

Projet de Fin d'Études (PFE) 2021-2022

État de l'art des techniques de génie végétal appliqués aux berges de cours d'eau.



A. Evette (Irstea)

État de l'art des techniques de génie végétal appliquées aux berges de cours d'eau.

**Aménagements pour le contrôle de l'érosion et
l'amélioration de la biodiversité.**

Séraphine Grellier

Claire Ginestet

2021-2022

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à la relecture de ce rapport.

Je remercie grandement ma tutrice pédagogique, Mme Grellier qui m'a guidé dans la réalisation de ce Projet de Fin d'Études. Merci pour vos conseils, votre écoute et pour l'accompagnement que vous m'avez témoigné.

J'adresse mes remerciements à Mme Greulich qui a accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier M. Abid, tuteur professionnel qui m'a partagé son expertise, m'a aidé dans mes missions au sein de l'entreprise Eurovia Béton.

SOMMAIRE

Introduction	1
I. Le génie végétal : contexte et évolution.....	3
a. Le phénomène d'érosion des cours d'eau	3
b. Les techniques de restauration écologique des sols	6
c. Les critères à considérer, et la planification des techniques	10
II. Le contrôle de l'érosion.....	13
a. Les différentes contraintes et ruptures liés au milieu riverain	13
b. La résistance des techniques face à l'érosion	17
c. Le rôle de la végétation dans le maintien du sol	21
III. La préservation de la biodiversité	24
a. La diversité et succession végétale, potentialités des différentes techniques.....	24
b. La biodiversité de la faune terrestre	27
c. La diversité et abondance des organismes aquatiques	29
Conclusion.....	32
Bibliographie :.....	33
Annexes	35
Annexe 1 : Autres techniques de génie végétal, sources : (Houbrechts et al., s. d.; Li & Eddleman, 2002).....	35
Annexe 2 : Schéma d'aide à la décision : diagnostic de l'érosion de berge et évaluation de la nécessité d'intervention, source : (Houbrechts et al., s. d.) provenant d'une étude de Valé et al. (2013)	39
Annexe 3 : Clé de détermination du type de rupture en masse de berges, source : (Watson & Basher, 2006)	40
Annexe 4 : interprétation de la stabilité de berges en coupe de profil de l'étude de Thorne 1998, source : (Watson & Basher, 2006)	41

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Les différentes zones des berges de cours d'eau, source : (Li & Eddleman, 2002).....	6
Figure 2 : Représentation schématique des techniques : mixtes, et génie civil (enrochement), source (Cavaillé et al., 2013)	7
Figure 3 : Représentations schématiques de la technique fascine, source : (Li & Eddleman, 2002; Peeters et al., 2018)	8
Figure 4 : Représentation schématique de la technique Peigne, source : (Houbrechts et al., s. d.)	8
Figure 5 : Schéma de représentation de la technique de caissons végétalisés, source : (Li & Eddleman, 2002; Peeters et al., 2018)	9
Figure 6 : Image de modélisation de la méthode des épis végétaux, source : (Peeters et al., 2018).....	9
Figure 7 : Les étapes de planification et d'implémentation d'un projet de génie végétal, source : (Allen & Leech, 1997)	10
Figure 8 : Schéma d'aide à la décision de technique de génie végétal adaptée aux caractéristiques environnementales du site,	11
Figure 9 : Les mécanismes de dégradations hydraulique de l'étude de O'Neill and Kuhns 1994, source : (Watson & Basher, 2006)	13
Figure 10 : Schéma glissement superficielle de sol de berges	14
Figure 11 : Schéma de la rupture de berge par rotation	14
Figure 12 : Schéma de la rupture de dalle	14
Figure 13 : Schémas des mécanismes de la rupture en porte-à-faux, source : Ashbridge 1995	15
Figure 14 : Schéma de la rupture en porte-à-faux	15
Figure 15 : Schéma d'écoulement de terre humide	15
Figure 16 : Schéma de la rupture par éclatement, source : O'Neill and Kuhns 1994	15
Figure 17 : Tableau bilan des différentes valeurs de résistances à la contrainte de cisaillement des techniques de protections de berges en fonction de leur âge, source : (Frossard, 2009)	17
Figure 18 : Tableau bilan des valeurs de contrainte de cisaillement en fonction de l'âge. Source : (Evette et al., s. d.).....	18
Figure 19 : Schéma de l'expérience menée par (Posi et al., 2018) sur la technique des Fascines.	19
Figure 20 : Nombre moyen de genre de coléoptères sur les trois types de berges. Les lettres différentes indiquent une différence statistique entre les échantillons. Les barres d'erreur indiquent les erreurs standard. Source : (Cavaillé et al., 2013).....	27
Figure 21 : Boxplot de la richesse spécifique de différents groupes échantillonnés sur les différentes techniques et milieux de l'étude. Source : (Cavaillé et al., 2018).....	29
Figure 22 : Composition (en %) des matériaux composant les berges de six sites d'étude (Sudduth & Meyer, 2006)	30

Introduction

Le génie écologique pour (Rey et al., 2015) « désigne la mise en œuvre des techniques utilisant le vivant, végétal ou animal, pour la qualité environnementale des milieux que l'on cherche à restaurer, créer, préserver ou gérer. Le vivant constitue donc un moyen et/ou une finalité. » Le génie végétal est un sous-ensemble du génie écologique il constitue la mise en œuvre de techniques utilisant des végétaux et leurs propriétés mécaniques et/ou biologique pour dans le cas de notre étude : contrôler, stabiliser et gérer des berges érodées.

Le génie biologique des sols pour (Gray & Sotir, 1996) consiste à imiter les processus naturels comme l'ancrage des racines, en intégrant du matériel végétal dans la conception de projets d'ingénierie, afin de protéger différentes structures de l'érosion. Pour ces mêmes auteurs, le génie biologique des sols utilise des plantes vivantes et des parties de plantes par la mise en place de boutures et des tiges vivantes dans le sol, ou dans des structures en terre, permettant ainsi de fournir un support mécanique supplémentaire au sol, et agissant comme des drains hydrauliques, des barrières aux mouvements de la terre, et des pompes ou des mèches hydrauliques. Le feuillage et les tiges des arbustes et des arbres sur les berges des cours d'eau peuvent réduire les vitesses d'écoulement et dissiper l'énergie de l'écoulement en redistribuant la configuration et la direction de l'écoulement. Le végétal joue donc un rôle prépondérant, il est au cœur du fonctionnement de ces techniques. Ces techniques sont donc des alternatives au génie civil.

Les techniques d'ingénierie biologique liés à la stabilisation des berges ont vu leur apogée en Europe pendant le XVIII – XIX ème siècle, en effet les ingénieurs de l'époque élaboraient des guides techniques de réalisation d'ouvrages. Les techniques de génie végétal ont connu un abandon pendant les trentes glorieuses, dû à l'introduction de combustibles fossiles, l'amélioration des transports et une plus grande mécanisation. Cela a rendu les grandes structures en pierre ou en béton beaucoup plus faciles et moins chères à construire, elles représentaient des solutions rapides avec peu de besoin de main d'œuvre et solides face aux problèmes d'érosion et de protection des installations socio-économiques. Néanmoins depuis une trentaine d'années, les techniques de génie végétal ont connu un regain d'intérêt et grâce aux nouvelles technologies apparues leur mise en œuvre a été beaucoup plus facile (excavatrice mécanique et une scie à chaîne par exemple). (Evette et al., 2009)

De sérieuses perturbations comme la construction de barrages et de centrales hydroélectriques vont impacter indirectement l'écosystème riverain qui en bordure de rivière va subir une augmentation de la déstabilisation des berges, une augmentation de l'érosion, une migration latérale des cours d'eau et de la sédimentation, qui se reflètent directement dans le nombre et la position des bancs de sable. L'érosion des berges des cours d'eau est en fait un processus naturel qui, au fil du temps, a entraîné la formation de plaines d'inondation et de terrasses alluviales, ainsi, même les systèmes fluviaux stables ont des berges qui s'érodent, (Rodrigues Holanda & da Roch, 2011) c'est la dynamique naturelle sédimentaire du cours d'eau. Néanmoins les modifications hydrologiques dues aux constructions de barrage changent les structures et le fonctionnement sédimentaire, augmentant la fréquence des inondations en aval, provoquant de nouvelles fonctions climatiques locales et induisant une perte d'eau. Cela a un impact majeur car les sédiments retenus ne vont pas être restitués en aval (Carone et al., 2006), cela accrue le phénomène d'érosion des berges en aval.

Le génie civil par la prévention des inondations et par le contrôle des migrations des cours d'eau a fortement impacté les dynamiques sédimentaires et les régimes d'écoulement des cours d'eau. Ainsi les impacts sur la biodiversité aquatique et terrestre sont conséquents puisque leur habitat a été profondément modifié. De plus le changement induit par les techniques dites dures de génie civil influe sur la structure et la composition des espèces végétales, en effet ces dernières favorise

l'introduction d'espèces invasives (Cavaillé et al., 2012) engendrant une simplification de la biodiversité de la zone riparienne.

La zone riparienne (zone plus ou moins large longeant les cours d'eau recouverte de végétation ou ripisylve) représente seulement 1% du territoire européen (Weissteiner et al., 2016) et concentre de multiples espèces spécifiques (Janssen et al., 2019), ces milieux représentent donc un enjeu majeur de conservation de la biodiversité. Les zones riveraines sont constituées d'une diversité de communautés de plantes spécialistes qui sont adaptés à des variations de taux d'humidité et aux modifications hydrologiques (Tabacchi et al., 1998). En effet la proximité avec les cours d'eau les rend sujettes aux inondations et donc certaines plantes sont capables de s'adapter à des milieux anoxiques. La végétation de ces milieux forme un habitat ou un abri, permanent ou temporaire, pour de nombreuses espèces animales (insectes, amphibiens... etc) qui vont utiliser la zone riparienne pour leurs cycles de vie notamment pour se reproduire ou pour remplir certaines fonctions vitales tels que se nourrir ((Petersen et al., 2004; Semlitsch & Bodie, 2003). Les berges faisant partie de la zone riparienne sont des composantes essentielles de la fonction écologique du paysage (dispersion des populations) (Décamps, 2011; Rodriguez-Iturbe et al., 2009). La zone riparienne forme un corridor écologique permettant la migration de certaines espèces à l'échelle régionale (Johansson et al., 1996; Machtans et al., 1996), et donc permettent de diminuer les discontinuités physiques et écologiques du paysage notamment créées par les ouvrages de génie civil (enrochement, recalibrage, bétonnage, endiguement) (Evette et al., 2017). La ripisylve prodigue de nombreux services écosystémiques à l'Homme notamment en régulant la quantité d'eau lors des inondations (zone tampon) et en améliorant la qualité de l'eau car la végétation a un rôle de filtration. Cette interface entre le milieu aquatique et terrestre permet de connecter les espèces entre elles, de favoriser l'échange de matière et d'énergie. (Tisserant et al., 2021)

Nous nous demanderons donc en quoi la performance des techniques de génie végétal permet une amélioration de la dynamique végétale et constitue un habitat plus favorable pour les espèces animales et végétales tout en permettant un contrôle de l'érosion. Pour répondre à cette question dans un premier temps nous étudierons dans quel contexte s'inscrit la mise en place de ces techniques, nous verrons donc les différentes techniques existantes et quelles sont les caractéristiques à considérer avant leur mise en place. Dans un second temps, il sera judicieux de comprendre le phénomène d'érosion qui a lieu au niveau des berges des cours d'eau. Comment est-il possible de mesurer, de quantifier la résistance de chaque technique et comment les plantes sont des éléments centraux de la gestion de l'érosion au niveau de ces techniques. Dans un troisième temps nous aborderons la diversité végétale présente sur les différentes techniques et comment elle constitue des habitats favorables sur la zone riparienne. Pour terminer par une analyse de la biodiversité animale terrestre et aquatique et comment les différentes techniques étudiées contribuent au développement de la faune.

I. Le génie végétal : contexte et évolution

a. Le phénomène d'érosion des cours d'eau

La restauration écologique notamment le génie végétal répond à des enjeux et contextes variés au niveau des rivières, ces projets fédèrent et concernent de nombreux acteurs différents tels que les syndicats de rivière, les collectivités publiques, les bureaux d'études spécialisés, les entreprises, les pépinières, les chercheurs, les usagers et riverains des cours d'eau concernés. (Frossard, 2009) De nombreux guide méthodologiques ont été publiés dans différents pays, un des guide français le plus couramment cité est l'ouvrage d'(Adam & Debiais, s. d.).

Les techniques de génie végétal s'inscrivent dans un contexte plus large, et ont une longue histoire les premières traces datent d'il y a deux mille ans en Chine et dans la Rome Antique (Evette et al., 2009). En rappelant leur contexte historique, nous essayons de comprendre l'évolution de ces pratiques. Les différentes phases d'évolution de ces techniques ancestrales dans l'Europe de l'Ouest ont été :

- Un regain d'intérêt au XVIII – XIX ème siècle : avec l'élaboration de guides techniques de réalisation d'ouvrages par des ingénieurs Européen.
- Une apogée : fin XIX ème siècle en France, Italie et Suisse dans le milieu montagneux pour limiter l'érosion dû aux pratiques anthropiques de déforestation et de surpâturage.
- Un abandon pendant les trentes glorieuses dû à la mécanisation, et au moindre coût financier des techniques considérées comme plus sécuritaire, sûres de génie civil.
- Un essor depuis une trentaine d'année dans les projets de restaurations de berges de cours d'eau notamment.

Ainsi depuis les années 80-90, le génie végétal connaît un renouveau qui s'explique par les nombreux avantages prodigués par ces méthodes s'inspirant des milieux naturels. L'importance de l'intégration paysagère de ces techniques dans les milieux naturels ou semi-naturels qui donc s'avère être meilleure que celle du génie civil. Cet aménagement forme ensuite un milieu naturel à part entière, qui par la création d'une diversité d'habitats potentiels (pour la nidification, le nourrissage ou l'abri) favorise la biodiversité et forme par ailleurs une structure guide dans le paysage et améliore la fonctionnalité du corridor écologique riverain. Au niveau des cours d'eau, ces techniques n'influencent pas les nappes phréatiques et par ailleurs améliorent la qualité physico-chimique des cours d'eau (ombrage, piégeage des particules fines, diminution des pollutions par l'absorption des intrants ou de la terre lessivée d'origine agricole). Et contrairement au génie civil ces techniques n'ont pas d'impact négatif sur le moyen et long terme et restaurent le fonctionnement de l'écosystème qui a été dégradé lors de la phase chantier. (Frossard, 2009)

L'avantage majeur des techniques de génie végétal appliqué à la stabilisation des berges est sa capacité à avoir une résistance qui augmente au fil du temps, contrairement à l'ingénierie « dur », ainsi les plantes notamment par l'interaction entre les racines et le sol vont s'étendre et la résistance de l'ouvrage va croître avec le temps. La protection des berges via les techniques de génie végétal, grâce aux systèmes racinaires et au couvert végétal permettent une meilleure agrégation des particules du sol dans une situation de faible cohésion (sol sableux). Ainsi cela réduit le processus de ruissellement, entraînant alors une diminution du taux d'érosion et de la sédimentation du lit mineur de la rivière. (Rodrigues Holanda & da Roch, 2011)

Les techniques de génie végétal dans la restauration ou la stabilisation de berges font appels parfois à d'autres techniques et matériaux. Par ailleurs si l'usage de bois (non planté) devient le matériau dominant on parle alors de génie forestier, et lorsque les techniques végétales sont couplées aux méthodes de génie civil on parle de techniques mixtes (Adam & Debiais, s. d.). L'ensemble de ces méthodes et techniques sont présentées dans la partie suivante.

L'objectif du génie végétal n'est pas d'utiliser les plantes de manière superficielle, et l'intérêt n'est pas de multiplier l'ensemble de ces techniques de manière homogène mais bien d'analyser là

où les interventions s'avèrent nécessaires. En effet parfois certaines dérives sont observées et ne prennent pas en compte une réelle conservation de la biodiversité ou une analyse de l'intégration paysagère (Frossard, 2009).

Les aspects réglementaires liés à la protection de berges en génie végétal sont relativement peu précis. Le code de l'environnement cadre et réglemente les pratiques de protection de berges liés au génie civil dans l'article R 214-1 du Code de l'environnement. Ainsi les techniques de protection de berge faisant appel au génie végétal sont dispensées de procédures administratives qui peuvent parfois être relativement conséquentes (Frossard, 2009). Néanmoins il est judicieux de faire appel au service de la police de l'eau du département pour connaître les différentes règles et enjeux liés au site, et avoir leur accord avant la mise en place de ces techniques. (Frossard, 2009). Les travaux de génie végétal des sols des berges de cours d'eau sont souvent utiles sur des sites sensibles ou escarpés, dans des zones à accès limité, ou lorsque l'espace de travail pour les machines lourdes n'est pas envisageable.

En protégeant les berges via la mise en œuvre de techniques liées au génie végétal, cela réduit ou évite l'érosion des berges. En mettant en place ces actions on empêche donc le mouvement du canal de la rivière, qui peut être de direction verticale et horizontale, s'illustrant par des méandres, des tresses, ou le déplacement et le changement du chemin de la rivière (on parle de rivière en tresse). (Rodrigues Holanda & da Roch, 2011).

Les bassins versants du monde entier ont vu une multiplication des installations de barrages hydroélectriques et des prélèvements d'eau de surface pour assurer l'approvisionnement en eau pour différents usages (industriel, domestique, agricole), pour assurer une production d'électricité, ou pour la protection contre les inondations (Rodrigues Holanda & da Roch, 2011). Cependant la construction de barrage engendre une modification irréversible de la morphologie du milieu naturel. Induisant un changement dans la dynamique du cours d'eau qui a naturellement un lit mineur qui va être modifié avec le temps. La fréquence d'inondation des zones à proximité augmente, et il y a une perte d'eau et de sédiments qui devraient être rendus aux cours d'eau en aval (Carone et al., 2006). En outre, suite à la construction de ces barrages, les terres adjacentes de plaine d'inondation sont actuellement inondées et le régime d'écoulement de la rivière a été modifié. Ces perturbations vont avoir un impact sur les écosystèmes riverains en bordure de rivière notamment cela conduit à une augmentation de la déstabilisation des berges, une augmentation de la force d'érosion mais aussi cela induit une migration latérale des cours d'eau et une sédimentation accrue sur certaines berges, qui s'illustrent directement dans le nombre et la position des bancs de sable. (Rodrigues Holanda & da Roch, 2011). L'érosion des berges des cours d'eau est un processus géomorphologique naturel qui se produit dans tous les cours d'eau. Selon l'Agence d'Environnement de Grande Bretagne en 1999, le mécanisme d'érosion permet au cours d'eau d'ajuster sa taille et sa forme pour transporter le débit et les sédiments qui lui sont fournis par les terres environnantes. En tant que processus naturel, l'érosion des berges est généralement bénéfique pour l'écologie des cours d'eau, puisque l'érosion et le dépôt créent une variété d'habitats pour la flore et la faune, ce qui contribue à la diversité écologique. Ce processus naturel, au fil du temps, a entraîné la formation de plaines inondables riches en espèces, et il est important de noter que les systèmes fluviaux stables ont des berges qui s'érodent. Inversement, une augmentation de l'apport en sédiments due à une érosion accélérée des berges des cours d'eau, liée souvent à un changement d'usage des terres 'expansion de l'agriculture ou de l'urbanisation et réduction de la zone riveraine), est une cause majeure de pollution diffuse dans les cours d'eau (Watson & Basher, 2006).

L'érosion accrue liée aux infrastructures humaines entraîne une simplification de la morphologie des chenaux naturels et une réduction de l'activité géomorphologique dans le lit de la rivière. Avant la construction d'un réservoir, l'érosion des berges se produit généralement dans un tronçon local, tandis que l'accrétion apparaît à un autre endroit, ce qui permet de maintenir l'équilibre

dynamique de la largeur du canal, cet équilibre entre la berge et largeur du cours d'eau est donc rompu. Les écosystèmes aquatiques ont été fortement dégradés, et de nombreux poissons et autres organismes aquatiques sont désormais menacés ou en voie de disparition, notamment en raison des projets d'aménagement des cours d'eau et des infrastructures lié au génie civil de régulation du débit (canal). De plus la canalisation des chenaux entraîne une augmentation de la vitesse d'écoulement, et l'enrochement dur (stabilisation de berge, technique de génie civil) élimine la végétation qui peut tempérer la température de l'eau, l'ensemble de ces facteurs impacte la vie des poissons (Li & Eddleman, 2002).

Les écosystèmes riverains sont au niveau de l'écotone entre les milieux terrestres et les milieux aquatiques. L'écosystème riverain peut être défini comme le milieu entre la ligne d'eau au moment de l'étiage et des hautes eaux pendant les périodes d'inondation, ainsi que le paysage terrestre au-dessus de la ligne des hautes eaux (lit majeur), où la végétation peut être influencée par l'élévation des nappes phréatiques ou des inondations extrêmes et par la capacité du sol à retenir l'eau (Naiman et al., 2002). Les écosystèmes riverains naturels sont composés d'une variété de types de communautés végétales, avec des arbres et des arbustes à feuilles caduques sur des substrats hétérogènes (Rodrigues Holanda & da Roch, 2011).

(Gray & Sotir, 1996) décrivent la bio-ingénierie des sols comme « l'utilisation de plantes vivantes et de parties de plantes, dans lesquelles des boutures et des tiges vivantes sont placées dans le sol, ou dans des structures en terre, où elles fournissent un support mécanique supplémentaire au sol, et agissent comme des drains hydrauliques, des barrières aux mouvements de la terre, et des pompes ou des mèches hydrauliques ». Les systèmes de bio-ingénierie des sols généralement utilisent des matériaux inertes tels que la roche et le bois, ou des géosynthétiques, des géocomposites, et autres produits manufacturés.

b. Les techniques de restauration écologique des sols

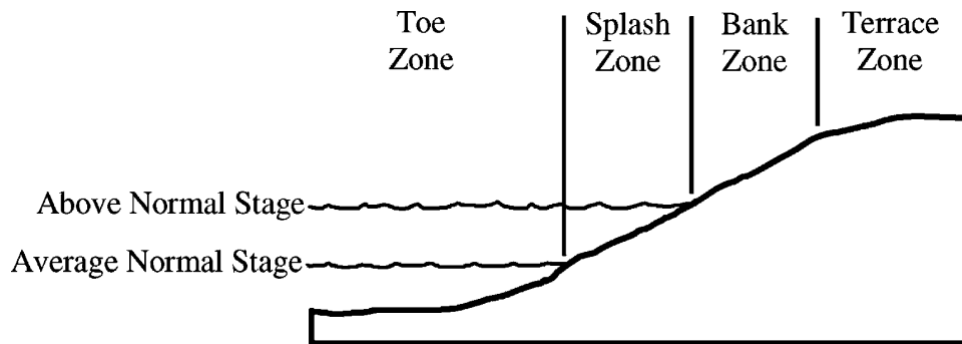


Figure 1 : Les différentes zones des berges de cours d'eau, source : (Li & Eddleman, 2002)

Les berges de cours d'eau peuvent être divisées en quatre zones. Chaque zone dépend de l'élévation de la berge, en fonction de la hauteur de l'eau. Ainsi les techniques génie végétal et les plantes vont être choisies en fonction de chacune de ces aires. En effet les caractéristiques des plantes notamment la capacité à tolérer les inondations (à différentes fréquence et durée) et la capacité à dissiper l'énergie du courant vont être analysés. Ces zones vont se moduler en fonction des niveaux du cours d'eau qui varie chaque jour et à chaque saison, et s'adapte selon la géométrie des berges (Allen & Leech, 1997).

La zone de pied se situe sur la partie basse de la berge, cette zone entre le lit et le niveau normal moyen est soumise à de fortes contraintes et peut souvent être sapée par les courants (affouillement). L'affaissement de la berge à ce niveau engendre probablement la rupture, c'est pourquoi les techniques mixtes présentées ci-dessous stabilisent en premier lieu cette zone par la mise en place d'un enrochement (rochers, pierres) des revêtements en rondins, des caissons, ou un matériau durable tel qu'un rouleau géotextile (dont il sera question plus tard).

La zone d'éclaboussure est la partie juste au-dessus de la zone de pied, elle est située entre la hauteur du niveau moyen de l'eau et la hauteur au moment de crue. Cette zone à forte contrainte au niveau du remous des vagues subit les mouvements des courants érosifs, et de débris, elle est soumise aux cycles d'assèchement de gel et de dégel. Pendant une majeure partie de l'année (au moins six mois), cette section serait inondée.

La partie au-dessus du niveau normal des eaux hautes se nomme la zone des berges, elle est exposée temporairement à différents éléments tels que le déferlement des vagues, les courants érosifs des rivières, le piétinement des animaux et des hommes ou encore les mouvements des glaces et des débris. Cette section pendant au moins 60 jours sur une fréquence de 2 à 3 ans se retrouve inondée. Dans la zone des berges, les herbacées (graminées, trèfles, certains carex etc) et certaines plantes ligneuses sont présentes et sont utilisées par le génie végétal. Ces espèces sont tolérantes aux inondations et peuvent supporter une submersion partielle ou totale pendant plusieurs semaines.

La zone de terrasse est l'endroit de la rive située le plus loin du cours d'eau et donc au niveau de l'intérieur des terres par rapport à la zone de la rive. Cette section est donc peu soumise à l'érosion du cours, sauf au moment de crues exceptionnelles. La zone de terrasse présente moins d'enjeu dans la gestion de la protection des berges car elle est moins souvent inondée, mais peut être érodée au moment d'inondations si la végétation n'est pas présente. La végétation a un rôle prépondérant, elle intercepte l'eau des inondations néanmoins les herbes, d'arbustes et d'arbres indigènes sont moins tolérants aux inondations que ceux de la zone de berge, les espèces d'arbres deviennent également plus hautes et plus massives.

Dans un premier lieu nous verrons la technique de génie civil la plus utilisée : l'enrochement. Les enrochements sont constitués de diverses tailles de pierres lâches et calibrées qui sont déposées sur un matériau de remplissage minéral granulaire ou un géotextile, depuis la zone de pied de la berge au niveau du cours d'eau jusqu'en haut de la berge (British Columbia et al., 2000). Cette technique de génie civil " dure ", est connue pour être relativement bon marché et rapide, et efficace quant au contrôle de l'érosion (Tisserant et al., 2021). Néanmoins la végétation s'établit peu sur ce type de structure en raison de l'absence de sol. L'enrochement peut utiliser différents types de matériaux tels que le béton ou la pierre. L'enrochement en béton peut être mis à n'importe quel endroit, sans tenir compte des conditions régionales et des caractéristiques du site. Les enrochements en pierre cependant ont des facteurs spécifiques à considérer tels que la forme, la taille, le poids de la pierre, le type de roche et de canal. L'installation d'un enrochement nécessite le défrichage de la végétation naturelle pour la construction et donc entraîne la perte de la couverture végétale pré-existante, le sol est donc mis à nu. Les enrochements en béton à surface lisse sont susceptibles d'accélérer l'écoulement du cours d'eau, ce qui provoque une érosion en aval. L'enrochement dispose d'un bon capital de confiance. C'est dû au bon degré de précision de cette technique, et au fait qu'elle stabilise instantanément les berges. Elle permet aussi de limiter le risque d'effondrement ou l'altération des infrastructures à proximité (à la fin de projet). De plus cette méthode est étudiée dans de nombreuses analyses et articles de recherche (Li & Eddleman, 2002). Ces avantages ne sont cependant pas toujours garants de résistance sur le long terme et de l'absence d'impacts négatifs.

Techniques mixtes : dans la protection des berges, ces techniques combinent le génie civil, via l'enrochement de la partie basse de la berge (pied de berge) et les techniques de génie végétal pure au niveau de la berge.

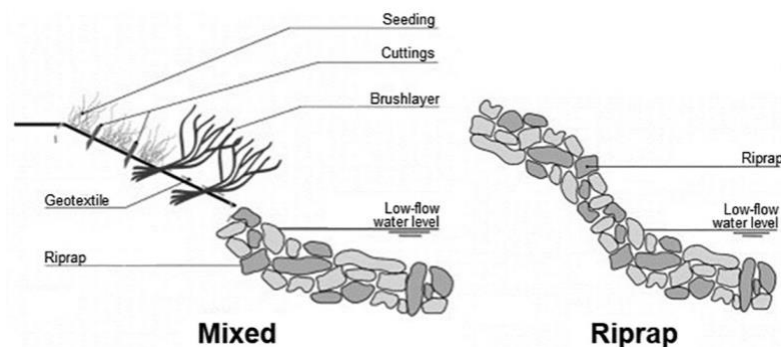


Figure 2 : Représentation schématique des techniques : mixtes, et génie civil (enrochement), source (Cavaillé et al., 2013)

Les techniques pures de génie végétal les plus citées dans les études sont les fascines, les caissons végétalisés, les peignes et les épis végétaux, mais aussi les lits de plants ou plançons ou encore les plantations jointes, les deux dernières techniques seront présentées dans l'annexe n°1.

La fascine est une protection du pied de berge, cette structure est réalisée avec des boutures de saules vivants assemblées en fagots à l'aide d'une corde puis fixées au sol par une rangée de pieux. Ces piquets vivants ou morts sont des tiges, des branches ou des troncs **dormants** de plantes ligneuses qui sont enterrés dans le sol pour assurer la solidité de l'ensemble à la construction. Les pieux vivants peuvent être utilisés pour stabiliser d'autres techniques génie végétal du sol, comme, les fascines de coco, les matériaux de contrôle de l'érosion (géotextile) ou encore les lits de plant ou plançons.

Les fascines sont généralement constituées de diverses espèces de saule. Elles peuvent être disposées en une rangée simple ou entre deux rangées de piquets (fascine double) par couches successives. La très bonne aptitude du saule au bouturage leur permet de s'enraciner afin de fournir un renforcement constant de la berge.

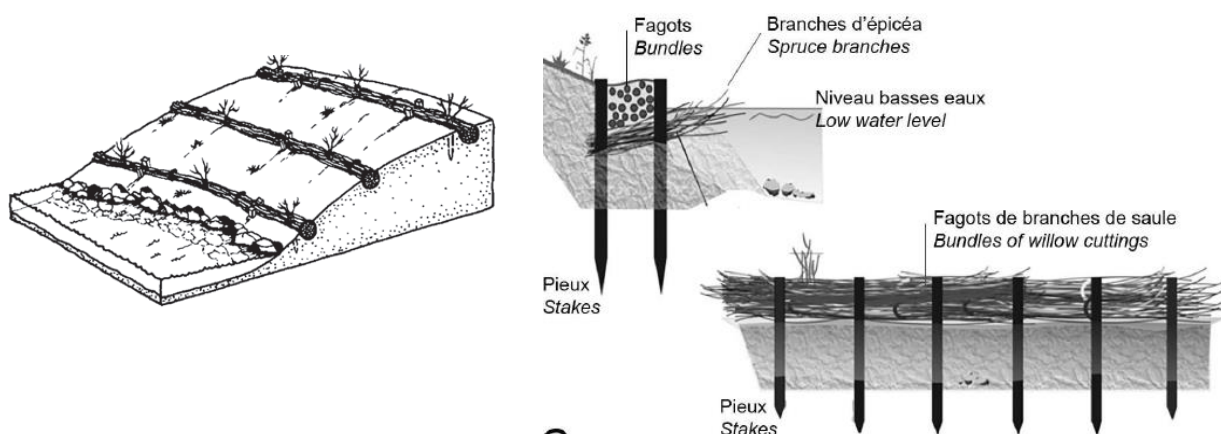


Figure 3 : Représentations schématiques de la technique fascine, source : (Li & Eddleman, 2002; Peeters et al., 2018)

Également utilisé dans la protection du pied de berge, la technique de peigne est formée d'un entassement de branches et d'arbres attachés. Ce rassemblement d'éléments forme un ensemble végétal qui va permettre de capter les sédiments, ainsi son efficacité réside dans la présence de différents facteurs dont l'occurrence de crues et leurs volumes mais aussi les Matières En Suspension (MES) dans le cours d'eau. Sur le peigne des boutures de saules peuvent être mise en place mais cela dépend du remplissage en sédiments du peigne.

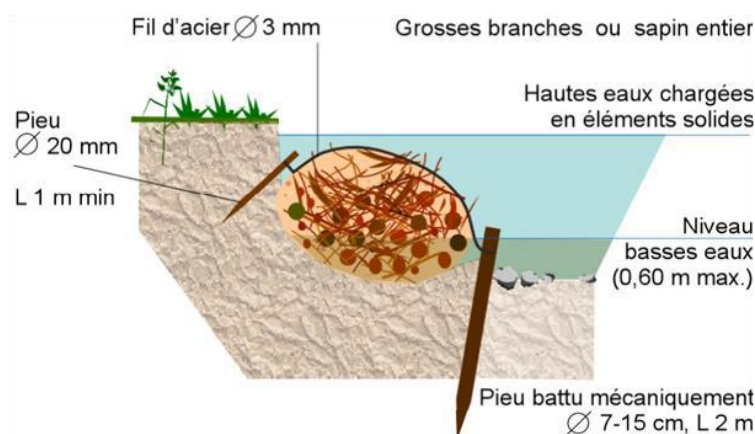


Figure 4 : Représentation schématique de la technique Peigne, source : (Houbrechts et al., s. d.)

Contrairement aux deux dernières techniques, le caisson végétalisé est une technique construite qui permet une protection de l'ensemble de la berge, cette structure utilise des rondins de bois. Ces poutres sont disposées en deux rangées : des éléments parallèles au cours d'eau (longrines) sur lesquels sont fixés perpendiculairement à l'aide de clous, d'autres rondins appelées moises. Les espèces d'arbres utilisés le plus fréquemment sont le douglas, le mélèze et l'épicéa. Puis le caisson formé va être rempli de différents matériaux : roche, terre, boutures vivantes ou de plantes enracinées, qui vont se développer notamment dans la partie supérieure afin que leurs systèmes racinaires puissent remplacer à termes les fonctions structurales des rondins (qui vont avec le temps se décomposer). La structure en bois permet une stabilisation immédiate. Les boutures de saule et les plantations (souvent l'aulne) vont être disposées sur les chaque étages définis par la longueur des moises. L'utilisation d'un géotextile (autre technique présentée dans l'annexe 1) d'une durée de 3 à 5 ans peut-être utile les premières années pour permettre le remplissage du caisson pendant le développement de la végétation.

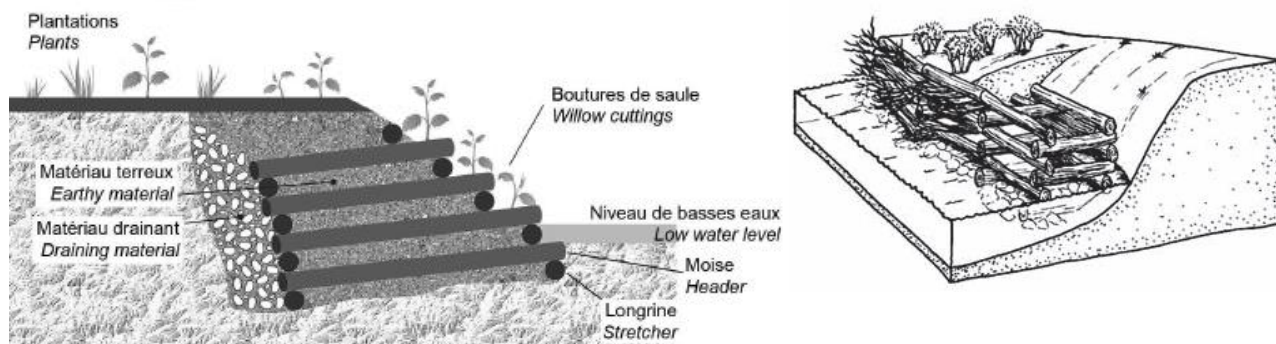


Figure 5 : Schéma de représentation de la technique de caissons végétalisés, source : (Li & Eddleman, 2002; Peeters et al., 2018)

Les épis végétaux sont des méthodes dites indirectes. Ces ouvrages perpendiculaires au courant sont implantés sur la berge et se développent depuis la rive sur une partie du lit de la rivière. La protection de la berge s'effectue par une déviation ou une diminution de la force du courant et en fonction de leurs implantations et de l'orientation de la méthode, les épis permettent d'approfondir ou de remblayer une partie du lit. L'imperméabilité des épis font de cette technique de génie végétal un outil pour les contraintes hydrauliques moins fortes.

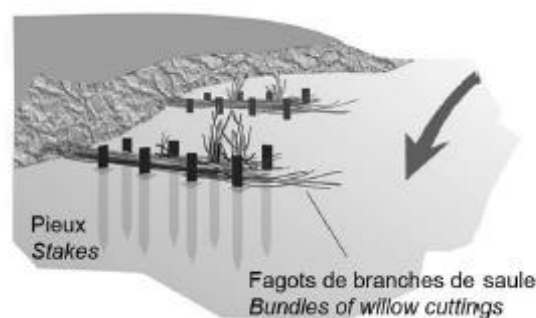


Figure 6 : Image de modélisation de la méthode des épis végétaux, source : (Peeters et al., 2018)

Nous avons fait le choix de présenter ces quatre techniques de génie végétal. Elles seront abordées dans les deux sections suivantes pour leurs propriétés de résistance à l'érosion et leur potentiel de développement de la biodiversité. Certaines des méthodes décrites dans l'annexe 1 sont largement utilisées notamment pour des ouvrages de couverture. (Peeters et al., 2018)

c. Les critères à considérer, et la planification des techniques

Dans cette partie nous nous focalisons sur les différentes caractéristiques à considérer avant la mise en place de projet de stabilisation de berges via le génie végétal. Ainsi dans un premier temps nous verrons les différents critères de mise en place qui peuvent différencier les différentes techniques de génie végétal présentées précédemment. Ensuite nous verrons quels sont les éléments à collecter avant la mise en place d'une technique, propre au site d'étude mais aussi à plus large échelle. Enfin l'enjeu humain qui s'avère être le déclencheur de la mise en œuvre des techniques sera abordé.

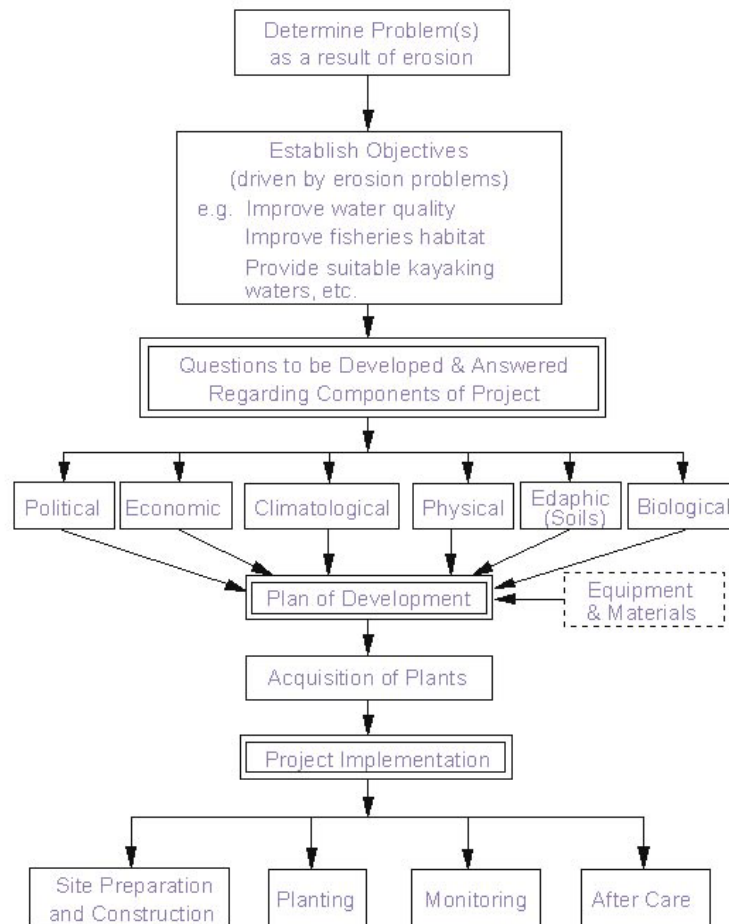


Figure 7 : Les étapes de planification et d'implémentation d'un projet de génie végétal, source : (Allen & Leech, 1997)

(Allen & Leech, 1997) ont proposé un modèle pour aider à la planification des projets de génie végétal au niveau des berges de cours d'eau. Au sein de ce schéma général (Fig n°7), les spécificités des techniques de bio-ingénierie, les facteurs régionaux (pool d'espèces régionales, connectivité du paysage, occupation des sols à proximité du site, la température, l'étage de végétation etc) et des facteurs locaux (comme le débit et la largeur du cours d'eau, les matières en suspensions dans l'eau, la pente, l'exposition au soleil, les caractéristiques du substrat).

Il est important de noter que les techniques sont diverses et que l'analyse du site doit permettre de savoir laquelle choisir. (Houbrechts et al., s. d.) dans leur guide technique qui fait suite à l'analyse de 6 études scientifiques qui se sont déroulés en Wallonie (Belgique) trois critères majeurs sont à considérer :

- La puissance spécifique de la crue maximale (ou contrainte de cisaillement : équations existantes de conversion)

- La concentration en Matière En Suspension au moment de la crue maximale
- L'angle d'attaque entre l'eau et l'ouvrage

Ces chercheurs ont donc proposé différentes valeurs seuils qui peuvent aider à la décision lors du choix de différents aménagements (Fig n°8).

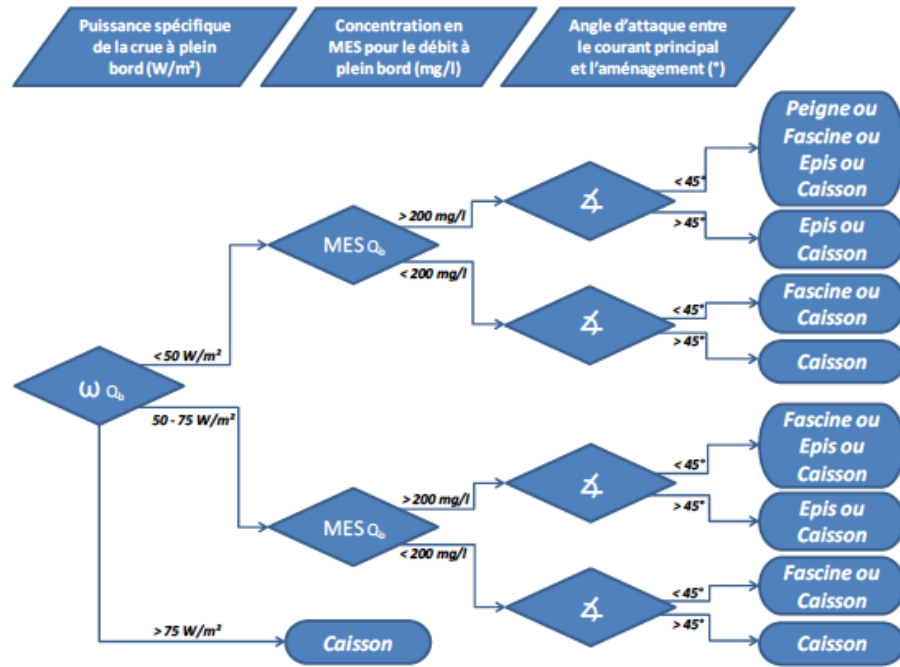


Figure 8 : Schéma d'aide à la décision de technique de génie végétal adaptée aux caractéristiques environnementales du site, source : (Houbrechts et al., s. d.)

(Li & Eddleman, 2002) ont proposé un modèle innovant basé sur l'analyse de chaque technique végétale selon une matrice coût-résistance. Cet article de recherche donne de nombreuses indications sur l'application et les propriétés inhérentes à chaque structure notamment sur leur position au niveau des différentes zones de la berge.

La mise en place de projets de génie végétal prenant en compte l'intégration paysage doit comprendre les éléments suivants, selon (Schiechl & Stern, 1997) :

- Choix réfléchi sur les outils et engins de construction qui doivent être adaptés aux caractéristiques du terrain,
- Des berges un minimum stables et avec une forme permettant la mise en place de la technique ;
- L'utilisation de matériaux de construction locaux tels que le sable, la pierre, le gravier, la terre, le bois ;
- Il est nécessaire d'éviter l'utilisation de matériaux non présents initialement sur le site comme par exemple certaines roches ou blocs dans les alluvions à grain fin,
- Réduire voir ne pas utiliser de matériaux de construction artificiels (acier, béton, plastiques pour le revêtement de surface ou l'injection de coulis de ciment par exemple dans les lits de rivières ou de ruisseaux) ;
- Ne pas choisir de pentes trop raides ;
- Favoriser l'utilisation de matériaux de construction d'origine végétal et vivant ;
- Se tourner vers des plantes ligneuses qui ont la capacité à se propager par voie végétative sur le site, mais aussi au niveau des environs et/ou des habitats similaires situés à proximité du site ;
- Régulation de l'usage de machines et d'équipements de déplacement ;

- L'implantation végétale par enlèvement, stockage temporaire et rétablissement (transplantation) de la végétation ;
- Limitation voire évitement de traces de coupe, ainsi il faut diminuer les risques de fragmentation ou de défrichement des forêts alluviales.

(Rodrigues Holanda & da Roch, 2011) ont proposé un modèle afin de planifier et d'installer un projet de génie végétal des sols de manière réfléchie. Ainsi différents éléments cités ci-dessous sont à considérer sur les sites. Il est à noter que pour une pente trop abrupte ou un affaissement de la berge, il est nécessaire de procéder à un nivellement afin d'aplanir la pente et pour assurer la stabilité de la pente (un terrassement est nécessaire également dans la mise en œuvre de nombreuses techniques). Différentes caractéristiques intrinsèques au site vont déterminer le degré d'aplanissement tels que la pédologie (identification du type de sol), la géologie, les conditions hydrologiques etc. La planification du calendrier et des horaires est nécessaire pour avoir une coordination optimale entre les acteurs. Les racines de la végétation ne sont généralement pas les causes des dommages au niveau des structures inertes. Les racines des plantes ont tendance à éviter les structures de soutènement poreuses et ouvertes en raison des facteurs suivants : l'absence d'un milieu de croissance, l'ensoleillement excessif et le manque d'humidité. Ces différents facteurs ne sont pas favorables au développement des racines des plantes notamment dans ces milieux.

Ainsi dans la review de (Rodrigues Holanda & da Roch, 2011) cette liste regroupant différents éléments à connaître en amont de la mise en place de l'ouvrage est intéressante :

- [1. Détermination de la cause du dommage si des travaux de réparation sont nécessaires.
2. Détermination de l'objectif et de l'aspect final du projet.
3. Évaluation des aspects hydro-ingénierie des détails du projet.
4. Évaluation de la situation juridique (propriété, utilisation, responsabilité, etc.).
5. Sélection finale de la technique de bio-ingénierie à mettre en œuvre.
6. Adapter le système de bio-ingénierie du sol au site, ce qui signifie qu'il faut prendre en compte des informations sur la topographie, la géologie, les sols, la végétation et l'hydrologie du site. Il faut au minimum, recueillir des informations sur :
 - i. La topographie et l'exposition, liées au degré de pente dans les zones stables et instables ;
 - ii. La géologie et les sols, liés à l'histoire géologique et aux types de dépôts (colluvium, glaciaires, alluvions, autres), le type de sol et sa profondeur ;
 - iii. L'hydrologie, la zone de drainage et les précipitations annuelles, et le calcul des débits de pointe ou du débit moyen dans la zone du projet ;
 - iv. Visite du site, tracé de l'alignement, coupe longitudinale et transversale, (informations hydrologiques) ;
 - v. Évaluation des résultats de l'analyse des sols du matériau du lit et de la stabilité des berges du cours d'eau ;
 - vi. Évaluation de l'étude de la végétation de la zone du projet et de son environnement ;
 - vii. Évaluation de toutes les informations disponibles sur l'hydro-écologie de la zone ;
- Afin d'obtenir ces informations :
 - Trouver des cartes topographiques, des photos aériennes, des orthophotos et des plans de construction.
7. Sélection de la méthode et du type de construction.
8. Sélection du matériel végétal vivant et mort à utiliser.
9. Conserver la végétation existante dans la mesure du possible - Limiter l'enlèvement de la végétation par l'enlèvement et le stockage de la végétation ligneuse existante qui pourra être utilisée plus tard dans le projet.
10. Stocker et protéger la terre végétale, lors des opérations de défrichement et de nivellement, qui peut être réutilisée lors des opérations de plantation.
11. Protéger les zones exposées pendant la construction.
12. Détourner, drainer ou stocker l'excès d'eau.]

II. Le contrôle de l'érosion

a. Les différentes contraintes et ruptures liés au milieu riverain

Comme nous l'avons vu précédemment différentes caractéristiques sont à identifier avant la mise en place d'une technique de génie végétal appliqué à la stabilisation des berges. En effet cela est dû au fait que le processus d'érosion des berges dépend de nombreux facteurs comme la composition du sol et aux propriétés mécaniques correspondantes. Ainsi le matériau des berges peut être deux types soit cohésif ou soit non cohésif et peut être constitué de nombreuses couches de sol. (Rodrigues Holanda & da Roch, 2011). Les deux principaux mécanismes d'érosion des berges des cours d'eau sont l'affouillement des berges et la rupture en masse (Queensland Government, 2006).

L'érosion hydrique correspond au changement d'équilibre entre la contrainte de cisaillement hydraulique (voir section suivante) et la résistance du matériau de la berge. Ainsi lorsque la contrainte de cisaillement s'intensifie quand le débit augmente, la résistance du matériau de la berge va donc diminuer (notamment quand par exemple la berge devient saturée). L'érosion liée à l'énergie de l'eau (contrainte de cisaillement) est généralement le premier processus qui va induire une rupture de masse ou rupture gravitationnelle, dont les débris vont être transporter par la suite par le cours d'eau. La contrainte de cisaillement est la force de traction moyenne sur un cours d'eau (Gray & Sotir, 1996) qui dépend de la pente, de la profondeur mais aussi de la géométrie de la rivière (du lit de la rivière).

L'écoulement de l'eau avec les sédiments qu'elle transporte a une action abrasive sur les berges, le phénomène d'affouillement correspond donc à l'enlèvement direct des éléments de la berge par l'action physique de l'eau au niveau de l'eau et en dessous (schéma à gauche fig n°9). Le creusement dans la zone de pied de berge est un signe de l'affouillement de la berge (schéma de droite, fig n°9).

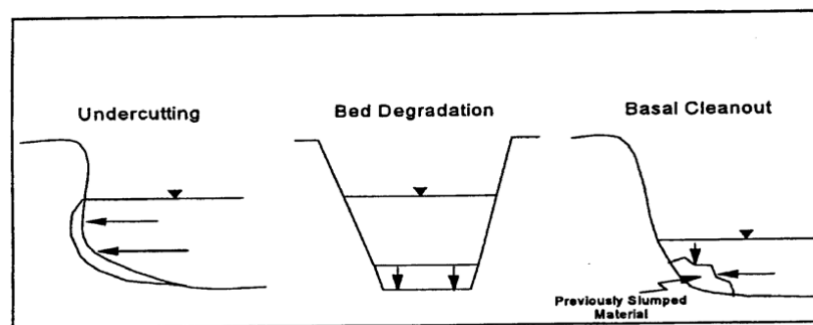


Figure 9 : Les mécanismes de dégradations hydraulique de l'étude de O'Neill and Kuhns 1994, source : (Watson & Basher, 2006)

Le décollement des éléments de la berge peut induire une accélération et une réorientation de l'écoulement suite au dépôt des débris qui vont former une obstruction (végétation) dans le lit du cours d'eau. Cela peut aussi être amplifié par les caractéristiques du sol de la berge comme un matériau non cohésif et un mauvais drainage. Le phénomène d'affouillement est relativement fréquent à l'extérieur des courbes de méandre car la vitesse d'écoulement et la contrainte de cisaillement sont généralement plus élevées.

La dégradation basale du lit se déroule lorsque le pouvoir érosif de l'eau en mouvement augmente, induisant une croissance de l'énergie de cisaillement générées par le fluide dépassant la résistance du matériau du lit qui est par ailleurs relativement plus érodable que la berge. Ce processus va par conséquent conduire à une augmentation de la hauteur mais aussi de la pente de la berge, augmentant la probabilité d'affaissement et d'effondrement. (Schéma central sur la fig n°..)

L'instabilité des berges d'un cours d'eau peut être également dû l'enlèvement, pendant une augmentation de l'écoulement de l'eau, de matériaux à leurs bases qui ont un rôle de soutien ou de protection. Ce prélèvement de matériau du bas de la berge, rend ce milieu encore plus exposé au cycle permanent de sapement (d'affouillement), d'effondrement et d'enlèvement. Le processus cyclique de l'érosion de base influe sur l'effondrement de la partie supérieure de la berge, et l'accumulation et

l'enlèvement des blocs effondrés joue un rôle considérable dans le contrôle de la stabilité, de la forme, mais aussi du taux de recul de tous les types de berges.

La rupture en masse, a lieu au moment où des matériaux de taille importante de la berge deviennent instables et basculent dans le cours d'eau en même temps. C'est donc un phénomène d'effondrement et d'affaissement des berges, la rupture en masse est majoritairement au niveau des tronçons inférieurs des grands cours d'eau. Ces cours d'eau en aval sont donc sujet à la rupture en masse qui en plus s'associe aux phénomènes d'affouillement des berges inférieures. Ce processus où l'instabilité gagne sur les forces de stabilité des matériaux dépend également de la géométrie du lit mineur, du type d'écoulement de l'eau (laminaire ou turbulent), mais aussi du transport de sédiments dans la rivière comme expliqué précédemment.

Il existe différents types de rupture de masse lié également à la force de gravité (Rodrigues Holanda & da Roch, 2011), l'ensemble des schémas provient du livre de l'Agence Environnemental des Royaume-Uni de 1999 intitulé « Protection des berges des cours d'eau : Guide pour l'évaluation et la gestion de l'érosion :

- Glissement superficielle :

Rupture peu profonde de la couche superficielle de sol de matériau non-cohésif le long d'un plan parallèle à la surface de la berge (de pente modérée).

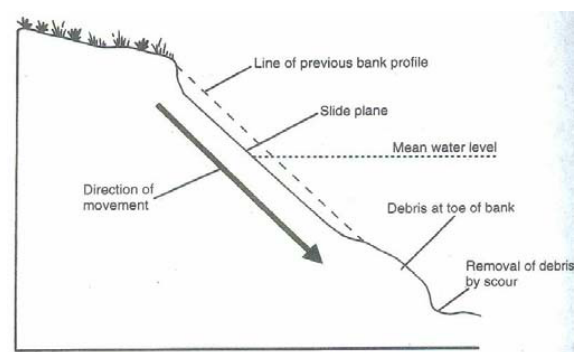


Figure 10 : Schéma glissement superficielle de sol de berges

- Rupture par rotation :

Les ruptures rotationnelles sont courantes sur les berges cohésives dont la pente est inférieure à 60°. Après la rupture, la pente créée au-dessus du niveau du bloc glissé est inclinée vers l'intérieur de la berge, et les matériaux de rupture peuvent être à l'origine de formation de fissures de tension verticales. La rupture par rotation est dû à l'affouillement au niveau du pied de berge et/ou à une pression d'eau interstitielle élevée dans le matériau de la berge. Elles se produisent fréquemment suite à un abaissement rapide du niveau de l'eau après un débit élevé.

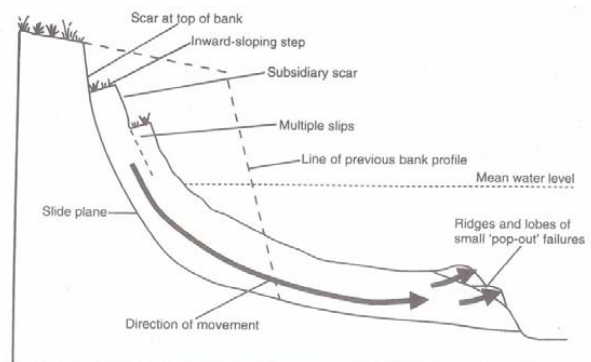


Figure 11 : Schéma de la rupture de berge par rotation

- Rupture de dalle

Glissement et basculement vers l'avant dans le Lit mineur d'une masse, la rupture de dalle est fréquente au niveau des berges cohésives à grains fins, de faible hauteur et abrupte. Ce processus peut avoir lieu dans des cours d'eau à faible débit. L'origine de la rupture peut s'expliquer par la combinaison de différents facteurs : l'affouillement au pied de la berge, une forte pression d'eau interstitielle dans le matériau de la berge et le développement de fissures de tension au sommet de la berge (libération des contraintes, infiltration dû aux écoulements de surface et souterrains).

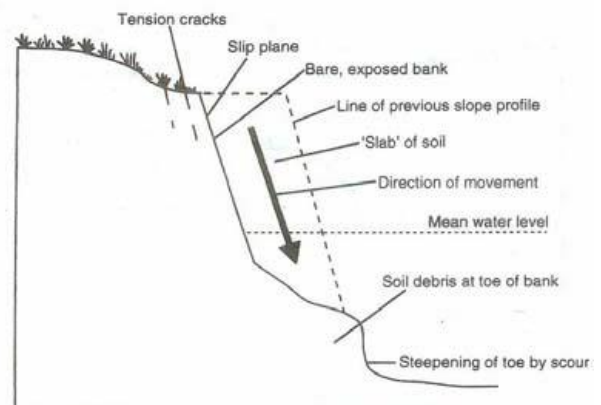


Figure 12 : Schéma de la rupture de dalle

- Rupture en porte-à-faux

La rupture en porte-à-faux correspond à l'effondrement d'un bloc au-dessus du vide dans le cours d'eau, ce processus a lieu souvent suite à l'affouillement basal de la berge. La rupture en porte-à-faux se produit sur des matériaux à grains fins et grossiers, et dans des conditions de faible débit. Il existe trois principaux modes de rupture en porte-à-faux (illustrés à la Fig.). La rupture, déplacement vers le bas d'un bloc en surplomb, est initiée par des fissures de tension qui se forment à une certaine distance en arrière de la berge.

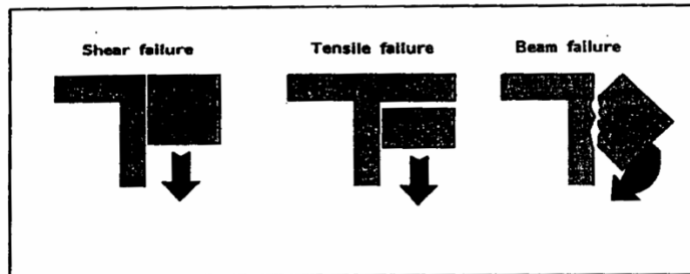


Figure 13 : Schémas des mécanismes de la rupture en porte-à-faux, source : Ashbridge 1995

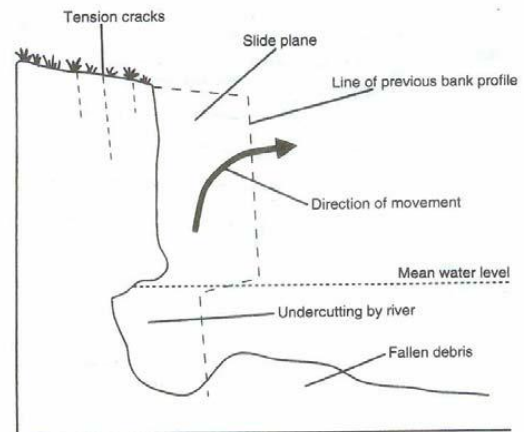


Figure 14 : Schéma de la rupture en porte-à-faux

- Écoulement de terre humide

Cette rupture résulte de la perte de résistance d'une section de la berge due à la saturation en eau (suite à de fortes précipitations, fonte des neiges, abaissement rapide du niveau d'eau) qui va augmenter le poids de la berge et diminuer la résistance du matériau jusqu'à ce que le sol s'écoule sous forme de liquide très visqueux. Ce type de processus a lieu généralement sur des berges de faible pente. Les coulées de terre vont se répartir le long de la berge pour ensuite former des lobes de matériau au pied (figure 7, cela a lieu au niveau de berges soumises à de fortes infiltrations et à un mauvais drainage).

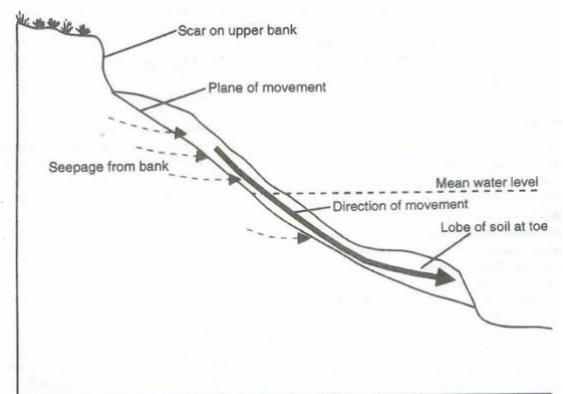


Figure 15 : Schéma d'écoulement de terre humide

- Rupture par éclatement :

L'effondrement par éclatement décrit des ruptures où des blocs de taille petite à moyenne sont expulsés près du pied de berge à cause d'une pression trop importante de l'eau interstitielle et d'une surcharge. Un morceau de la berge dans la moitié inférieure se détache, laissant une cavité en forme d'alcôve (figure 8). Ce mode de rupture se produit majoritairement sur des berges abruptes avec des matériaux cohésifs saturés à grain fin qui permettent l'accumulation de pression d'eau interstitielle positive et/ou un écoulement/une fuite dans sa structure. Par la suite le toit en surplomb de l'alcôve peut s'effondrer sous forme de rupture en porte-à-faux.

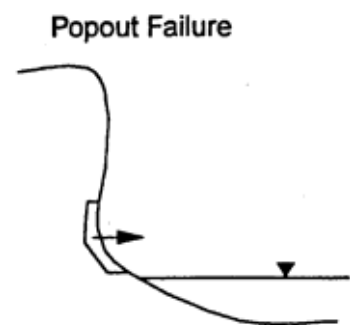


Figure 16 : Schéma de la rupture par éclatement, source : O'Neill and Kuhns 1994

- Écoulement granulaire sec : ce phénomène de rupture a lieu en général sur des berges de matériaux non cohésifs, avec un faible angle (proche du repos), qui sont sous-cavés, augmentant ainsi l'angle de talus original au-dessus de l'angle de friction. Les grains vont ainsi être en mouvement le long de la berge en une couche. Dans un matériau de berge cohésif, le décollement est le précurseur de ruptures par mouvement de masse et, dans un matériau de berge non cohésif, d'un écoulement granulaire sec.

- Chute de terre ou de roche : Ce phénomène ne se produit que sur des berges qui subissent une forte érosion et qui sont formés d'un matériau faiblement cohésif. Elles se produisent souvent lorsqu'un cours d'eau passe sous le pied d'un banc de sable, de gravier ou de roche profondément altérée.

- Rupture de canalisation : L'effondrement d'une partie de la berge se produit suite à une pressions d'infiltration d'eau souterraine de débits élevés qui provoquent l'enlèvement spécifique de sections de la berge. Cela est due à un écoulement préférentiel des eaux souterraines le long de couches saturées interstratifiées avec des strates de sable et de matériaux plus grossiers intercallés entre des couches de matériaux cohésifs plus fins. L'écoulement se produit dans les couches les plus perméables grâce aux changements de niveau de la rivière et/ou à l'infiltration des eaux souterraines.

En annexe 3 vous pourrez retrouver une classification des différents types de rupture et de mouvements en masse en fonction du degré de pente de la berge. De plus un schéma permettant d'interpréter la stabilité des berges des cours d'eau est fourni en annexe.

Différentes méthodes et outils pour mesurer l'importance de l'érosion sont cités dans l'article de (Watson & Basher, 2006) :

- Études stratigraphiques grâce à la datation numérique et la datation botanique.
- Les sources historiques en série (les cartes, les notes, les photographies aériennes, les articles de journaux)
- Les photographies répétées et télédétection
- Le levé topographique
- Les broches d'érosion (outil tige métallique insérée dans le matériau de la berge)
- Le cadre d'érosion
- Le profileur de berge portatif
- Le profileur de berge électronique (PEEP)
- Les capteurs de turbidité

La review de (Watson & Basher, 2006) permet de comprendre les différents facteurs qui vont influencer l'intensité du processus d'érosion comme :

- La fréquence des fortes précipitations (lié au phénomène météorologique de tempêtes) qui conditionne la fréquence et l'intensité des crues.
- Les propriétés de l'écoulement du cours d'eau, le gradient de vitesse va déterminer l'ampleur du cisaillement hydraulique.
- La composition du matériau des berges : les sols des berges alluviales peuvent être classés en trois grandes catégories : non cohésifs, cohésifs et stratifiés. Matériaux non cohésifs : granulométrie de taille importante, ils sont donc bien drainés.
- La géométrie des berges tel que la hauteur et la pente des berges qui constituent des facteurs critiques lors de l'évaluation du potentiel d'érosion des berges d'un cours d'eau.
- La géométrie du canal : qui va affecter les forces hydrauliques provoquant l'érosion des berges.
- Les conditions d'humidité du sol des berges : lié à la résistance du sol, lorsque la concentration en eau dans le sol augmente la stabilité du sol diminue. L'action du gel (et dégel) peut jouer un rôle préparatoire dans l'affaiblissement des berges en élargissant les fissures préexistantes et en détachant le matériau de surface pour rendre la berge plus vulnérable à l'érosion future.
- Le rôle de la végétation : développé dans la partie IIc.
- Les facteurs induits par l'homme : piétinement du bétail et utilisation de véhicules qui vont endommager la végétation et compacter la surface du sol (réduisant l'infiltration, augmentant le phénomène de ruissellement).

b. La résistance des techniques face à l'érosion

Pour évaluer l'efficacité d'un ouvrage de génie végétal en termes de résistance à l'érosion plusieurs indicateurs sont possibles. L'indicateur le plus utilisé est la tension de cisaillement (Peeters et al., 2018) qui est déterminée par une approche empirique, c'est un seuil d'admissibilité c'est-à-dire que c'est la valeur maximale que la structure peut subir sans s'effondrer. Cette limite de résistance mécanique s'applique à l'échelle de l'ouvrage, elle s'appuie sur le calcul et l'analyse de différentes contraintes mécaniques : puissance spécifique, contrainte de cisaillement ou vitesse d'écoulement, toutes résultant de la crue maximale à laquelle l'ouvrage a résisté. La contrainte de cisaillement est généralement donnée en Newton par mètre carré (N/m²) (autre unité : lbf/ft²).

Le calcul de la contrainte de cisaillement considère le cours d'eau comme un écoulement uniforme, la force de friction entre l'eau et la frontière solide s'équilibre le long de la pente. Cette force de frottement est constante par la résistance aux mouvements du matériau solide, et par l'échange de momentum le long d'un gradient de vitesse dans le fluide. Le gradient de vitesse exprime le déplacement relatif d'une partie de la masse d'eau par rapport à une autre. (22_Thorne_1978_These.pdf, s. d.)

$$\tau = K_i \cdot (du/dy)$$

τ = shear stress = contrainte de cisaillement

du/dy = velocity gradient = gradient de vitesse

K_i = a transfer coefficient

Pour obtenir cette valeur il est nécessaire de connaître le débit instantané maximal et donc les différentes données sur les crues récentes que l'ouvrage a pu rencontrer. L'une des limites du calcul de contraintes de cisaillement est l'échelle, en effet les différentes données sont au niveau du tronçon de rivière, donnant une contrainte de cisaillement moyenne. Cependant la contrainte de cisaillement réelle qui va s'appliquer sur la berge peut s'avérer être différente car les conditions hydrauliques locales, comme des processus turbulents peuvent engendrer une force localisée qui va différer de la valeur moyenne. Un des facteurs à considérer est l'âge de la structure, en effet comme l'a constaté (Pinto et al., 2016), la croissance de la végétation sur les structures de génie végétal permet un accroissement de la résistance avec le temps contrairement au génie civil.

Technique		Résistance mécanique τ en N/m²		
		À la réalisation	1 à 2 ans après	3 ou 4 ans après
Enherbement		4 ⁽¹⁾ 20 ⁽¹⁾	25-30 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾ 100 ⁽²⁾
Boutures		10 ⁽¹⁾	60 ⁽¹⁾ 150 ⁽¹⁾	60 ⁽¹⁾ 165 ⁽¹⁾
Boudin d'hélophytes		10 ⁽¹⁾ 30 ⁽²⁾	20-30 ⁽¹⁾	50 ⁽¹⁾ 60 ⁽¹⁾
Clayonnages		10 ^(2,3)	10-15 ⁽¹⁾	10 ⁽¹⁾ 120 ⁽¹⁾
Fascines		20 ⁽¹⁾ 60 ⁽²⁾	50 ⁽¹⁾ 60 ⁽¹⁾	80 ⁽²⁾ 250 ⁽⁴⁾
Saules			50-70 ⁽⁴⁾	100-140 ⁽⁴⁾ 800 (20 ans) ⁽⁴⁾
Plantation d'arbre		20 ⁽²⁾		120 ⁽²⁾
Lit de plants et plançons		20 ^(2,3)	120 ⁽¹⁾	140 ^(2,3)
Couche de branches à rejet		50 ^(2,3) 150 ⁽¹⁾	150 ⁽¹⁾ 300 ⁽¹⁾	300 ^(2,3) 450 ⁽¹⁾
Caissons végétalisés		500 ⁽¹⁾	600 ⁽¹⁾	600 ⁽¹⁾
Enrochements	Végétalisés	100 ⁽¹⁾ 200 ⁽²⁾	100 ⁽¹⁾ 300 ⁽¹⁾	300 ⁽²⁾ 350 ⁽¹⁾
	Nus	250 ⁽²⁾	250 ⁽²⁾	250 ⁽²⁾

(1) Faber, 2004 ; (2) Schiechl et Stern, 1996 ; (3) Venti et al., 2003 ; (4) Lachat, 1994.

Figure 17 : Tableau bilan des différentes valeurs de résistances à la contrainte de cisaillement des techniques de protections de berges en fonction de leur âge, source : (Frossard, 2009)

Le tableau effectué par (Frossard, 2009) regroupe les valeurs de résistance mécanique via le calcul de la contrainte de cisaillement pour 4 études différentes. Ainsi ces valeurs de résistance à différentes temporalités nous permettent de faire un comparatif des évolutions de la résistance de différentes techniques génie végétal, de techniques mixtes et de techniques de génie civil.

Les différentes études de (Evette et al., s. d., 2017) dans les Alpes Suisse et Française nous permettent de connaître les capacités de résistance des techniques de génie végétal de stabilisation des sols dans un contexte montagneux, présentant des contraintes mécaniques plus fortes puisque les pente de profil en long peuvent être élevées (de 5 à 10 %). Six des sites d'étude étudié dans l'article de (Evette et al., 2017) ont résistés à des précipitations et des crues importantes en mai 2015, le tableau n°17 nous résume la contrainte tractrice qui a été estimée sur chacun des sites regroupant plusieurs techniques sur différentes berges.

Ces nouvelles valeurs permettent de voir un potentiel encore inconnu des techniques de génie végétal (forte pente, et crue importante dans l'année de l'implantation), les lits de plants et plançons qui ont été installés en pied de berge ont résisté dès la saison initiale de végétation (et par la suite 2 ans à 2 ans et demi) à 108, 134 et 150 N/m². Or comme nous l'indique le tableau n°17, les valeurs des études passées sur cette technique s'élevaient à maximum 20 N/m² suite à la réalisation.

Pendant la première année, une force tractrice de 140 N/m² a été relevé au niveau d'une technique de fascine en pied de berge soit le double comparé aux données des études précédentes, et deux ans et demi après leur réalisation, la fascine et les lits de plants et plançons se situant au-dessus ont toute deux résisté à une contrainte de 170 N/m² alors que la résistance maximale relevée par la technique des plants et plançons était jusque-là de 140 à 160 N/m².

Néanmoins il faut noter que l'ensemble de ces valeurs ne sont à considérer qu'à titre indicatif car lors valeurs de contraintes de cisaillement ont une part d'incertitude liés à des approximations explicités précédemment.

Time since completion	Shear stress [N/m ²]		
	0-2 yrs	3-4 yrs	> 5yrs
Techniques			
Reed plantation	5 ⁽⁶⁾	30 ⁽⁶⁾	
Sowing	30 ⁽³⁾	40 ⁽⁸⁾	
Reed roll	30 ^(6,2)	60 ⁽⁶⁾	
Wattle fence	120 ⁽⁹⁾	120 ⁽¹⁾	
Cutting	150 ⁽⁸⁾	165 ⁽⁷⁾	
Willow	100 ⁽⁴⁾	140 ⁽⁵⁾	800 ⁽⁵⁾
(according to the structure's age)			
Brush layer toe	108 ^(h) , 134 ^(h)	150 ^(h)	
Brush layers with fascine toe	141 ⁽ⁱ⁾ , 172 ⁽ⁱ⁾	116 ^(f)	
Brush layers with riprap toe	196 ^(b) , 37 ^(k) , 204 ^(b)	212 ^(b)	77 ^(a)
Live fascine toe	141 ⁽ⁱ⁾ , 50 ^(k) , 240 ⁽⁹⁾ , 116 ^(f)	80 ⁽⁶⁾	98 ^(e)
Brush mattress with riprap toe	244 ^(c) , 300 ⁽²⁾	450 ⁽²⁾	51 ^(a)
Log cribwall with branch layers	600 ⁽²⁾	600 ⁽²⁾	98 ^(e) , 153 ^(g) , 109 ^(d) , 381 ⁽ⁱ⁾
Vegetated riprap	300 ⁽³⁾	350 ⁽³⁾	
Riprap	250 ⁽⁶⁾	250 ⁽⁶⁾	

1: (Gerstgraser, 1998) in (Faber, 2004); 2: (Calò and Palmeri, 1996) in (Venti et al., 2003); 3: (Florineth, 1982) in (Venti et al., 2003); 4: (Adam et al., 2008); 5: (Lachat, 1994); 6: (Schiechl and Stern, 1997); 7: (Witzig, 1970, unpublished) in (Faber, 2004); 8: (Landesanstalt für Umweltschutz, 1996); 9: (Gerstgraser, 2000)

Figure 18 : Tableau bilan des valeurs de contrainte de cisaillement en fonction de l'âge. Source : (Evette et al., s. d.)

Une des limites du tableau ci-dessus regroupant les données du projet Génie'Alp (en gras) est l'absence des caractéristiques et spécificités de chacun des techniques liées à la conception et aux conditions géomorphologiques de chacun des sites. Le dimensionnement de chacun des sites est donc différent (comme la hauteur de l'enrochement en pied de berge) et la stabilité du lit du cours d'eau est un élément essentiel car un lit érodé sera forcément moins stable qu'un lit stabilisé. Une structure peut céder si le lit de la rivière est déstabilisé suite à une augmentation de la tension de cisaillement, mais souvent un échec sera le résultat d'une faiblesse locale qui a une probabilité d'apparition augmentant avec l'accroissement de l'intensité de contrainte de cisaillement. Selon (Evette et al., s. d.) les forces exercées sur les parties végétative des saules au moment de crues ne permettent pas un arrachement des plantes. Une défaillance de la structure n'est pas liée à la végétation mais bien aux effets de l'érosion sur la berge. Le tableau indique les valeurs des ouvrages qui ont cédé pendant des inondations passées (chiffres soulignées) cela permet une estimation des valeurs limites. Néanmoins la rupture de certaines constructions ne

doit pas être attribués uniquement à l'augmentation de la contrainte de cisaillement mais doit prendre en considération d'autres causes de rupture. Les erreurs lors de la conception, la mortalité des plantes, l'affouillement, la rupture en masse, le phénomène d'infiltration, ou le fait que la rupture peut potentiellement se produire au début de la crue avec des valeurs de contrainte de cisaillement par conséquent plus faibles sont autant d'éléments qui permettent de reconsidérer les valeurs soulignées. De plus les calculs de cette étude n'ont pas pris en compte la sinuosité du lit et ont été réalisés pour le lit de la rivière et non pour la berge. L'échelle à considérer pour utiliser ces valeurs est donc pour un tronçon de rivière donné, mais non pas comme des valeurs locales absolues au niveau de la structure et donc des berges.

Les techniques de bio-ingénierie étudiées lors de cette étude ont permis de mettre en lumière d'autres éléments notamment sur le fait que les fascines ou les couches de branches à rejet au niveau du pied de berges ont de bonnes capacités de résistance. Il persiste un manque de valeurs limites de résistance précises qui permettent d'avoir une idée de seuil d'admissibilité des ouvrages et qui par ailleurs permettent augmenter la confiance dans le génie végétal en termes de sécurité.

Un modèle expérimental a été mis en place par (Posi et al., 2018) à l'aide d'une maquette d'un canal de 6 mètre de long et 1,25 mètre de large et de pente à 2% (rivières alpines de fortes énergie pour accélérer le processus d'érosion), différents débits ont été testés pendant 1 heure à chaque fois. L'objectif était d'étudier l'action des contraintes de cisaillement sur différents aménagements de berges et avec différents degrés de courbure (4 berges) avec pour matériau composant le lit un matériau érodable de sables fins non cohésifs. La technique de protection de berges choisie est celle des fascines, qui consiste en un agencement de saules fixés dans le lit de la rivière contre la berge érodable à l'aide de bâtons de bois. La détérioration d'un ouvrage de protection de berge lié à l'érosion hydraulique peut provenir soit de l'action directe des contraintes de cisaillement (écoulement), soit par un affouillement local déstabilisant la berge à proximité de l'ouvrage. Ici l'objectif était de tester différentes conceptions de structure de fascines (cf fig n°19) face à des contextes morphologiques changeants (courbure et différents débits : faible débit n'atteignant que la partie basale de la structure, débit moyen au niveau la structure, débit élevé soit le débit sur la rive et le débit exceptionnel correspondant à l'inondation de la plaine inondable). Ainsi l'étude consistait à mesurer l'évolution de la vitesse de rupture de la berge dans des sections contrôlées.

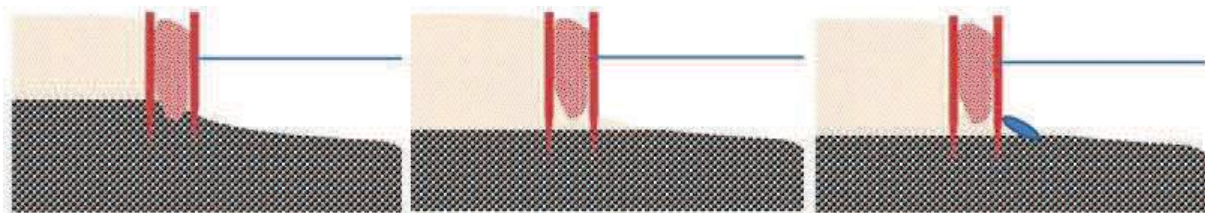


Figure 19 : Schéma de l'expérience menée par (Posi et al., 2018) sur la technique des Fascines.

Connection basal sur la berge érodable a) déconnectée, b) connectée, c) connectée avec enrochement

Une des conclusions majeures est qu'une fascine bien conçue peut résister à différentes intensités de contraintes de cisaillement puisqu'aucune fascine n'a été extraite pendant l'expérience. Les dégradations sont dû au phénomène d'affouillement et l'érosion augmente en fonction du degré de l'angle entre la structure et l'écoulement. L'érosion s'avère être minimale quand l'écoulement est parallèle à la construction, et maximal lorsque l'écoulement est frontal. Les situations qui amplifient une circulation de l'écoulement à l'intérieur de la berge intensifient l'érosion interne par exemple lors de l'enlèvement des enrochements amont mais aussi lorsque l'écoulement est frontal à l'ouvrage. Les faiblesses les plus importantes au niveau des structures sont liées à la connexion basale à l'écoulement. Ainsi les principales défaillances observées ont été :

- Lorsque la hauteur d'eau est trop importante une érosion sommitale s'effectue à cause du débordement de la fascine.
- L'érosion basal de la fascine entraîne l'affouillement puis l'effondrement local de la berge lorsqu'il n'y a pas de connexion entre la technique et la berge.

- L'érosion par l'arrière de la construction affecte la partie aval de la berge érodable.
- L'effondrement total a lieu lors de la combinaison de l'érosion arrière et de l'affouillement basal engendrant lui un effondrement local de la berge.

(Peeters et al., 2018) a fait le choix de mesurer l'efficacité de 19 ouvrages de protection de berges en génie végétal en Belgique avec un suivi à court et long terme (20 ans) en utilisant la Puissance Spécifique et non la contrainte de cisaillement. Cette étude a permis d'obtenir la puissance liée à l'énergie de la crue destructrice, la valeur maximale auquel chaque type d'ouvrage peut résister s'élève à 130W/m² pour les fascines, 65W/m² pour la technique du peigne, 200 W/m² pour les caissons végétalisés et 150 W/m² pour les épis végétaux. Cet article comporte de nombreux retours d'expérience. Il intègre de nombreux conseils pratiques pour la mise en place de chaque techniques comme le diamètre des moises, le remplissage du caissons par un substrat adapté, les conditions optimales pour la mise en place de la technique du peigne, la capacité du cours d'eau à fournir des éléments fins via les Matière En Suspension dans l'eau etc..

c. Le rôle de la végétation dans le maintien du sol

Le génie végétal fait donc appel aux propriétés physiques, biologiques et physiologiques des plantes. En effet les différentes caractéristiques des végétaux sont utiles dans la protection des sols et dans notre étude des berges face à l'érosion, différents effets liés à l'hydrologie et à la mécanique vont être étudiés dans cette partie pour comprendre tout le potentiel du végétal.

Les effets mécaniques liés à l'effet d'ancrage du système racinaire peuvent être étudiés via le ratio de surface de racine, la densité et la structure de ces dernières (Reubens et al., 2007). La taille des racines est fortement étudiée, le diamètre seuil qui s'étudie lorsqu'il y a rupture, quand la résistance au cisaillement du sol succombe, dans l'article de (Pollen, 2006.pdf, s. d.) il a été observé qu'au-delà du diamètre seuil les racines forcément cassent et au deçà les racines se brisent ou sont arrachées de manière intacte. Les racines de plus petit diamètre qu'importe l'espèce sont plus susceptibles d'être arrachées du sol à cause de la tension de cisaillement, cela pourrait expliquer la fragilité des ouvrages de génie végétal lors de la phase initiale de projet auquel (Peeters et al., 2018) fait référence dans son article. Les racines de plus gros diamètre au contraire sont plus susceptibles de se briser lorsque le sol est soumis aux forces de cisaillement ou à l'affouillement. Les deux mécanismes de rupture (arrachement ou brisure) dépendent de la force de friction entre les racines et le sol ce qui constitue la résistance du sol aux forces de cisaillement et la courbe de résistance à la traction spécifique aux espèces. Donc les différentes espèces de végétaux vont répondre différemment à la tension de cisaillement en fonction de la densité d'enracinement spécifique, la valeur de protection/de renforcement des racines. Mais attention cela dépend également du type de sol et des conditions d'humidité. Les racines permettent donc de lier les particules de sol entre elles ce qui augmente la résistance à l'affouillement des berges végétalisées. C'est donc via une étude mécanique via par exemple l'utilisation de logiciel et de modèle ou d'études de terrain que l'on peut comprendre les forces de friction et d'adhésion des racines avec le sol et les propriétés de résistance à la traction des racines, ce qui confère au sol sa résistance. (Simon & Collison, 2002) remettent en question également la notion de renforcement du sol augmentant grâce à l'abondance de petites racines mais mettent en lumière l'importance de quelques grosses racines qui ont un effet d'ancrage plus en profondeur. Pour l'ensemble des espèces végétales, l'augmentation de la résistance du sol s'effectue dans les 50 premiers centimètres. Dans cette même étude cependant les graminées ont permis une stabilisation importante grâce au ratio de surface racinaire élevée plutôt qu'à de fortes racines. Il est également judicieux de comprendre la structure du système racinaire (son mode de croissance : parallèle ou perpendiculaire au sol et la taille de la surface de cisaillement), avec l'étude de (Reubens et al., 2007) la mise en perspective de l'importance des racines fines et nombreuses comme étant plus importante que des racines moins nombreuses et grossières est faite. Il propose donc une structure adaptée aux faibles pentes avec une espèce ligneuse à croissance rapide qui développe une racine pivotante verticale profonde comme effet d'ancrage puis avec le temps se transforme en système plus latéral (il propose deux espèces mais non adaptées aux écosystèmes riverains d'Europe de l'Ouest considérés comme espèce exotique et envahissante le *Rubus pseudoacacia* et le *Fraxinus Americana* L. qui n'est pas une espèce indigène).

L'ajout de végétation augmente donc la stabilité et fait donc croître le facteur de sécurité des berges. (Pollen, 2006.pdf, s. d.) De plus le mélange d'espèces de plantes (ligneuses et herbacées) permet une diversité de racines ayant des fonctions spécifiques différentes, mais aussi permet d'obtenir des racines plus profondes (diverses espèces, stratégie de survie : développement racinaire) (Reubens et al., 2007). (Simon & Collison, 2002) rappelle également le potentiel de certaines graminées qui ont été étudiées par le passé et qui peuvent être utilisées aussi efficacement que les arbres pour accroître la stabilité du sol par le renforcement des racines. Les auteurs concluent sur le bénéfice résultant de communautés végétales mixtes d'espèces riveraines ligneuses et herbacées tant pour le contrôle de l'érosion que pour la qualité de l'habitat riverain. (Peeters et al., 2018) insiste également dans l'ensemencement d'espèces non ligneuses après installation de structure de génie végétal pour limiter

l'érosion et améliorer la diversité des espèces. (Frossard, 2009) site les graminées et légumineuses comme espèces herbacées à ensemer, les dicotylédones permettent de diversifier la végétation et répondent à des conditions extrêmes de croissance.

L'effet de couverture des tiges aériennes sur le sol, cette flexion vers le bas permet de réduire les effets de turbulence de l'affouillement. En effet la végétation va donc agir comme une barrière, une couche de protection contre l'érosion des berges. (Suttili et al., 2012) a étudié la flexibilité de différentes plantes, pour cela différents indicateurs ont été considérés dont l'angle d'inflexion. Ainsi ce critère est utile pour identifier si certaines plantes utilisées dans le cadre de génie végétal de protection du sol ont des capacités intéressantes de flexion sous contraintes hydraulique. Ce qui ressort de l'étude c'est que les plantes de plus petit diamètre (donc ayant des pousses plus jeunes) sont plus flexibles et mieux adaptées à la stabilisation des berges indépendamment des espèces considérées dans l'étude. *Salix x rubens* à un angle d'inflexion de 25° à la charge ultime s'élevant à 460 N, ainsi sa charge la plus élevée n'est pas la valeur la plus élevée sur l'ensemble des plantes étudiées. Et (Suttili et al., 2012) affirme que pour préserver la qualité et la fonction de flexibilité de *Salix x rubens* il est nécessaire d'effectuer un entretien plus fréquent consistant à la coupe systématique des tiges.

L'effet de drainage par l'absorption racinaires et l'évapotranspiration des feuilles sont des caractéristiques importantes dans la résistance à l'érosion. (Pollen, 2006.pdf, s. d.) dans son étude de terrain a observé que la résistance à la traction des racines est indépendante de l'humidité mais cette dernière influe sur le diamètre seuil des racines. En effet lorsque l'humidité diminue les racines arrachées sont plus petites, le lien de friction entre le sol et les racines est plus fort. Sur les sols secs la rupture racinaire est plus élevée, la résistance au cisaillement est donc plus forte, et sur sol humide c'est l'arrachement racinaire qui est plus fréquent. Ainsi comme le rappelle dans l'introduction de leur étude (Reubens et al., 2007) la végétation réduit la teneur en eau du sol en augmentant l'évapotranspiration.

En augmentant la rugosité de surface, la végétation a un effet de barrage lors de crues, cela permet de réduire la vitesse et donc de limiter les forces de cisaillement. (Frossard, 2009; Reubens et al., 2007) Sinon cela favorise également la sédimentation, processus bénéfique pour l'implantation d'espèces riveraines souhaitables dans le milieu riverain (voir partie IIIa).

Par l'action des racines la végétation maintient la porosité du sol ce qui améliore l'infiltration (Frossard, 2009), cependant il est important de ne pas trop augmenter le taux d'infiltration car cela peut augmenter le niveau de la nappe phréatique et ce qui pourrait augmenter la pression d'infiltration et engendrant une augmentation des risques de glissement de terrain (élément rappelé dans l'article de (Reubens et al., 2007)).

L'interception des précipitations grâce à la canopée constitue un des facteurs hydrologiques importants à considérer dans le choix d'espèces ligneuses lors de la mise en place de projet de restauration à l'aide du génie végétal. Ainsi les caractéristiques hydrologiques d'une espèce (couverture de la canopée, taux d'évapotranspiration, profondeur d'enracinement) selon (Simon & Collison, 2002) sont aussi importantes à considérer dans le choix d'une espèce que les propriétés mécaniques de la plante (force des racines, surface, structure, densité etc).

Les propriétés des Salicacées ont été largement plébiscitées, les saules constituent la famille d'espèces majoritairement utilisée dans les techniques de génie végétal de stabilisation de berges en France. La souplesse des branches et le caractère pionnier et la facilité de bouturage (taux de reprise élevée) font que les saules sont fortement utilisés. Par ailleurs comme le rappelle (Frossard, 2009) les saules sont naturellement présents dans les zones riveraines et sont des éléments essentiels des ripisylves.

Un des facteurs influençant fortement la stabilité des berges et l'enracinement de la végétation sont les paramètres pédologiques. En effet comme le rappelle (Reubens et al., 2007) différents critères permettent de connaître l'érodabilité potentiel d'un sol en fonction : de sa capacité d'infiltration, de la densité apparente, de la résistance au cisaillement, de sa texture, et de son contenu en matière organique et chimique.

Différents problèmes ont été soulevés par (Peeters et al., 2018) ayant impactés l'efficacité des ouvrages de techniques de génie végétal comme : une mauvaise reprise de la végétation dû à une mauvaise exposition, à un entretien inadapté (coupe non gérées), et aux dégâts liés à la faune (bétail et rongeur). Parfois un mauvais dimensionnement lié des défauts de conception induit un remplissage notamment en sédiment non adapté. Parfois les caractéristiques géomorphologiques (angle, courbure, débit) ont été mal pris en compte, mais aussi les impacts de la sécheresse sont importants à considérer notamment sur les saules. (Frossard, 2009)

(Frossard, 2009) propose d'autres espèces ayant des caractéristiques biologiques et physiques intéressantes dans la mise en place de techniques de génie végétal comme l'*Hippophae rhamnoides* (argousier) ou *Myricaria germanica* (myricaire d'Allemagne) avec des capacités de bouturage intéressantes, le *Populus nigra* (peuplier noir sauvage) plus fréquent, ou encore des espèces indigènes plus adaptée au milieu méditerranéen, comme *Populus alba*, peuplier blanc ou le *Tamarix gallica* (le tamaris de France).

III. La préservation de la biodiversité

a. La diversité et succession végétale, potentialités des différentes techniques

La diversité alpha, ou diversité spécifique correspond à la richesse d'espèces trouvées sur une technique ou un milieu étudié. Pour relever les espèces sur chaque site la technique du point de contact a été mis en place sur l'ensemble des études considérées dans notre état de l'art. Ainsi un baton de 2 mètre de long et de 1 centimètre de diamètre est placé le long de trois transects de 25 mètres partant du pied de berge à proximité de la ligne d'eau jusqu'en haut de la berge. Trente mesures ont été effectuées sur chaque site et l'identification des espèces végétales s'est faite à l'aide des Flores. Les techniques considérées ont été l'enrochement pour le génie civil, la technique mixte (pied de berge en enrochement et partie supérieure de berge en génie végétal) et deux techniques de génie végétal : fascine et caissons végétalisés. En étudiant la diversité alpha, on peut supposer que le degré de naturalité des sites est positivement corrélé à la richesse spécifique. Le degré de naturalité est considéré dans l'étude de (Cavaillé et al., 2015) comme la densité de matière végétale utilisée et trouvée le long des techniques et habitats étudiées. Ainsi les berges naturelles sont donc considérées comme l'objectif, l'habitat de référence pour les techniques végétales, les berges mixtes sont un peu plus végétalisées que les enrochements considérés comme la technique la plus fortement anthropisée avec une faible présence de végétal.

Sur l'ensemble des études menées, la technique d'enrochement propre au génie civil présente moins d'espèces que les autres méthodes et milieux de références. La richesse spécifique est donc moindre ce qui induit une faible diversité fonctionnelle même 3 à 7 ans après la réalisation (Cavaillé et al., 2013). Donc même de nombreuses années de colonisation spontanée ne suffisent pas à permettre une diversification des espèces végétales. Cette homogénéisation s'explique par un substrat minéral qui physiquement limite la colonisation (Cavaillé et al., 2013).

Cependant différentes études (Cavaillé et al., 2013, 2015; Tisserant et al., 2021) menées dans les Alpes et le Jura, en Suisse et en France ont montré que la diversité alpha des techniques mixtes se rapprochait plus du milieu naturel que les techniques de génie végétal de protection des berges. Ainsi on comprend donc que la quantité de matière minérale sur la technique étudiée n'est pas négativement corrélée à la diversité d'espèces. Ceci s'explique car les techniques de génie végétal, fascines et caissons végétalisés, ont majoritairement implantés des plantes de la famille des Salicacées qui avec le temps développe une canopée foisonnante induisant une inhibition du développement d'autres espèces dû au manque d'espace et de lumière (Cavaillé et al., 2013). La seconde explication est que l'enrochement en pied de berge forme un milieu ouvert avec de nombreuses interstices qui favorise la sédimentation tout en diminuant la vitesse de l'eau. Ce processus facilite l'interception d'élément végétatif et de graines qui vont pouvoir se développer sur le substrat humide permettant ainsi la colonisation des plantes près de la ligne de flottaison. De plus la sédimentation dans les lacunes permet de créer un milieu riche en loam, puis en litière ce qui favorise l'implantation d'espèces pionnières et hygrophiles (comme les héliophytes). Ce résultat confirme l'hypothèse de l'hétérogénéité de l'habitat en écologie, ce paradigme suppose que plus un habitat présente une structure complexe plus il est en capacité de fournir un plus grand nombre de niches et des moyens diversifiés d'exploiter les ressources environnementales et donc d'accroître la diversité des espèces (Cavaillé et al., 2015). Cependant l'étude de (Tisserant et al., 2021) menée sur 124 berges de 55 cours d'eau au Québec ne concorde pas avec les derniers éléments évoqués. En effet la richesse spécifique était supérieure sur les berges de techniques végétales que sur les berges mixtes. (Janssen et al., 2019) explique dans son étude que l'introduction d'espèces pionnières comme les Saules influent sur les conditions écologiques locales favorisant une densité et une richesse d'espèces grâce à une colonisation spontanée d'espèces riveraines. C'est en recréant un milieu stable (grâce aux techniques de génie végétal) que la succession secondaire peut se dérouler, c'est l'hypothèse de « Field of Dreams » (Tisserant et al., 2020, 2021). Ainsi (Tisserant et al., 2021) affirme que pour favoriser la biodiversité végétale locale

il est nécessaire de mettre en place les techniques de génie végétal plutôt que les techniques mixtes (tout en prenant en compte les spécificités locales).

La diversité beta sur chaque technique déjà évoquée précédemment a été étudiée pour la première fois par (Tisserant et al., 2021). Cet indicateur permet d'estimer l'unicité de la diversité taxonomique de chacun des sites par rapport à l'ensemble des milieux pris en compte dans l'étude. Les éléments qui ressortent de cette recherche sont que les techniques de génie végétal n'ont que peu contribué à cette diversité bêta car les niches sont plus stables, les saules favorisent la colonisation d'espèces tolérantes à l'ombre et compétitrices, ce qui réduit la gamme d'espèces. L'enrochement notamment au niveau du milieu de berge contribue fortement à la diversité bêta. Ce milieu subi un rajeunissement récurrent dû à l'affouillement des berges, des niches d'habitats vides ou avec des conditions changeantes l'ensemble de ces éléments expliquent l'hétérogénéité de la composition végétale trouvée sur ces berges. Ainsi les communautés végétales des berges en enrochement contrairement à ce qu'affirmait (Cavaillé et al., 2013) ne sont pas homogène sur l'ensemble de la verticalité de la berge. (Tisserant et al., 2020) a trouvé que les techniques d'enrochement et mixtes favorisent la richesse d'espèces non pionnière comme des arbrisseaux tels que *Buddleia davidii*, *Cornus sanguinea* et *Ligustrum vulgare*.

Le mécanisme de dispersion des propagules va impacter la structure de la flore riveraine, et donc permet de comprendre les schémas de distribution des espèces le long des berges. Le mode de dispersion des propagules qui a été le plus fréquent lors de l'analyse des espèces dans l'étude de (Cavaillé et al., 2015) est l'anémochorie (vent). Cependant il est possible que la dispersion par hydrochorie (eau) ait été sous-estimé car de nombreuses espèces qui utilise le vent pour se disperser peuvent lors de crues, utiliser comme moyen de propagation l'eau (puisqu'elles ont la capacité de flotter) (Johansson et al., 1996). L'un des biais de l'étude des propagules est que la plupart des plantes relevées ont été plantées ou semées sur les berges aménagées (techniques mixtes, fascines, caissons végétalisés).

Comme expliqué précédemment les techniques mixtes sont plus enclin à piéger les propagules grâce aux interstices qui vont fixer les graines, et le substrat humide et la matière organique présente qui va favoriser le processus de germination sur des microsites. Les enrochements suivent un processus de colonisation stochastique (conditions : habitats non stables, communautés végétales supposément différentes des sites naturels) cependant au niveau du pied de berge la composition de communautés végétales avec le temps se rapprochent de celles des milieux naturels. Ainsi les sites de référence sont aussi soumis aux perturbations liées aux inondations et les communautés végétales restent moins complexité, ce stade de succession primaire est observable sur tous les sites de génie végétal (Tisserant et al., 2021). (Tisserant et al., 2020) a montré dans la zone d'étude de milieux montagneux de France et Suisse que les espèces préférant les milieux azotés, qui sont généralement tolérante également à l'ombre et au stress (sécheresse) ont remplacé avec le temps les espèces hygrophiles. Cette succession typique des forêts riveraines est largement observable sur les sites naturels et de génie végétal puisque en 14 ans les espèces compétitrice et tolérantes à l'ombre ont doublé, et ont stagné sur les berges mixtes et en enrochement.

Les berges avec du matériau minéral ont montré une proportion d'espèces tolérante à la lumière et xérophytes plus importantes, la température constitue donc un filtre environnement. En effet les enrochements sont donc des milieux inhospitaliers pour de nombreuses espèces et des espèces exotiques et envahissantes tels que *Fallopia japonica*, *Robinia pseudoacacia*. Cela rejoint les conclusions de (Cavaillé et al., 2013) qui a observé une fréquence plus importante d'espèces exotiques et envahissantes sur les sites de protection de berges en génie civil, car le milieu perturbé a permis le développement de ces espèces qui ont un taux de croissance plus élevé ce qui constitue un avantage compétitif. Sur les milieux mixtes et de génie végétal la présence d'espèces compétitrices vont contrôler l'apparition d'espèces exotiques. Au Canada à proximité des sites d'étude (Tisserant

et al., 2021) les espèces invasives formaient des plants trop jeunes qui n'ont par conséquent pas envahis les berges étudiées. La flore indigène et hydrochore souhaitée sur les berges aménagées n'étaient que peu composé d'espèces rares (Tisserant et al., 2021), cela s'explique par la présence d'espèces spécialistes et rudérales sur ces milieux riverains qui peuvent se développer sur une large gamme d'habitat ce qui ne favorise pas l'implantation d'espèce plus rares dans ces habitats.

Concernant la prise en compte de facteurs environnementaux de plus grande échelle notamment par l'analyse du contexte paysager (occupation des sols), (Janssen et al., 2019) suite à l'étude statistique on a pu observer que la biodiversité diminuait lorsque le pourcentage d'urbanisation augmentait au niveau paysager dans les alentours. De plus lorsque les zones forestières dans le contexte paysager augmente, la richesse d'espèces herbacées croît, cela montre les relations entre les différentes étapes de succession le long des cours d'eau. Cela met en perspective le réel impact des techniques de génie végétal sur la biodiversité des milieux riverains lorsque les impacts à plus grande échelle lié à l'activité anthropique (qualité de l'eau) influencent plus la qualité de ces habitats que ces aménagements à l'échelle locale. Il est donc important de restituer ces aménagements dans un contexte global et donc d'accompagner une réflexion de la place de ces projets dans la préservation des écosystèmes. Enfin l'étude de (Evette et al., 2012) produit une classification des différentes espèces utiles dans les projets de génie végétal, en différents groupes en fonction de variables environnementales (saturation en eau, pH, lumière, température, nitrogène, humidité du sol). Ainsi ces groupes en fonction des caractéristiques identifiées sur les sites, permettant également la succession végétale (séquence végétale vertical le long des berges) est utile dans le contexte de changement climatique car il permet une lecture facilitée du choix d'espèces.

b. La biodiversité de la faune terrestre

De nombreuses études établissent un lien de corrélation entre les techniques de génie végétal qui améliorent les conditions environnementales et la biodiversité faunistique sur ces milieux (Cavaillé et al., 2012; Frossard, 2009; Houbrechts et al., s. d.; Janssen et al., 2019).

Dans cette partie nous nous focaliserons sur les espèces faunistiques terrestres, peu de groupes biologiques de faune terrestre ont été analysés mais les insectes notamment l'ordre des coléoptères ont été étudiés. L'étude de (Cavaillé et al., 2012) s'intéresse aux coléoptères volants de 15 berges sur six cours d'eau différents dans la région Rhône-Alpes Auvergne et (Janssen et al., 2019) sur la même aire d'étude s'est focalisé sur les carabidés. (Cavaillé et al., 2013) se sont penchés sur les coléoptères car cet ordre d'insectes constitue un indicateur de diversité et d'état de santé de l'habitat et renseigne également des informations sur les processus hydrologiques. En étudiant le statut fonctionnel et trophique des coléoptères présents sur site on comprend l'influence et les caractéristiques de l'habitat sur les insectes considérés.

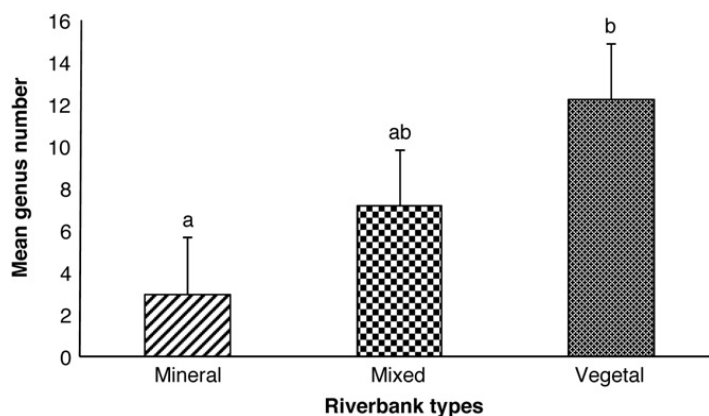


Figure 20 : Nombre moyen de genre de coléoptères sur les trois types de berges. Les lettres différentes indiquent une différence statistique entre les échantillons. Les barres d'erreur indiquent les erreurs standard.
Source : (Cavaillé et al., 2013)

42 genres de coléoptères volants ont été collectés suite à l'échantillonnage des sites. La figure n°20 nous indique que la richesse spécifique des coléoptères volants est plus importante sur les berges végétales (techniques de génie végétal et naturelle). Ainsi la couverture et la biomasse végétale plus importante sur ces sites permettent le développement d'une végétation plus complexe. (Cavaillé et al., 2013)

Cette végétation, grâce à la diversité des espèces végétale et à la présence notamment de différentes strates de végétation permet une structure et une hétérogénéité de l'habitat favorable à la biodiversité de l'entomofaune. Cela est dû

à la dynamique fluviale, les perturbations liées aux inondations dans les techniques de génie végétal permettent une différence de granulométrie, d'humidité et de fertilité des micro-habitats. Ainsi les inondations permettent un changement récurrent de la mosaïque d'habitat et entraîne la succession verticale le long des berges et donc le développement de différentes strates. (Janssen et al., 2019) dans les modèles de diversité, les variables hydrologiques ont prédit la richesse et l'abondance des carabes. Cette même étude qui a relevé 64 espèces de carabidés a conclu que les sites avec les techniques de génie végétal améliorent la qualité de l'habitat terrestre, notamment par l'introduction d'espèces pionnières, et donc augmente la richesse et l'abondance des espèces faunistiques.

Le genre *Salix* est un élément essentiel dans l'implication de la richesse spécifique des coléoptères. En effet différents types de coléoptères ont été relevés sur les sites de génie végétal, notamment des insectes nectarophages qui vont pouvoir utiliser le Saule comme source de nectar pendant une période de l'année (en janvier et février) où les sources de nectar sont rares. Les espèces de *Cetonia* saproxyliques est lié à la présence d'espèces ligneuses et notamment de saule car les larves se développent dans le bois en décomposition. D'autres espèces de *Cerambycidae* comme *Lamia textor*, dont la présence dépend du Saule car ses larves grandissent dans les souches et les racines des saules. *C. aurata*, *Chaetocnema aridula* et *Altica aenescens* sont d'autres espèces dont la présence dépend du Saule. Puis il y a *Necydalis major* qui évoluent dans les hauteurs des arbres, et *Aromia moschata* qui a des larves se développant dans les souches et branches en décomposition. Les coléoptères herbivores sont nombreux et ont des sources d'alimentation diverses :

- *Variimorda* ssp. lié à la présence d'Apiaceae
- *Hoplia farinosa* se nourrissant de pollen

- *Oedemera* ssp. dont la larve est xylophage et l'adulte herbivore

Les milieux à proximité de la ligne d'eau, contiennent de nombreuses espèces de prédateurs et de charognards notamment des carabes. Les carabes se nourrissant de fucus ou de charognes auront plus de probabilité d'avoir du fucus dans les techniques "de génie végétal" et "mixtes" qui présentent plus de végétation que l'enrochement. La diversité des milieux, la présence de fucus induit probabilité plus grande de mortalité par noyade des animaux. Cette zone au niveau de l'écotone est une source d'alimentation importante pour certaines espèces notamment appartenant au groupe des prédateurs ou des charognards comme les carabes.

La ripisylve est un milieu riche en biodiversité qu'il convient de préserver ainsi dans le guide technique de (Houbrechts et al., s. d.), il est important de ne pas abattre des arbres dépérissant ou mort (appart s'ils constituent une embâcle et un danger réel) car ce micro-habitat est bénéfique pour différents groupes biologiques comme les insectes (source d'alimentation), les oiseaux ou les chauve-souris comme refuge. La plantation d'arbustes à baies peut être intéressant pour la qualité paysagère mais aussi est une source de nourriture pour certains oiseaux. Enfin diversifier les techniques de génie végétal permet de diversifier les habitats pour la faune le long du continuum fluviale.

(Tisserant et al., 2021) propose une espèce spécifique qui est semi-aquatique (*Salix* et *Maacrophyte*) dont la végétation dense est bénéfique à diverses espèces d'oiseaux locales. En effet l'article appelle à plus de recherche sur le rapport entre le Saule et le Cornouiller qui peut constituer un prédicteur de la structure verticale de la végétation le long des berges. Ainsi la succession végétale formée peut avoir un impact sur certaines communautés végétales et leur utilisation par les niveaux trophiques supérieurs.

Les aménagements de génie végétal forme donc des habitats potentiels pour de nombreuses espèces et permet la nidification, le nourrissage ou l'abri pour la faune sauvage. (Frossard, 2009) De plus ils ont un rôle à jouer dans la continuité écologique car ils forment une structure favorisant la dispersion des populations le long de la zone riveraine et permet de réduire les effets néfastes (discontinuités écologiques) des lacunes de végétation dûes au génie civil. (Tisserant et al., 2021)

Ainsi (Sudduth & Meyer, 2006) a montré que les habitats créés grâce aux aménagements du génie végétal contribuent à une amélioration locale de la qualité des berges et donc à plus grande échelle à une amélioration de la diversité de l'écosystème fluvial et de l'aspect fonctionnel lié à l'intégration paysagère.

c. La diversité et abondance des organismes aquatiques

Les macro-invertébrés benthiques sont collectées sur les sites étudiés grâce à la technique du Surber Sample, cela permet de recueillir les différents insectes aquatiques, crustacées, mollusques ou encore vers (Plathelminthe, Annelide, Nematode) qui composent la faune aquatique des cours d'eau.

(Sudduth & Meyer, 2006) a étudié les communautés de macro-invertébrés benthiques dans le bassin versant d'Atlanta, donc à proximité de milieux urbains. L'analyse qui est ressortie de cette étude est que le génie végétal est bénéfique pour la biodiversité de la faune aquatique car il crée un habitat préférentiel et adapté à ces espèces. Notamment le pourcentage d'habitat organique influe fortement sur la diversité des taxons, et la richesse d'espèces d'insectes notamment. Mais aussi il existe un fort lien de corrélation entre la quantité de matière organique présent dans l'habitat et la biomasse globale de macro-invertébrés, et la biomasse de broyeurs et d'insectes. Comme expliqué précédemment les techniques de génie végétal vont plus être enclin, grâce aux racines notamment, à capter les débris ligneux et les feuilles en décomposition (d'où la présence de broyeurs qui ont pour rôle de réduire les matières organiques grossière en particules plus fines) ce qui va créer des micro-habitats stables qui peuvent servir de milieux de refuge pour les macro-invertébrés lors de crues. Ainsi l'augmentation de la quantité de bois et de racines et écologiquement favorables aux espèces de faune du milieu aquatique.

(Cavaillé et al., 2018) a montré grâce à cette étude que les techniques mixtes et de génie civil ne constitue pas des habitats à privilégier pour favoriser la biodiversité des communautés de macro-invertébrés benthiques. En effet les fascines sont des habitats de haute qualité notamment grâce aux racines qui permettent la sédimentation ce qui permet le recrutement de macro-invertébrés benthiques diversifiés. 88 espèces étaient des Ephéméroptères, Plécoptères ou Trichoptères (EPT) parmi les 195 taxons d'insectes recueillies et les 78 taxons de non-insectes étaient principalement constitués de Crustacés, Turbellariés, Hirudinea, de mollusques (Gastropodes, Bivalvia) et d'Oligochaeta (annélides).

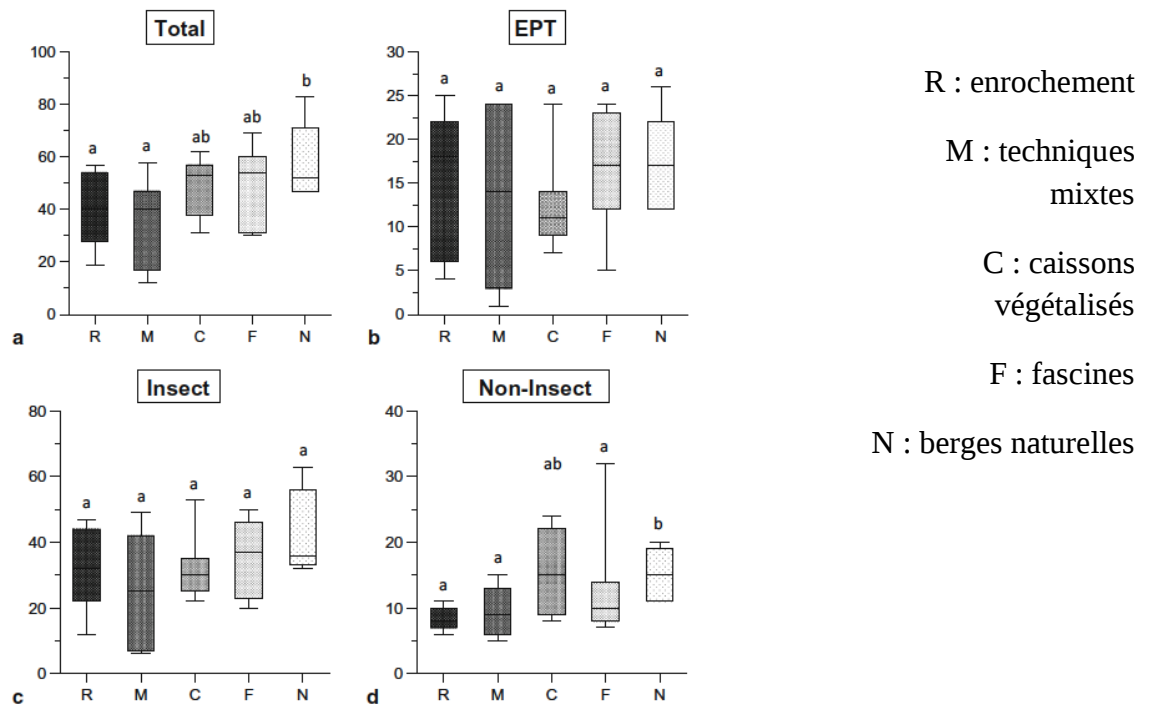


Fig. 3 Boxplot distribution of taxonomic richness for each riverbank type, a total sampled organisms, b *Ephemeroptera*, *Plecoptera*, *Trichoptera* (EPT), c insects, d non-Insects.

Different letters indicate a statistical difference (Kruskal-Wallis test) between categories. Error bars indicate standard errors

Figure 21 : Boxplot de la richesse spécifique de différents groupes échantillonnés sur les différentes techniques et milieux de l'étude. Source : (Cavaillé et al., 2018)

(Janssen et al., 2019) a obtenu les mêmes conclusions, le génie végétal permet une amélioration de la qualité de l'habitat aquatique. L'introduction d'espèces ligneuses pionnières ingénieurs permet une modification des propriétés physiques du milieu riverain notamment en améliorant des conditions locales (température de l'eau, condition de débit, ensoleillement). Ce qui a pour conséquence d'augmenter la qualité de l'habitat aquatique. Ainsi (Janssen et al., 2021) dans cette étude explique que le génie végétal permet une augmentation d'habitats potentiels car ces milieux se rapprochent des écosystèmes naturels, ainsi les berges en fascine et naturel ont une qualité d'habitat aquatique plus important que celle des berges mixtes et en enrochement.

En effet les techniques comme l'enrochement ou les aménagements mixtes engendrent une simplification des micro-habitats aquatiques liée notamment à la présence plus importante de blocs (dalles) de taille conséquente dans la partie immergée de la berge (Janssen et al., 2019). Les fascines de saule développée jusqu'en pied de berge est une pratique intéressante puisque cela permet d'augmenter l'hétérogénéité de l'habitat (en lien avec la charge sédimentaire) pour les organismes aquatiques tout en améliorant les conditions locales telles que la température de l'eau, l'ensoleillement ou encore les conditions de débit. (Janssen et al., 2021) conseille d'éviter l'enrochement en pied de berge car ce dernier ne favorise pas la biodiversité de la faune aquatique et par ailleurs les techniques comme les fascines ou les caissons végétalisés permettent un développement racinaire fin qui constitue et permet un apport de débris et de litières de feuilles dans la rivière, cet apport en matière organique comme expliqué précédemment est intéressant pour les macro-invertébrés benthiques.

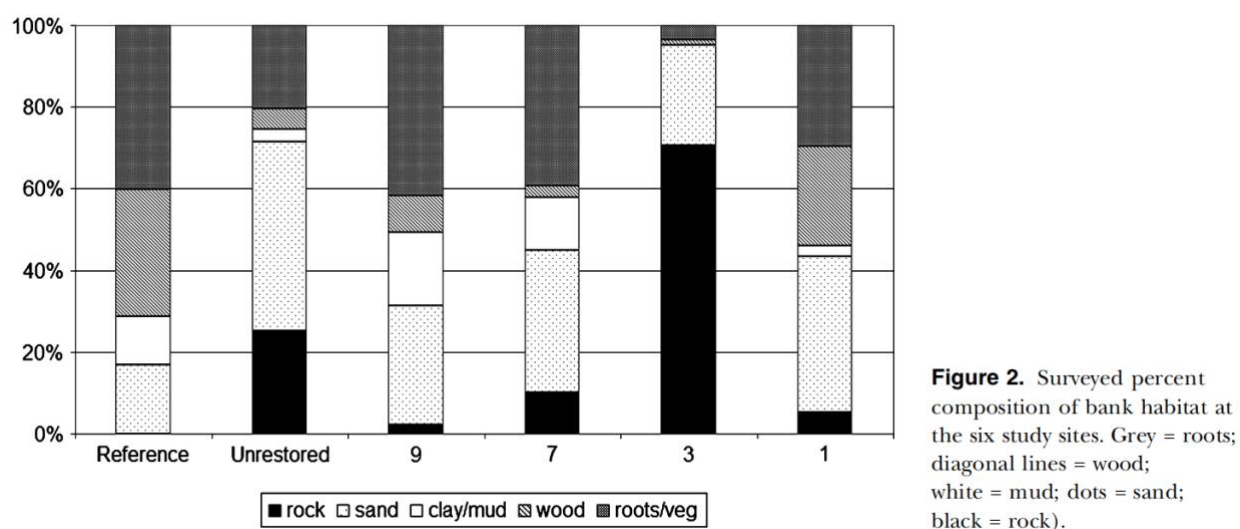


Figure 22 : Composition (en %) des matériaux composant les berges de six sites d'étude (Sudduth & Meyer, 2006)

Ainsi la méthode du Joint Planting (plantations et boutures vivantes insérées dans les interstices de l'enrochement) présenté en annexe 1, qui correspond au site 3 sur la figure ci-dessus, présente même après 3 ans une faible quantité de matière organique et l'ensemble des mesures (richesse, abondance etc) de macro-invertébrés est faible et est encore plus bas que le site non restauré. Le site 9 constitué d'une combinaison de géotextile et de boutures vivantes, sur le site 7 ces mêmes éléments sont présents avec l'ajout de " rondins " de tissu géotextile. Le site 1, a des berges constituées de nombreuses espèces ligneuses grâce à la plantation de boutures vivantes, et la plantation d'arbre le tout soutenu par un tissu géotextile. Le site de référence présentait le pourcentage le plus élevé d'habitat organique (71 %), les sites 9, 7 et 1 avaient environ 50 % d'habitats organiques ; c'est donc plus que le site non restauré (25 %) et encore plus que le site 3 (5 %). Les sites 9, 7 et 1 étaient similaires à plus de 70 % au site de référence le site non restauré et le site 3 ans se différenciaient de l'habitat de référence (45 et 22%, respectivement) dû à la proportion élevée de

roches dans ces milieux. L'étude a montré que l'abondance et la biomasse des macro-invertébrés benthique était plus importante dans les habitats organiques (racines et bois) que dans les habitats marqué par le milieu minéral (roche, sable). Ainsi les éphéméroptères de grande taille sensiblement plus impacté par la pollution, les Tipulidae, les Trichoptères, les Odonates trouveront dans les sites avec de la matière organique plus abondante un habitat plus favorable, milieu également intéressant pour les communautés de broyeurs et de prédateurs.

Dans l'ensemble, les taxons les plus courants étaient des oligochètes (embranchement des Annélides), les chironomes (famille de Diptères), les copépodes (crustacées), et la patelle *Ferrissia* (mollusques). Beaucoup de sites étaient marqué par la présence d'Odonates et de trichoptères hydropsychidés (sauf sur le site 9). Les prédateurs étaient plus abondants sur l'ensemble des sites, mais notamment sur le site 3 et 7 où le pourcentage d'abondance et de biomasse étaient supérieur. Les résultats de (Sudduth & Meyer, 2006) mettent en lumière que l'amélioration de la qualité ou le manque d'habitat n'est pas le critère principale à considérer dans l'étude et l'abondance de macro-invertébrés benthiques. En effet une rivière comparable au niveau d'une région plus montagneuse avec un paysage plus forestier présente près de 60% d'EPT alors que le site de référence ici ne possède que 5% (en abondance) uniquement d'Éphéméroptères et de Trichoptères sur l'ensemble des relevés effectués. On comprend donc notamment que le milieu urbain à proximité a de nombreux impacts liés à l'urbanisation comme une dégradation de la qualité de l'eau, une modification de l'intensité du débit d'orage ou encore du transport sédimentaire. (Janssen et al., 2019) a constaté que l'abondance et la richesse et des insectes aquatiques, dont les Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères (EPT) constituaient 54% de l'abondance totale et 44% de la richesse totale, augmentent de manière significative avec la croissance de surface forestière à proximité des sites.

L'étude de la composition et des traits biologiques des communautés d'organismes macro-benthique (Cavaillé et al., 2018) permet de comprendre quel rôle joue les berges aménagées dans la répartition des espèces le long du continuum fluvial. Ainsi il a été trouvé que les organismes de petite taille, avec un cycle de vie plus court, et présentant des diaspores protégées et/ou fixes, sont résistants et s'adaptent bien au milieu perturbé comme la berge naturelle (crue). La dynamique sédimentaire joue un rôle important puisque les berges dont le substrat est stable (comme les dalles ou les roches) liés aux techniques d'enrochements ou de berges mixtes et des berges jusqu'à parfois des caissons végétalisés abritaient des organismes plus gros. En effet le substrat instable des berges naturelles ou des fascines accueillait des organismes de plus petites tailles dû à une granulométrie diversifié, les sédiments stabilisés par les racines de saules notamment induisent un changement dans les communautés macrobenthiques des berges. Cependant d'autres éléments, comme la largeur du lit de la rivière sont des facteurs influençant plus la disposition des communautés macrobenthiques le long des berges comme l'ont montré (Janssen et al., 2021). Ils ont montré à l'aide d'étude statistiques que les macroinvertébrés étaient plus influencés par les facteurs régionaux que par les facteurs locaux, d'ailleurs le contexte hydrologique a été le facteur qui a permis d'explicitier le mieux la composition des habitudes alimentaires des taxons et la variation de la diversité des taxons. Par ailleurs, à mesure que la proportion d'espaces urbaines diminuait à proximité des zones d'étude plus la diversité des espèces indigènes, des grattoirs et des décheteteurs augmentait. La qualité de l'eau a eu également un impact positif sur les espèces de grattoirs et indigènes, et négatif quant à la richesse des espèces exotiques.

(Janssen et al., 2019) a également confirmé que les activités humaines ont un impact important sur la biodiversité riveraine. La richesse spécifique a diminué avec l'augmentation de la surface des zones urbaines dans le contexte paysager. **De plus cette étude confirme le consensus autour du rôle du génie végétal, elle insiste sur le fait que les techniques de génie végétal n'ont pas la capacité de contrebalancer l'ensemble des dégradations environnementales liés aux activités anthropiques à proximité des zones riveraines.**

Conclusion

L'érosion des berges des cours d'eau est un processus naturel qu'il convient de conserver, elle permet le bon fonctionnement de la dynamique sédimentaire tout au long du bassin versant. La compréhension des impacts des infrastructures humaines (barrages hydroélectriques, digues, canalisation des cours d'eau, enrochement, ...) sur l'écoulement de l'eau et l'amplification du processus de l'érosion questionne sur la gestion et la préservation du continuum fluvial (dans ces trois dimensions : verticale, latérale et longitudinale).

Il est donc essentiel d'analyser les enjeux humains liés à la sécurité pour pouvoir justifier de la mise en place de techniques de stabilisation de berges. La mise en place de techniques de génie végétal est plus intéressante, vis-à-vis de la biodiversité, que l'enrochement qui a été multiplié depuis de nombreuses années. Mais on comprend que le contrôle de l'érosion s'inscrit dans une démarche anthropocentrée, ces méthodes de génie écologique permettent donc de trouver un compromis dans l'efficacité lié à la stabilisation du sol, l'intégration paysagère et l'amélioration de la biodiversité.

La Society for Ecological Restoration International (SER) a défini la restauration écologique dans les termes suivants : « La restauration écologique est le processus qui consiste à aider le rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit » (SER, 2002). D'après cette définition, la « restauration au sens strict vise à atteindre un état entièrement fonctionnel et autorégulé » c'est-à-dire qu'elle cherche à récupérer l'intégrité d'un écosystème. Comme nous avons pu le voir certaines techniques de génie végétal comme les fascines ou les caissons végétalisés favorisent la succession végétale qui se déroule naturellement, encouragent la diversité des habitats et améliorant la qualité de ces derniers, ce qui permet donc la diversité spécifique végétale et animale. Cependant il est important d'intégrer ces techniques de génie végétal dans un projet de grande échelle, car les nombreuses études notamment sur les macro-invertébrés benthiques ont révélé l'importance des facteurs paysagers et des impacts liés aux activités de l'Homme sur la biodiversité de la zone riparienne (Cavaillé et al., 2018; Janssen et al., 2019, 2021; Sudduth & Meyer, 2006).

Certains points importants restent à être approfondis notamment sur la gestion de ces structures dans le temps, mais aussi un comparatif d'un point de vue financier est utile pour voir la faisabilité économique de ces projets notamment car certains articles divulguent ces informations. Il sera judicieux de traiter l'aspect coût mais aussi réglementaire pour comprendre les implications juridiques et financières lors de la mise en œuvre de ces projets.

De nombreuses caractéristiques sont à analyser au niveau du site mais aussi à plus grande échelle pour faire un choix judicieux de la technique et bien dimensionner l'ouvrage. La conception de ces aménagements reste entre les mains d'experts car il existe peu de guides techniques sur le sujet, et la connaissance, l'expérience, sont des facteurs importants dans le succès de ces projets. Les retours d'expérience sur le moyen et long terme sont de plus en plus nombreux et permettent de comprendre les critères essentiels à considérer avant, pendant et après la mise en place de ces structures. (Peeters et al., 2018)

On comprend que l'approche holistique et systémique est utile dans la gestion des cours d'eau (et des projets écologiques en général) notamment de la zone riparienne car de nombreux éléments et facteurs sont inters corrélés. Il est important de faire appel à une diversité de professionnels tels que des biologistes, des ingénieurs, des géologues et des agronomes pour favoriser les probabilités de réussite de ces projets (Rodrigues Holanda & da Roch, 2011)

Suite à cet état de l'art, il serait intéressant que de nouvelles recherches se penchent sur d'autres groupes taxonomiques pour évaluer la contribution du génie végétal sur la biodiversité, Également, une étude paysagère pourrait être faite pour évaluer la continuité écologique de la zone riparienne sur une aire donnée et étudier l'influence de ces techniques sur la dispersion des espèces par l'étude d'un groupe taxonomique.

Bibliographie :

22_Thorne_1978_These.pdf. (s. d.).

- Adam, P., & Debiais, N. (s. d.). *Le génie végétal—Un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques*. 1.
- Allen, H. H., & Leech, J. R. (1997). *Bioengineering for Streambank Erosion Control. Report 1—Guidelines*.: Defense Technical Information Center. <https://doi.org/10.21236/ADA326294>
- British Columbia, Water Management Branch. Public Safety Section, British Columbia, & Water Management Branch. Public Safety Section. (2000). *Riprap design and construction guide*. Ministry of Environment, Lands & Parks, Water Management Branch, Public Safety Section.
- Carone, M. T., Greco, M., & Molino, B. (2006). A sediment-filter ecosystem for reservoir rehabilitation. *Ecological Engineering*, 26(2), 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.09.002>
- Cavaillé, P., Dommanget, F., Daumergue, N., Loucougaray, G., Spiegelberger, T., Tabacchi, E., & Evette, A. (2013). Biodiversity assessment following a naturalness gradient of riverbank protection structures in French prealps rivers. *Ecological Engineering*, 53, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.105>
- Cavaillé, P., Ducasse, L., Breton, V., Dommanget, F., Tabacchi, E., & Evette, A. (2015). Functional and taxonomic plant diversity for riverbank protection works: Bioengineering techniques close to natural banks and beyond hard engineering. *Journal of Environmental Management*, 151, 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.028>
- Cavaillé, P., Dumont, B., Van Looy, K., Floury, M., Tabacchi, E., & Evette, A. (2018). Influence of riverbank stabilization techniques on taxonomic and functional macrobenthic communities. *Hydrobiologia*, 807(1), 19-35. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3380-3>
- Cavaillé, P., Evette, A., & Dommanget, F. (2012). Biodiversité des aménagements de berges de montagne : Caractérisation selon un gradient de naturalité. *INVASIVE SPECIES*, 3.
- Décamps, H. (2011). River networks as biodiversity hotlines. *Comptes Rendus Biologies*, 334(5-6), 420-434. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2011.03.002>
- Evette, A., Balique, C., Lavaine, C., Rey, F., & Prunier, P. (2012). USING ECOLOGICAL AND BIOGEOGRAPHICAL FEATURES TO PRODUCE A TYPOLOGY OF THE PLANT SPECIES USED IN BIOENGINEERING FOR RIVERBANK PROTECTION IN EUROPE: TYPOLOGY OF PLANT SPECIES IN BIOENGINEERING. *River Research and Applications*, 28(10), 1830-1842. <https://doi.org/10.1002/rra.1560>
- Evette, A., Frossard, P. A., Vale, N., Leblois, S., & Recking, A. (2017). *Oser le génie végétal en rivière de montagne—Retour d'expérience sur les ouvrages Génie'Alp*. 7.
- Evette, A., Jaymond, D., Recking, A., Piton, G., Rauch, H. P., & Frossard, P.-A. (s. d.). *The limits of mechanical resistance in bioengineering for riverbank protection*. 7.
- Evette, A., Labonne, S., Rey, F., Liebault, F., Jancke, O., & Girel, J. (2009). History of Bioengineering Techniques for Erosion Control in Rivers in Western Europe. *Environmental Management*, 43(6), 972-984. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9275-y>
- Frossard, P.-A. (2009). *Le génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière : Une tradition millénaire en constante évolution*. 12.
- Gray, & Sotir. (1996). *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilisation*.
- Houbrechts, G., Hallot, E., Petit, F., Otte, P., & Genin, D. (s. d.). *Alexandre Peeters 1 Gisèle Verniers 2*. 68.
- Janssen, P., Cavaillé, P., Bray, F., & Evette, A. (2019). Soil bioengineering techniques enhance riparian habitat quality and multi-taxonomic diversity in the foothills of the Alps and Jura Mountains. *Ecological Engineering*, 133, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.017>
- Janssen, P., Dommanget, F., Cavaillé, P., & Evette, A. (2021). Does soil bioengineering benefits aquatic biodiversity? An empirical study of the relative influence of local and regional drivers on benthic macroinvertebrate assemblages. *Ecological Engineering*, 168, 106287. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106287>
- Johansson, M. E., Nilsson, C., & Nilsson, E. (1996). Do rivers function as corridors for plant dispersal? *Journal of Vegetation Science*, 7(4), 593-598. <https://doi.org/10.2307/3236309>
- Li, M.-H., & Eddleman, K. E. (2002). Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods A biotechnical streambank stabilization design approach. *Landscape and Urban Planning*, 18.
- Machtans, C. S., Villard, M.-A., & Hannon, S. J. (1996). Use of Riparian Buffer Strips as Movement Corridors by Forest Birds. *Conservation Biology*, 10(5), 1366-1379. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10051366.x>
- Naiman, R. J., Bilby, R. E., Schindler, D. E., & Helfield, J. M. (2002). Pacific Salmon, Nutrients, and the Dynamics of Freshwater and Riparian Ecosystems. *Ecosystems*, 5(4), 399-417. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0083-3>
- Peeters, A., Houbrechts, G., Hallot, E., Campenhout, J. V., Verniers, G., & Petit, F. (2018). Efficacité et résistance de techniques de protection de berges en génie végétal. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 24(2). <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11927>
- Petersen, I., Masters, Z., Hildrew, A. G., & Ormerod, S. J. (2004). Dispersal of adult aquatic insects in catchments of differing land use: Dispersal of adult aquatic insects. *Journal of Applied Ecology*, 41(5), 934-950. <https://doi.org/10.1111/j.0021-8901.2004.00942.x>
- Pinto, A., Fernandes, L. F. S., & Maia, R. (2016). Monitoring Methodology of Interventions for Riverbanks Stabilization : Assessment of Technical Solutions Performance. *Water Resources Management*, 30(14), 5281-5298. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1486-4>
- Pollen, 2006.pdf. (s. d.).
- Posi, S., Montabonnet, L., Recking, A., Evette, A., Bellot, H., Ousset, F., Ravanat, X., Piton, G., & Solari, L. (2018). Experimental study of riverbank protection with bio-engineering techniques. *E3S Web of Conferences*, 40, 05023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184005023>
- Queensland Government. (2006). *What causes bank erosion?*
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., & Muys, B. (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review. *Trees*, 21(4), 385-402. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0132-4>

- Rey, F., Crosaz, Y., Cassotti, F., & de Matos, M. (2015). Génie végétal, génie biologique et génie écologique : Concepts d'hier et d'aujourd'hui. *Sciences Eaux & Territoires, Numéro 16*(1), 4. <https://doi.org/10.3917/set.016.0004>
- Rodrigues Holanda, F. S., & da Roch, I. P. (2011). Streambank Soil Bioengineering Approach to Erosion Control. In A. Carpi (Éd.), *Progress in Molecular and Environmental Bioengineering—From Analysis and Modeling to Technology Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/20659>
- Rodriguez-Iturbe, I., Munepeeraikul, R., Bertuzzo, E., Levin, S. A., & Rinaldo, A. (2009). River networks as ecological corridors : A complex systems perspective for integrating hydrologic, geomorphologic, and ecologic dynamics: RIVER NETWORKS AS ECOLOGICAL CORRIDORS. *Water Resources Research, 45*(1). <https://doi.org/10.1029/2008WR007124>
- Schiechl, H. M., & Stern, R. (1997). *Water Bioengineering Techniques : For Watercourse Bank and Shoreline Protection*. Wiley. <https://books.google.fr/books?id=h69WSugYR-MC>
- Semlitsch, R. D., & Bodie, J. R. (2003). Biological Criteria for Buffer Zones around Wetlands and Riparian Habitats for Amphibians and Reptiles. *Conservation Biology, 17*(5), 1219-1228. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2003.02177.x>
- Simon, A., & Collison, A. J. C. (2002). Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms, 27*(5), 527-546. <https://doi.org/10.1002/esp.325>
- Sudduth, E. B., & Meyer, J. L. (2006). Effects of Bioengineered Streambank Stabilization on Bank Habitat and Macroinvertebrates in Urban Streams. *Environmental Management, 38*(2), 218-226. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0381-6>
- Sutuli, F. J., Denardi, L., Durlo, M. A., Rauch, H. P., & Weissteiner, C. (2012). Flexural behaviour of selected riparian plants under static load. *Ecological Engineering, 43*, 85-90. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.02.012>
- Tabacchi, E., Correll, D. L., Hauer, R., Pinay, G., Planty-Tabacchi, A., & Wissmar, R. C. (1998). **Development, maintenance and role of riparian vegetation in the river landscape**. *Freshwater Biology, 40*(3), 497-516. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1998.00381.x>
- Tisserant, M., Bourgeois, B., González, E., Evette, A., & Poulin, M. (2021). Controlling erosion while fostering plant biodiversity : A comparison of riverbank stabilization techniques. *Ecological Engineering, 172*, 106387. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106387>
- Tisserant, M., Janssen, P., Evette, A., González, E., Cavallé, P., & Poulin, M. (2020). Diversity and succession of riparian plant communities along riverbanks bioengineered for erosion control : A case study in the foothills of the Alps and the Jura Mountains. *Ecological Engineering, 152*, 105880. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105880>
- Watson, A. J., & Basher, L. R. (2006). *Motueka Integrated Catchment Management (Motueka ICM) Programme Report Series. 2005*, 35.
- Weissteiner, C., Ickerott, M., Ott, H., Probeck, M., Ramminger, G., Clerici, N., Dufourmont, H., & de Sousa, A. (2016). Europe's Green Arteries—A Continental Dataset of Riparian Zones. *Remote Sensing, 8*(11), 925. <https://doi.org/10.3390/rs8110925>

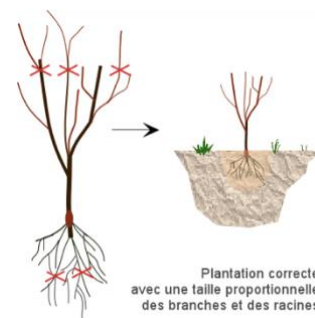
Annexes

Annexe 1 : Autres techniques de génie végétal, sources : (Houbrechts et al., s. d.; Li & Eddleman, 2002)

Les ouvrages de couverture :

La plantation

Technique simple qui consiste en la mise en terre de végétaux enracinés d'espèces ligneuses, c'est un moyen d'accompagner les autres techniques.



Plantation d'hélohytes

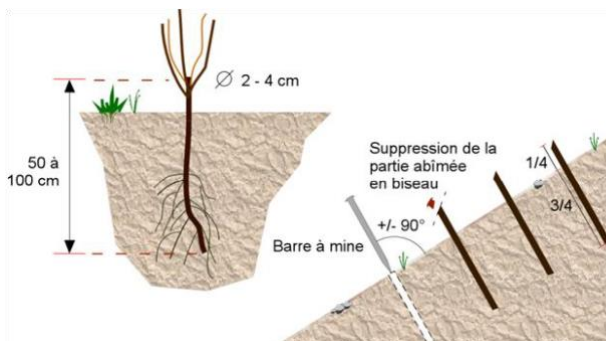
Sur des pentes douces, la plantation d'hélophytes peut se faire de trois manières : en ballot, en rhizome ou en rejets, elle augmente la sédimentation et ne nécessite pas d'entretien.

L'ensemencement

Technique de stabilisation de surface qui consiste à disperser des graines d'espèces herbacées (graminées, légumineuses notamment) mécaniquement ou hydrauliquement. Cela permet de limiter l'érosion de surface par ravinement notamment et présente de nombreux avantages et un rôle écologique important pour les espèces d'insectes ou d'oiseaux.

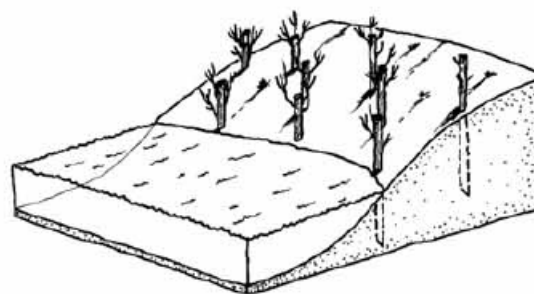
Le bouturage

La bouture c'est un segment de branche d'une espèce présentant une forte capacité de rejets. La branche de diamètre variable (quelques centimètres) et de longueur allant de 40 à 100 centimètres permet le développement d'un nouvel arbre ou arbuste. Les espèces les plus communément utilisés sont celle faisant partie du groupe des Salicacées qui permettent une revégétalisation rapide.



Plantations de boutures dormantes

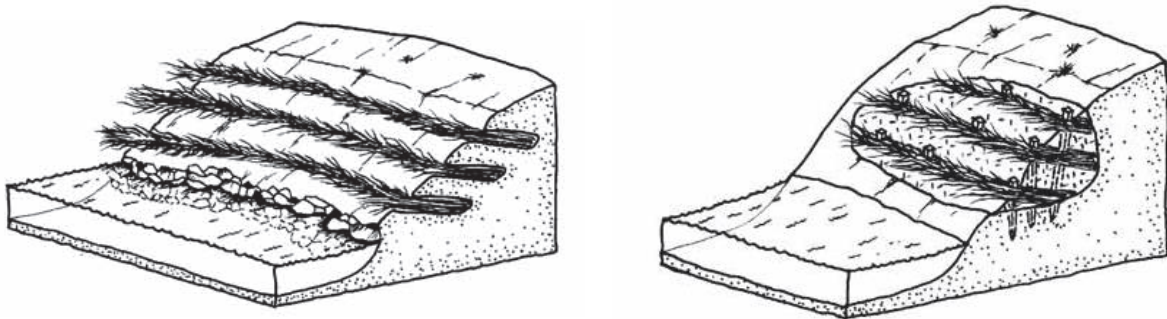
Plantations de boutures de bois dormant le long des berges des cours d'eau sous forme carré ou triangulaire. La plante en phase de dormance, perd ses feuilles c'est une période qui s'étend de mi-novembre à fin février, l'enracinement est long (plusieurs mois). Les pieux endommagés peuvent développer plusieurs tiges, il y a donc une capacité d'auto-réparation.



Cette technique peut être utilisée en combinaison avec d'autres techniques de génie végétal. La végétation se développant avec le temps va dépasser la limite des berges ce qui peut dévier l'écoulement du cours d'eau et réduire le débit mais aussi piéger les sédiments.

Lit de plant ou plançons

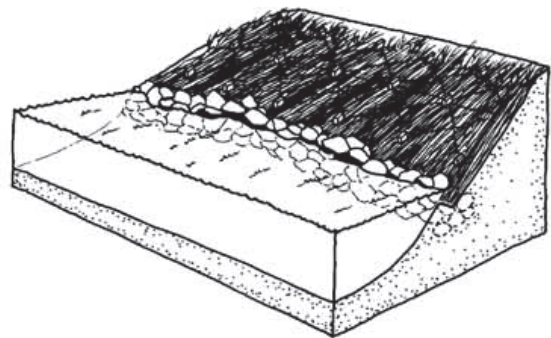
Consiste en une alternance de couches de boutures vivantes d'espèces ligneuses (avec forte capacité de rejets comme le saule) et de terre. Les éléments ligneux installés offrent une résistance immédiate grâce aux rangées de branches qui vont diminuer les effets de l'érosion superficielle par ruissellement et prévient les glissements de terrain superficiels.



Cette technique permet par exemple comme le schéma ci-dessus à droite de réparer les effondrements et les trous dans les berges des cours d'eau. Les remblais vivants renforcent le sol de la même manière que les géotextile/géogrille conventionnels, en fournissant une résistance frictionnelle immédiate aux glissements peu profonds.

Tapis de branches

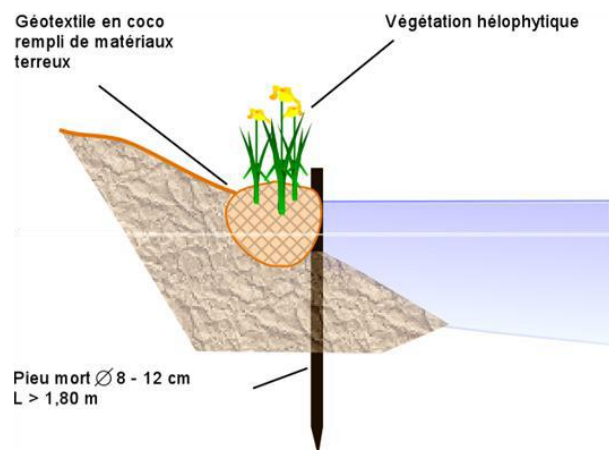
Il s'agit d'une couche de d'éléments ligneux vivants placée à plat contre la face inclinée de la berge. Des piquets solides et de la ficelle sont utilisés pour ancrer le matériel de coupe à la berge. Cette mesure est souvent construite avec une autre technique comme les fascines, une plantation jointe, ou un enrochement en pied de berge.



Les ouvrages de pied de berges :

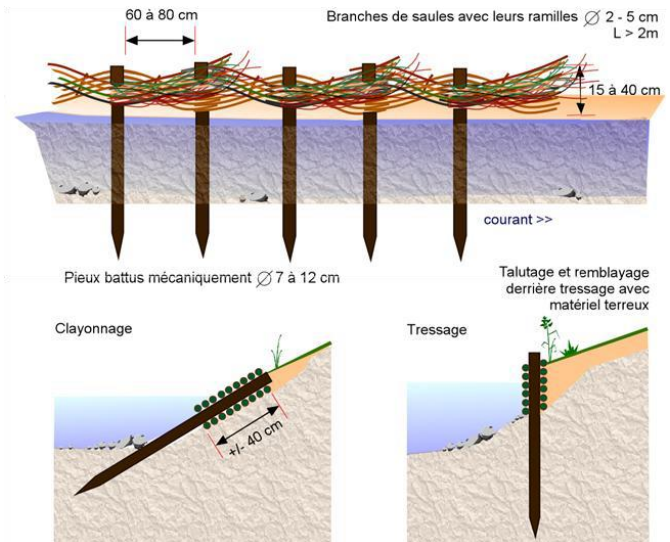
Le fascinage d'hélophytes

Les hélophytes, végétaux semi-aquatiques développent un fort enracinement qui permet fixer le pied de berge des cours d'eau. La plantation des hélophytes se fait dans un boudin de géotextile rempli de matériaux terreux et fixé par une ou deux rangées de pieux. Dû au faible développement végétatif cette technique est intéressante pour les cours d'eau de faible gabarit hydraulique (évite le risque d'embacle). Elle ne nécessite que très peu d'entretien.



Le tressage- clayonnage

Le tressage (hauteur de 40 cm minimum le long de la berge) est réalisée avec des branches de saule vivantes qui vont être entrelacées autour de pieux battus mécaniquement. Le clayonnage est un tressage plus haut que 40 cm, il est plaqué, à plat, sur la berge talutée au contact direct du sol. Elle module le pied de berge de façon souple en diversifiant les types d'écoulement et les habitats.

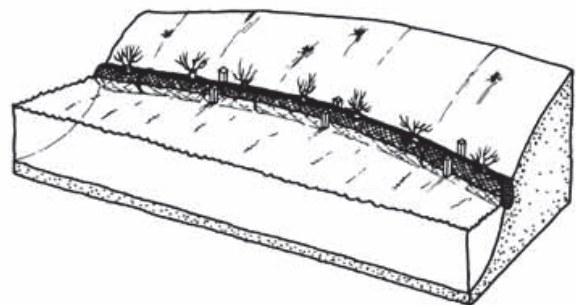


Les techniques de génie végétal combinées avec des géotextiles :

Les géotextiles sont des nattes filtrantes faites de matériaux synthétiques ou naturels (jute, coton). Ils peuvent être tissés ou non-tissés et offrir des degrés de perméabilité, de résistance et d'allongements variés. Les géotextiles pour leurs propriétés perméables et souples sont fortement utilisés au niveau des cours d'eau car ils retiennent néanmoins de la matière et permettent le développement végétal. Par ailleurs ils laissent passer les racines et les boutures, sans subir de dommages.

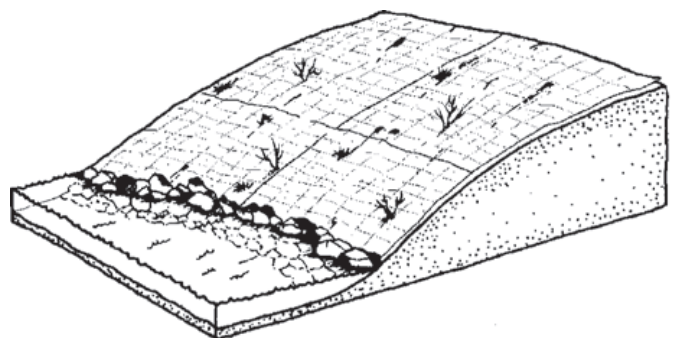
Rouleaux de fibre de coco

Les rouleaux de fibre de coco ou les fascines de coco sont constitués de fibres d'écorce de noix de coco liées ensemble en un faisceau cylindrique par un filet naturel ou synthétique et sont fabriqués dans différentes gammes de longueurs, de diamètres et de densités de remplissage en fonction de l'environnement auquel il est destiné. Non rigides les rouleaux s'adaptent à la courbure de la rive.

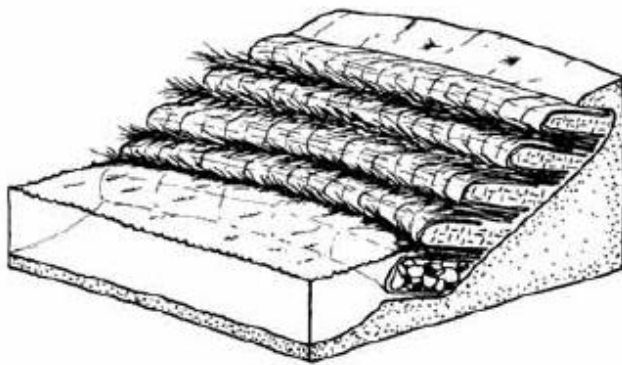


Couverture de contrôle de l'érosion

Couverture produite en matériaux naturels (paille, le bois, la fibre de coco tissée) ou synthétiques (non dégradables et tridimensionnelles). La toile de jute et la toile de coco sont les plus utilisées.



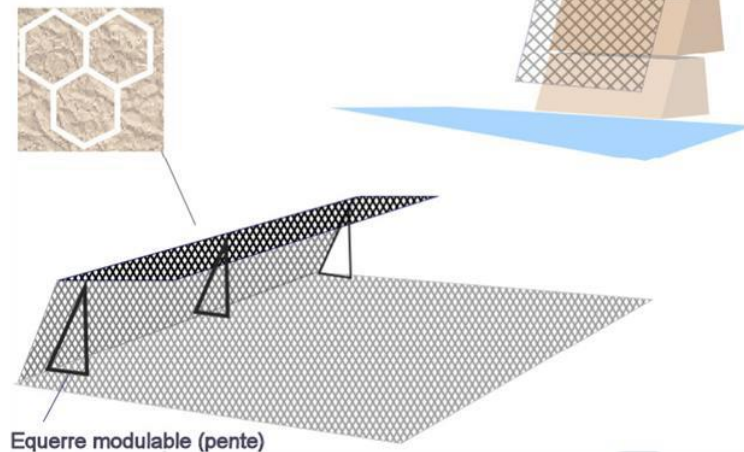
Géogrille végétalisée



Couches de boutures vivantes incorporées dans un géotextile naturel ou synthétique qui va enrober chaque lèvé de terre entre les couches de boutures vivantes.

Green Terramesh

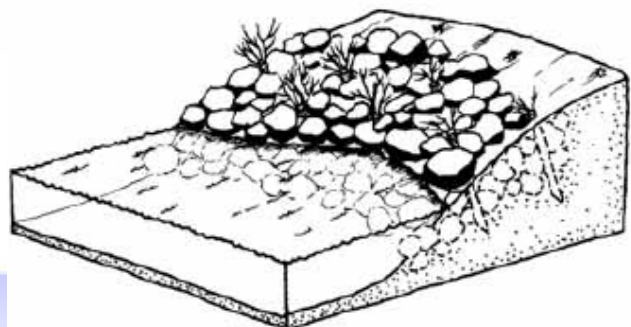
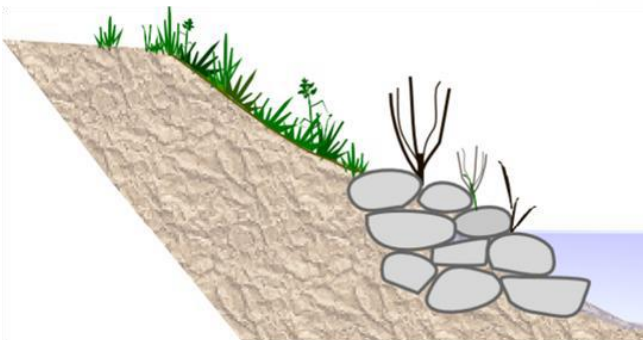
Green Terramesh®
structure grillagée alvéolée
remplie de terre et
recouverte de géotextile



Il s'agit d'un système modulaire, qui peut s'adapter aux berges de forte pente forte. Cette structure grillagée et alvéolée en fil de fer galvanisé peut être remplie de terre. Une équerre modulable règle la pente. Ces « paniers » sont recouverts d'un géotextile biodégradable côté berge qui permet une couverture végétale.

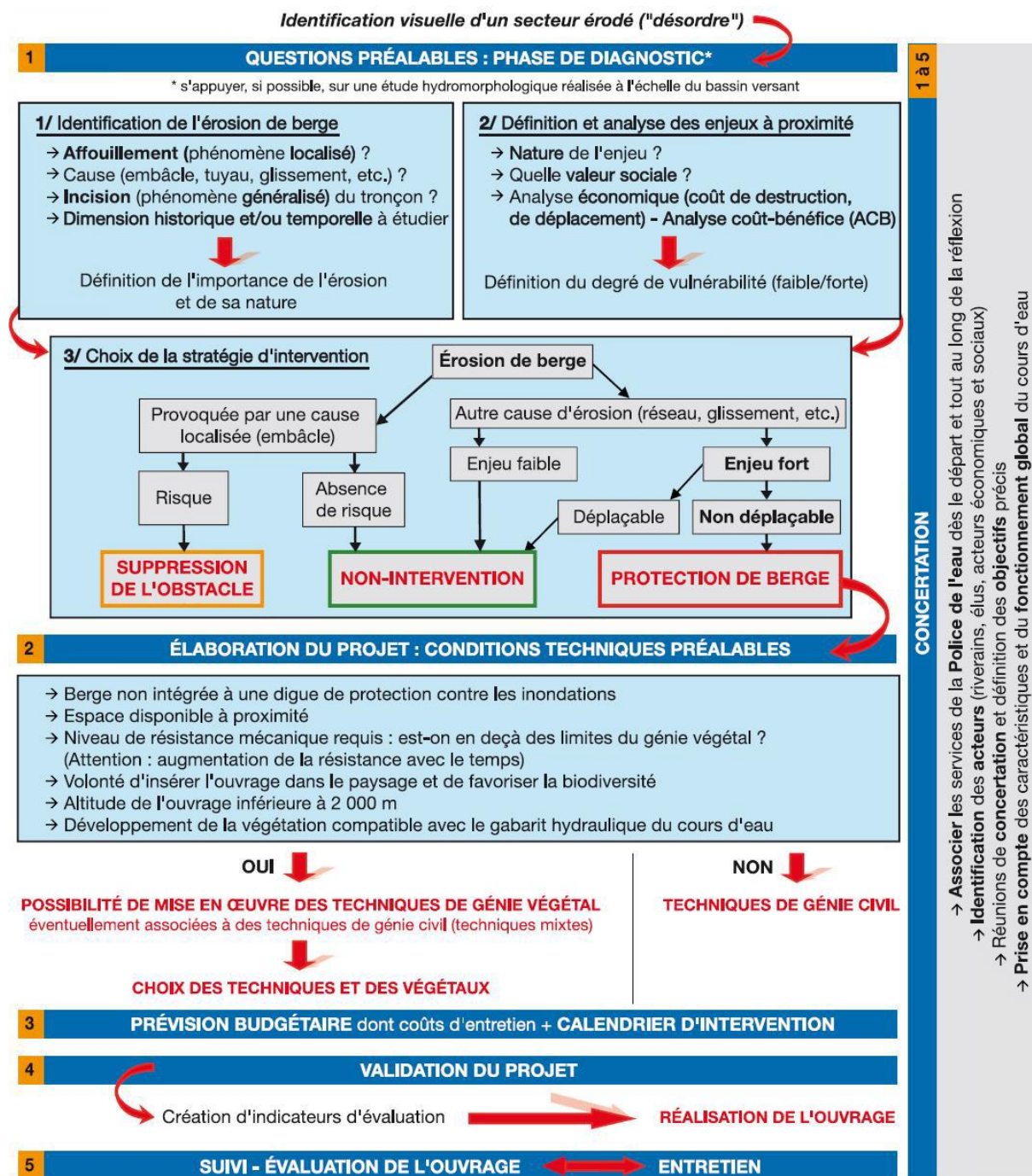
Les techniques mixtes font appels à des ouvrages de génie civil en pied de berges et associes des matériaux vivants au dessus ou dedans :

Plantations jointes



Enrochements avec des piquets vivants enfoncés dans les joints ou les ouvertures entre les rochers.

Annexe 2 : Schéma d'aide à la décision : diagnostic de l'érosion de berge et évaluation de la nécessité d'intervention, source : (Houbrechts et al., s. d.) provenant d'une étude de Valé et al. (2013)



Annexe 3 : Clé de détermination du type de rupture en masse de berges, source : (Watson & Basher, 2006)

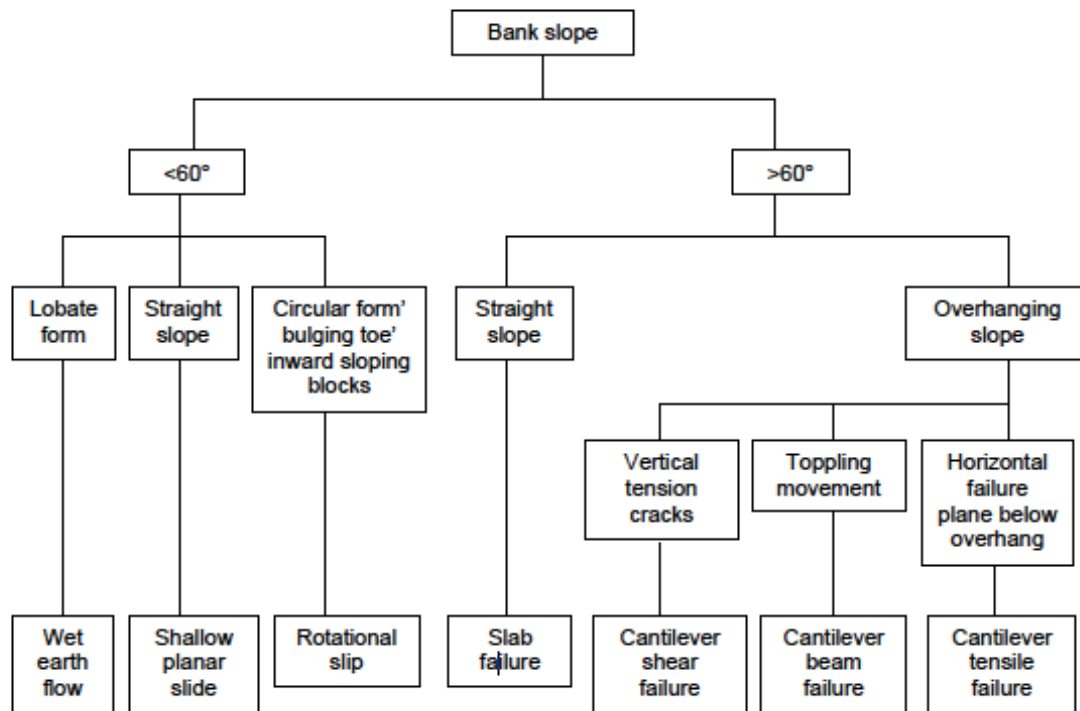
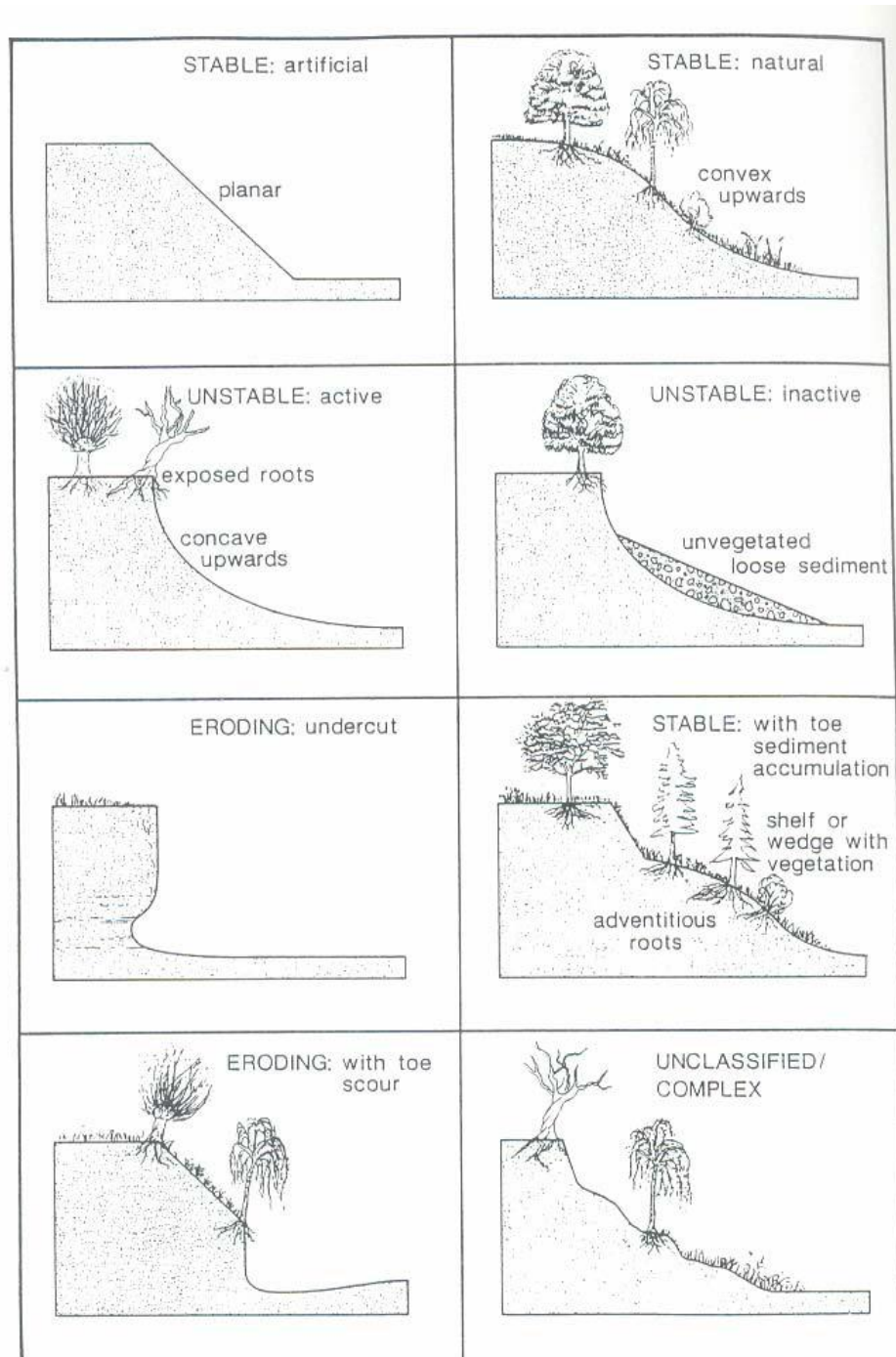


Fig. 1 Key to recognition of different types of mass movement bank failure (after Environment Agency 1999)

Annexe 4 : interprétation de la stabilité de berges en coupe de profil de l'étude de Thorne 1998, source : (Watson & Basher, 2006)



Directeur de recherche :

Séraphine Grellier

Claire Ginestet

PFE/DAE5

UIT ADAGE

2021-2022

État de l'art des techniques de génie végétal appliquées aux berges de cours d'eau : aménagements pour le contrôle de l'érosion et l'amélioration de la biodiversité.

Résumé : Cet état de l'art sur les techniques de génie végétal appliquées aux berges de cours d'eau a donc permis de faire un bilan non exhaustif des recherches sur le sujet. Cet écrit constitue un premier rendu sur le sujet de la restauration de berges, et permet de comprendre notamment les concepts écologiques et mécaniques liés aux enjeux entourant ces pratiques. La problématique est d'analyser si les différentes études existantes permettent de conclure sur l'aspect effectif (contrôle de l'érosion) et l'impact sur la biodiversité riveraine de ces techniques. Ainsi de nombreuses recherches menées sur ces aménagements permettent d'affirmer que certains sont efficaces pour stabiliser les sols des rives. Néanmoins cela dépend de nombreux critères qu'il est important de considérer en amont comme le débit du cours d'eau (lors de crue), la quantité de Matière En Suspension dans l'eau, etc... D'un point de vue de la biodiversité floristique, la technique mixte n'a pas présenté les mêmes résultats selon les études, cependant les enrochements ont parfois été corrélés à une fréquence plus importante d'espèces exotiques envahissantes, et a contrario le génie végétal est favorable à une hétérogénéité d'habitat et d'espèces qui contribue à la succession végétale (le long d'un gradient vertical). En étudiant les propriétés du végétal, on comprend les bénéfices que les plantes ont sur la biodiversité de la faune terrestre. Pour les organismes aquatiques, il est important d'analyser la qualité de l'habitat, notamment en pied de berge, ainsi l'ensemble de études concluent que le génie végétal et les berges naturelles sont plus favorables à ces espèces que les techniques mixtes ou le génie civil.

Mots Clés : Berges, contrôle de l'érosion, biodiversité, génie végétal, cours d'eau.