans ce guide n'a pas pour objectif de fournir une "recette miracle" pour le choix des techniques de génie végétal. Il présente plutôt un ensemble de solutions adaptées à diverses situations. La sélection finale des techniques doit tenir compte de nombreux facteurs, tels que le degré d'érosion, les contraintes spécifiques du site et les objectifs à long terme. Une étude préalable approfondie est donc indispensable pour identifier les meilleures options à mettre en œuvre, et garantir la réussite du projet.

Ce guide technique propose des méthodes efficaces pour réussir la revégétalisation, en garantissant une couverture végétale durable et protectrice. Il complète les deux précédents guides réalisés par INRAE et l'OFB, l'un consacré aux méthodes de fascinage (Didier et al., 2023) et l'autre au bouturage et aux espèces (Didier et al., 2024). Les lecteurs et lectrices souhaitant approfondir ces approches spécifiques peuvent se référer à ces guides. En revanche, le présent document se concentre sur des techniques distinctes, notamment celles sans éléments structurants rigides (rondins et pierres), mettant en avant l'utilisation de végétaux vivants pour protéger et régénérer les milieux naturels (voir parties 3-4- de ce guide).

Tableau 2: Tableau d'aide à la décision concernant les principales techniques de génie végétal observées, adapté et complété depuis Gray & Sotir (1996).

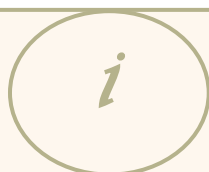
FACTEURS DU SITE AVANT RESTAURATION	INTENSITÉ OU TYPE DE CONDITION	BOUTURAGE	FASCINE VIVANTE	LITS DE PLANTS ET PLANÇONS	PLANTATIONS ET FASCINES D'HÉLOPHYTES	ENSEMENCEMENT	PLANTATIONS DE LIGNEUX	COUCHES DE BRANCHES À REJETS	BROSSES ET PEIGNES
TALUS OU PIED DE BERGE	Pied		x	(x) ²	x				x
	Talus	x	x	x		x	x	x	
GRADIENT DE LA PENTE	Raide		x	x		X		x	x
	Doux	x	x		x	x	x	x	
HAUTEUR DE LA BERGE	Élevée	(x) ³	x	x	x	x	x	x	x
	Faible	x	x	x	x	x	x	x	x
ÉRODABILITÉ DU SOL	Haute		x	x ⁴		X ⁴		x	x
	Faible	x	x	x	x	X	x		
ÉROSION SUPERFICIELLE	Élevée		x			X ⁴			x
	Faible								
GLISSEMENT DE MASSE ⁵	Peu profond	x	x	x	x	x	x	x	x
	Modéré			x					x

² Des aménagements peuvent être réalisés en pied de berge sans recours à d'autres techniques de protection, mais ces pratiques restent marginales.³ Placées trop haut sur la berge, et donc rarement en contact avec l'eau, les boutures présentent un risque accru de mortalité.⁴ Avec géotextile.⁵ Mouvement descendant des matériaux formant la pente – roche naturelle, sols, remblais artificiels ou combinaisons de ces matériaux.

3- Les principales techniques de génie végétal : Techniques à base de plantes hélophytes

Plantations et banquettes d'hélophytes

Reeds planting, Reeds structures



Les informations concernant la description et les contextes d'application de cette technique sont issues des références suivantes : Donat, (1995); Schiechl & Stern, (1997); Barbry, (2002); Zeh, (2007); Adam et al., (2008); Peeters et al., (2020).

DESCRIPTION

Les techniques basées sur les hélophytes comprennent principalement la plantation directe, l'aménagement de banquettes en pied de berge ou la mise en œuvre de fascines (comme traitée dans la partie suivante). Ces plantes herbacées, spécifiques aux milieux humides, jouent un rôle crucial dans la stabilisation des berges et la restauration des écosystèmes aquatiques grâce à leur capacité de multiplication végétative.



Figure 6 : Plantation d'hélophytes sous un géotextile en berge de rivière © S. De Danieli.

La plantation d'héliophytes consiste à implanter des mottes, rhizomes ou jeunes pousses directement sur le site (Figure 6). Ces plants sont placés en pleine terre, le long des rives de cours d'eau ou de plans d'eau, et stabilisent naturellement grâce à l'ancrage de leurs racines dans le sol. Cette méthode simple permet un enracinement progressif et renforce peu à peu les berges, tout en favorisant la biodiversité locale.

Les banquettes d'héliophytes, quant à elles, constituent une variante plus structurée de la plantation. Elles consistent à créer des terrasses au pied des berges, sur lesquelles les héliophytes sont plantées (Figure 7). Ces terrasses, généralement construites avec des matériaux terreux, forment une zone végétalisée élargie qui stabilise davantage les berges. En augmentant la surface de contact entre la végétation et l'eau, elles réduisent l'impact des vagues et des courants, limitant ainsi l'érosion. Ces banquettes sont souvent protégées à l'aide de géotextiles biodégradables tissés et/ou non tissés résistants.

Les tiges des héliophytes dissipent l'énergie du courant et atténuent l'effet érosif des vagues, tandis que leur réseau racinaire dense lie le sol, jouant un rôle essentiel dans son ancrage, bien que cet effet stabilisateur ne soit pas immédiat. Grâce à leur croissance rapide, surtout si la plantation a lieu au début de la saison de croissance (mai/juin), ces plantes renforcent progressivement les berges, offrant ainsi une protection durable contre l'érosion. Associées à d'autres techniques de stabilisation des talus, elles favorisent le développement d'une végétation dense, notamment au niveau des rives basses.



Figure 7: Banquette d'héliophytes à la mise en place et après une saison de végétation © A. Evette.

CONTEXTE D'APPLICATION

Les plantations d'héliophytes, qu'elles soient sous forme simple ou intégrées à des banquettes, sont particulièrement adaptées à la végétalisation des zones inondées de manière permanente ou temporaire. Elles sont également très efficaces pour stabiliser les pieds de berges dans des environnements à eaux calmes, tels que les canaux, les bras morts ou les zones lenticles des grands cours d'eau (Figure 8). Les techniques de plantation d'héliophytes sont beaucoup plus difficiles à utiliser sur les berges exposées à de fortes actions érosives des vagues. Ces techniques sont idéales pour restaurer ou créer des zones humides à haute valeur écologique, en favorisant l'introduction de plantes comme les graminées, les typhacées ou les cypéracées. Les héliophytes, en formant un tapis dense de plantes hygrophiles, peuvent offrir une protection efficace contre les courants, le batillage lié à la navigation ou au vent, ainsi que les variations du niveau d'eau dans les estuaires et les lacs de retenue.



Figure 8 : Banquette d'héliophytes développées en berge à eaux calmes © A. Evette.

Les banquettes d'héliophytes, plus structurées que les simples plantations, sont particulièrement recommandées dans les zones où les pressions hydrauliques sont faibles à modérées. Elles permettent un ancrage plus solide des sols et créent un environnement favorable à la colonisation naturelle des espèces aquatiques et riveraines.

Avec le temps, la résistance de l'ouvrage augmente grâce au développement des végétaux, selon le principe général des techniques vivantes. Les performances de la plantation d'héliophytes (ou de la banquette), avant et après le développement pendant 3 à 4 saisons de la végétation, sont les suivantes (Tableau 3):

Tableau 3: Contrainte tractrice admissible par la plantation d'héliophytes (Schiecht & Stern, 1997)

Contrainte tractrice admissible (N/m²)	
Avant développement	5
Après développement (3-4 saisons de végétation)	30

Le choix des espèces d'héliophytes doit être fait en fonction de leur adaptation au sol et aux conditions d'humidité. Ces plantes doivent être installées près de la ligne d'eau, mais sans être complètement immergées. La hauteur par rapport à l'eau et la durée d'immersion tolérée vont varier suivant les espèces. Idéalement, elles sont plantées au niveau moyen de l'eau ou légèrement au-dessus. Toutefois, au-delà de 50 cm au-dessus du niveau moyen de l'eau, certaines espèces peuvent montrer des signes de faiblesse dans leur croissance et/ou être concurrencées par des espèces moins hygrophiles (le cas de l'ortie est assez fréquent). Pour assurer une plantation réussie, il est conseillé de diversifier les espèces afin d'optimiser la résilience écologique du site face à la variabilité des contraintes.

Parmi les espèces les plus couramment utilisées, on trouve l'*Iris pseudacorus* L. (iris des marais), apprécié pour sa robustesse, *Typha latifolia* L. (massette à larges feuilles), qui peut devenir envahissante si plantée en trop grande quantité, et le *Phragmites australis* (Cav.) (roseau commun), dont le système racinaire est particulièrement vigoureux. Les Carex (laïches) sont également des espèces souvent privilégiées pour leurs capacités stabilisatrices.

AUTRES CONSIDÉRATIONS

- La plantation d'héliophytes, qu'elle soit simple ou sous forme de banquettes, peut se faire **sans géotextile**, s'appuyant alors uniquement sur l'**ancrage naturel** des racines dans le sol. Toutefois, dans les zones remaniées ou soumises à de fortes contraintes hydrauliques, l'utilisation de géotextiles est recommandée. Ils offrent une stabilisation temporaire du sol durant la phase critique où les racines d'héliophytes ne sont pas encore assez développées pour stabiliser efficacement le substrat (Zeh, 2000, 2010; Lequertier et al., 2015). Leur durabilité varie selon leur composition, et leur choix doit être effectué en tenant compte des principes d'éco-conception et des spécificités du site (à consulter : Kuntz, (2019)).
- Dans les environnements où la **faune locale**, comme les ragondins ou les anatidés, risque de consommer les jeunes plantations, il est recommandé de **protéger** celles-ci. Il peut également être pertinent d'introduire des plantes plus matures, dont les tiges extérieures sont moins appétentes (Adam et al., 2008). Le choix des espèces peut également influencer cette pression. Par exemple, les héliophytes à feuilles rigides, comme les carex et les joncs, sont généralement moins attractives pour ces animaux que les espèces à feuilles plus tendres, telles que les salicaires ou la menthe (Peeters et al., 2020).
- Si le sol est **dur et pierreux**, un **travail préalable** peut être nécessaire : mélanger sur 35 cm de profondeur de la terre fine (argile, sable, craie) et de la tourbe. La plantation se fait normalement au moyen d'un plantoir (Peeters et al., 2020).

MATÉRIAUX

Tableau 4: Caractéristiques des matériaux utilisés pour la plantation d'héliophytes (Schiechl & Stern, 1997; Adam et al., 2008; Zeh, 2010)

Plantes d'héliophytes	Forme	En motte, en conteneur ou en godet
	Hauteur	80 à 120 cm
	Origine	Milieu naturel ou pépinière spécialisée
	Remarque	Maintenir l'humidité permanente des racines entre le prélèvement et la mise en place
Géotextile biodégradable tissé ou non tissé résistant - (en option)	Remarque	À utiliser en cas de risque d'érosion durant la phase de reprise des plantations, stabilisation temporaire du sol jusqu'à l'enracinement des héliophytes

DÉTAILS DE CONSTRUCTION

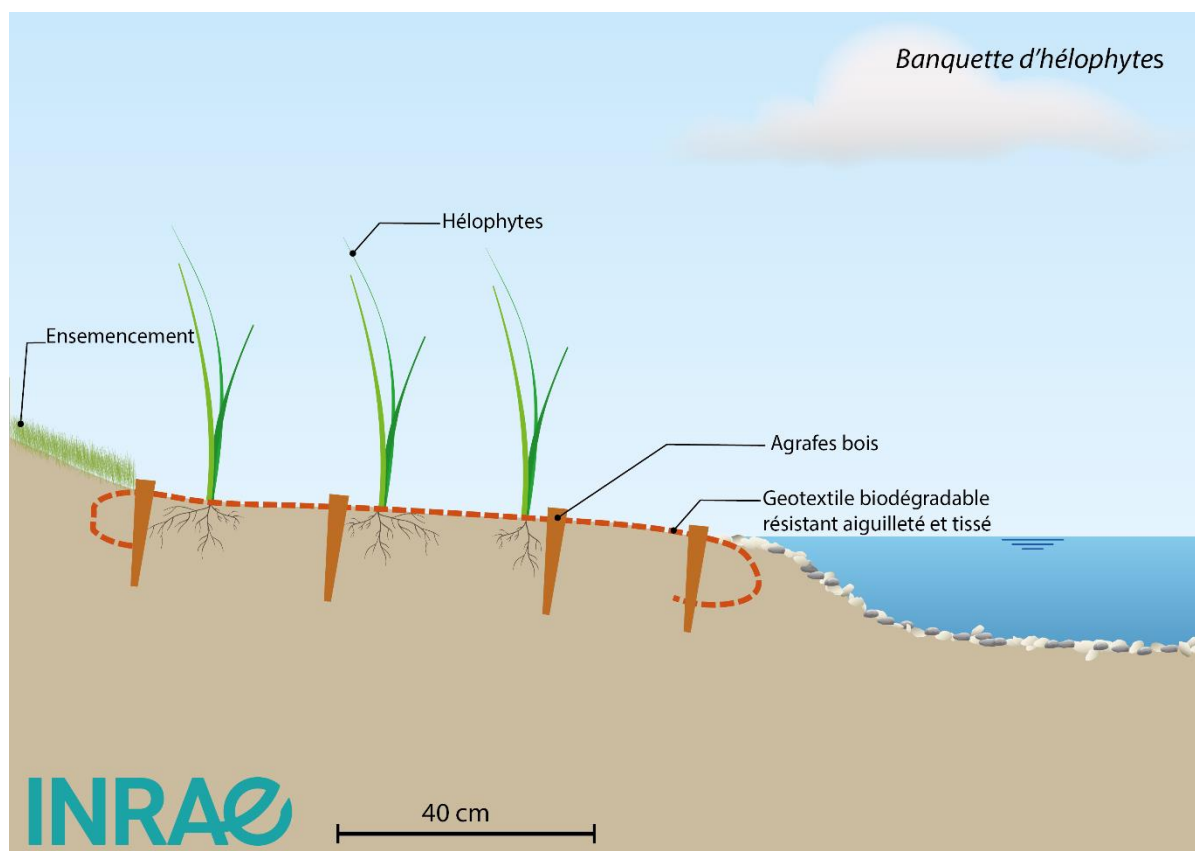


Figure 9: Profil en vue transversale d'une banquette d'héliophytes avec géotextile biodégradable et résistant, au niveau moyen des eaux.

EXÉCUTION

Les étapes d'exécution présentées ci-dessous s'appuient sur les références suivantes : Donat, (1995); Schiechl & Stern, (1997); Barbry, (2002); Waterways Restoration Institute and & Urban Creeks Council, (2006); Adam et al., (2008); Zeh, (2010).

1. **Mise en place du géotextile** (en option) : Dérouler le géotextile biodégradable résistant sur la surface préparée, en veillant à bien l'ancrer au sol à l'aide d'agrafes en bois. L'ancrage côté rivière s'effectue par un retour vers la berge à l'extrémité pour améliorer la stabilité. Dans le cas d'un géotextile tissé, une plantation avant la pose du géotextile est préférable, évitant les incisions dans le géotextile et *de facto* l'affaiblissement de l'aménagement.
2. **Préparation du trou** : Utiliser une pelle ou une tarière pour creuser un trou 1,5 fois plus profond et deux fois plus large que le contenant de la plante. Le trou doit permettre aux racines de se déployer sans être comprimées. Les plantes doivent généralement être positionnées à environ 10-15 cm au-dessus du niveau de l'eau, mais la hauteur reste bien sûr à adapter aux caractéristiques écologiques des espèces. La plantation peut être réalisée en rangs à intervalles de 50 à 100 cm, ou en groupes/touffes pour certaines espèces, en respectant une densité de 3 à 9 touffes/m². Un espacement de 25 à 50 cm est généralement recommandé, en veillant à positionner les plants au plus près de l'interface terre-eau. Cet espacement peut être réduit pour les densités les plus élevées.

3. **Mise en terre de la plante** : Retirer délicatement la plante de son contenant, en coupant celui-ci si nécessaire, et tailler les racines encerclantes (chignons) ou tordues afin d'obtenir un système racinaire bien ouvert. Placer la plante dans le trou de manière à ce que la base des tiges soit juste sous la surface du sol (Figure 10). Remplir le trou à moitié avec le mélange de plantation, tasser légèrement, arroser et laisser égoutter.



Figure 10: Travaux de plantation d'héliophytes sur une berge renforcée par un géotextile biodégradable, suivant les différentes étapes de mise en place depuis la préparation du trou, jusqu'au tassement du sol après plantation. © Grenoble Alpes Métropole.

4. **Finalisation du remblayage** : Compléter le remplissage du trou avec des matériaux terreux, en tassant bien le sol autour de la plante pour éviter les poches d'air et favoriser l'enracinement. Il est important de ne pas recouvrir la couronne de la plante, et de créer un bassin d'arrosage autour de celle-ci.
5. **Arrosage** : Dépend de l'hydromorphie du sol mais n'est pas très pratiqué pour les héliophytes.
6. **Ensemencement parallèle** : Pour accélérer la couverture végétale, un semencement peut être réalisé en parallèle à la plantation, avec un mélange de graines adaptées. Cela permet de créer une couverture herbacée homogène et durable. Toutefois, l'ensemencement est susceptible de concurrencer les héliophytes, s'il est composé de plantes « agressives » (*Lolium perenne* L. par exemple). L'accompagnement par un semencement devrait être réservé aux situations où l'exposition aux phénomènes d'érosion est assez importante.

Pour la réalisation d'une banquette d'héliophytes, l'exécution ne diffère que légèrement de celle d'une plantation classique. La principale différence réside dans l'ajout d'une étape préalable : la formation d'une terrasse en pied de berge, souvent construite à partir de matériaux terreux (le plus souvent en remblais). Cette terrasse sert de support stable pour l'implantation des héliophytes. La banquette est souvent protégée par un double géotextile, aiguilleté et tissé (dans les cas où il y a des contraintes tel que du battillage). Une fois la banquette formée, les étapes de plantation restent identiques, avec le positionnement des plantes, l'ancrage des racines, et le remblayage.

AVANTAGES

- **Colonisation rapide** : Il est possible de végétaliser rapidement des surfaces étendues de berges avec un investissement matériel relativement faible (Donat, 1995; Zeh, 2010; Peeters et al., 2020).
- **Capacités hydriques** : Ces plantes présentent une forte capacité d'absorption d'eau, avec une consommation annuelle de 500 à 1500 litres/m². Elles favorisent également la sédimentation et contribuent à l'épuration des eaux (Zeh, 2010; Peeters et al., 2020).

- **Bon ancrage** : Les rhizomes et racines des héliophytes renforcent les sols avec un enracinement pouvant atteindre jusqu'à 2 mètres de profondeur (Zeh, 2010).
- **Faible entretien** : Une fois établies, ces plantations nécessitent très peu d'entretien. Les héliophytes gèrent leur propre croissance de manière autonome (Barbry, 2002; Peeters et al., 2020). Toutefois, le contrôle des plantes ligneuses par arrachage dès leur apparition peut s'avérer nécessaire, lorsqu'elles ne sont pas souhaitées. Le cas se présente assez fréquemment avec l'aulne glutineux (*Alnus glutinosa* L.), par exemple.
- **Simplicité et coût réduit** : Les plantations d'héliophytes sont simples à réaliser et peu coûteuses (Donat, 1995; Schiechl & Stern, 1997).
- **Rétrécissement du profil limité** : La sédimentation au sein des héliophytes installés sur des berges lisses peut entraîner un léger rétrécissement du profil en travers. Toutefois, le risque d'encombrement du gabarit hydraulique demeure nettement plus faible qu'avec des aménagements impliquant des espèces ligneuses.

INCONVÉNIENTS

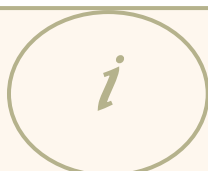
- **Effet retardé** : L'effet optimal des plantations n'est atteint qu'après la deuxième année voire la troisième (Donat, 1995; Schiechl & Stern, 1997).
- **Limitation aux eaux calmes** : Les plantations d'héliophytes sont adaptées uniquement aux zones d'eau stagnante ou à faible écoulement.
- **Intolérance à l'ombre** : La plupart de ces plantes supportent mal les sites ombragés (Donat, 1995; Schiechl & Stern, 1997), bien que certaines espèces présentent une certaine tolérance à une ombre partielle..

COÛTS

En 2008, le coût de la plantation d'héliophytes, incluant la fourniture et la mise en œuvre, varie de **3 à 6 euros HT** par plant, en fonction de la taille des mottes (9 x 9 cm) ou des conteneurs (1,5 L) (Adam et al., 2008).

Fascines d'hélophytes

Reeds rolls, Swamp reeds rolls, Coconut fiber rolls



Les informations concernant la description et les contextes d'application de cette technique sont issues des références suivantes : Donat, (1995); USDA, (1996); Barbry, (2002); Eubanks & Meadows, (2002); Tourbier & Westmacott, (2005); Adam et al., (2008); Lequertier et al., (2015); Peeters et al., (2020).

DESCRIPTION



Figure 11: Fascine végétalisée d'hélophytes en berge © B. Gerfand.

La fascine d'hélophytes est une variante de la technique de plantation d'hélophytes qui utilise le support d'un boudin géotextile biodégradable résistant. Elle consiste à créer un boudin de géotextile, soit réalisé sur place, soit préfabriqué (généralement composé d'un double géotextile biodégradable tissé ou non tissé et résistant). Ce boudin est rempli de matériaux granulaires minéraux ou organiques dans lesquels des mottes d'hélophytes sont insérées (Figure 11). Il est ensuite fixé au substrat à l'aide de pieux en bois pour assurer sa stabilité. L'objectif principal est de protéger et végétaliser le pied de berge, servant de zone tampon entre la berge et le cours d'eau. Dans un premier temps, le boudin de géotextile offre une protection mécanique contre l'érosion, le batillage et/ou les effets des courants. À mesure que les hélophytes se développent, leurs tiges souples absorbent l'énergie du courant, tandis que leurs racines, en se ramifiant, renforcent le sol et stabilisent davantage la berge. Petit à petit le développement des parties aériennes et racinaires des hélophytes vient remplacer la résistance offerte par le géotextile.

Comme pour d'autres ouvrages végétaux de stabilisation des berges, la fascine d'hélophytes n'est généralement pas utilisée seule. Elle est

souvent combinée à des techniques supplémentaires sur le haut de la berge, telles que la pose de géotextiles biodégradables résistants, accompagnés d'ensemencements ou de plantations complémentaires d'hélophytes ou autres herbacées. Cette approche permet de créer une couverture végétale dense et souple qui contribue à renforcer la berge sur le long terme, tout en favorisant la biodiversité locale. Par ailleurs, la fascine d'hélophytes peut également être utilisée pour protéger une banquette d'hélophytes du côté de l'eau, en jouant un rôle de tampon face aux petites contraintes hydrodynamiques.

CONTEXTE D'APPLICATION

La fascine d'hélophytes est particulièrement adaptée à la revégétalisation et à la stabilisation des pieds de berge dans des eaux calmes, telles que les lacs, canaux, étangs, bras-morts ou les zones lenticles des grands cours d'eau. Elle constitue la technique à base d'hélophytes la plus efficace contre les glissements superficiels et les sapements, ainsi que contre le battillage, qu'il soit dû à la navigation sur de petits canaux ou au clapotis des vagues causé par le vent sur des plans d'eau. La souplesse de la fascine lui permet de s'adapter à la courbure naturelle de la berge.

En plus de ses propriétés physiques, la fascine d'hélophytes aide à lutter contre l'érosion grâce au développement rapide du réseau racinaire des plantes insérées, qui ancre les substrats et les protège des effets de « lessivage ». Cette technique s'avère particulièrement efficace dans les zones présentant des irrégularités, comme la présence de souches ou de canalisations, puisqu'elle peut s'ajuster à ces contraintes sans nécessiter de modifications importantes du site.

Avec le temps, la résistance de l'ouvrage augmente grâce au développement des végétaux, selon le principe général des techniques vivantes. Les performances de la fascine d'hélophytes, avant et après le développement pendant 3 à 4 saisons de la végétation, sont les suivantes (Tableau 5):

Tableau 5: Contrainte tractrice admissible par la fascine d'hélophytes (Schiechl & Stern, 1997)

Contrainte tractrice admissible (N/m ²)	
Avant développement	30
Après développement (3-4 saisons de végétation)	60

AUTRES CONSIDÉRATIONS

- L'utilisation de **boudins préfabriqués** (boudin pré-réalisé et pré-planté par les hélophytes avant la mise en place sur la berge) peut s'avérer **coûteuse**, avec une durabilité estimée entre 6 et 10 ans, selon les déclarations des fabricants (Eubanks & Meadows, 2002).
- De la même manière que pour les plantations, l'utilisation de **plantes plus matures** peut atténuer les risques de dommages qui pourraient être causés par la faune locale, notamment les anatidés, en endommageant les jeunes plants. Il est conseillé de privilégier des espèces à feuilles fermes, comme les carex et les joncs, pour limiter cette attraction (Adam et al., 2008).
- Pour favoriser la **diversité végétale**, il est recommandé d'introduire une **large variété d'hélophytes** (au moins huit à dix espèces) adaptées aux conditions locales. Enrichir la partie plus haute du site avec des jeunes plants ligneux typiques des berges renforce aussi la stabilisation et la biodiversité (Adam et al., 2008).
- L'utilisation de pieux vivants pour soutenir l'aménagement est déconseillée, car leur développement risquerait d'étouffer les jeunes pousses d'hélophytes (Barbry, 2002).

MATÉRIAUX

Tableau 6 : Caractéristiques des matériaux utilisés pour la fascine d'héliophytes (Donat, 1995; Schiechl & Stern, 1997; Barbry, 2002; Eubanks & Meadows, 2002; Lequertier et al., 2015; Peeters et al., 2020)

Mottes d'héliophytes	Remarque	
		Prévoir un minimum de 8 à 10 espèces différentes pour assurer la biodiversité sur l'ensemble du chantier.
Géotextile aiguilleté (en fibres biodégradables)	<i>Largeur</i>	> 2,2 m
	<i>Densité</i>	≥ 1 000 g/m ²
Treillis biodégradable tissé ou noué - (en option)	<i>Largeur</i>	> 2 m
	<i>Densité</i>	> 740 g/m ²
Agrafes de fixation	<i>Remarque</i>	Préférentiellement en bois pour être biodégradable
Pieux morts	<i>Diamètre</i>	8 à 12 cm
	<i>Longueur</i>	> 200 cm, plus court selon les cas (entre 60 et 150 cm)
	<i>Remarque</i>	Non traités, taillés en biseau à la base
Corde coco de sécurisation des structures	<i>Diamètre</i>	3 mm
	<i>Remarque</i>	Utilisation de cordes biodégradables plutôt que de fils de fer pour moins polluer le milieu
Ramilles non capables de rejeter ⁶ - (en option)	<i>Diamètre</i>	0,5 à 1,5 cm
	<i>Longueur</i>	≈ 70 cm

DÉTAILS DE CONSTRUCTION

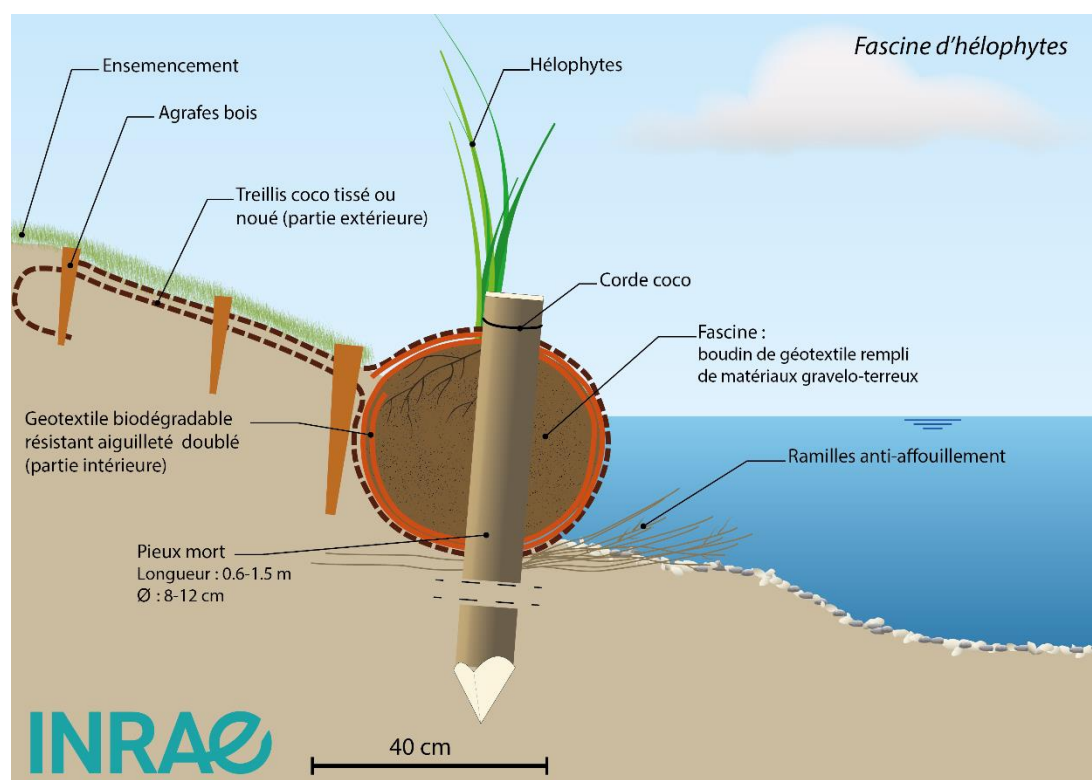


Figure 12: Profil en vue transversale d'une fascine d'héliophytes en pied de berge au niveau moyen des eaux. Cette technique peut également se retrouver sous d'autres formes, avec en option le treillis coco, et les ramilles anti-affouillement. La disposition du géotextile sera alors adaptée pour assurer le bon ancrage de l'ouvrage dans la berge.

⁶ Branches anti-affouillement : Branches disposées sous la fascine, perpendiculairement au courant, afin de réduire les risques d'érosion sous celle-ci. Elles assurent une protection temporaire jusqu'au développement des racines des héliophytes.

EXÉCUTION

Les étapes d'exécution présentées ci-dessous s'appuient sur les références suivantes : Donat, (1995); Schiechl & Stern, (1997); Barbry, (2002); Eubanks & Meadows, (2002); Adam et al., (2008); Lequertier et al., (2015); Peeters et al., (2020).

1. **Préparation de la plate-forme** : Créer une petite plate-forme en pied de berge à l'aide du dos d'une pelle hydraulique pour permettre d'améliorer la stabilité et l'ancrage de l'ouvrage. La tranchée doit avoir une profondeur et une largeur de 0,4 à 0,5 m. Elle doit être positionnée avec soin, en tenant compte du niveau de l'eau d'eau moyen annuel et de ses variations. Pour une implantation optimale, environ un tiers de la structure doit se trouver hors de l'eau.
2. **En option - Branches anti-affouillement** : Placer les branches anti-affouillement sur la plate-forme nouvellement créée de manière qu'elles soient positionnées en dessous de la fascine lorsque cette dernière sera mise en place.
3. **En option - Pose du treillis de coco** : Disposer le treillis coco tissé ou noué de sorte à ce qu'il entoure le géotextile de la fascine, ce qui rigidifie la structure de la fascine et maintient sa forme.
4. **Installation du géotextile** : Tapisser l'intérieur de la banquette nouvellement créée avec un géotextile aiguilleté biodégradable résistant plié en deux (doublé) pour solidifier la structure.
5. **Formation de la fascine** : Remplir le géotextile avec des matériaux gravo-terreux, puis le replier en forme de boudin (Figure 13). Commencer par replier le côté situé vers la berge sur la terre, puis le côté vers l'eau, en veillant à éviter la formation de plis. Pour faciliter cette étape, un coffrage temporaire, avec



Figure 13: Etapes successives de mise en œuvre d'une fascine d'héliophytes en pied de berge. © A. Evette

(A) Le treillis et le géotextile sont déroulés avant d'être progressivement rempli de matériaux terreux.

(B) Le boudin est formé et fermé, et les géotextiles repliés sur la berge.

(C) La fascine bien intégrée dans la berge suite à sa mise en place.

des traverses ou des planches, peut être utilisé. Le boudin ainsi formé doit avoir un diamètre d'environ 30 à 40 cm, avec une longueur ajustable selon les besoins.

6. **Fermeture de la fascine** : Refermer le boudin et fixer les couches de treillis et géotextile à l'aide de deux agrafes par m², en veillant à attacher une des couches du côté de la berge. Il est aussi possible de fixer chaque côté du géotextile séparément lors de la formation de la fascine. Une fois les travaux terminés, le rouleau doit dépasser de 5 à 10 cm au-dessus du niveau de l'eau.
7. **Insertion des pieux** : Enfoncer mécaniquement une rangée de pieux morts à travers le boudin, en les espaçant de 50 à 150 cm, jusqu'à une profondeur de 1,5 m le long de la ligne de flottaison moyenne. Les pieux doivent être enfoncés de manière à ce qu'il ne reste que 30 cm au-dessus de l'eau et ne dépassent pas le niveau du boudin de coco. Avant cette étape, il est essentiel de découper le treillis pour éviter toute déchirure lors de l'insertion du pieu à travers. Il est également possible de procéder avec deux rangées de pieux de part et d'autre du rouleau, à des intervalles de 60 à 120 cm, selon les conditions et notamment les vitesses d'écoulement prévues.
8. **Fixation du boudin** : Attacher le boudin aux pieux avec de la corde coco et des crampillons (ou en les passant dans une encoche faite dans le pieu), puis enfoncer à nouveau les pieux pour ancrer solidement l'ouvrage au sol.
9. **Installation des héliophytes** : Insérer entre 3 à 6 mottes d'héliophytes par m² en faisant de légères incisions dans la fascine, que l'on referme ensuite avec une agrafe par motte. Il faut veiller à maintenir les mottes d'héliophytes humides pendant toutes les étapes de la mise en place.
10. **Rebattage des pieux** : Battre de nouveau les pieux en phase finale puis les recouper, de façon à maintenir parfaitement le boudin sur le fond de l'assise.
11. **Remblayage** : Remblayer derrière l'ouvrage avec des matériaux terreux, afin de réaliser une pente homogène jusqu'à la fascine.
12. **Ensemencement parallèle** : Une opération d'ensemencement des sols peut être réalisée en parallèle, en utilisant un mélange de graines adaptées, afin d'accélérer la couverture végétale et d'obtenir une surface herbacée plus homogène notamment sur les surfaces soumises à des contraintes érosives plus fortes.

AVANTAGES

- **Entretien minimal** : Ces structures nécessitent presque aucun entretien, ce qui les rend pratiques à long terme (Donat, 1995; Peeters et al., 2020).
- **Protection immédiate** : La fascine d'héliophyte assure une protection instantanée après la construction (Donat, 1995; Schiechl & Stern, 1997; Eubanks & Meadows, 2002; Tourbier & Westmacott, 2005).
- **Adaptabilité aux fluctuations d'eau** : Ces plantes survivent bien aux variations des niveaux d'eau (Eubanks & Meadows, 2002).
- **Coût relativement faible** : L'implantation est généralement moins coûteuse par rapport à d'autres techniques (Eubanks & Meadows, 2002; Tourbier & Westmacott, 2005).

- **Amélioration des conditions de colonisation** : Les héliophytes favorisent la colonisation naturelle et l'établissement d'autres espèces végétales dans la communauté environnante (Eubanks & Meadows, 2002).

INCONVÉNIENTS

- ✎ **Efficacité limitée** : Technique peu résistante aux vitesses élevées. La hauteur limitée de la fascine, généralement comprise entre 30 et 40 cm, et rarement jusqu'à 50 cm (Lequertier et al., 2015), peut réduire son efficacité sur des berges à pente prononcée.
- ✎ **Coûts de main-d'œuvre plus élevés** : La construction de fascines d'héliophytes peut engendrer des coûts de main-d'œuvre plus élevés par rapport à de simples plantations d'héliophytes (Donat, 1995; Schiechl & Stern, 1997).

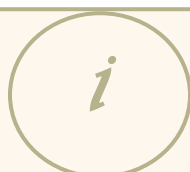
COÛTS

En 2008, le prix indicatif pour la fourniture et la mise en œuvre de l'ensemble de l'ouvrage se situait entre **50 et 100 euros HT** par mètre linéaire (Adam et al., 2008). En ce qui concerne le temps de travail, il est estimé entre 4 et 6 heures par mètre (Donat, 1995; Schiechl & Stern, 1997).

4- Les principales techniques de génie végétal : Techniques à base de plantes ligneuses

Plantations de ligneux

Woody plants planting



Les informations concernant la description et les contextes d'application de cette technique sont issues des références suivantes : Lachat, (1994); Bayfield, (1995); Schiechl & Stern, (1996); Howell, (1999); Lewis, (2000); Cramer & Bates, (2002); Venti et al., (2003); Degoutte, (2006); Adam et al., (2008); Zeh, (2010); Baird et al., (2015); Sangalli, (2019); Peeters et al., (2020); Roadside Manual, (2023).

DESCRIPTION

La plantation de ligneux est une technique simple de protection et de végétalisation des berges. Elle consiste à introduire des espèces riveraines, souvent issues de pépinières, pour renforcer ou reconstituer la végétation (Figure 14). Cette méthode évite le stade critique de la germination et du développement de la jeune plantule, accélérant l'établissement des végétaux et réduisant leur exposition à l'érosion.



Figure 14 : Plantation de ligneux sur une berge © INRAE.

Outre leurs nombreuses fonctions écologiques — telles que l'épuration de l'eau, la production primaire, la régulation thermique par l'ombrage, ou encore leur rôle structurant dans l'infrastructure écologique en tant qu'habitats et corridors pour la faune — les plantations assurent également des fonctions essentielles de stabilisation des sols. Elles contribuent à la diversité et à la complémentarité des formations végétales riveraines en combinant différentes essences et strates végétatives, qui interagissent au sein de la rhizosphère⁷ pour renforcer les berges. Les végétaux utilisés peuvent inclure des arbres et arbustes sous diverses formes : plants à racines nues, en godet, en conteneur ou encore en motte.

Au départ, les plants contribuent peu à la stabilité des berges, car ils ne fournissent pas immédiatement une structure protectrice. Cependant, leur impact augmente progressivement avec le développement de leur réseau racinaire. Dès la deuxième année de croissance, les biomasses aériennes et racinaires peuvent être multipliées par dix, renforçant ainsi leur efficacité dans la stabilisation des berges (à lire : Lavaine (2013)). Les tiges aériennes protègent contre l'érosion superficielle, favorisent le dépôt de sédiments et créent une couverture végétale surplombante. À maturité, la ramure offre ombrage et améliore la qualité du sol via la décomposition des feuilles.

Cette technique s'inscrit souvent dans des projets de stabilisation et de restauration plus larges, en complément d'autres méthodes de génie végétal, afin de reconstruire la structure et la composition des écosystèmes riverains tout en améliorant leur intégration paysagère.

CONTEXTE D'APPLICATION



Figure 15 : Plantation d'un arbre au sein d'un projet de restauration, avec un grillage protecteur individuel © INRAE.

Les plantations de ligneux représentent une technique de végétalisation particulièrement adaptée à la stabilisation des berges et à la restauration des milieux riverains. Elles peuvent également servir à restaurer des habitats ou à contrôler les espèces exotiques envahissantes, tout en étant adaptées aux berges dégradées présentant une faible érosion ou une couverture végétale insuffisante. Leur mise en œuvre se fait généralement dans la partie médiane ou supérieure de la berge, selon les espèces choisies et les objectifs visés. Toutefois, il est déconseillé de les installer en pied de berge, notamment avec des espèces arborées, afin d'éviter les risques de basculement dus à l'effet de bras de levier créé par leur croissance.

Ces plantations trouvent également leur utilité dans des sites où l'arborisation naturelle est impossible, bien que dans certains contextes, il puisse être préférable de privilégier la recolonisation naturelle sans intervention. Adaptées aux berges à faibles contraintes hydrauliques, elles peuvent être réalisées sur des pentes allant jusqu'à 1V:2H à condition d'utiliser les techniques appropriées.

Il est conseillé de consulter une pépinière pour obtenir des plants adaptés aux exigences locales. Les différentes formes de plants proposées répondent à des besoins spécifiques et varient en fonction des conditions du site :

⁷ Espace souterrain utilisé par le plant.

- **Plantes en conteneur ou en godet** : Bien que plus coûteux, ces plants sont plus résistants aux manipulations et au transport grâce à leur système racinaire développé et au substrat. Ils assurent une meilleure reprise après plantation, bien que le stress racinaire dû au confinement dans le pot soit un facteur à prendre en compte.
- **Plantes à racines nues** : Moins onéreuses, ces plantes nécessitent des trous de plantation plus petits. Cependant, elles sont plus sensibles aux dommages liés aux manipulations, en particulier pendant le transport. Leur plantation et leur stockage exigent plus de précautions afin d'assurer leur survie. Dans les milieux naturels, les végétaux à racines nues sont généralement préférés aux godets ou conteneurs, car ils s'acclimatent rapidement et évitent le stress racinaire souvent associé aux pots.
- **Plantes en motte, dont la partie souterraine est protégée par de la toile de jute** : Ces plants, généralement des arbres ou arbustes de plus grande taille, présentent une bonne résistance aux herbivores et à la concurrence des mauvaises herbes. Cependant, ils sont plus difficiles à manipuler et nécessitent souvent un haubanage après la plantation.

Avec le temps, la résistance de l'ouvrage augmente grâce au développement des végétaux, selon le principe général des techniques vivantes. Après plusieurs années, les plantations peuvent offrir une meilleure résistance aux forces tractrices que les enrochements. Les performances de la plantation de ligneux, avant et après le développement pendant 3 à 4 saisons de la végétation, sont les suivantes (Tableau 7) :

Tableau 7: Contrainte tractrice admissible pour la plantation de ligneux (Schiechl & Stern, 1997)

Contrainte tractrice admissible (N/m ²)	
Avant développement	20
Après développement (3-4 saisons de végétation)	120

AUTRES CONSIDÉRATIONS

- Pour favoriser le boisement de **surfaces éloignées du niveau moyen des eaux** ou au niveau des zones soumise à sécheresse, il est préférable de travailler avec des **plants** (à racines nues de préférence) plutôt que des boutures de saules, qui risquent de se dessécher (Adam et al., 2008).
- Dans la partie inférieure des talus riverains, les **plants** peuvent être combinés avec des massifs de **boutures** pour enrichir la diversité végétale. Il est essentiel de tenir compte de la **distribution géographique** et **altitudinale** de chaque espèce, tout en respectant l'ordre naturel de succession des boisements alluviaux. Les espèces pionnières à croissance rapide, bois tendres, doivent précéder les espèces climaciques à croissance plus lente, bois durs (Adam et al., 2008).
- Les jeunes plants sont particulièrement vulnérables à l'érosion au cours de leurs **premières années de croissance**. Pour assurer leur survie, il peut être nécessaire de réaliser une **seconde plantation** ou d'installer un **géotextile temporaire** autour des plants, appelé collerette de géotextile. Ce dernier protège la surface du sol et prévient l'érosion jusqu'à ce que les plants aient bien pris racine et atteint une taille suffisante pour stabiliser le sol par eux-mêmes (Adam et al., 2008; Baird et al., 2015). En plus de son rôle de protection physique, la collerette limite également la concurrence des espèces herbacées environnantes et facilite ainsi l'entretien des plantations.
- Un **entretien minimum** est recommandé pendant les deux ou trois premières années, comprenant des arrosages réguliers et un contrôle de la végétation concurrente (Degoutte, 2006; Baird et al., 2015).
- Une **protection contre les herbivores** (grillage ou clôture « anti-rongeurs » ou « anti-gibiers ») peut être nécessaire jusqu'à la stabilisation des plants (Degoutte, 2006; Sangalli, 2019). Il est recommandé d'appliquer cette protection sur chaque sujet planté (Figure 15) (Adam et al., 2008).

MATÉRIAUX

Tableau 8: Caractéristiques des matériaux utilisés pour la plantation de ligneux (Lachat, 1986, 1994; Adam et al., 2008; Zeh, 2010; Sangalli, 2019)

Arbres	<i>Type</i>	À racines nues ou en conteneurs de 1 000 à 2 000 cm ³
	<i>Dimension</i>	Calibre 6/8 ⁸
Arbustes	<i>Type</i>	À racines nues ou en conteneurs d'au moins 500 cm ³ ou en motte d'une taille d'environ 20 x 20 cm compact
	<i>Hauteur</i>	30 à 80 cm
Tuteurs	<i>Remarque</i>	Pour les arbres 6/8 et ceux mesurant plus de 150 cm
Protection individuelle contre la sécheresse ou l'érosion - (en option)	<i>Remarque</i>	Sous la forme de disque ou paillis fixés avec des agrafes
	<i>Diamètre moyen</i>	30 à 60 cm
Protection individuelle contre les herbivores - (en option)	<i>Remarque</i>	Sous la forme d'un grillage ou d'une clôture contre l'herbivorie, à appliquer sur chaque sujet
Outils		Pelles, bêches et, si nécessaire, des pics et des ciseaux pour tailler les racines ou ajuster les supports.
Géotextile biodégradable résistant - (en option)	<i>Remarque</i>	Densité et nature à adapter en fonction des contraintes
	<i>Type</i>	Remblai général, terre végétal, matière organique, engrais à libération lente, tablette d'engrais forestier
Substrat et amendement - (en option)		Ou ensemencement par éléments vivants du sol (mycorhizes, microfaune, etc.)
	<i>Remarque</i>	Amélioration des conditions de plantation mais souvent superflu.

⁸ Rapport circonférence/hauteur équivalent à 3 m

DÉTAILS DE CONSTRUCTION

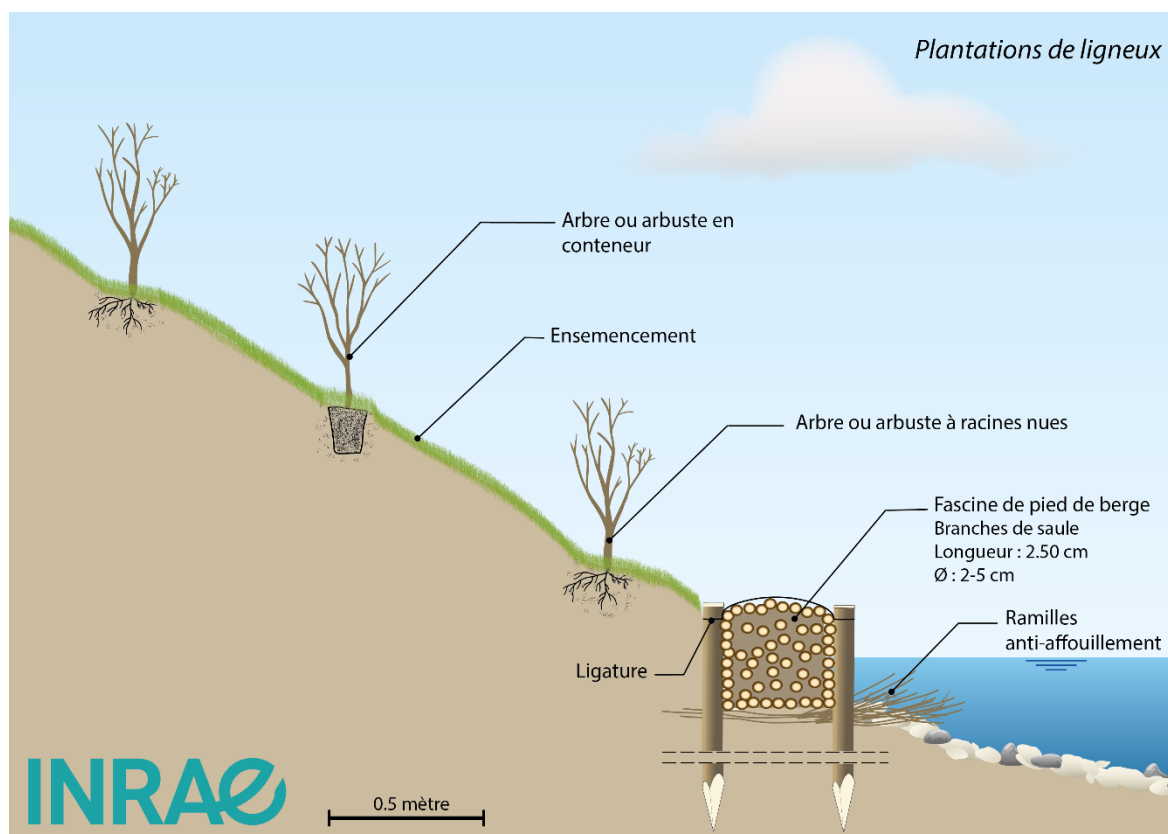


Figure 16: Profil en vue transversale d'une plantation de ligneux en berge de cours d'eau avec un aménagement en pied de berge.

EXÉCUTION

Les étapes d'exécution présentées ci-dessous s'appuient sur les références suivantes : Lachat, (1994); Schiechl & Stern, (1996); Howell, (1999); Lewis, (2000); Adam et al., (2008); Zeh, (2010); AMEC, (2012); Lequertier et al., (2015); Sangalli, (2019); Peeters et al., (2020); Roadside Manual, (2023).

1. **Préparation des plants – Mise en jauge :** Effectuer la mise en jauge immédiatement après la livraison en immergeant la partie basale des plants dans de l'eau pour éviter leur dessèchement. Préparer à l'avance les zones de mise en jauge et veiller à ce que le délai entre la réception des végétaux et leur plantation ne dépasse pas huit jours.
2. **Préparation des plants – Coupe :** Tailler les racines trop longues ou encombrantes pour éviter une mauvaise position dans le trou de plantation, tout en préservant le chevelu racinaire. La taille des racines et des tiges est conditionnée par l'état des plants à la livraison.
3. **Préparation du sol :** Retirer les irrégularités et les débris sans viser une surface parfaitement lisse. Éliminer éventuellement la végétation concurrente, soit sur l'ensemble du site soit autour d'un cercle de 1 mètre autour de chaque plant. Prendre en compte la compaction et le drainage du sol : un site trop compacté doit être décompacté et sur un site mal drainé, l'utilisation d'une charrue forestière pour créer des crêtes et des sillons favorise la plantation et améliore le drainage.

4. **Pré-trous pour la plantation** : Creuser un trou, à l'aide d'une pelle ou d'une tarière, qui puisse permettre d'installer le plant sans comprimer les racines ou les relever sur les côtés.
 - *Densité et espacement des plants* : Adapter la densité de plantation en fonction des caractéristiques des espèces. Pour une couverture rapide, espacer les arbres et arbustes d'environ 1,5 m (avec un éclaircissement à un stade précoce si nécessaire). Dans les zones boisées, un espacement standard de 2 à 2,5 m est recommandé. Les arbustes, quant à eux, peuvent être plantés plus proches les uns des autres (0,5 à 1,5 m), selon les besoins spécifiques des végétaux.
 - *Disposition des plants* : Respecter la position altimétrique des plants pour éviter l'asphyxie ou le stress hydrique lié aux variations des niveaux d'eau. En cas de plantation en triangulation, maintenir un écart de d'environ 3 m entre chaque plant. Sur les pentes où la stabilité est cruciale, éviter les rangées de fosses perpendiculaire à la pente, car elles peuvent favoriser l'infiltration de l'eau et affaiblir les couches superficielles.
5. **Positionnement du plant** : Positionner le plant dans le trou en laissant le collet (zone de transition entre la tige et les racines) au niveau de la surface du sol. Rabattre les tiges aériennes si nécessaire pour réduire la prise au vent et limiter l'évapotranspiration, particulièrement lors des plantations tardives.
6. **Remblayage** : Remblayer le trou avec la terre extraite ou un matériau terreux, puis tasser légèrement pour éliminer les vides et assurer un contact optimal avec les racines. Redresser les végétaux si nécessaires.
7. **Arrosage** : Arroser abondamment après la plantation pour favoriser l'établissement des plants. Répéter l'arrosage en cas de sécheresse durant les premiers mois pour éviter un enracinement superficiel.
8. **Aménagements complémentaires** : Créer des fosses ou des cuvettes autour des arbres pour retenir l'eau. Installer une protection anti-mauvaises herbes si nécessaire et ajouter un tuteur pour stabiliser les plants plus grands ou fragiles. En conditions sèches, veiller à ajouter un paillage pas trop épais.

AVANTAGES

- **Intervention simple et facilité de mise en œuvre** : Nécessite peu de préparation de terrain, et peu de matériel rendant cette technique accessible pour différents types de projets (Lachat, 1994; Lewis, 2000; Peeters et al., 2020).

INCONVÉNIENTS

- **Entretien et suivi nécessaire** : Un suivi et un entretien réguliers sont requis pour assurer le succès de la plantation, en particulier dans des environnements contraints (Peeters et al., 2020). La plantation de ligneux peut nécessiter une surveillance régulière et un soutien avec de l'irrigation pendant les 2-3 premières années, particulièrement en cas de sécheresse (Sangalli, 2019).
- **Efficacité initiale limitée** : La technique peut être faiblement efficace au début, le temps que les racines se développent, elle n'offre pas de structure de protection de la berges dès le début comme on peut les trouver pour d'autres techniques comme les fascines, tressages et couches de branches à rejets (Lachat, 1994; Peeters et al., 2020).

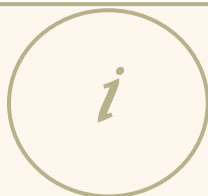
➤ **Champ d'application restreint** : Cette technique est peu adaptée aux sols bruts ou dépourvus d'humus, car ils ne favorisent pas une bonne reprise des plants, limitant ainsi son utilisation (Zeh, 2010). Elle est également déconseillée dans les cours d'eau soumis à de fortes contraintes hydrauliques (Lachat, 1994).

COÛTS

Le coût des plantations est faible, s'élevant à **quelques euros** par plant et variant selon le type de végétal et le conditionnement. En 2018, un plant d'arbuste de 300 cm³ coûtait 2,90 euros par unité, tandis qu'un conteneur de 1 000 cm³ s'élevait à 6 euros par unité. Les arbres en 6/8 à racines nues ou en motte atteignaient 19,70 euros par unité. Environ 60 % de ces coûts concernent la main-d'œuvre et 40 % les matériaux (Sangalli, 2019; Peeters et al., 2020).

Couche de branches à rejets

Live brush mattress, Live brush mats



Les informations concernant la description et les contextes d'application de cette technique sont issues des références suivantes : Schiechl, (1980); Zuffi, (1989); Besio & Lucchetta, (1993); Lachat, (1994); Donat, (1995); USDA, (1996); Allen & Leech, (1997); Bentrup & Hoag, (1998); Zeh, (2000); Eubanks & Meadows, (2002); Hoag et al., (2002); Venti et al., (2003); Faber, (2004); Florineth, (2004); Tourbier & Westmacott, (2005); Degoutte, (2006); Waterways Restoration Institute and & Urban Creeks Council, (2006); Adam et al., (2008); Arizpe et al., (2008); Zeh, (2010); AMEC, (2012); Bonin et al., (2013); Sangalli, (2019); Peeters et al., (2020).

DESCRIPTION

Également appelée "tapis" ou "matelas de branches à rejets", cette technique de stabilisation consiste à appliquer une épaisse couche de végétaux vivants capables de se multiplier par voie végétative. Les branches sont disposées transversalement à l'écoulement ou selon un angle d'environ 20 degrés et maintenues par des pieux et un treillage de corde (Figure 17).

Les branches, posées en couches successives ou en matelas, ont leurs extrémités inférieures enfoncées dans le sol (ou dans le lit de la rivière) pour favoriser l'enracinement tandis que l'extrémité supérieure recouvre la base de l'éventuelle rangée suivante, assurant une couverture homogène et renforcée. Cette disposition permet d'obtenir une couverture végétale dense, continue et flexible, tout en stimulant la croissance végétale, à la fois au niveau du sol et du couvert. Les branches sont ensuite recouvertes d'une fine couche de terre végétale, cette dernière ne devant pas être trop épaisse, en effet les pousses issues des



Figure 17 : Couche de branches à rejets à San Martino in Badia (Italie) (A) à la mise en place en 2006, (B) en 2008 et (C) son évolution en 2024 © G. Pederoa, A. Evette et J. Rousset.

branches ne peuvent traverser plus de 1 à 3 cm de terre. Dans les zones particulièrement vulnérables, cette couche végétale peut être renforcée par un géotextile biodégradable résistant le temps que les racines se développent, mais il est également possible de réaliser ces techniques sans géotextile (Figure 18).

Dans les premières années de croissance, les branches restent élastiques et flexibles, ce qui leur permet de se plier facilement en cas de crue. Cela réduit la vitesse de l'écoulement et assure une protection efficace des berges.

Avec le temps, les plantes s'enracinent, stabilisant durablement la berge et augmentant sa résistance à l'érosion et aux crues. On obtient des structures extrêmement résistantes à l'érosion avec des berges structurées par des troncs vivants au ras du sol, entourés de systèmes racinaires puissants (Figure 19).



Figure 18 : Couche de branches à rejets utilisée sur un talus en berge de rivière. Les branches sont positionnées les unes à côté des autres, elles sont recouvertes d'une très fine couche de terre puis d'un géotextile © S. De Danieli.

CONTEXTE D'APPLICATION

En protégeant directement la surface du sol dès sa mise en place, la couche de branches à rejets offre une solution, particulièrement adaptée aux berges exposées à des contraintes hydrauliques élevées. Elle convient notamment pour stabiliser les talus et les berges menacées d'érosion, à condition que la pente ne soit pas trop forte (c.à.d. $< 38^\circ$). Dans certains cas, elle peut même remplacer l'utilisation de simple géotextiles biodégradables résistants.

Cependant, cette technique montre ses limites sur des substrats trop secs ou trop drainants, notamment les expositions sud, où les branches ne peuvent s'ancrer en profondeur. Ces techniques, comme le tressage, sont très superficielles, et à moins que les branches aient les pieds dans l'eau, elles n'ont pas rapidement accès à l'eau et risquent de sécher lors des premières saisons de végétation avant que les racines n'atteignent la nappe. Dans ces contextes, il est préférable de recourir à des boutures profondes densément plantées à travers un géotextile



Figure 19 : Berge protégée par une couche de branches à rejet ayant fait l'objet de travaux d'excavation pour observer les tiges et systèmes racinaires développés © Department of hydraulic engineering. Autonomous Provinz of Bozen/Bolzano South Tyrol / Italy.

biodégradable résistant, voire à des techniques de lits de plants et plançons, qui permettent aux boutures et aux plançons d'accéder d'entrée aux ressources en eaux enfouies dans le sol.

Une attention particulière doit être apportée à la protection des pieds de l'ouvrage et des extrémités amont et aval de la couverture, car leur vulnérabilité peut compromettre l'ensemble de l'ouvrage. Le pied de talus, en particulier, doit être protégé contre l'érosion par des structures complémentaires comme des fascines de saules ou d'hélophytes, des tressages ou des rochers, selon le type de cours d'eau. Cette technique peut également être enrichie par des plantations pour évoluer vers une couverture végétale diversifiée et durable.

Parmi les techniques de génie végétal, elle résiste particulièrement bien au courant immédiatement après sa pose, offrant une protection efficace dès l'installation. Avec le temps, la résistance de l'ouvrage augmente grâce au développement des végétaux, selon le principe général des techniques vivantes. Les performances de la couche de branches à rejets avec enrochement des pieds des berges, avant et après le développement de la végétation, sont les suivantes (Tableau 9) :

Tableau 9 : Contrainte tractrice admissible pour la couche de branches à rejets (Barbry, 2002; Sangalli, 2019)

Contrainte tractrice admissible (N/m²)	
Avant développement	150
Après développement	200-300

MATÉRIAUX

Tableau 10: Caractéristiques des matériaux utilisés pour la couche des branches à rejets (Schiechl, 1980; Besio & Lucchetta, 1993; Lachat, 1994; Donat, 1995; USDA, 1996; Allen & Leech, 1997; Schiechl & Stern, 1997; Zeh, 2000; Eubanks & Meadows, 2002; Hoag et al., 2002; Venti et al., 2003; Tourbier & Westmacott, 2005; Adam et al., 2008; Lequertier et al., 2015; Sangalli, 2019; Peeters et al., 2020)

Branches aptes à produire des rejets	Âge	2 à 3 ans préférablement
	<i>Longueur</i>	1,5 à 4 m
	<i>Diamètre</i>	2 à 10 cm
	<i>Remarque</i>	En cas de pénurie de branches capables de se multiplier par voie végétative, il est possible d'ajouter des branches mortes, à condition de les répartir uniformément et de ne pas dépasser un ratio de 50 %.
Pieux vivants	<i>Longueur</i>	0,5 à 1,5 m
	<i>Diamètre</i>	6 (4) à 10 cm
	<i>Remarque</i>	Il est possible d'utiliser des pieux morts.
Fil de fixation	<i>Type</i>	Fil recuit ou ficelle de jute ou corde coco
	<i>Dimension</i>	3 mm
	<i>Remarque</i>	La corde coco est préférable bien qu'il ait une durée de vie limitée (1,5 an).
Matériau de recouvrement - (en option)	<i>Type</i>	Géotextile tissé biodégradable et résistant, et agrafes
	<i>Densité</i>	> 740 g/m ²

DÉTAILS DE CONSTRUCTION

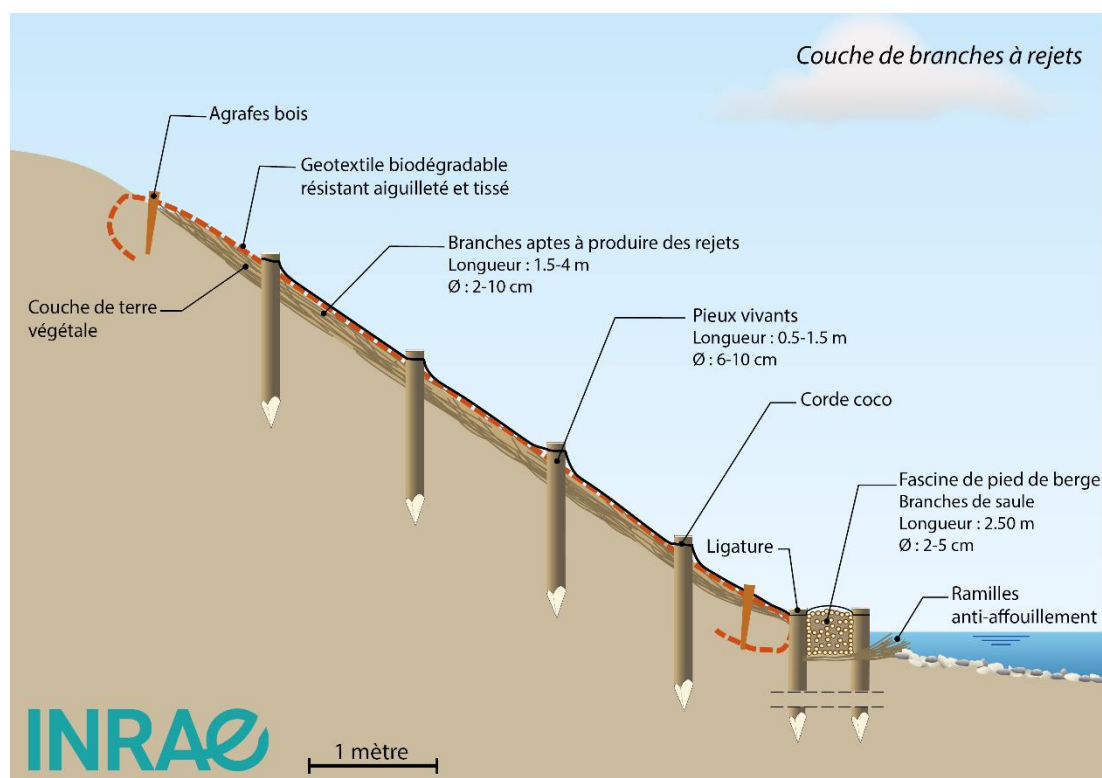


Figure 20: Profil en vue transversale d'une couche de branches à rejets avec un aménagement en pied de berge.

EXÉCUTION

La construction commence par la préparation de la pente et progresse de haut en bas, avec un chevauchement entre les rangées. Les étapes d'exécution présentées ci-dessous s'appuient sur les références suivantes : Schiechtl, (1980); Zuffi, (1989); Besio & Lucchetta, (1993); Lachat, (1994); Donat, (1995); Schiechtl & Stern, (1996); USDA, (1996); Allen & Leech, (1997); Schiechtl & Stern, (1997); Bentrup & Hoag, (1998); Eubanks & Meadows, (2002); Faber, (2004); Hoag et al., (2002); Venti et al., (2003); Tourbier & Westmacott, (2005); Degoutte, (2006); Waterways Restoration Institute and Urban Creeks Council, (2006); Adam et al., (2008); Arizpe et al., (2008); AMEC, (2012); Lequertier et al., (2015); Sangalli, (2019); Peeters et al., (2020); Zeh, (2000, 2010).

1. **Préparation de la pente** : Remodeler la berge pour obtenir une pente maximale de 35° (idéalement 3V:2H), ce qui garantit une bonne adhérence des branches au sol et dégager la surface si nécessaire.
2. **Disposition des branches** : Placer les branches parallèlement à la pente, avec leurs extrémités apicales dirigées vers le haut. Enterrer leur base dans le sol ou derrière une protection de pied de berge si elle est présente. Ajuster la densité à 20-50 branches/mètre linéaire pour obtenir une épaisseur de 10 à 30 cm selon les matériaux disponibles et une couverture du sol d'environ 80%. Si la longueur des tiges ne permet pas de couvrir toute la berge, appliquer le revêtement en deux couches, en chevauchant la couche supérieure sur la couche inférieure d'au moins 30 cm.
3. **Recouvrement** : Recouvrir les branches d'une fine couche de terre végétale (3-5 cm maximum) pour favoriser la reprise végétative, tout en laissant les extrémités des branches exposées. Une couche trop épaisse pourrait empêcher les jeunes pousses de percer.

En option : Ajouter un géotextile biodégradable résistant si nécessaire, par-dessus les branches, fixé parallèlement au flux de l'eau. Les recouvrements de lés de géotextile doivent correspondre à une rangée de pieux qui servent de fixation.

4. **Fixation par pieux** : Enfoncer des pieux en bois, à la main ou mécaniquement, à une profondeur de 50cm minimum (longueur à ajuster en fonction du contexte), avec un espacement de 75-100 cm dans la partie inférieure, et en quinconce dans les rangées supérieures pour un meilleur ancrage. Ne laisser provisoirement dépasser que 20 cm de chaque pieu, destinés à fixer les branches.
5. **Liaison de la structure** : Après avoir fait une rainure dans les pieux, ou avoir installé des crampillons, passer un fil d'acier ou une corde biodégradable pour relier les pieux en un treillage. Attacher d'abord les pieux alignés, puis ceux en travers, afin de créer un maillage croisé entre les rangées de pieux. Pour réduire l'utilisation de fil, il est possible de plaquer les branches avec des rameaux de saule rigides fixés en croix directement aux pieux.
6. **Finition et consolidation** : Battre les pieux une nouvelle fois pour resserrer la structure contre le sol, puis couper les à la hauteur adéquate. En l'absence de géotextile, combler les espaces entre les branches avec de la terre fine, puis presser fermement pour encourager l'enracinement, en laissant les extrémités apicales des branches dépasser légèrement.

AVANTAGES

- **Effet protecteur immédiat** : La protection est efficace dès l'installation, avant même le développement complet de la végétation (Schiechtl, 1980; Lachat, 1994; Donat, 1995; USDA, 1996; Zeh, 2000; Eubanks & Meadows, 2002; Hoag et al., 2002; Florineth, 2004; AMEC, 2012; Peeters et al., 2020).
- **Matériaux simples et locaux** : Utilise des matériaux souvent disponibles sur place, réduisant ainsi les coûts de transport (Zeh, 2000; Venti et al., 2003; Zeh, 2010).
- **Flexibilité et facilité de réparation** : La technique est flexible et simple de réparation (Donat, 1995).
- **Adaptation aux cours d'eau rapides** : Convient aux cours d'eau avec des contraintes hydrauliques élevées (USDA, 1996; Eubanks & Meadows, 2002; Tourbier & Westmacott, 2005).

INCONVÉNIENTS

- **Grande quantité de matériel** : Nécessite un volume important de branches droites et de gros diamètre pour un bon contact avec le sol (Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Lachat, 1994; Donat, 1995; Schiechtl & Stern, 1996; Venti et al., 2003; Tourbier & Westmacott, 2005; AMEC, 2012; Sangalli, 2019; Peeters et al., 2020).
- **Main-d'œuvre importante** : Exige une main-d'œuvre considérable, ce qui peut augmenter les coûts d'installation (Zuffi, 1989; Lachat, 1994; Donat, 1995; Zeh, 2000, 2010; AMEC, 2012).
- **Entretien régulier** : Demande un entretien fréquent si l'on ne souhaite pas une saulaie dense et pure (Donat, 1995; Venti et al., 2003). Il peut falloir plusieurs années avant que d'autres espèces ligneuses ne s'installent naturellement pour diversifier la berge aménagée (Lachat, 1994; Donat, 1995; Zeh, 2000; Venti et al., 2003; Zeh, 2010).

COÛTS

En 2018, le coût financier de cette technique est modéré et dépend de la configuration du terrain ainsi que de la disponibilité des matériaux. En 2018, un matelas de branches de saule de 3 à 4 m de long et 5 à 10 cm de diamètre, recouvert d'un géotextile de coco de 700 g/m² et reposant sur une base en pierres brise-lame, coûtait environ **90 euros** par m² (Sangalli, 2019). Ce montant comprenait 62 % pour la main-d'œuvre, 10 % pour la machinerie et 28 % pour les matériaux.

Le temps nécessaire à la mise en œuvre varie généralement entre 1 et 5 heures/m², en fonction des conditions du site et de la disponibilité des matériaux (Zuffi, 1989; Donat, 1995).

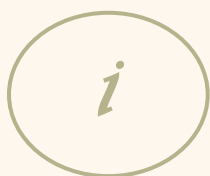
Lits de plants et plançons

Branchlayers, Brush layering, Hedge brush layer, Hedge layer

En anglais, les lits de plants et plançons se déclinent en plusieurs techniques spécifiques selon leur conception. Le terme *brushlayers* désigne les lits de plants et plançons sans géotextile, où les branches sont disposées en couches pour assurer une stabilisation naturelle. Les *vegetated soil wraps* ou *vegetated geogrids* correspondent aux lits de plants et plançons dans lesquels un lé de géotextile entoure les couches de sol intercalées avec des végétaux, offrant ainsi une protection renforcée et une meilleure stabilisation des sols. Quant au *branch packing*, il s'agit d'une variante des *brushlayers* intégrant l'utilisation de pieux pour consolider davantage la structure. Une dernière variante, reposant sur l'utilisation de fascines (fagots de branches vivantes) en tant que lit, ayant déjà été abordée dans un précédent guide, ne sera pas traitée ici (Didier et al., 2023).

Outre la distinction liée à la présence ou non de géotextile ou de pieux, on différencie ces lits selon le type de matériel végétal utilisé : les "lits de plançons" utilisent de longues branches vivantes (soit de longues boutures ou plançons), tandis que les "lits de plants" sont constitués de plants avec leurs racines. La technique peut également combiner ces deux types pour former des "lits de plants et plançons."

Ces distinctions permettent d'adapter les techniques aux conditions spécifiques des sites à restaurer. La section suivante se concentre principalement sur la variante sans géotextile. Cependant, les informations présentées s'appliquent également aux autres variantes (avec géotextile et avec pieux), dont les spécificités sont abordées par la suite.



Les informations concernant la description et les contextes d'application de cette technique sont issues des références suivantes : Schiechl, (1980); Besio & Lucchetta, (1993); Lachat, (1994); Gray & Sotir, (1996); USDA, (1996); Allen & Leech, (1997); Bentrup & Hoag, (1998); Howell, (1999); Lewis, (2000); Eubanks & Meadows, (2002); Venti et al., (2003); British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, (2004); Mohseni et al., (2004); Tourbier & Westmacott, (2005); Waterways Restoration Institute and & Urban Creeks Council, (2006); Adam et al., (2008); Campbell et al., (2008); Zeh, (2010); Sangalli, (2019); Peeters et al., (2020); Roadside Manual, (2023).

DESCRIPTION

Les lits de plants et plançons sont une technique de stabilisation des talus et des berges, consistant à implanter, dans des tranchées longitudinales remplies de terre, des rangées de ramilles de saules (plançons), de plants racinés ou d'autres espèces à reprise végétative. Ces éléments, placés côte à côte, forment une structure continue qui stabilise les pentes sous forme de "lits".

Ces lits divisent la pente en talus, séparées par des rangées de plants et de plançons. Ce système structure la pente avec du bois vivant et crée une barrière vivante capable de retenir les matériaux dévalant la pente, réduisant ainsi les mouvements de terrain, l'érosion et les risques d'éboulement. Les branches capturent également des débris végétaux qui, en s'enracinant à leur tour, renforcent la stabilité du sol, même en cas d'affaissement des lits.

Orientés à peu près perpendiculairement à la pente (10 à 20° avec l’horizontale), ces lits disposent les branches et racines en couches successives, dont les extrémités affleurent la surface du remblai. Cette disposition ralentit l’écoulement des eaux, filtre les sédiments et favorise la liaison des sols grâce à un maillage racinaire dense qui se développe au fil du temps. Ce réseau racinaire améliore la cohésion du substrat par un drainage naturel du sol, protège contre l’érosion et offre une meilleure résistance aux crues tant que le matériel végétal reste flexible. Cette méthode présente une croissance rapide des végétaux, souvent plus efficace que d’autres techniques de stabilisation.

En version sans géotextile, cette méthode repose uniquement sur les végétaux, sans support synthétique ou organique, ce qui en fait une technique simple et naturelle. Pour une efficacité optimale, il est parfois conseillé de l’installer sur une base solide en pied de berge (enrochement, caisson végétalisé ou tout autre ouvrage de pied de berge), réduisant ainsi les forces latérales exercées sur le sol.

CONTEXTE D’APPLICATION

Les lits de plants et plançons sont particulièrement adaptés pour stabiliser rapidement des talus instables, notamment dans des zones sujettes à l’érosion, aux glissements de terrain, ou aux chutes de pierres. Ils sont également efficaces pour consolider des niches d’arrachement hautes et raides ainsi que des talus détrempés.

Adaptée dans les environnements à faible énergie fluviale, cette technique est souvent combinée à des structures de pied de berge telles que des enrochements, caissons végétaux ou fascines, renforçant ainsi la stabilité globale des berges en réduisant ainsi les forces latérales exercées sur le sol. Elle est également idéale pour réaliser des transitions entre ouvrages végétaux distincts ou entre des zones modifiées et le terrain naturel, tout en assurant une croissance végétale rapide par rapport à d’autres méthodes.

L’utilisation de plants racinés permet d’ajuster les lits aux variations topographiques locales des surfaces traitées, maximisant ainsi leur efficacité. Sur des berges, cette technique favorise une restauration rapide de la végétation riveraine. En outre, l’abondance de matière végétale utilisée renforce progressivement la cohésion du sol à mesure que les plantes s’enracinent et croissent.

Cette méthode se révèle particulièrement avantageuse dans les projets impliquant des travaux de déblai ou de remblai, sur des pentes comportant des sols ameublis ou dans des zones très érodées où le risque d’affaissement est élevé. Bien qu’elle soit idéale pour les pentes de faible à moyenne inclinaison, elle peut également s’appliquer à des sols plus pentus.

L’efficacité des lits a une première dimension immédiate grâce au recouvrement végétal qui protège directement le sol. Avec le temps, leur résistance augmente à mesure que la végétation s’enracine et se développe selon le principe des techniques vivantes. Les seuils de résistance des lits sans géotextile sont les suivants (Tableau 11) :

Tableau 11: Contrainte tractrice admissible pour les lits de plants et plançons (Sangalli, 2019)

	Contrainte tractrice admissible (N/m²)	Vitesse admissible (m/s)
Avant développement	100	3
Après développement	150-200	3-6

AUTRES CONSIDÉRATIONS

- Pour garantir des **horizons racinaires variés** et une **croissance uniforme**, il est conseillé de mélanger au moins **trois à quatre espèces**. L'utilisation de plants d'âges et de diamètres de branches différents (entre 1 et 3 ans) améliore également la diversité et la stabilité du système racinaire (Schiechtl, 1980; Campbell et al., 2008).
- Dans les zones où la croissance végétale est **rapide**, l'intégration de **30 % à 50 % de branches mortes** dans les lits peut être envisagée (Zeh, 2010).
- La sélection des espèces doit être adaptée à leur **position sur la berge** et leurs **préférences**. On peut ainsi prévoir la présence de plançons de saules et de plants de ligneux de pied de berge dans le ou les lits du bas, et prévoir des plants à tendance plus forestière dans les lits de la partie supérieure de la berge.

MATÉRIAUX

Tableau 12: Caractéristiques des matériaux utilisés pour les lits de plants et plançons (Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Besio & Lucchetta, 1993; Gray & Sotir, 1996; USDA, 1996; Allen & Leech, 1997; Bentrup & Hoag, 1998; Howell, 1999; Lewis, 2000; Eubanks & Meadows, 2002; De Antonis & Molinari, 2003; Venti et al., 2003; Florineth, 2004; Degoutte, 2006; Waterways Restoration Institute and Urban Creeks Council, 2006; Campbell et al., 2008; Zeh, 2010; AMEC, 2012; Lequertier et al., 2015; Sangalli, 2019).

Branches aptes à produire des rejets, avec ramilles (plançons)	Âge	2 à 3 ans de préférence
	Longueur	0,5 à 4 m
	Diamètre	2 à 10 cm
	Remarque	Les plus petites longueurs sont adaptées aux sols compacts et les plus grandes longueurs aux sols meubles ou remblayés.
Plants à racines nues	Âge	2 à 4 ans
	Hauteur	60 à 90 cm pouvant atteindre 100 à 150 cm selon les espèces et les conditions
	Diamètre	1 à 3 cm

DÉTAILS DE CONSTRUCTION

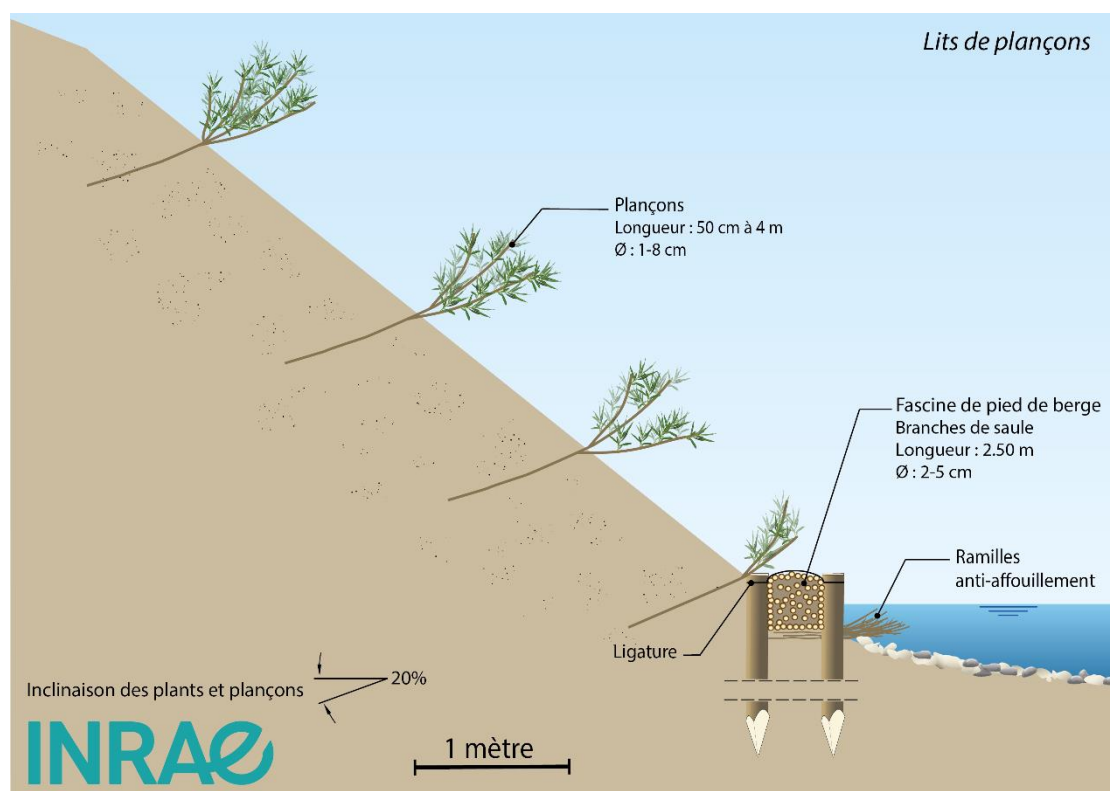


Figure 21: Profil en vue transversale de lits de plants et plançons en berge de cours d'eau avec un aménagement en pied de berge. Les plants sont insérés au même niveau que les plançons, en ligne, comme des simples plantations.

EXÉCUTION

L'exécution des lits de plants et plançons commence de la base de la pente vers le haut du talus. Les étapes d'exécution présentées ci-dessous s'appuient sur les références suivantes : Schiechl, (1980); Zuffi, (1989); Besio & Lucchetta, (1993); Lachat, (1994); Leiser, (1994); Gray & Sotir, (1996); USDA, (1996); Allen & Leech, (1997); Bentrup & Hoag, (1998); Howell, (1999); Lewis, (2000); Eubanks & Meadows, (2002); De Antonis & Molinari, (2003); Morgan & Rickson, (2003); Venti et al., (2003); British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, (2004); Florineth, (2004); Degoutte, (2006); Waterways Restoration Institute and & Urban Creeks Council, (2006); Zeh, (2007); Adam et al., (2008); Campbell et al., (2008); Zeh, (2010); AMEC, (2012); Lequertier et al., (2015); Sangalli, (2019); Peeters et al., (2020).

Une exception peut exister pour les pentes très fortes où on préférera travailler en descendant à cause de la chute des matériaux. Les étapes décrites ci-dessous sont générales et s'appliquent à toutes les modalités d'application des lits de plants et plançons, avec des ajustements spécifiques pour les autres modalités, abordés dans les sections ultérieures du guide.

1. **Réalisation des tranchées** : Creuser des tranchées à peu près perpendiculaires à la pente, de 50 à 180 cm de profondeur, avec une inclinaison de 10° à 20° vers le talus, toujours au-dessus du niveau moyen de l'eau. Travailler par sections courtes pour limiter les risques d'affaissement.

2. **Placement des matériaux vivants** : Déposer, dans la tranchée, une couche de remplissage de 5 à 10 cm avant d'installer les plants ou plançons perpendiculairement à la pente afin d'assurer une assise dans de la terre meuble.

Positionner les végétaux avec une légère inclinaison (10° à 20°). Les branches doivent dépasser de 10 à 30 cm pour minimiser les turbulences ($\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{3}$ de leur longueur totale).

Recouvrir immédiatement de terre en compactant soigneusement pour éviter les poches d'air.

3. **Configuration selon le type de lit** :

- **Lits de plants** : Installer 5 à 25 plants à racines nues par mètre linéaire.
- **Lits de plançons** : Disposer 15 à 25 branches vivantes par mètre linéaire, de manière entrecroisée.
- **Lits de plants et plançons** : Mélanger 15 à 25 branches avec 2 à 5 plants à racines nues par mètre linéaire.

4. **Remblayage et compactage** : Remplir les tranchées avec le matériau excavé en couches de 10 à 20 cm. Compacter soigneusement pour garantir un bon contact sol-plante et éviter les risques d'arrachage. En progressant de bas en haut, combler la tranchée du dessous dès que la suivante est creusée.
5. **Assemblage des lits** : Disposer les lits successivement pour structurer la pente selon le projet et compacter soigneusement pour stabiliser l'ensemble. Arroser avant de remblayer.

L'espacement vertical entre les ranges dépend de la pente et du risque d'érosion. Généralement, des intervalles de 1 à 3 m sont appliqués⁹. Les intervalles sont généralement plus serrés en bas de pente où l'érosion est plus forte (Tableau 13) :

Tableau 13 : Distance approximative entre les lits de plants et plançons en fonction de la pente selon Gray & Sotir (1996)

DISTANCE APPROXIMATIVE ENTRE LES RANGS EN FONCTION DE LA PENTE		
INCLINAISON DE LA PENTE (V:H)	Sur les pentes humides (m)*	Sur les pentes sèches (m)*
1:1,5 A 1:2	0,9-1,2	1,2-1,5
1:2 A 1:2,5	0,9-1,2	1,5-1,8
1:2,5 A 1:3	1,2-1,5	1,8-2,4
1:3 A 1:4	1,5-1,8	2,1-3,0

* converties et approximées depuis les unités impériales britanniques

6. **Stabilisation du pied de berge** : Ajouter une protection au pied de berge si nécessaire.
7. **Arrosage** : Arroser abondamment l'installation pour favoriser la reprise des végétaux. Prévoir un système d'arrosage ou d'irrigation si nécessaire.

AVANTAGES

➤ **Réponse immédiate et durable à l'érosion** : La végétation s'établit rapidement et renforce efficacement le sol en 1 à 2 ans. Grâce à un enracinement profond, cette technique stabilise le sol et lutte contre l'érosion dès sa mise en œuvre (Zuffi, 1989; Lachat, 1994; Donat, 1995; USDA, 1996; Zeh, 2000; Venti et al., 2003; British

⁹ Pour les pentes plus raides que 3H :1V, il est préférable d'opter pour la méthode avec géotextile, qui offre une résistance accrue et convient mieux à ce type de profil (British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004).

Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004; Zeh, 2010; AMEC, 2012; Sangalli, 2019; Peeters et al., 2020).

- **Permet d'avoir des pentes élevées** : Cette technique contribue à structurer mécaniquement la berge et offre une bonne stabilité au talus (Lachat, 1994; AMEC, 2012; Peeters et al., 2020).
- **Simplicité et faible coût** : Cette technique est simple, peu coûteuse (Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Besio & Lucchetta, 1993; Lachat, 1994; Zeh, 2000, 2010; AMEC, 2012; Peeters et al., 2020).
- **Modération de l'humidité du sol** : Les lits de plants et plançons favorisent l'infiltration dans les zones sèches et assèchent les endroits trop humides, régulant ainsi l'humidité du sol (Roadside Manual, 2023).

INCONVÉNIENTS

- **Limites d'utilisation** : Ce procédé convient aux sols facilement travaillables mais n'est généralement pas adapté aux sols rocheux ou caillouteux et aux pentes de plus de 40°. De plus, il est inefficace dans les extrados de méandres ou sur les berges trop endommagées (Zeh, 2000; Eubanks & Meadows, 2002; Zeh, 2010; Sangalli, 2019).
- **Grande quantité de matériel végétal nécessaire** : L'approvisionnement en matériel végétal est important, ce qui peut engendrer des coûts et des contraintes logistiques (Zuffi, 1989; Lachat, 1994; Venti et al., 2003; Peeters et al., 2020; British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004; Sangalli, 2019).
- **Impact sur le sol indigène** : Cette technique est intrusive pour le sol naturel et requiert des travaux préparatoires par étapes pour limiter les perturbations (Schiechtl, 1980; British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004; Roadside Manual, 2023).
- **Exigences de main-d'œuvre élevées** : La reconstruction des berges nécessite une main-d'œuvre importante, ce qui peut la rendre inadaptée comme méthode unique (British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004; AMEC, 2012).

COÛTS

En 2020, le coût de lits de plants et plançons a été estimé entre **15 et 25 euros** par mètre linéaire (Peeters et al., 2020). La mise en œuvre demande de 1 à 3 heures de travail par mètre, incluant les matériaux et les travaux annexes (Schiechtl, 1980; Donat, 1995).

Déclinaison avec géotextile

Vegetated soil wraps, Vegetated geogrids

Les lits de plants et plançons renforcés avec du géotextile représentent la variante la plus couramment utilisée de cette technique (Adam et al., 2008). Ce dispositif associe les végétaux et un géotextile, biodégradable et résistant, qui est placé dans le fond de la tranchée et enveloppe les couches de sol entre les rangées de plants et plançons (Figure 22). Ses extrémités sont solidement ancrées dans le remblai pour garantir la stabilité de la structure. (Gray & Sotir, 1996; USDA, 1996; Lewis, 2000; Faber, 2004; Florineth, 2004; Sangalli, 2019).

Le géotextile offre une stabilisation temporaire au talus, empêchant l'érosion immédiate et facilitant l'enracinement des végétaux. Il prévient également l'érosion interne de la berge et augmente la durabilité de la structure (Allen & Leech, 1997; British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004). Grâce à sa flexibilité, le géotextile s'adapte aux déformations dues au tassement du sol et aux contraintes hydrodynamiques, ce qui en fait une solution particulièrement adaptée aux pentes instables ou soumises à des écoulements rapides (Adam et al., 2008). Bien qu'exigeant une main-d'œuvre importante, cette méthode est efficace pour la reconstruction des berges et combine les avantages des structures naturelles avec ceux des techniques de renforcement modernes (USDA, 1996; Eubanks & Meadows, 2002; Mohseni et al., 2004; Roadside Manual, 2023).

Les lits de plants et plançons avec géotextile sont utilisés dans des contextes similaires à la version sans géotextile, mais offrent une meilleure résistance les premières années et donc des avantages accrus en termes de résistance et de stabilisation, notamment sur des pentes pouvant atteindre 1V :1.5H ou dans des zones à forte érosion et écoulements rapides (Gray & Sotir, 1996; British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004). Inspiré de la technique de la "terre armée"¹⁰, le géotextile renforce les pentes instables et constitue une solution plus robuste pour les talus érodés et les pentes abruptes (British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004; Adam et al., 2008).

En zones où les vitesses d'écoulement sont élevées, comme les courbes extérieures des méandres, cette technique offre une protection accrue contre l'érosion. La combinaison du géotextile et d'une végétation dense stabilise rapidement les sols peu cohésifs, souvent présents dans les zones sensibles à l'érosion (Mohseni et al., 2004; Bonin et al., 2013). Pour optimiser son efficacité, l'installation doit être réalisée au-dessus du niveau des plus bas ligneux et peut être associée à des techniques complémentaires telles que le tressage ou l'enrochement pour renforcer durablement les berges en zone de non-submersion (British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004; Florineth, 2004; Baird et al., 2015).



Figure 22 : Lits de plants et plançons avec boudins de géotextile au-dessus d'un caisson végétalisé © S. De Danieli

¹⁰ Système de terre mécaniquement stabilisée avec un renforcement artificiel (souvent armatures en métal).

MATÉRIAUX SUPPLÉMENTAIRES

- Géotextile biodégradable et résistant : densité $\geq 700 \text{ g/m}^2$
- Agrafes de fixation en fer ou préférablement en bois.

EXÉCUTION

Les étapes d'installation des lits de plants et plançons avec géotextile suivent le même processus que pour les lits sans géotextile, en progressant de la base vers le sommet de la pente, sauf en cas de pente très forte où il est parfois préférable de travailler en descendant. Les spécificités sont les suivantes (Schiechtl, 1980; Gray & Sotir, 1996; Allen & Leech, 1997; Lewis, 2000; Eubanks & Meadows, 2002; Florineth & Molon, 2005; Adam et al., 2008; Lequertier et al., 2015; Sangalli, 2019):

Après avoir formé la première tranchée :

- Placer le géotextile dans le fond, puis le recouvrir de matériau terreux.
- Replier le géotextile autour du remblai en l'ancrant en profondeur (1 m). Former un boudin homogène, au-dessus de la végétation, en fermant le géotextile avec les agrafes sans laisser d'air et tasser les matériaux terreux à l'intérieur. La partie supérieure du géotextile (qui vient au-dessus du boudin) peut être tendue avec le godet de la pelle et est agrafée (au moins trois agrafes par mètre linéaire) pour assurer sa stabilité.
- Disposer la première rangée de plants et plançons (voir paragraphe ci-dessus).
- Recouvrir la rangée d'une fine couche de terre.

Boudins suivants :

- Dérouler les lés de géotextile parallèlement aux lignes de végétalisation et les remplir avec des matériaux extraits de la partie supérieure (5 à 10 cm).
- S'assurer que le géotextile ne presse pas les plants vers le bas, le boudin du dessus ne devant pas s'avancer au-delà du boudin du dessous de manière à ne pas tordre les plantes, voire les casser.
- Former un boudin homogène, au-dessus de la végétation, en fermant le géotextile avec les agrafes sans laisser d'air et tasser les matériaux terreux à l'intérieur.
- Disposer la rangée de végétaux suivante sur cette couche de géotextile. Creuser ensuite la tranchée suivante plus en amont, en comblant la précédente à mesure que le montage progresse de bas en haut.

Montée des niveaux :

- Respecter la pente prévue dans le projet, en veillant à limiter la hauteur totale à 2-4 mètres.
- Les couches formées créent, entre elles, des pentes de 30 à 45°, sans dépasser l'angle de pente naturelle du remblai.

Dernière couche :

- Étendre le géotextile sur tout le reste la pente pour épouser le profil final et fixer-le avec trois agrafes par m² et ou enterrer l'extrémité dans une tranchée de 20 à 30 cm.

Finition :

- Avant de poser le géotextile, ensemercer les espaces entre les lits avec des graminées et recouvrir éventuellement d'un paillis de paille pour favoriser la végétalisation.

COÛTS

Le coût des lits de plants et plançons avec géotextile est légèrement supérieur à ceux sans, variant selon le terrain et l'approvisionnement. En 2018, il était d'environ **44 euros** par mètre linéaire, réparti entre main-d'œuvre (35 %), machinerie (33 %), et matériaux (32 %) (Sangalli, 2019).

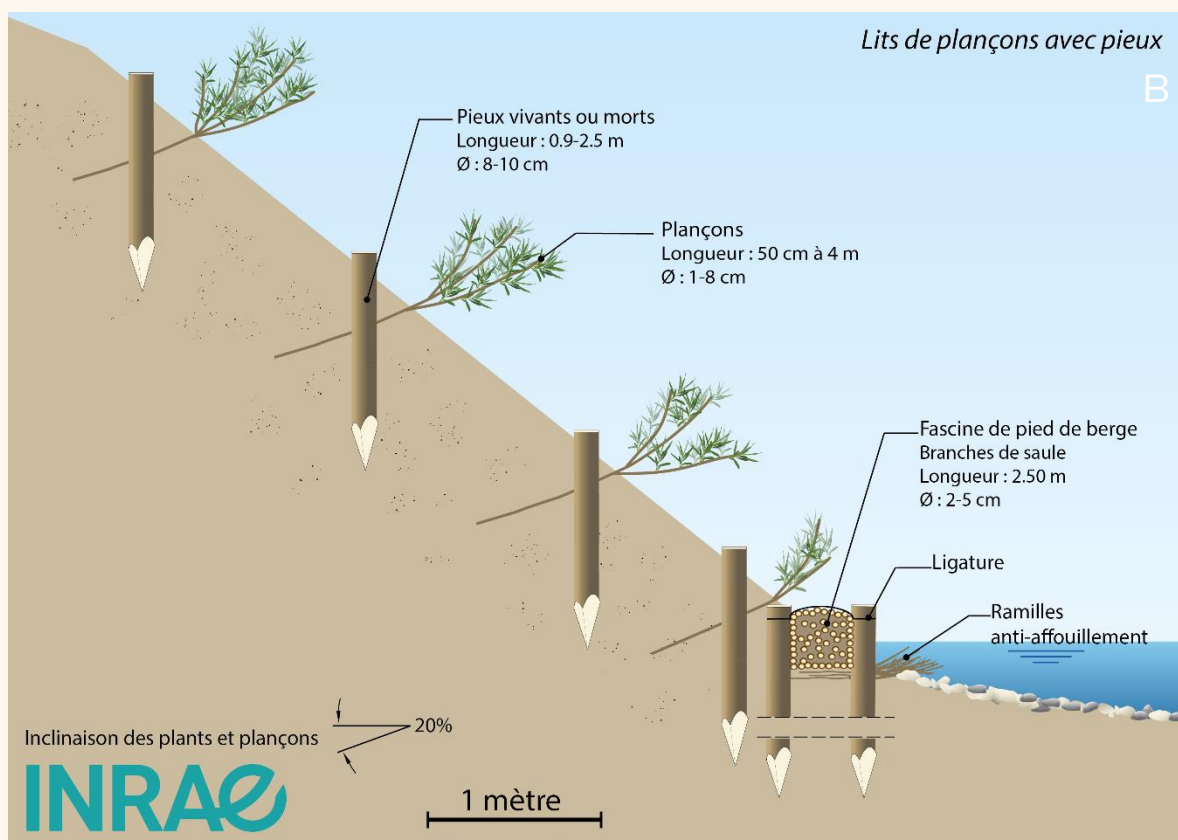
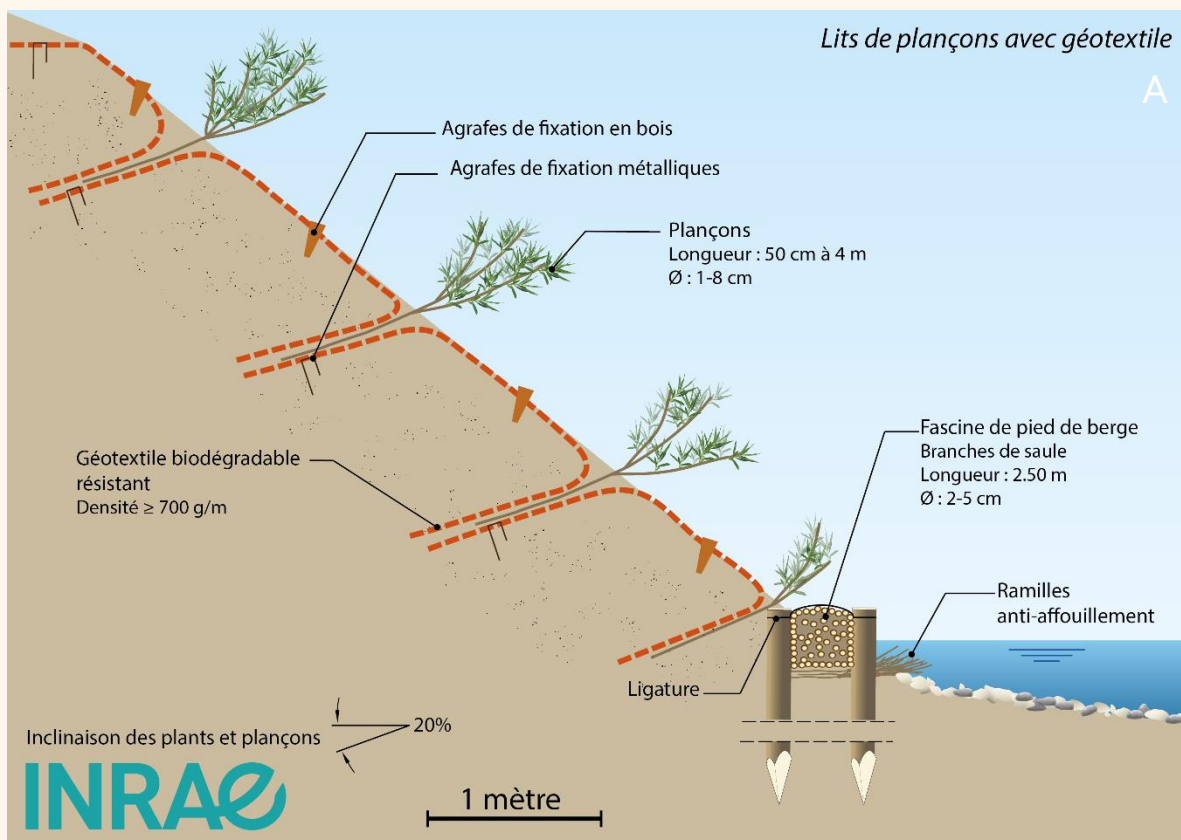


Figure 23 : Profils en vue transversale de lits de plants et plançons (A) avec géotextile ; (B) avec pieux.

Déclinaison avec pieux

Branch packing

Dans cette version, l'alternance de branches vivantes compactées et de matériau de remblai est stabilisée par des pieux, qu'ils soient vivants ou non. Cette configuration permet d'éviter l'utilisation de géotextile tout en garantissant une stabilité optimale (Gray & Sotir, 1996; USDA, 1996; Lewis, 2000; British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004; Tourbier & Westmacott, 2005; AMEC, 2012).

Les différentes configurations de lits de plants et plançons — avec ou sans géotextile, et avec pieux — sont conçues pour répondre aux contraintes spécifiques de chaque site. Les pieux vivants apportent une rigidité accrue au talus grâce à leur développement racinaire, tandis que les branches exposées protègent la surface contre l'érosion et filtrent les sédiments (British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004; Campbell et al., 2008).

Les lits de plants et plançons avec pieux sont utilisés dans des contextes similaires à ceux sans géotextile, mais offrent des avantages supplémentaires en termes de résistance et de durabilité. Cette méthode est particulièrement adaptée pour traiter des zones d'érosion localisées, telles que des ravins peu profonds ou des affaissements sur les berges (USDA, 1996; Tourbier & Westmacott, 2005; AMEC, 2012). Elle convient particulièrement aux petits cours d'eau et ruisseaux où les contraintes hydrauliques sont modérées et aux pentes inférieures à 1V:2H (Gray & Sotir, 1996; USDA, 1996; British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004; AMEC, 2012; Baird et al., 2015).

MATÉRIAUX SUPPLÉMENTAIRES

- Pieux vivants ou morts : Ø 8 à 10 cm (ou 5x10 cm) ; longueur 0.9 à 2.5 m, (Gray & Sotir, 1996; USDA, 1996; Lewis, 2000; British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2004; Tourbier & Westmacott, 2005; Campbell et al., 2008).

EXÉCUTION

Les étapes d'installation des lits de plants et plançons avec pieux suivent celles de la version sans géotextile, en progressant de la base vers le sommet de la pente sauf éventuellement en cas de pente très forte (Schiechtl, 1980; Gray & Sotir, 1996; De Antonis & Molinari, 2003). Les ajouts sont les suivants :

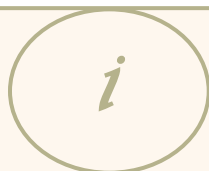
Après avoir formé la première tranchée :

- Enfoncer verticalement les pieux dans le sol à une profondeur d'au moins 1 m, en les espaçant de 30 à 60 cm horizontalement, depuis la base de la pente (Gray & Sotir, 1996; USDA, 1996; Eubanks & Meadows, 2002; Tourbier & Westmacott, 2005; Campbell et al., 2008; AMEC, 2012).
- Disposer les matériaux terreux et les branches entre les pieux.

Les étapes suivantes suivent le même procédé que celles décrites pour les lits sans géotextile. Il est recommandé de disposer les pieux en quinconce entre les couches pour optimiser la stabilité.

Tressage vivant

Willow weaving / Wattling



Les informations concernant la description et les contextes d'application de cette technique sont issues des références suivantes : Lachat, (1986); Zuffi, (1989); Besio & Lucchetta, (1993); Lachat, (1994); Barbry, (2002); Hoag et al., (2002); Venti et al., (2003); Faber, (2004); Florineth & Molon, (2005); Tourbier & Westmacott, (2005); Adam et al., (2008); Arizpe et al., (2008); Lequertier et al., (2015); Peeters et al., (2020).

DESCRIPTION

Le tressage est une technique de protection des pieds de berge consistant en une structure de faible hauteur (maximum généralement de 40 cm), réalisée à partir de branches vivantes d'espèces ligneuses capables de se multiplier végétativement, généralement issues de la famille des Salicacées. Ces branches sont entrelacées autour de pieux en bois enfoncés dans le sol parallèlement au courant. La plus grosse extrémité de chaque branche est enfouie dans le sol, tandis que le reste est tressé autour des pieux pour former une structure compacte. Cette structure est ensuite remblayée avec de la terre pour combler les espaces vides, créant ainsi un "mur" végétal capable de résister aux contraintes hydrauliques dès son installation (Figure 24).



Figure 24 : Tressage de saule en berge de rivière ayant bien repris © A. Evette.

Le clayonnage, souvent confondu avec le tressage, se distingue principalement par sa hauteur, généralement supérieure à 40 cm. Contrairement au tressage, cette technique implique la construction d'une structure sur la rive, qui est ensuite plaquée à plat sur la berge préalablement talutée et nettoyée, assurant ainsi un contact optimal avec le sol et renforçant la stabilité. Le clayonnage est souvent appliqué en pente (Figure 25).

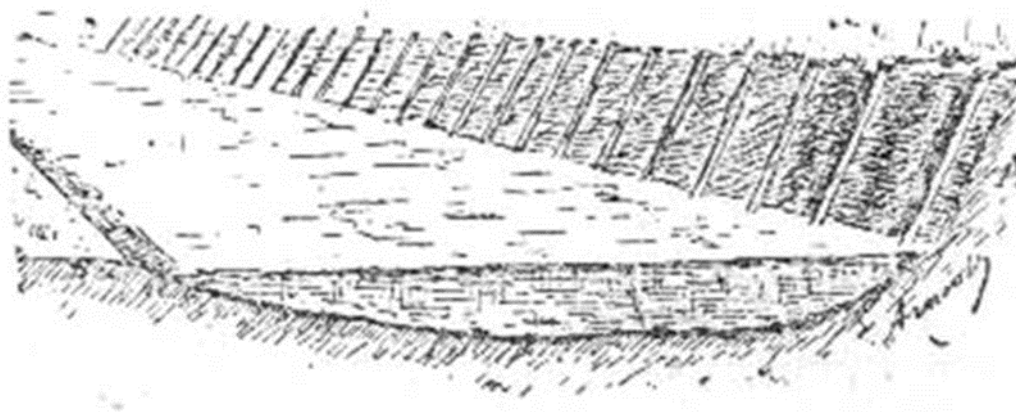


Figure 25 : Iconographie de clayonnage en pente par Arnould, C. (1913).

CONTEXTE D'APPLICATION

Le tressage est une méthode efficace et polyvalente pour stabiliser les pieds de berge, particulièrement adaptée aux sites présentant des irrégularités telles que des souches, des débouchés de canalisations ou des reliefs complexes. Il permet de protéger ces zones soumises à l'érosion, en particulier sur des cours d'eau à débit faible à modéré, où la dynamique d'érosion et le transport de sédiments sont limités. Cette technique est idéale pour les rivières et ruisseaux de petite taille, avec un lit mineur d'une largeur maximale d'environ 15 mètres. Cette technique est cependant particulièrement sensible à la sécheresse, les branches étant installées de manière très superficielles dans le sol.

Pour renforcer l'efficacité de la stabilisation en milieu et haut de berge, le tressage peut être combiné avec des techniques complémentaires telles que les boutures, les couches de branches à rejets ou la plantation de végétaux ligneux. Ces aménagements supplémentaires améliorent la durabilité de la solution. Dans certains cas, plusieurs niveaux de tressage peuvent être disposés en escalier pour protéger des talus plus élevés. Cependant, dans des contextes à forte érosion, comme les cours d'eau plus larges ou à débit élevé, des solutions alternatives, telles que les fascines de saules, peuvent être plus appropriées.

Une fois installé, le tressage protège immédiatement les berges. On estime que cette technique est capable de résister à la traction à hauteur d'environ 180 N/m. Cette résistance tend à augmenter avec le développement des branches s'il est permis.

MATÉRIAUX

Tableau 14: Caractéristiques des matériaux utilisés pour le tressage vivant (Zuffi, 1989; Besio & Lucchetta, 1993; Schiechl & Stern, 1996; Zeh, 2000; Hoag et al., 2002; Venti et al., 2003; Faber, 2004; Florineth & Molon, 2005; Adam et al., 2008; Arizpe et al., 2008; Lequertier et al., 2015; Peeters et al., 2020).

Branches flexibles	<i>Longueur</i>	≥ 150 cm
	<i>Diamètre</i>	1,5 à 4 cm jusqu'à 10 cm sur la partie basale
	<i>Remarque</i>	Dans un souci de diversification et de réussite, privilégier l'emploi de différentes espèces de saules buissonnants et arbustifs (trois à quatre espèces minimum) choisies en fonction de leur distribution géographique et des conditions édaphiques rencontrées sur site.
Pieux	<i>Longueur</i>	1 à 1,5 m
	<i>Diamètre</i>	7 à 15 cm
	<i>Remarque</i>	Éviter la mise en place de pieux de trop gros diamètre (> 12 cm), ce qui nécessite une plus grande « courbure » des branches tressées, et donc qui favorise davantage d'espaces libres dans l'ouvrage, constituant un risque de déstabilisation. Il faut que l'ouvrage réalisé demeure le plus compact possible.
Fil de fixation - (en option)	<i>Type</i>	Fil recuit ou corde biodégradable (coco, jute,...)
	<i>Dimension</i>	2-3 mm pour du fil de fer
Ramilles anti-affouillement - (en option)	<i>Longueur</i>	≥ 70 cm
	<i>Diamètre</i>	0,5 à 1,5 cm

DÉTAILS DE CONSTRUCTION

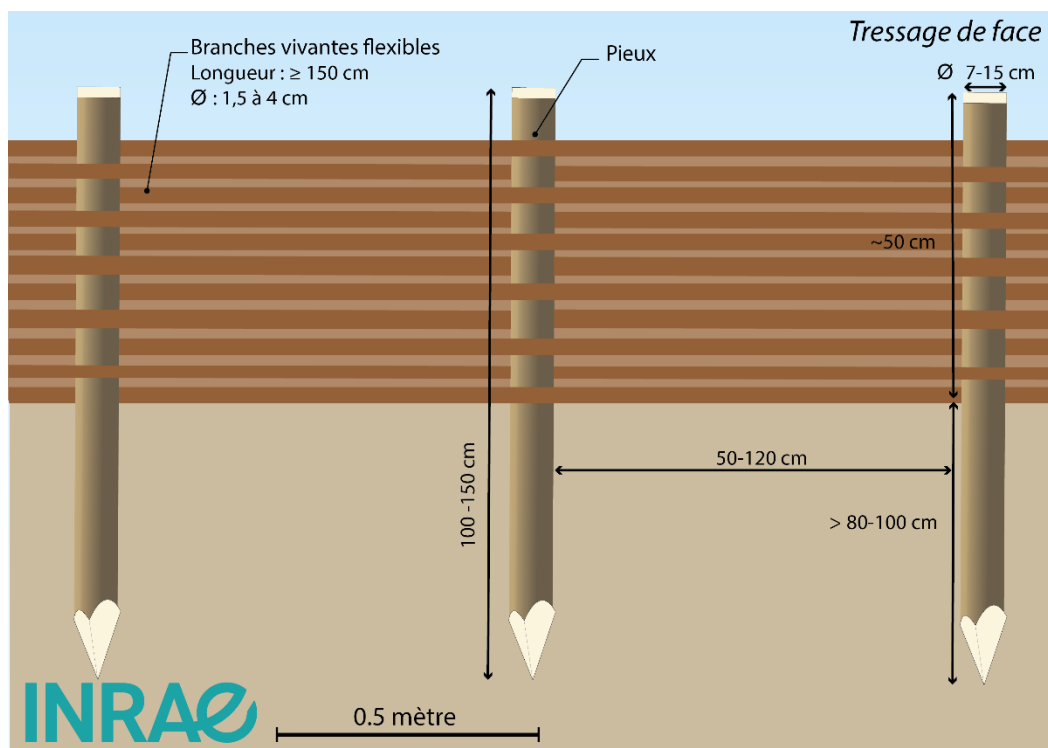


Figure 26 : Profil en vue de face d'un tressage en pied de berge.

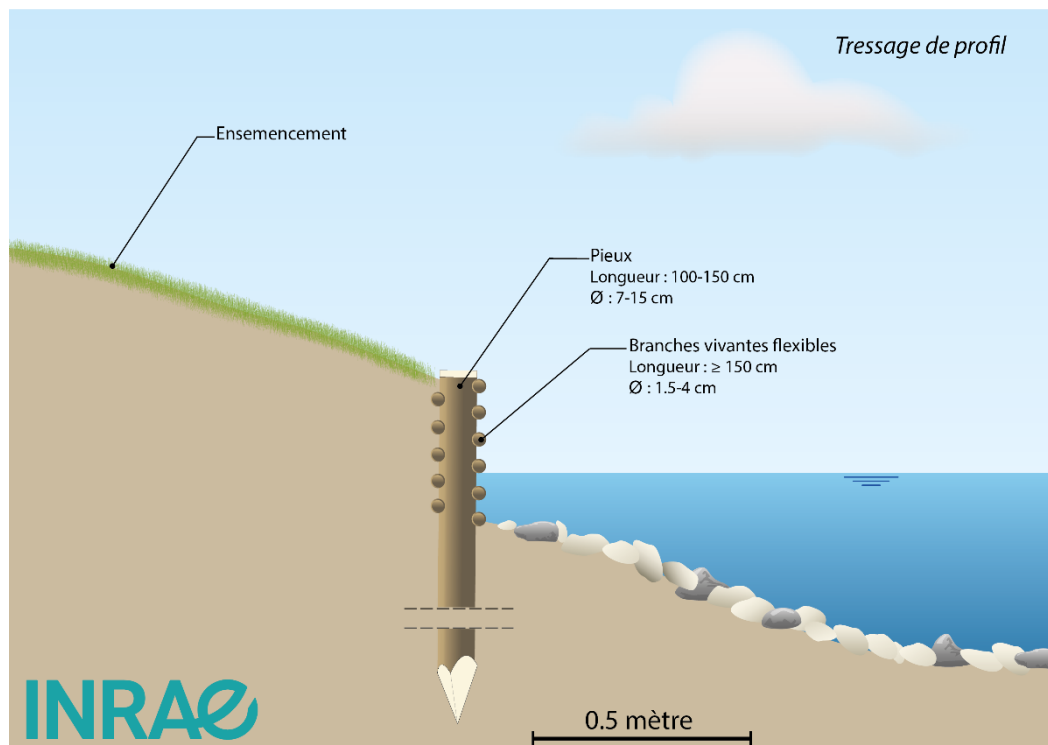


Figure 27 : Profil en vue transversale d'un tressage en pied de berge.

EXÉCUTION

La mise en œuvre du tressage nécessite peu de travaux préparatoires, mais un nettoyage minutieux du pied de berge est crucial. Les étapes d'exécution présentées ci-dessous s'appuient sur les références suivantes : Zuffi, (1989); Besio & Lucchetta, (1993); Schiechl & Stern, (1996); Hoag et al., (2002); Venti et al., (2003); Faber, (2004); Florineth & Molon, (2005); Zeh, (2007); Adam et al., (2008); Arizpe et al., (2008); Lequertier et al., (2015); Peeters et al., (2020).

1. **Préparation du site** : Nettoyer la berge en enlevant les gros blocs, puis réaliser un léger terrassement pour éviter que l'ouvrage n'empiète sur le cours d'eau. Pour permettre un travail correct, l'assise doit être horizontale et large de 30 à 50 cm.
2. **Disposition des pieux** : À partir de l'aval et remontant vers l'amont, tailler les pieux en biseau à la base. Disposer-les à l'extrémité aval des banquettes, soit dans des trous creusés à la barre à mine ou à la perforatrice, soit plantés à la masse ou battus mécaniquement. Les pieux doivent être enfoncés parallèlement au courant, à une profondeur d'au moins 80-100 cm (à adapter aux conditions) et dépasser d'environ 50 cm au-dessus du sol. La distance entre les pieux doit être de 50 à 120 cm, avec une mise en place qui évite de trop rapprocher les pieux afin d'éviter une courbure excessive du tressage.
En fonction du contexte, on peut enfoncer les pieux situés les plus en amont et en aval en retrait dans la berge pour former un tressage incurvé et protéger les extrémités des ouvrages qui sont des points de fragilité.
3. **Placement des ramilles "anti-affouillement"** - En option : Pour limiter les risques d'affouillement, en particulier sur les substrats fins (sables, limons), placer des ramilles de saule (environ 40 pièces par mètre linéaire) au pied de l'ouvrage, disposées perpendiculairement au sens du cours d'eau.
4. **Début du tressage** : Tresser les branches entre les pieux pour former un mur végétal d'une hauteur de 15 à 40 cm, en orientant les extrémités des branches vers l'aval et leur base enfoncée dans la berge à au moins 20 cm de profondeur afin d'améliorer leur capacité de reprise et respecter leur polarité. Les couches supérieures doivent toucher la berge sans sortir du tressage.

Le tressage doit être installé à environ deux tiers au-dessus du niveau moyen des eaux et un tiers en dessous. Une immersion excessive peut nuire au développement des branches vivantes, tandis qu'une installation trop haute peut entraîner leur dessèchement.

Généralement, la première ligne de branches est installée sur toute la longueur du tressage avant de passer à la couche suivante, et ainsi de suite.

5. **Montage du tressage** : Utiliser 10 à 12 branches par mètre linéaire (chiffre à ajuster en fonction de la hauteur du tressage et du diamètre des branches), en alternant les points d'appui sur les pieux à chaque couche pour répartir les forces de manière uniforme (d'un côté du pieu, puis de l'autre alternativement).
Décaler les points de départ de chaque couche pour assurer une structure homogène.
Veiller à bien serrer pour éviter tout jeu et jours entre les branches. Des crampillons métalliques peuvent être utilisés pour renforcer la fixation avec les fils de fer ou cordes.
6. **Compression du tressage** : Appuyer fermement sur le tressage, pour rendre la structure aussi compacte que possible, soit en marchant dessus, soit en utilisant une planche ou une pelle hydraulique.
7. **Fixation des branches** : Pour renforcer la fixation, utiliser du fil de fer galvanisé ou, pour une approche plus écologique, de la corde biodégradable (coco, ...) sur la partie supérieure du tressage.

8. **Finition** : Couper proprement l'extrémité des pieux dépassant après un dernier battage mécanique.
9. **Remblayage** : Remblayer l'espace derrière le tressage avec des matériaux gravo-terreux afin que les branches soient en contact avec le sol, ce qui permet d'éviter qu'elles ne se dessèchent et assure une bonne reprise racinaire.

AVANTAGES

- **Réponse immédiate et durable à l'érosion** : Le tressage assure une protection stable dès sa mise en place, même avant que les végétaux n'aient commencé à produire des racines, offrant ainsi une réponse rapide à l'érosion (Zuffi, 1989; Besio & Lucchetta, 1993; Schiechl & Stern, 1996; Tourbier & Westmacott, 2005; Sangalli, 2019; Peeters et al., 2020; Venti et al., 2003).
- **Adaptabilité** : Cette technique s'adapte aisément aux irrégularités des berges, ce qui la rend idéale pour les cours d'eau de petite taille et les terrains légèrement inclinés (Venti et al., 2003; Sangalli, 2019; Peeters et al., 2020).
- **Simplicité de mise en œuvre** : Grâce à sa technique de mise en œuvre simple et à l'usage limité de matériel, le tressage est facilement mis en œuvre par les entreprises spécialisées (Zuffi, 1989; Florineth & Molon, 2005; Sangalli, 2019).

INCONVÉNIENTS

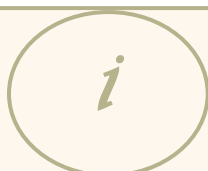
- **Hauteur de protection limitée** : Bien que le tressage soit efficace, il ne fournit une protection que sur une hauteur relativement faible, nécessitant souvent l'ajout d'autres techniques végétales pour une protection complète (Sangalli, 2019; Peeters et al., 2020).
- **Entretien nécessaire** : Le développement des saules peut réduire le gabarit du lit des petits cours d'eau, ce qui requiert un entretien régulier pour éviter toute obstruction (Venti et al., 2003; Sangalli, 2019).
- **Inadapté aux grands cours d'eau ou terrains rocheux** : Le tressage n'est généralement pas adapté aux cours d'eau à débit et volume élevés où les forces érosives sont trop fortes, ni aux terrains rocheux (Zeh, 2000; Venti et al., 2003; Florineth & Molon, 2005; Arizpe et al., 2008; Zeh, 2010; Peeters et al., 2020).
- **Travail intensif** : Bien que la technique soit simple à mettre en œuvre, elle nécessite un travail conséquent, notamment en termes de préparation et d'entretien (Zuffi, 1989; Venti et al., 2003; Tourbier & Westmacott, 2005).
- **Grande quantité de matériel végétal nécessaire** : Pour garantir un enracinement suffisant, une grande quantité de végétaux vivants est requise (Schiechl & Stern, 1996; Zeh, 2000, 2010).

COÛTS

En 2008, le coût indicatif de réalisation d'un tressage, incluant les fournitures et la mise en œuvre des matériaux, était relativement modéré, se situant entre **40 et 60 euros** hors taxes par mètre linéaire (Adam et al., 2008).

Peignes et treillis de branches

Brush Grids / Log brush barrier



Les informations concernant la description et les contextes d'application de cette technique sont issues des références suivantes : Adam et al., (2008); De Antonis & Molinari, (2003); Degoutte, (2006); Donat, (1995); Florineth & Molon, (2005); Lachat, (1994); Peeters et al., (2020); Sangalli, (2019); Schiechl, (1973, 1980); Schiechl & Stern, (1997); Zeh, (2000, 2007, 2010)

Les termes *peignes* et *treillis de branches* (on peut parfois trouver le terme de *brosses*) désignent différentes variantes d'une même technique de stabilisation des berges. Malgré des spécificités propres à chaque méthode, leur principe de fonctionnement reste identique : créer un enchevêtrement de branches et de matériaux gravo-terreux pour ralentir les courants, filtrer les éléments transportés par l'eau et favoriser le dépôt de sédiments. Les différences entre ces techniques ne sont qu'une question d'organisation : Le treillis de branche est organisé alors que le peigne ne l'est pas. Ces techniques combinent végétation vivante et structures organisées pour assurer une efficacité immédiate et une stabilisation progressive des berges.

DESCRIPTION

Ces ouvrages vivants sont constitués d'un enchevêtrement de branches et de ramilles compactées avec des matériaux gravo-terreux, maintenus par une ou plusieurs rangées de pieux et de fixations (câbles d'acier ou cordes biodégradables pour une approche plus écologique). Les branches utilisées, proviennent d'espèces capables de rejeter et peuvent être lestées avec des pierres pour une meilleure stabilité. Les ouvrages diffèrent par l'organisation des branches : Les **treillis de branches** sont constituées de différentes couches de branches posées



Figure 28 : Treillis de branche en bord de rivière ©D. Jaymond.

parallèlement puis perpendiculairement au cours d'eau, créant une grille compacte organisée (Figure 28), tandis que les **peignes** privilégient eux une structure plus désordonnée¹¹(Figure 29).

Leur mise en place vise à ralentir le courant, dissiper son énergie et favoriser le dépôt des sédiments fins, contribuant ainsi à la reconstitution progressive de la berge tout en stimulant le développement de la végétation. Ces ouvrages contribuent à une stabilisation progressive des berges en s'appuyant sur trois mécanismes complémentaires. La densité des branches enchevêtrées ralentit le courant, ce qui favorise le dépôt des sédiments transportés par l'eau. Ensuite, la reprise végétative se fait de manière double : les végétaux vivants en place développent leurs propres systèmes racinaires, tandis que les propagules et graines amenées par l'eau enrichissent spontanément la diversité végétale locale. La consolidation du sol est assurée par les racines de ces plantes pionnières, qui renforcent mécaniquement la berge et créent un environnement propice à l'installation progressive d'autres espèces végétales, augmentant ainsi la stabilité et la résilience globale de l'écosystème. Ces techniques voient leur consolidation se renforcer au fil du temps, notamment grâce au développement des systèmes racinaires, des tiges aériennes et au dépôt progressif des matériaux.



Figure 29 : Peigne en bord de rivière ©D. Jaymond.

¹¹ Dans certains cas, des arbres entiers abattus, orientés dans le sens du courant et fixés par des câbles, jouent un rôle similaire en retenant les particules en suspension et en favorisant la reconstitution de la berge (Adam et al., 2008; Degoutte, 2006; Lachat, 1986).

CONTEXTE D'APPLICATION

Les peignes et treillis de branches sont des techniques de stabilisation idéales pour les petits cours d'eau, où elles exploitent l'enchevêtrement des branches pour restaurer les berges érodées. Ces structures permettent de combler et de végétaliser naturellement d'importantes niches d'arrachement, qu'il s'agisse de petites encoches d'érosion (0.5 à 1 m) ou de sections pouvant atteindre jusqu'à 3 mètres de profondeur. Leur efficacité repose sur la dynamique entre le courant et la charge solide en suspension, particulièrement dans des rivières à crues régulières transportant des sédiments limoneux ou sableux.

Elles sont particulièrement adaptées pour corriger des affouillements localisés, souvent causés par des accidents morphologiques, comme par exemple d'arbre déchaussé ayant aggravé une niche d'érosion en pied de berge. De plus, ces techniques s'appliquent efficacement aux marges nues et aux rivières sinueuses à vitesse moyenne ou élevée, tout en facilitant une colonisation rapide par des végétaux ligneux.

Cependant, ces techniques ne conviennent pas à la stabilisation de grands linéaires ou à des cours d'eau soumis à des contraintes hydrauliques extrêmes. En cas de fortes crues dans des rivières torrentielles, elles risquent de se transformer rapidement en amas de branchages contournés par le courant. Elles doivent donc être réservées à des interventions localisées. De même, on privilégiera l'utilisation de saule et on évitera toute espèce à port arboré, comme dans toute technique de pied de berge, pour éviter la création de turbulences pouvant éroder le sol et l'éventuel effet de bras de levier dans le cas où l'arbre serait déchaussé.

L'efficacité des peignes et des treillis de branches est immédiate après installation, car l'enchevêtrement des branches offre une protection mécanique contre l'érosion. Cette efficacité évolue positivement dans le temps grâce au développement progressif de la végétation. Les contraintes tractrices admissibles et la vitesse du courant supportable augmentent significativement une fois la végétation établie (Tableau 15):

Tableau 15: Contrainte tractrice admissible pour les peignes et les treillis (Sangalli, 2019)

Valable pour les peignes et les treillis	Contrainte tractrice admissible (N/m^2)	Vitesse admissible (m/s)
Avant développement	100	<3
Après développement	100-150	3-6

MATÉRIAUX

Tableau 16: Caractéristiques des matériaux utilisés pour les peignes et treillis de branches (Besio & Lucchetta, 1993; Florineth & Molon, 2005; Peeters et al., 2020; Sangalli, 2019; Venti et al., 2003; Zeh, 2000, 2007, 2010)

Branches vivantes capables de reproduction végétative	<i>Longueur</i>	100-200 cm, suffisamment longues pour dépasser de 15 à 30 cm de la pente et bien ramifiées	
	<i>Diamètre</i>	3 à 10 cm	
	<i>Remarque</i>	Branches rectilignes avec ramilles, issues d'espèces ligneuses capables de reproduction végétative.	
Branches mortes non capables de reproduction végétative	<i>Remarque</i>	Les branches vivantes peuvent être complétées par des branches mortes, des troncs, des pierres ou des agrégats, si le matériel vivant est insuffisant.	
Pieux en bois (sur le haut de berge)	Peigne	<i>Longueur</i>	100 cm
		<i>Diamètre</i>	5 à 15 cm
	Treillis	<i>Longueur</i>	200 cm
		<i>Diamètre</i>	8 à 10 cm
Pieux en bois (dans le cours d'eau)	Peigne	<i>Longueur</i>	200 cm
		<i>Diamètre</i>	15 à 20 cm
	Treillis	<i>Longueur</i>	200 cm
		<i>Diamètre</i>	15 à 18 cm
Fil de fixation	<i>Type</i>	Fil recuit ou ficelle de jute ou corde coco	
	<i>Dimension</i>	3 mm	
Matériaux terreux	<i>Type</i>	Pierres, terre, graviers utilisés comme lest	

DÉTAILS DE CONSTRUCTION - PEIGNE

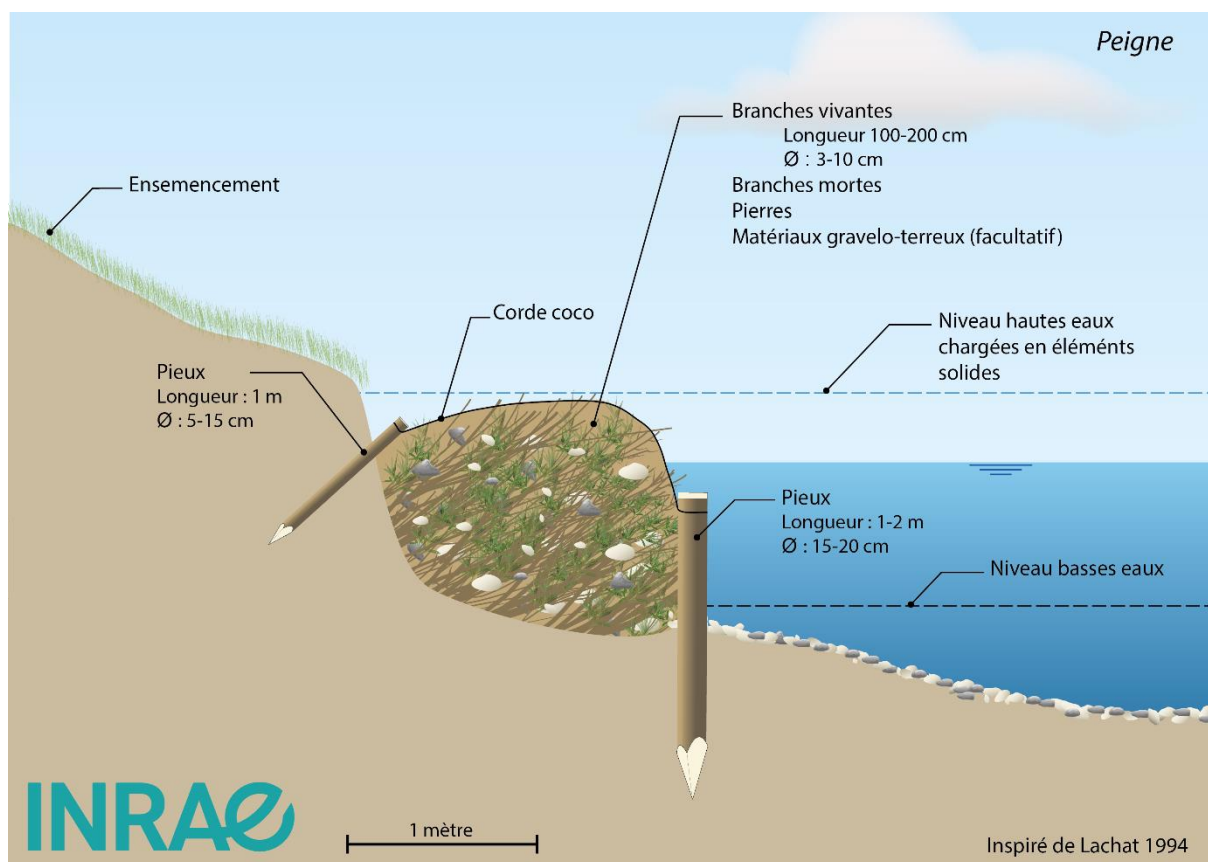


Figure 30 : Profil en vue transversale d'un peigne.

EXÉCUTION - PEIGNE

Les étapes d'exécution présentées ci-dessous s'appuient sur les références suivantes : Adam et al., (2008); Lachat, (1986); Peeters et al., (2020); Sangalli, (2019)¹²

Aucune préparation particulière du terrain n'est nécessaire.

1. **Localisation de la ligne des pieux** : Déterminer l'emplacement des pieux dans le cours d'eau afin de placer la ligne du pied de berge. Enfoncer, par battage mécanique les pieux de plus petites dimensions en haut de la berge et les pieux de grandes dimensions dans l'eau (espacement entre pieux de 100 à 300 cm). Environ 2/3 de la longueur des pieux doit être enterrée, ils ne doivent pas dépasser de plus de 80 cm au-dessus de la surface du sol érodé. Veiller à ne pas rétrécir le lit du cours d'eau.
2. **Placement des couches de branches et matériaux** : Entasser les branches, troncs et arbres « en vrac » en dirigeant tout de même les grosses extrémités en aval. Une grande proportion de saules est souhaitable.

¹² Selon Adam et al., (2008) et Sangalli, (2019), les étapes 1 et 2 sont inversées. Choisir l'exécution qui convient le mieux au terrain en question. Placer les couches de branches avant les pieux peut avoir du sens, mais il faut tenir compte du risque qu'elles se fassent emporter par le courant.

3. **En option - Ajout de matériaux terreux** : Intercaler une ou plusieurs couches de matériaux terreux (environ 50% du volume) entre les branches si l'on sait que le cours d'eau n'est pas très riche en éléments en suspension ou pour pallier à un manque de crues. L'ajout de matériaux terreux est à adapter selon la charge sédimentaire du cours d'eau.
4. **En option - Ajout de pierres** : Placer des pierres et des graviers pour lester la structure et donner du poids entre les couches.
5. **Fixation de la structure** : Attacher solidement tout l'ouvrage avec du fil de fer galvanisé ou cordes biodégradables pour une approche plus écologique (diamètre 3 mm pour du fil de fer) tendu entre les pieux.
6. **Finition** : Une fois le fil de fer ligaturé aux pieux, ces derniers seront définitivement enfoncés (battus mécaniquement) de manière à maintenir tout l'ouvrage le plus compact possible.

DÉTAILS DE CONSTRUCTION – TREILLIS DE BRANCHES

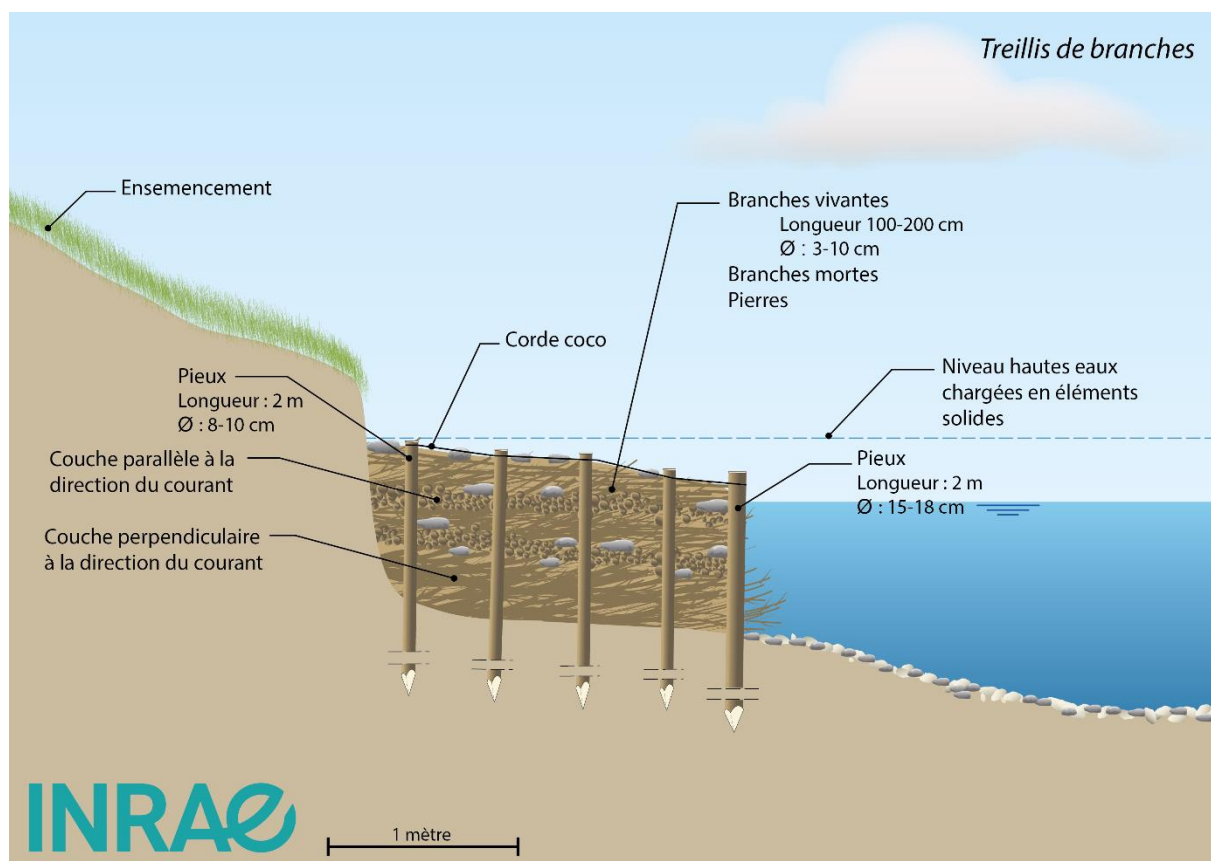


Figure 31 : Profil en vue transversale d'un treillis de branches.

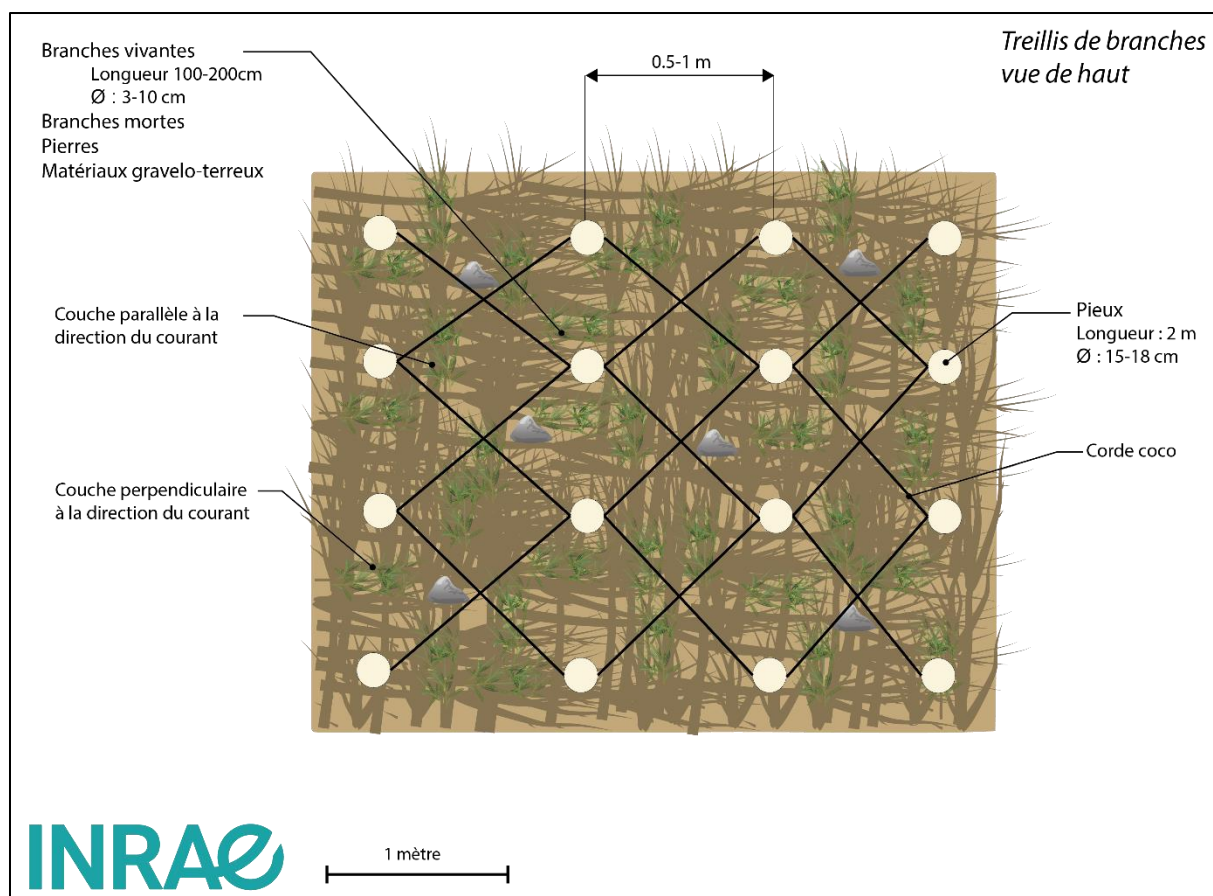


Figure 32: Schéma d'un treillis de branches vue de haut.

EXÉCUTION - TREILLIS DE BRANCHE

Les étapes d'exécution présentées ci-dessous s'appuient sur les références suivantes : Florineth & Molon, (2005); Sangalli, (2019); Zeh, (2000, 2007, 2010).

1. **Localisation de la ligne des pieux** : Déterminer l'emplacement des pieux dans l'eau afin de reconstruire la ligne d'origine de pied de berge. Placer le reste des pieux de manière à former un quadrillage à une distance de 1 m x 1 m les uns des autres pour remplir toute la zone du treillis. Enfoncer les pieux par battage mécanique. Leur longueur varie en fonction de la profondeur de la zone érodée. En principe, enfoncer les pieux sur les 2/3 de leur longueur, en ne dépassant pas 80 cm au-dessus du fond.
2. **Placement des couches de branches et matériaux morts** : Des couches successives de branches mortes sont placées de manière transversale, jusqu'au niveau moyen de l'eau, couvrant toute la surface affectée. La première couche est placée perpendiculairement au sens du courant et les couches successives sont placées alternativement à un angle de 90° par rapport à la couche précédente formant une sorte de treillis.
3. **Placement des couches de branches et matériaux vivants** : La dernière couche est constituée de matériaux vivants, rameaux ou fagots, placés dans le sens du courant et avec les pointes tournées vers l'amont. L'épaisseur totale des branches vivantes et mortes doit être égale à la profondeur de la zone érodée.

4. **Ajout de matériaux terreux** : Remplir et recouvrir les branches d'une couche de terre végétale pour favoriser l'enracinement du matériau vivant.
5. **Ajout de pierres** : Placer des pierres et des graviers pour lester la structure et donner du poids entre les couches.
6. **Fixation de la structure** : Attacher solidement tout l'ouvrage avec du fil de fer galvanisé ou cordes biodégradables pour une approche écologique (diamètre 3 mm fil de fer) tendu entre les pieux.
7. **Finition** : Une fois les pieux fixés entre eux, enfoncer les une dernière fois définitivement (battage mécanique) de manière à maintenir tout l'ouvrage le plus compact possible.

AVANTAGES GÉNÉRAUX (PEIGNES ET TREILLIS DE BRANCHES)

- **Technique simple, rapide et économique (surtout pour le peigne simple)** : Cette méthode permet de protéger et de restaurer les petites incisions et pertes de berges grâce à l'action naturelle de l'eau et au développement de la végétation, à condition que la rivière soit sujette à des crues fréquentes transportant des sédiments (Lachat, 1986; Peeters et al., 2020; Sangalli, 2019; Zeh, 2007). L'utilisation de matériel local réduit les coûts (Sangalli, 2019; Zeh, 2010).
- **Efficacité immédiate et croissante** : L'ouvrage protège immédiatement contre l'érosion (De Antonis & Molinari, 2003; Lachat, 1986) et gagne en robustesse à mesure qu'il se remplit de sédiments fins (Peeters et al., 2020). Les saules contribuent à cet effet en produisant de nouvelles branches qui augmentent la filtration (Lachat, 1986).
- **Utilisation de matériaux morts** : Cette technique valorise les matériaux morts, issus d'espèces non riveraines (Sangalli, 2019).
- **Faible entretien** : Peu d'entretien est nécessaire, mis à part la recharge éventuelle en branches, matériaux terreux et/ou en sédiments (Peeters et al., 2020).
- **Adaptée aux rivières à faible débit** : Elle fonctionne particulièrement bien sur des cours d'eau à faible débit (Campbell et al., 2008).

INCONVÉNIENTS GÉNÉRAUX (PEIGNES ET TREILLIS DE BRANCHES)

- **Limitation selon le type de cours d'eau** : Cette technique est efficace uniquement sur des rivières transportant beaucoup d'alluvions fines et sujettes à des crues fréquentes. Elle est vulnérable sur des cours d'eau à forte énergie ou à faible concentration en matières en suspension (Adam et al., 2008; De Antonis & Molinari, 2003; Lachat, 1986; Peeters et al., 2020; Sangalli, 2019).
- **Risque de rétrécissement du cours d'eau** : Une analyse préalable de la section de la rivière est indispensable pour éviter un rétrécissement du lit (Zeh, 2010).
- **Grande quantité de matériel requise** : La technique demande une quantité importante de végétaux, qu'ils soient morts ou vivants (De Antonis & Molinari, 2003; Sangalli, 2019).

➤ **Méconnaissance et mauvaise perception** : En raison de son apparence désordonnée, l'ouvrage peut être perçu comme accidentel et risque d'être enlevé ou brûlé par méconnaissance (Zeh, 2000, 2010).

COÛTS

Le coût financier est moyen et dépend de la situation du terrain et de l'approvisionnement en matériel. En 2018, le coût pour un peigne en berge par m³, construction et placement des branches vivantes comprises, s'élevait à **47 euros**. Ce montant se répartissait comme suit : 48 % pour la main-d'œuvre, 22 % pour la machinerie, 30 % pour les matériaux et le reste (Sangalli, 2019).

En 2018, le coût pour un treillis de branche en berge par m³, construction et placement des branches vivantes comprises, s'élevait à **67 euros**. Ce montant se répartissait comme suit : 34 % pour la main-d'œuvre, 30 % pour la machinerie, 36 % pour les matériaux et le reste du travail (Sangalli, 2019).

Treillis de branches : variante de Prueckner

Brush Grids, Log brush barrier

Les informations concernant la description et les contextes d'application de cette technique sont issues des références suivantes : Besio & Lucchetta, (1993); De Antonis & Molinari, (2003); Donat, (1995); Schiechl, (1973, 1980); Schiechl & Stern, (1997); Venti et al., (2003).

Schiechl décrit une variante qui a été développée par Prueckner en 1948 et a été installée sur différents cours d'eau depuis. Cette variante a été décrite par la suite par d'autres auteurs (Besio & Lucchetta, 1993; Donat, 1995; Venti et al., 2003).

L'exécution est sensiblement la même que le peigne classique. La différence vient du fait que la première couche de branche doit être morte et placée horizontalement et perpendiculairement au cours d'eau. Puis, des branches vivantes sont, en quelque sorte, plantées presque à la verticale entre les branches mortes. Le reste du déroulé est identique, avec l'ajout de pierres et le battage des pieux. Il n'y a en revanche pas de fixation à l'aide de fil de fer ou autre corde.

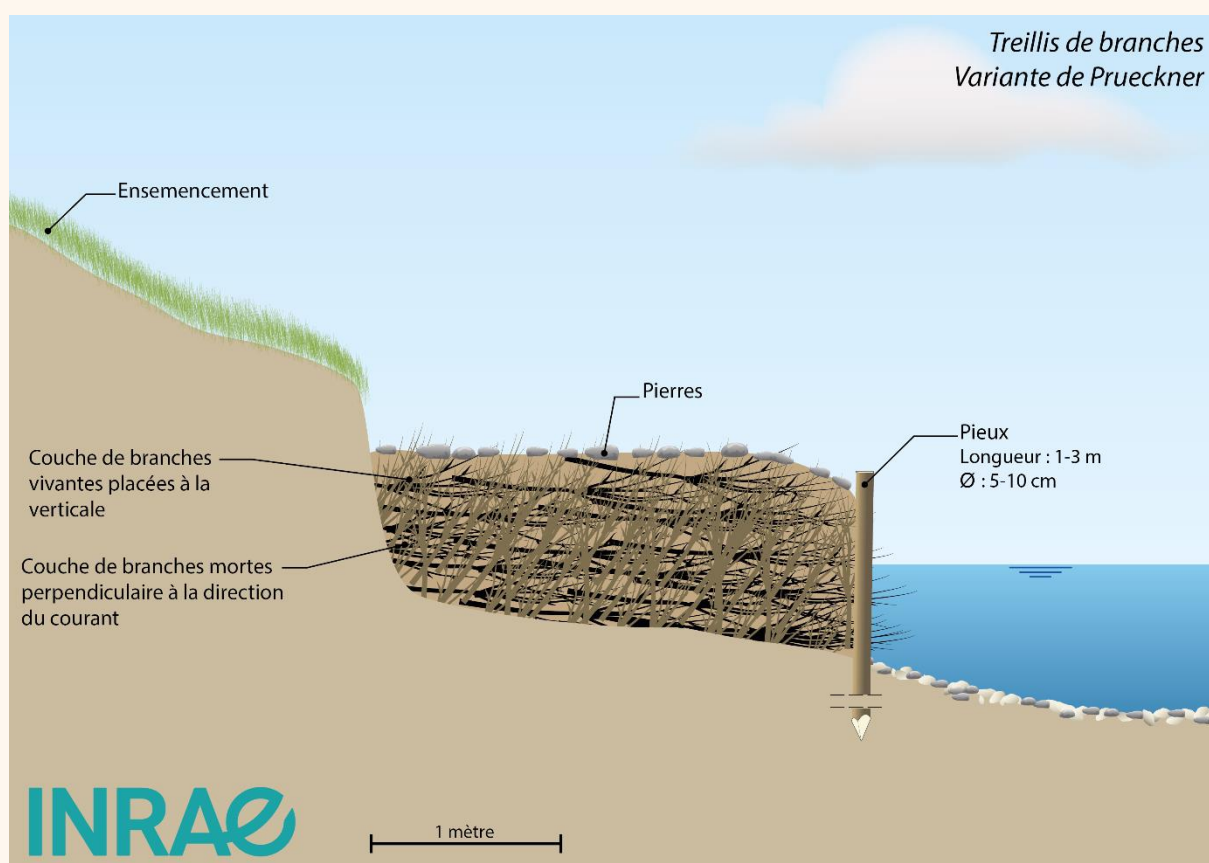


Figure 33 : Profil en vue transversale d'un treillis de branches selon la variante de Prueckner.



Conclusion

Les techniques de génie végétal présentées dans ce guide ne constituent pas un objectif, mais un ensemble d'outils adaptables pour une gestion durable des milieux aquatiques et des territoires. En associant ingénierie écologique et respect des dynamiques naturelles, elles offrent des solutions efficaces pour stabiliser les berges, restaurer les écosystèmes dégradés et répondre à des objectifs multiples, qu'ils soient environnementaux, paysagers ou hydrauliques.

Le génie végétal se distingue des approches strictement minérales par son recours à des matériaux vivants capables de s'intégrer aux évolutions du milieu tout en favorisant la biodiversité et la résilience des écosystèmes. Sa flexibilité en fait une méthode adaptée à une grande diversité de contextes, des sols variés aux hydrologies complexes, tout en répondant aux spécificités locales comme les espèces végétales disponibles. Ces techniques conjuguent technicité et durabilité, tout en offrant des solutions respectueuses des dynamiques écologiques.

Cependant, leur réussite repose sur une compréhension fine des interactions entre la végétation, le sol et l'eau. Une planification rigoureuse est essentielle pour garantir la durabilité des ouvrages, notamment en tenant compte des forces de cisaillement et des limites mécaniques des matériaux vivants. À la différence des structures inertes comme les gabions ou les enrochements, les ouvrages de génie végétal nécessitent un entretien les premières années, comme la taille ou le remplacement des plants non repris, pour assurer leur pérennité.

Ce guide se veut un outil pratique pour les concepteurs, offrant une synthèse des savoirs éprouvés tout en intégrant les évolutions récentes dans ce domaine. En croisant plusieurs expertises, le génie végétal s'inscrit dans une dynamique transdisciplinaire innovante et en constante évolution, capable de répondre aux défis contemporains, qu'il s'agisse du changement climatique, de la perte de biodiversité, de la gestion durable des ressources en eau ou encore des nouveaux enjeux économiques pour la gestion des cours d'eau.

En encourageant une approche intégrée et en ouvrant la voie à de nouvelles innovations, le génie végétal a le potentiel de jouer un rôle clé dans l'aménagement du territoire. Ce guide marque une étape vers une meilleure diffusion de ces pratiques et invite les concepteurs à approfondir leur mise en œuvre dans des projets complexes et ambitieux, inscrits dans les cadres réglementaires nationaux, européens et internationaux.



Références

- 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* (La Documentation française, Éd.). MEDDE.
- Allen, H. H., & Leech, J. R. (1997). *Bioengineering for Streambank Erosion Control. [Technical Report EL-97-98]. Army engineer waterways experiment station Vicksburg.*
- AMEC. (2012). *Design guidelines for erosion and flood control projects for streambank and riparian stability restoration* (AMEC Environment & Infrastructure No. CW2098). The City of Calgary, Water Resources.
- Arizpe, D., Mendes, A., & Rabaça, J. E. (2008). *Sustainable Riparian Zones—A management guide*. Generalitat Valenciana, España. <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/6864>
- Baird, D. C., Fotherby, L., Klumpp, C. C., & Scullock, S. M. (2015). *Bank stabilization design guidelines* (No. SRH-2013-25). U. S. Department of the Interior.
- Barbry, Y. (2002). *Application des techniques végétales pour la protection des berges des voies navigables*. Voies navigables de France (VNF).
- Bayfield, N. G. (1995). Species Selection and Management for Slope Revegetation Projects. In *Vegetation and Slopes : Stabilisation, Protection and Ecology*. Thomas Telford.
- Bentrop, G., & Hoag, J. C. (1998). *The practical streambank bioengineering guide : Interagency riparian/wetland plant development project*. SDA-Natural Resources Conservation Service, Plant Materials Center, Aberdeen. ID.
- Besio, F., & Lucchetta, A. (1993). *Manuale tecnico di ingegneria naturalistica*.
- 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 ouvrages bois*. <http://www.geni-alp.org/ouvrage/files/10/ouvrage.html>
- Boyer, M., Popoff, N., & Piton, G. (2023). *La gestion de la végétation dans le cadre de la compétence GEMAPI*.
- British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries. (2004). *Bio-Engineering Techniques—Drainage Management Guide. Factsheet No. 3*.
- Campbell, S. D. G., Shaw, R., Sewell, R. J., & Wong, J. C. F. (2008). *Guidelines for soil bioengineering applications on natural terrain landslide scars*. 227.
- Corenblit, D., Tabacchi, E., Steiger, J., & Gurnell, A. M. (2007). Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors : A review of complementary approaches. *Earth-Science Reviews*, 84(1), 56-86. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.05.004>
- Corenblit, Steiger, J., Mazal, L., & Till-Bottraud, I. (2020). Relier la biogéomorphologie fluviale à l'écologie évolutive : Un focus sur les arbres riverains pionniers. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 26(1), Article 1. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.14127>
- Cramer, M., & Bates, K. (2002). *Integrated Streambank Protection Guidelines*.
- Datry, T., Dole-Olivier, M.-J., Marmonier, P., Claret, C., Perrin, J. F., Lafont, M., & Breil, P. (2008). La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, 54, 3-18.
- De Antonis, L., & Molinari, V. M. (2003). *Interventi di sistemazione del territorio con tecniche di Ingegneria Naturalistica*. (Regione Piemonte, Torino.).
- Degoutte, G. (2006). *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : Hydraulique et morphologie fluviale appliquées*. Lavoisier, Paris.
- Didier, M., Evette, A., Pires, E., Rousset, J., Prunier, P., Frossard, P. A., Martin, L., & Vivier, A. (2024). *Le bouturage en berges de rivières, guide technique en partenariat avec l'OFB*. <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/datas/et.xhtml?persistentId=doi:10.57745/AUWFDZ>
- Didier, M., Evette, A., Schmitt, E., Leblois, S., Jaymond, Delphine, Evette, J.-B., Mira, E., Raymond, P., & Frossard, P.-A. (2023). *Les fascines de ligneux en génie végétal, guide technique en partenariat avec l'OFB*. https://genibiodiv.inrae.fr/wp-content/uploads/Les_fascines_de_ligneux_INRAE_OFB.pdf
- Donat, M. (1995). *Bioengineering techniques for streambank restoration. A review of Central European practices* (No. Watershed Restoration Project Report No. 2). Ministry of Environment, Lands and Parks and Ministry of Forests.

- Eubanks, C., & Meadows, D. (2002). *A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization*. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Technology and Development Program.
- Evette, A., Labonne, S., Rey, F., Liébault, F., Jancke, O., & Girel, J. (2009). History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in Western Europe. *Environmental Management*, 43(6). <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9275-y>
- Faber, R. (2004). *New techniques for urban river rehabilitation. Specifications for new materials and techniques improve instream morphology soil-bioengineering*. IWHW-BOKU.
- Florineth, F. (2004). *Manuale di ingegneria naturalistica e verde tecnico. Plante al posto del cemento*. (Il Verde Editoriale).
- Florineth, F., & Molon, M. (2005). *Dispensa di ingegneria naturalistica* (Università di Bodenkultur. Istituto di ingegneria Naturalistica e Costruzione del Paesaggio).
- Gray, D. H., & Sotir, R. B. (1996). *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization : A practical guide for erosion control*. John Wiley and Sons, Inc.
- Gurnell, A. M., Corenblit, D., García de Jalón, D., González del Tánago, M., Grabowski, R. C., O'Hare, M. T., & Szweczyk, M. (2016). A Conceptual Model of Vegetation–hydrogeomorphology Interactions Within River Corridors. *River Research and Applications*, 32(2), 142-163. <https://doi.org/10.1002/rra.2928>
- Hoag, C., Box, P. O., & Fripp, J. (2002). *Streambank Soil Bioengineering Field Guide for Low Precipitation Areas*.
- Howell, J. (1999). *Roadside bio-engineering (site handbook)*. Dept. of Roads, His Majesty's Govt. of Nepal.
- Junk, W. J., Bayley, P. B., & Sparks, R. E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences*, 106(1), 110-127.
- Kuntz, C. (2019). *Ecoconception des solutions utilisées dans le cadre du génie écologique—Fiche matériau : Fibres végétales*. [Rapport de stage - Centre de ressources Génie écologique de l'Office français de la Biodiversité (OFB)].
- Labroche, A., Piroux, M., Culat, A., Celle, J., Renaux, B., & CBN Massif central. (2021). *Flore & végétations des ripisylves de Loire Forez agglomération : Guide d'évaluation de l'état de conservation* (Conservatoire botanique national du Massif central, Éd.). Conservatoire botanique national du Massif central.
- Lachat, B. (1986). *Techniques végétales et constructions vivantes pour les cours d'eau*.
- Lachat, B. (1994). *Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales (en collaboration avec P. Adam, P.-A. Frossard, R. Marcaud)*. Ministère de l'Environnement.
- Lavaine, C. (2013). *Evaluation des capacités biotechniques de boutures de Salicaceae et Tamaricaceae sur un gradient de sécheresse* [These de doctorat, Lyon, École normale supérieure]. <https://www.theses.fr/2013ENSL0851>
- Leiser, A. T. (1994). *Biotechnical approaches for shoreline erosion control. Notes from "Reservoir Shoreline Erosion/Revegetation Workshop,"* (U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.).
- Lequertier, E., Berlioz, J.-P., Gonthier, C., & Muller, T. (2015). *Travaux de génie végétal* (E. de Bionnay, Éd.; Vol. 1-N.C.1-R0).
- Lewis, L. (2000). *Soil bioengineering : An alternative for roadside management* [A practical guide]. United States Department of Agriculture.
- Maiolini, B., & Bruno, M. C. (2007). The River Continuum Concept revisited : Lessons from the Alps. *Alpine space - man & environment*, 3, 67-76.
- Mohseni, O., Weiss, J. D., Cantelli, A., & Wilson, B. N. (2004). *Scoping Study for the Development of Design Guidelines for Bioengineering in the Upper Midwest*. <https://hdl.handle.net/11299/806>
- Morgan, R. P. C., & Rickson, R. J. (2003). *Slope Stabilization and Erosion Control : A Bioengineering Approach: A Bioengineering Approach*. Taylor & Francis.
- Naiman, R. J., & Décamps, H. (1997). The Ecology of Interfaces : Riparian Zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28(1), 621-658. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621>
- Nelson, C. R., Hallett, J. G., Romero Montoya, A. E., Andrade, A., Besacier, C., Boerger, V., Bouazza, K., Chazdon, R., Cohen-Shacham, E., Danano, D., Diederichsen, A., Fernandez, Y., Gann, G. D., Gonzales, E. K., Gruca, M., Guariguata, M. R., Gutierrez, V., Hancock, B., Innecken, P., ... Weidlich, E. W. A. (2024). *Standards of practice to guide ecosystem restoration : A contribution to the United Nations Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030*. FAO, Washington, DC, SER & Gland, Switzerland, IUCN CEM. <https://doi.org/10.4060/cc9106en>

- Pautou, G., Girel, J., Peiry, J.-L., Hughes, F. M. R., Richards, K., Foussadier, R., Garget-Duport, B., Harris, T., & Barsoum, N. (1996). Les changements de végétation dans les hydrosystèmes fluviaux. L'exemple du Haut-Rhône et de l'Isère dans le Grésivaudan. *Revue d'écologie alpine*, 3, 41-66.
- Peeters, A., Verniers, G., Houbrechts, G., Hallot, E., & Petit, F. (2020). *Protections de berges en génie végétal : Conception, application, suivi et recommandations*.
- Piégay, H., Pautou, G., & Ruffinoni, C. (2003). *Les forêts riveraines des cours d'eau : Écologie, fonctions et gestion*. CNPF-IDF.
- Poff, N. L., & Ward, J. V. (1989). Implications of Streamflow Variability and Predictability for Lotic Community Structure : A Regional Analysis of Streamflow Patterns. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46(10), 1805-1818. <https://doi.org/10.1139/f89-228>
- Preti, F., Capobianco, V., & Sangalli, P. (2022). Soil and Water Bioengineering (SWB) is and has always been a nature-based solution (NBS) : A reasoned comparison of terms and definitions. *Ecological Engineering*, 181, 106687. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106687>
- Roadside Manual. (2023). *Chapter 740 Soil Bioengineering*.
- Sangalli, P. (2019). *BIOINGENIERÍA FLUVIAL. Manual técnico para el ámbito cantábrico* (Proyecto H2O Gurea.).
- Schiechtl, H. M. (1973). *Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau : Grundlagen lebende baustoffe Methoden*.
- Schiechtl, H. M. (1980). *Bioengineering for land reclamation and conservation*. University of Alberta Press. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Bioengineering+for+land+reclamation+and+conservation&author=Schiechtl%2C+Hugo+M.&publication_year=1980
- Schiechtl, H. M., & Stern, R. (1996). *Ground bioengineering techniques. For slope protection and erosion control*. Blackwell.
- Schiechtl, H. M., & Stern, R. (1997). *Water bioengineering techniques for watercourse bank and shoreline protection* (L. Jaklitsch, Trad.; Blackwell Science). David H. Barker.
- Tourbier, J. T., & Westmacott, R. N. (2005). *Manual of urban rivers rehabilitation techniques* (No. A contribution to work package 8, Chapter 5). Dresden University of Technology.
- UICN. (2016). *Union Internationale pour la Conservation de la Nature [Rapport Annuel 2016]*.
- USDA. (1996). *Engineering Field Handbook -Ch 16*.
- Venti, F., Bazzurro, F., Palmeri, F., Uffreduzzi, T., Venanzoni, R., & Gibelli, G. (2003). *Manuale tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni* D. Venti, F. Bazzurro, F. Palmeri, T. Uffreduzzi, R. Venanzoni and G. Gibelli (Provincia_di_Terni ed.).
- Waterways Restoration Institute and & Urban Creeks Council. (2006). *STREAM BIOENGINEERING WORKSHOP HANDBOOK: Using Natural Materials and Non-Structural Techniques to Combat Soil Erosion and Restore Creeks*.
- Zeh, H. (2000). *Méthodes de construction du génie biologique*. Office fédéral des eaux et de la géologie.
- Zeh, H. (2007). *Ingenieurbiologie : Handbuch Bautypen. Génie biologique : Manuel de construction. Ingegneria naturalistica : Quaderno delle opere tipo. Soil bioengineering : Construction type manual. Ingegneria biologica : Manual tecnico*. Société suisse du génie biologique et Fédération Européenne pour le génie biologique.
- Zeh, H. (2010). *Génie biologique et aménagement de cours d'eau : Méthodes de construction. Guide pratique*. Office fédéral de l'environnement (OFEV). <http://www.biodiversiteetbati.fr/Files/Other/DocComplGTBPU/F22-GenieBiologiqueAmenagementCoursDEau-OFEV.pdf>
- Zuffi, D. (1989). *Génie biologique—Cours sur la stabilisation végétale des talus*. Inspection cantonale des forêts.

Liste des figures

Figure 1: Clayonnage, Esaias Van de Velde (1587/91-c1630), « The Great Flood of January 10, 1624 or Repairing the Broken Dike on the River Lek by Vianen », 1624.	3
Figure 2: Matelas de saule - Un groupe de travailleurs du département d'ingénierie des États-Unis déplaçant des nattes de saule dans la rivière ; celles-ci étaient la base des barrages en ailes sur le fleuve Mississippi, vers 1920, University of Wisconsin-La Crosse, Murphy Library, Special Collections.	4
Figure 3 : Exemples de parties végétales servant d'éléments structurants pour des aménagements de protection (graines, boutures, plançons ou plante entière) © N. Daumergue et S. De Danieli.	6
Figure 4: Structure riveraine résultant des quatre descripteurs majeurs de l'écosystème : longitudinal, latéral, vertical et temporel. La répartition de la végétation varie selon les conditions de stabilité : herbacées sur les zones récemment remaniées, arbustives sur les zones intermédiaires plus stables, et arborées sur les secteurs où la stabilité s'est installée durablement. ©S. De Danieli.	7
Figure 5: Organisation transversale de la végétation riveraine en fonction du gradient d'humidité et de stabilité. Les héliophytes colonisent les secteurs les plus proches de l'eau et instables. Plus en retrait, les arbustes pionniers (saules) et post-pionniers (saules, aulnes) s'installent sur des sols plus stables, suivis par la forêt mature composée de frênes, hêtres, et chênes. Les groupements pionniers alluviaux peuvent occuper les bancs alluviaux, les zones les plus instables et susceptibles d'être inondées.	9
Figure 6 : Plantation d'héliophytes sur un géotextile en berge de rivière © S. De Danieli.	13
Figure 7: Banquette d'héliophytes à la mise en place et après une saison de végétation © A. Evette.	14
Figure 8 : Banquette d'héliophytes développées en berge à eaux calmes © A. Evette.	15
Figure 9: Profil en vue transversale d'une banquette d'héliophytes avec géotextile biodégradable et résistant, en berge de cours d'eau.	17
Figure 10: Travaux de plantation d'héliophytes sur une berge renforcée par un géotextile biodégradable, suivant les différentes étapes de mise en place depuis la préparation du trou, jusqu'au tassement du sol après plantation. © Grenoble Alpes Métropole.	18
Figure 11: Fascine végétalisée d'héliophytes en berge © B. Gerfand.	20
Figure 12: Profil en vue transversale d'une fascine d'héliophytes en pied de berge de cours d'eau. Cette technique peut également se retrouver sous d'autres formes, avec en option le treillis coco, et les ramilles anti-affouillement. La disposition du géotextile sera alors adaptée pour assurer le bon ancrage de l'ouvrage dans la berge.	22
Figure 13: Etapes successives de mise en œuvre d'une fascine d'héliophytes en pied de berge. © A. Evette.	23
Figure 14 : Plantation de ligneux sur une berge © INRAE.	26
Figure 15 : Plantation d'un arbre au sein d'un projet de restauration, avec un grillage protecteur individuel © INRAE.	27
Figure 16: Profil en vue transversale d'une plantation de ligneux en berge de cours d'eau avec un aménagement en pied de berge.	30
Figure 17 : Couche de branches à rejets à San Martino in Badia (Italie) (A) à la mise en place en 2006, (B) en 2008 et (C) son évolution en 2024 © G. Pederio, A. Evette et J. Rousset.	33
Figure 18 : Couche de branches à rejets utilisée sur un talus en berge de rivière. Les branches sont positionnées les unes à côté des autres, elles sont recouvertes d'une très fine couche de terre puis d'un géotextile © S. De Danieli.	34
Figure 19 : Berge protégée par une couche de branches à rejet ayant fait l'objet de travaux d'excavation pour observer les tiges et systèmes racinaires développés © Department of hydraulic engineering, Autonomous Provinz of Bozen/Bolzano South Tyrol / Italy.	35
Figure 20: Profil en vue transversale d'une couche de branches à rejets avec un aménagement en pied de berge.	36
Figure 21: Profil en vue transversale de lits de plants et plançons en berge de cours d'eau avec un aménagement en pied de berge. Les plants sont insérés au même niveau que les plançons, en ligne, comme des simples plantations.	42
Figure 22 : Lits de plants et plançons avec boudins de géotextile au-dessus d'un caisson végétalisé © S. De Danieli.	45
Figure 23 : Profils en vue transversale de lits de plants et plançons (A) avec géotextile ; (B) avec pieux.	47
Figure 24 : Tressage de saule en berge de rivière ayant bien repris © A. Evette.	49
Figure 25 : Iconographie de clayonnage en pente par Arnould, C. (1913).	50
Figure 26 : Profil en vue de face d'un tressage en pied de berge.	52
Figure 27 : Profil en vue transversale d'un tressage en pied de berge.	52
Figure 28 : Treillis de branche en bord de rivière ©D. Jaymond.	56
Figure 29 : Peigne en bord de rivière ©D. Jaymond.	57
Figure 30 : Profil en vue transversale d'un peigne.	60
Figure 31 : Profil en vue transversale d'un treillis de branches.	61
Figure 32: Schéma d'un treillis de branches vue de haut.	62
Figure 33 : Profil en vue transversale d'un treillis de branches selon la variante de Prueckner.	65

Liste des tableaux

Tableau 1: Gamme de résistance à la traction en fonction du type de végétation considéré	11
Tableau 2: Tableau d'aide à la décision concernant les principales techniques de génie végétal, adapté et complété depuis Gray & Sotir (1996).....	12
Tableau 3: Contrainte tractrice admissible par la plantation d'hélophytes (Schiechl & Stern, 1997)	15
Tableau 4: Caractéristiques des matériaux utilisés pour la plantation d'hélophytes (Schiechl & Stern, 1997; Adam et al., 2008; Zeh, 2010).....	16
Tableau 5: Contrainte tractrice admissible par la fascine d'hélophytes (Schiechl & Stern, 1997)	21
Tableau 6 : Caractéristiques des matériaux utilisés pour la fascine d'hélophytes (Donat, 1995; Schiechl & Stern, 1997; Barbry, 2002; Eubanks & Meadows, 2002; Lequertier et al., 2015; Peeters et al., 2020).....	22
Tableau 7: Contrainte tractrice admissible pour la plantation de ligneux (Schiechl & Stern, 1997)	28
Tableau 8: Caractéristiques des matériaux utilisés pour la plantation de ligneux (Lachat, 1986, 1994; Adam et al., 2008; Zeh, 2010; Sangalli, 2019)	29
Tableau 9 : Contrainte tractrice admissible pour la couche de branches à rejets (Barbry, 2002; Sangalli, 2019).....	35
Tableau 10: Caractéristiques des matériaux utilisés pour la couche des branches à rejets (Schiechl, 1980; Besio & Lucchetta, 1993; Lachat, 1994; Donat, 1995; USDA, 1996; Allen & Leech, 1997; Schiechl & Stern, 1997; Zeh, 2000; Eubanks & Meadows, 2002; Hoag et al., 2002; Venti et al., 2003; Tourbier & Westmacott, 2005; Adam et al., 2008; Lequertier et al., 2015; Sangalli, 2019; Peeters et al., 2020)	36
Tableau 11: Contrainte tractrice admissible pour les lits de plants et plançons (Sangalli, 2019)	40
Tableau 12: Caractéristiques des matériaux utilisés pour les lits de plants et plançons (Schiechl, 1980; Zuffi, 1989; Besio & Lucchetta, 1993; Gray & Sotir, 1996; USDA, 1996; Allen & Leech, 1997; Bentrup & Hoag, 1998; Howell, 1999; Lewis, 2000; Eubanks & Meadows, 2002; De Antonis & Molinari, 2003; Venti et al., 2003; Florineth, 2004; Degoutte, 2006; Waterways Restoration Institute and & Urban Creeks Council, 2006; Campbell et al., 2008; Zeh, 2010; AMEC, 2012; Lequertier et al., 2015; Sangalli, 2019).	41
Tableau 13 : Distance approximative entre les lits de plants et plançons en fonction de la pente selon Gray & Sotir (1996)	43
Tableau 14: Caractéristiques des matériaux utilisés pour le tressage vivant (Zuffi, 1989; Besio & Lucchetta, 1993; Schiechl & Stern, 1996; Zeh, 2000; Hoag et al., 2002; Venti et al., 2003; Faber, 2004; Florineth & Molon, 2005; Adam et al., 2008; Arizpe et al., 2008; Lequertier et al., 2015; Peeters et al., 2020).	51
Tableau 15: Contrainte tractrice admissible pour les peignes et les treillis (Sangalli, 2019)	58
Tableau 16: Caractéristiques des matériaux utilisés pour les peignes et treillis de branches (Besio & Lucchetta, 1993; Florineth & Molon, 2005; Peeters et al., 2020; Sangalli, 2019; Venti et al., 2003; Zeh, 2000, 2007, 2010).....	59

LESSEM, 2 rue de la Papeterie
38402 Saint-Martin-d'Hères

