

Le génie végétal en berges pour transformer la ville

Services écosystémiques, représentations des acteurs et biodiversité

Rapport final du projet Génie-eaux

Octobre 2023

Action 70 accord cadre ZABR-Agence de l'eau



M. Cottet (coord.), A. Evette (coord.), François A., Moreau
C., Rivière-Honegger A., Vukélic S.

ZABR



INRAE



Auteur.e.s

Coordinateur.rice

Marylise Cottet, Chargée de recherche CNRS, Université de Lyon, CNRS-UMR 5600 Environnement Ville Société, ENS de Lyon
marylise.cottet@ens-lyon.fr

André Evette, Chercheur et Ingénieur, Université Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM
andre.evette@inrae.fr

Constitutrices

Adeline François, ingénieure d'étude, Université Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM

Clémence Moreau, post-doctorante, Université de Lyon, CNRS-UMR 5600 Environnement Ville Société, ENS de Lyon

Anne Rivière-Honegger, Directrice de recherche CNRS, Université de Lyon, CNRS-UMR 5600 Environnement Ville Société, ENS de Lyon

Stéphanie Vukélic, Université de Lyon, CNRS-UMR 5600 Environnement Ville Société, ENS de Lyon

Pour citer ce rapport

Cottet M., Evette, A., François A., Moreau C., Rivière-Honegger A., Vukélic S. (2023). Le génie végétal en berges pour transformer la ville - services écosystémiques, représentations des acteurs et biodiversité. Rapport final du projet Géni-eaux. Action 70 accord cadre ZABR-Agence de l'eau. 95 pages.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les praticiens qui ont participé à cette étude, l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse qui a financé ce projet, à travers l'accord cadre avec la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône), c'est-à-dire le LTER (Long-Term Ecological Research) du fleuve Rhône, et la Métropole du Grand Lyon (en particulier Hervé Caltran et Pauline Brémond) pour leur soutien.

Introduction

Contexte

Le génie végétal est une technique qui peut être utilisée pour stabiliser les berges des rivières grâce à l'utilisation de végétation vivante. Elle constitue une alternative aux techniques dites "grises", principalement basées sur le génie civil (e.g., enrochements, gabions). Contrairement aux techniques grises, le génie végétal est une technique basée sur l'observation et l'imitation des processus naturels. Elle utilise les propriétés mécaniques, physiologiques et biologiques des plantes. Par exemple, la couverture végétale et l'ancrage du système racinaire protège le sol de l'érosion (Rey, 2018).

Au-delà de ses fonctions de stabilisation de berge, le génie végétal est un moyen de restaurer les zones riveraines et la plupart des services écologiques qui y sont associés : biodiversité, connectivité écologique, stockage du carbone, capture des polluants et stabilisation des berges, tout en assurant une protection dont l'empreinte carbone est inférieure à celle des techniques grises (Symmank et al., 2020, Rauch et al., 2022). Le génie végétal contribue également à la santé et au bien-être de l'homme (Andersson et al., 2014), en créant des îlots de fraîcheur qui peuvent réguler la température pendant les vagues de chaleur (Trimmel et al., 2016) et en soutenant les valeurs récréatives, esthétiques, culturelles, sacrées, scientifiques et éducatives (Riis et al., 2020). Le génie végétal a un potentiel particulier dans les contextes urbains où les enjeux de la protection sont forts (en raison de l'omniprésence des biens et des personnes nécessitant une protection) et où les défis du bien-être social et de la restauration de la biodiversité sont considérables. Comme les environnements urbains rendent souvent impossible d'envisager la restauration de la mobilité du canal, le génie végétal peut être une solution pour restaurer la biodiversité.

Le génie végétal s'inscrit dans le champ des solutions fondées sur la nature (SFN) (Nesshöver et al. 2017, Preti et al. 2022), celles-ci étant définies comme des "actions visant à protéger, gérer durablement et restaurer les écosystèmes naturels ou modifiés qui répondent aux défis sociétaux de manière efficace et adaptative, en apportant simultanément des bénéfices en termes de bien-être humain et de biodiversité" (Cohen-Schacham et al., 2016 ; p. 2). Selon la Commission européenne (Faivre et al., 2017), les SFN sont considérées comme des solutions qui répondent clairement à un défi sociétal (dans le cas du génie végétal, la réduction du risque d'érosion des berges et l'adaptation au changement climatique) et fournissent des co-bénéfices plus larges pour la société et/ou les écosystèmes en s'appuyant sur les fonctionnalités des écosystèmes. Les SFN impliquent des formes innovantes d'action territoriale et environnementale nécessitant une nouvelle logique, reconnaissant la nécessité de travailler avec la nature pour soutenir le bien-être social, plutôt que d'opposer ou de séparer les humains de la nature (Potschin et al., 2015).

Cependant, malgré leurs avantages, les SFN, à commencer par les techniques de génie végétal, restent faiblement utilisées aujourd'hui, en particulier dans les territoires urbains (Symmank et al., 2020). Leur mise en œuvre soulève de nombreuses questions, notamment d'ordre technique (par exemple, des contraintes foncières, une vulnérabilité à court terme des installations, un accès limité aux berges) (Morris et

Moses, 1999 ; Simon et Steinemann, 2000 ; Sotir, 2001), de gouvernance (les techniques de génie végétal nécessitent le soutien et la coordination d'un large éventail de parties prenantes et le développement d'une communauté de pratique) (Bark et al., 2021 ; Neshhöver et al., 2017), ainsi que des questions de représentation mentale. Anderson et Renaud (2021) et Han et Kuhlicke (2019) ont montré que trois dimensions liées aux représentations influençaient le soutien aux SFN en matière d'inondation : les représentations de l'efficacité de la solution proposée, les représentations du risque et l'importance accordée aux avantages auxiliaires générés cette solution. Les représentations négatives du public ont été identifiées comme un obstacle à la diffusion des SFN (Ramírez-Agudelo et al., 2020 ; Kabisch et al., 2016). Les réticences exprimées par le public peuvent peser sur le processus de prise de décision concernant le choix des techniques, et peuvent nuire à la diffusion des SFN. Il est donc nécessaire d'en savoir plus sur les représentations, tant des experts que du public à l'égard du génie végétal.

Question et objectifs de recherche

Dans le contexte actuel d'une redécouverte des techniques de génie végétal comme possible solution pour répondre aux enjeux environnementaux (adaptation des territoires au changement climatique et crise de la biodiversité), le projet de recherche Génie-eaux vise à identifier les freins et les leviers perçus par des différents acteurs, tant experts que profanes en matière de gestion environnementale, pour une utilisation plus large du génie végétal pour protéger les berges en territoire urbain. Plus spécifiquement, il s'agit de répondre à la question suivante :

Comment différents types d'acteurs des projets d'aménagement de berges par solutions de génie végétal, tant experts que profanes, se représentent-ils ces solutions, leurs avantages, leurs inconvénients et in fine la valeur qu'ils leur accordent ? Ces représentations peuvent-elles expliquer la faible utilisation de ces solutions en territoire urbain ?

Cette question a été déclinée en deux objectifs.

Objectif 1 : comprendre la manière dont les professionnels de la filière du génie végétal se représentent les enjeux liés à la protection des berges en territoire urbain (définition du problème, diagnostic et proposition d'action) et évaluer si le passage du génie civil au génie végétal est un simple changement technique ou s'il suppose plus largement un changement de paradigme de l'action qui pourrait expliquer les difficultés actuelles à une utilisation plus large.

Objectif 2 : explorer l'existence d'un éventuel décalage entre les services tels qu'ils sont perçus par le grand public, tels qu'ils sont perçus par des experts de la gestion environnementale et tels qu'ils peuvent être mesurés sur le terrain par des scientifiques à l'aide d'indicateurs. Il s'agit plus largement d'étudier l'influence de l'expertise environnementale sur les perceptions et les valeurs associées au génie végétal. Il s'agit également d'examiner si les différences éventuelles peuvent créer des controverses ou des conflits de valeurs entre acteurs susceptibles de nuire à la diffusion de ces solutions en territoire urbain.

Approches retenues dans le cadre de ce travail

Ces objectifs ont été menés grâce un **travail interdisciplinaire** mobilisant des

chercheurs en géographie sociale de l'environnement (Université de Lyon ; CNRS-UMR 5600 Environnement Ville Société) et en écologie (INRAE ; Laboratoire Ecosystèmes et Sociétés En Montagne).

Il repose sur un important travail de terrain pour la production de données d'enquête et sur l'utilisation de méthodes d'analyse à la fois qualitatives et quantitatives, envisagées dans leur complémentarité.

La poursuite des deux objectifs définis plus haut s'est appuyée au préalable sur la production d'un état de l'art. Il s'agissait notamment d'identifier, à partir d'une revue de la littérature scientifique et technique, les facteurs capables d'influencer les choix techniques des gestionnaires pour élaborer un projet de protection de berge. Cinq types de facteurs ont été explorés : les facteurs liés à la technique, aux perceptions et aux représentations, au contexte urbain, à la profession et enfin, au contexte réglementaire et institutionnel. Cette **synthèse bibliographique**, présentée dans la **partie 1** de ce rapport, nous a permis de cadrer et de concevoir les deux enquêtes conduites pour répondre aux deux objectifs du projet.

La première enquête, présentée dans la **partie 2**, s'appuie sur **des entretiens semi-directifs auprès des professionnels** de la filière (objectif 1).

La seconde enquête, présentée dans la **partie 3**, repose sur un **photo-questionnaire mené auprès du grand public et d'experts** de la gestion environnementale. Les données de perception acquises par cette méthode ont été mises en perspectives avec des **données écologiques acquises par des relevés de terrain** effectués sur les mêmes sites que les photographies (objectif 2).

Une **synthèse des principaux résultats** est proposée en **partie 4**, de même que les **perspectives** que ce travail de recherche ouvre, tant en termes scientifique qu'opérationnel.

PARTIE 1 - ETAT DE L'ART

Cet état de l'art vise à présenter la technique du génie végétal utilisée notamment pour protéger les berges de rivière contre l'érosion. Il est orienté plus particulièrement sur l'identification des facteurs capables d'influencer les choix techniques des gestionnaires pour élaborer un projet de protection de berge. Cinq types de facteurs ont été explorés : les facteurs liés à la technique, aux perceptions et aux représentations, au contexte urbain, à la profession et enfin, au contexte réglementaire et institutionnel.

1. Le génie végétal, une technique ancienne réactualisée face aux enjeux environnementaux

1.1. Définitions et vocabulaire

Le **génie végétal** désigne « un ensemble de techniques de construction utilisant des végétaux vivants » (Bonin et al. 2013). Il poursuit différents objectifs, comme la stabilisation des sols érodés (notamment pour les berges de cours d'eau), la restauration d'un milieu dégradé, l'épuration ou la dépollution des sols et des eaux, ou encore la lutte contre les espèces invasives (Frossard and Evette 2009; Bonin et al. 2013; Rey 2018; Rey et al. 2015). Le terme de **génie biologique** est un synonyme, mais son utilisation parallèle dans les domaines médical et pharmaceutique a conduit à abandonner progressivement son utilisation. Le génie végétal est un sous-ensemble du **génie écologique**, qui peut mobiliser l'activité animale ou d'autres processus naturels (Rey et al. 2015).

S'il répond aux mêmes objectifs que les « techniques dures » du **génie civil** (protéger les biens et les personnes), le génie végétal s'appuie sur des « techniques douces », fondées sur l'observation et l'imitation des modèles naturels, en mobilisant les propriétés mécaniques, physiologiques et biologiques des végétaux (Rey 2018). Dans les ouvrages de génie végétal, ce sont les végétaux qui assurent les fonctions mécaniques, contrairement aux ouvrages de **génie biotechnique**, dans lesquels la fonction mécanique est assurée par des matériaux inertes (comme la roche, ou le grillage), les végétaux n'assurant que des fonctions écologiques ou paysagères (Bonin et al. 2013). Enfin, le génie végétal se distingue du **génie forestier**, qui s'appuie sur des ouvrages réalisés avec des structures en bois mort (Bonin et al. 2013).

Le génie végétal s'inscrit dans **les solutions fondées sur la nature**, définies comme « les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » (Cohen-Schacham et al. 2016). Les solutions fondées sur la nature répondent à huit critères :

- (i) Elles respectent les normes et les principes de conservation de la nature ;
- (ii) elles peuvent être appliquées indépendamment ou de façon intégrée avec d'autres solutions pour relever les défis sociétaux ;
- (iii) elles sont adaptées au contexte naturel et culturel local, qui inclut le savoir traditionnel, local et scientifique ;
- (iv) elles produisent des bénéfices sociaux de façon juste et équitable, en promouvant la transparence et la participation ;

- (v) elles maintiennent la diversité biologique et culturelle et la capacité des écosystèmes d'évoluer à travers le temps ;
- (vi) elles sont appliquées à l'échelle du paysage ;
- (vii) elles réalisent des compromis entre la production de bénéfices économiques immédiats pour le développement et les options futures pour fournir des services écosystémiques divers ;
- (viii) elles sont une part intégrante de la conception des politiques, des mesures ou des actions, pour relever un défi spécifique (Cohen-Schacham et al. 2016).

Une étude bibliométrique menée en 2021 donne un aperçu de l'appropriation du concept de « solutions fondées sur la nature » dans le champ académique. Les quatre thématiques principales sont respectivement les applications urbaines, la santé publique et le bien-être, les services écosystémiques (SE) dans les espaces verts et les risques en ville (Cousins 2021). Par services écosystémiques, on entend « les biens et les services que les hommes peuvent tirer des écosystèmes, directement ou indirectement, pour assurer leur bien-être » (Millennium Ecosystem Assessment 2005). Les SE relèvent de trois catégories : les SE d'approvisionnement, les SE de régulation et les SE culturels. On comprend donc que notre objet d'étude, à savoir l'usage du génie végétal pour lutter contre l'érosion dans un contexte urbain, sera au cœur de ce champ académique.

Le terme de génie écologique fait référence à deux traditions contrastées : l'ingénierie (l'étude, la conception et le contrôle d'équipements et d'installations techniques et industriels), et l'écologie (l'étude des fonctionnements de la nature selon ses lois propres) (Nicolas et al. 2014 ; Doré et al. 2014). D'emblée, le terme d'ingénierie écologique soulève plusieurs questions : la prévisibilité des résultats, l'ingénierie visant des résultats anticipés et prévisibles, l'écologie acceptant une part d'imprévisibilité des fonctionnements naturels en réponse à l'action humaine ; le choix d'un état de référence et du degré de naturalité ; mais aussi des questions épistémologiques et éthiques, opposant schématiquement un paradigme conversationniste à un paradigme utilitariste orienté vers le contrôle, la simplification et la performance des systèmes vivants (Nicolas et al. 2014 ; Doré et al. 2014).

1.2. Histoire du génie végétal

Si les premières traces d'utilisation de la végétation vivante pour réduire l'érosion ou stabiliser les berges de cours d'eau datent du 1^{er} siècle avant JC, l'âge d'or de l'utilisation de ces techniques se situe au 18^{ème} et au 19^{ème} siècle (Evette et al. 2009). Ces techniques végétales ont évolué grâce à l'association des matériaux traditionnels (branches pouvant bouturer, graviers) et des matériaux plus modernes (fil d'acier, blocs de béton), notamment le long du Mississippi et de ses affluents à la fin du 19^{ème} siècle (Girel 1996). Les techniques végétales sont peu à peu délaissées au cours du 20^{ème} siècle, à la faveur de la mécanisation et du développement des techniques de génie civil, en particulier après la Seconde Guerre Mondiale (Lachat 1998).

Un tournant s'opère dans les années 1970 et 1980, période où les faiblesses du génie civil sont mises à jour. D'un point de vue écologique, on constate que les ouvrages de génie civil nuisent aux fonctionnalités écologiques des cours d'eau (accueil de la biodiversité animale et végétale, hydrogéomorphologie, dépollution etc.), et apposent des barrières dans les corridors écologiques (suppression des connectivités latérales via les enrochements ou les digues) (Bonin et al. 2013). Quand le génie civil est utilisé dans le cadre de la canalisation des cours d'eau, il conduit à supprimer des composantes

essentielles au bon fonctionnement des écosystèmes (mouilles, seuils, plaines alluviales, méandres), ce qui réduit la diversité, détruit et/ou banalise les habitats riverains et aquatiques, etc. (Li and Eddleman 2002). L'efficacité des techniques de génie civil est elle aussi remise en question, puisqu'en intervenant avec des techniques d'ingénierie lourde seulement à proximité des enjeux (par exemple à la base d'un pont), les techniques de génie civil peuvent conduire à reporter les problèmes d'érosion à un autre endroit du cours d'eau (Li and Eddleman 2002).

Dans le champ scientifique, la genèse des travaux sur le génie végétal est attribuée à Kruedener, qui parle de « ingénieurbiologie » (ingénierie biologique), mais c'est l'écologue américain Odum qui généralise le concept grâce à ses écrits dans les années 1960. Le champ de l'ingénierie écologique se développe ensuite sous l'impulsion d'auteurs comme Shijun en Chine (Shijun, 1985) ou Mitsch and Jørgensen en Occident (Mitsch 2012).

L'ingénierie écologique est donc en pleine expansion, que ce soit dans le domaine scientifique avec l'amélioration des connaissances, au niveau industriel avec des innovations techniques (géotextiles, géogrille...), ou encore avec la structuration de la filière et la montée en compétence des professionnels. Bien que l'usage de ces techniques ait augmenté ces dernières années, les linéaires de cours d'eau aménagés avec du génie végétal restent marginaux (Symmank et al. 2020).

1.3. Les techniques contre l'érosion des berges de cours d'eau

Les matériaux utilisés dans le génie végétal sont des végétaux vivants : plantes entières ou parties de végétaux (boutures, ramilles, éclats de rhizomes, graines...). Pour qu'un ouvrage soit qualifié de génie végétal, il faut que la végétation ne se cantonne pas à un rôle de verdissage d'une structure, mais qu'elle assure aussi des fonctions mécaniques (soutènement, stabilisation de la berge, etc.) (Bonin et al. 2013).

Dans les techniques mixtes, on associe à ces végétaux des matériaux auxiliaires inertes, qui peuvent être à base de matière végétale (troncs, pieux en bois, géotextile...) ou des matériaux minéraux (enrochements, pieux métalliques, fils de fer...) (Bonin et al. 2013). Ces matériaux auxiliaires sont particulièrement utiles dans un premier temps après l'installation des ouvrages, période où la vulnérabilité de l'ouvrage est la plus importante (Evette and Frossard 2009). L'efficacité des ouvrages de génie végétal s'accroît ensuite avec le temps.

Le saule (*Salix sp.*) est le genre le plus fréquemment utilisé; sous forme de plants, de boutures ou de branches. Il présente de nombreux avantages : capacité de bouturage, forte capacité de régénération, croissance rapide, système racinaire développé qui permet un ancrage important, capacité à supporter des périodes d'immersion fréquentes et prolongées. Ce sont également des espèces pionnières, capables de se développer même dans un contexte de sol pauvre (substrat grossier, peu d'éléments nutritifs). Si le saule reste le genre le plus utilisé en génie végétal, la présence exclusive d'une seule de ces espèces, parfois qualifiée de « monoculture », n'est que transitoire, les espèces étant amenées à se diversifier avec le temps, au fil des stades de succession écologique (Frossard and Evette 2009).

Les techniques de génie végétal peuvent être utilisées dans différents contextes : milieux montagnards (Bonin et al. 2013; Evette et al. 2014), milieux urbains (Flaminio, et al. 2015; Warot et al. 2020), ou grandes rivières (Bariteau et al. 2013), dans des contextes géographiques variés, en Europe (Bonin et al. 2013; Peeters et al. 2018), en

Amérique du Nord (Poulin et al. 2019 ; Bariteau et al. 2013), ou encore en Asie (Acharya 2020).

Parmi les types d'ouvrages de génie végétal pour protéger les berges contre l'érosion, on trouve, parfois utilisés en combinaison (Figure 1) :

- Les ouvrages de couverture, comme les plantations, l'ensemencement hydraulique, l'enherbement ou le lit de plants et de plançons, qui sont aménagés parallèlement à la surface du talus, comme interface entre le milieu aquatique et le milieu terrestre.
- Les ouvrages de pied de berge, comme le fascinage ou le clayonnage, qui sont aménagés aux endroits menacés par l'érosion, dans le profil transversal du cours d'eau au niveau de la ligne de contact entre l'eau et la terre.

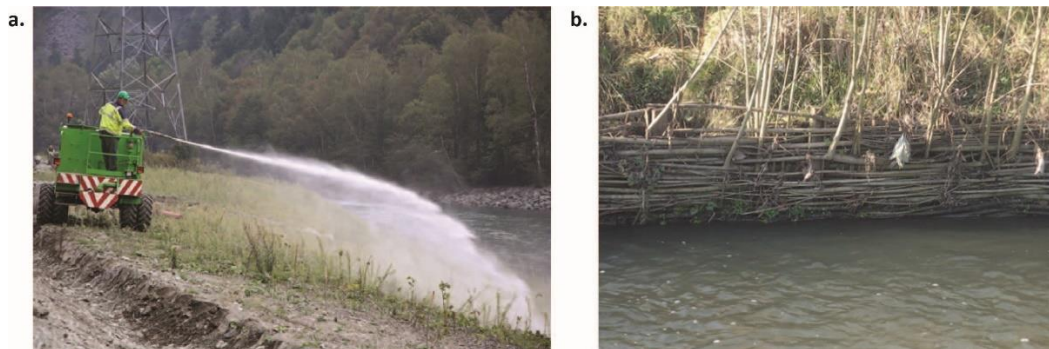


Figure 1 : Exemples de types d'ouvrage de génie végétal : a. Ensemencement hydraulique sur une berge (© N Daumergue) ; b. Clayonnage en pied de berge (© A Evette)

D'autres types de classifications existent, par exemple en prenant en compte la hauteur de la végétation ou la zone de berges concernée (pied de talus, zone immergée, berges, terrasses fluviales) (Li and Eddleman 2002).

1.4. L'ambivalence du génie végétal en ville : entre opportunités et difficultés de mise en œuvre

Des études antérieures se sont concentrées sur la mise en œuvre des solutions fondées sur la nature dans les villes (Kabisch et al., 2016). En ce qui concerne les rivières urbaines, il existe un contraste entre les opportunités offertes par le génie végétal pour répondre à une demande croissante de végétalisation des villes, et l'omniprésence d'enjeux humains et de contraintes liés au contexte urbain (Bonin et al., 2013 ; Warot et al., 2020). En conséquence, les techniques de génie végétal semblent particulièrement nécessaires en territoire urbain, mais sont particulièrement complexes à mettre en œuvre. On s'accorde à reconnaître le rôle des solutions fondées sur la nature pour relever les défis environnementaux dans les villes (Castellar et al., 2021). Des analyses récentes ont montré que les techniques de génie végétal peuvent fournir des solutions innovantes pour résister aux effets du changement climatique en termes de soutien de la biodiversité (Mickovski, 2021), de lutte contre les îlots de chaleur et pour rendre plus efficace et circulaire la gestion des flux d'eau en ville (Langergraber et al., 2021). Mais le génie végétal est une solution technique encore peu mobilisée (Symmank et al., 2020), de surcroît en ville. Les références aux travaux de génie végétal pour la protection des berges dans les territoires urbains restent rares. A

notre connaissance, il n'existe pas d'étude quantitative comparant le recours à des ouvrages de génie végétal ou à des ouvrages de génie civil sur les berges de cours d'eau urbains. Les rapports scientifiques et techniques concernent principalement des études de cas décrivant les aspects techniques, leurs avantages et leurs coûts.

2. Synthèse des facteurs capables d'influencer les choix techniques des gestionnaires pour protéger les berges de cours d'eau urbains

La lecture de la littérature scientifique et technique a permis d'identifier cinq types de facteurs susceptibles d'influencer les choix techniques des gestionnaires pour protéger les berges des cours d'eau en ville. Cette synthèse propose une lecture problématisée de la littérature : elle dresse une série de questions relatives à chacun des facteurs identifiés, rend compte de la manière dont la bibliographie aborde chacune de ces questions et, sur la base de cette synthèse, propose une série d'hypothèses qui mériteraient d'être validées ou invalidées dans le cadre de travaux de recherche. Elles ont guidé la préparation des enquêtes présentées dans les parties 2 et 3. Toutes ces hypothèses n'ont pas été explorées en détail dans le cadre du projet géni-eaux mais nous souhaitons les mettre en avant de manière à souligner les pistes de recherches identifiées pour l'avenir.

2.1. Les facteurs d'influence liés à la technique : quelle est la performance du génie végétal pour protéger les berges ?

On considère ici les techniques du génie végétal comme des alternatives aux techniques de génie civil, devant répondre au même objectif, la protection des berges contre l'érosion. Toutefois, en raison des spécificités des techniques de génie végétal, il semble compliqué de les comparer aux techniques de génie civil selon des critères strictement équivalents. De plus, génie civil et génie végétal sont loin d'être substituables si l'on adopte une approche centrée sur les milieux, dans la mesure où le génie végétal fournit de nombreux services écosystémiques. Se pose donc la question de la caractérisation de la performance mécanique et biologique du génie végétal.

Génie végétal et génie civil : une même logique d'intervention

Comme toute ingénierie, le génie végétal s'inscrit dans une logique d'intervention et de modification des écosystèmes. Cette nécessité d'intervention peut être justifiée par la morphologie du cours d'eau, les enjeux socio-économiques en présence ou pour prévenir des opérations plus lourdes à terme (Verniers et al. 2009; Bonin et al. 2013). A l'inverse, à chaque fois que cela est possible, la non-intervention est jugée préférable, car la mobilité des berges (et donc leur érosion) est un processus important pour la création d'habitats pionniers ou la recharge solide et pour atteindre le bon état écologique des cours d'eau, tel que défini dans la Directive Cadre Européenne sur l'eau du 23 octobre 2000 et la GEMAPI (Nicolas et al. 2014; Bonin et al. 2013).

Le rôle des végétaux dans la stabilisation des berges

Dans les cours d'eau peu anthropisés, les végétaux ont naturellement un rôle de stabilisation des berges, par différents mécanismes : ancrage par le système racinaire, effet de couverture par les tiges aériennes, effet de drainage par absorption *via* les racines, ou évapotranspiration par les feuilles (Frossard and Evette 2009). La végétation joue ainsi un rôle de protection active (elle limite l'érosion, en atténuant l'effet des agents érosifs et en fixant les matériaux) et un rôle de protection passive (elle retient les matériaux érodés) (Lavandier et al. 2010). Une végétation adaptée se développe sur les berges, dont les racines sont capables de supporter les conditions anoxiques de submersion (Lachat 1998).

La logique des aménagements avec le génie civil des cours d'eau fortement anthropisés est tout autre : les éléments minéraux de type bloc, absents des berges naturelles (à l'exception des cours d'eau de montagne), assurent la stabilisation des berges, sous forme de digue ou d'enrochement (Lachat 1998). Les végétaux présents vont planter leur système racinaire dans ces ouvrages, ce qui peut parfois en favoriser l'érosion et en atténuer la performance (Vennetier et al. 2004), mais aussi d'autres fois les renforcer (Schiechl et al 1997). La végétation a aussi des effets sur la dynamique des cours d'eau et des crues, en favorisant la création d'embâcles ou en ralentissant l'écoulement de l'eau, ce qui peut provoquer localement une élévation du niveau de l'eau (Vennetier et al. 2004; Li and Eddleman 2002), et peut être préjudiciable en milieu urbain.

Pour les berges endiguées protégées par des ouvrages de génie végétal, les végétaux retrouvent leur rôle de stabilisation. Certaines pratiques permettent de concilier lutte contre l'érosion et maintien de la végétation, dans une optique de compromis : traitements adaptés au profil de la berge, fauchage régulier, taille des arbres, implantation d'arbres et arbustes à une distance supérieure à 5 mètres des pieds de digue, déplacement de la digue pour l'éloigner du cours d'eau (Evette et al. 2014; Vennetier et al. 2004).

La performance des ouvrages de génie végétal à lutter contre l'érosion

Les ouvrages de génie végétal sont une alternative aux ouvrages de génie civil, ils doivent répondre aux mêmes objectifs : limiter l'érosion afin de protéger les biens et les personnes. Trois questions se posent alors : Quels critères pour évaluer la performance ? Comment mettre en place un protocole d'évaluation ? Comment prendre en compte les spécificités des ouvrages de génie végétal ?

- **Critères d'évaluation**

Plusieurs critères peuvent être pris en compte pour évaluer la performance des ouvrages de génie végétal.

Le premier critère est financier : est considéré comme performant un ouvrage qui présente un coût modéré de mise en place et d'entretien. Bien que les coûts varient en fonction de la provenance des matériaux, de la structure en charge des travaux, de la densité et de la qualité des végétaux implantés, des contraintes d'accès au site et du cours de marché, on peut toutefois donner des ordres de grandeur. Ainsi, l'enrochement peut être estimé entre 70 et 150€/m, alors que l'enherbement ou l'ensemencement (géotextile compris) coûte 4 à 10€/m, la fascine de 50 à 100€/ml, et les caissons végétalisés de 100 à 400€/m de bois posé (Bonin et al. 2013).

Les autres critères sont liés aux interactions entre le cours d'eau et les ouvrages : est jugé performant un ouvrage capable de résister à la contrainte tractrice (ou

d'arrachement) en cas de crue. La contrainte tractrice équivaut à la force tangentielle due à l'eau qui s'exerce par unité de surface du lit (ou des berges), en N/m^2 (Leblois et al. 2016). Le risque d'arrachement est une des principales limites du génie végétal aujourd'hui (Bonin et al. 2013). Cependant, les ouvrages de génie végétal présentent une certaine souplesse et sont bien ancrés dans la berge grâce aux racines (à la différence des ouvrages de génie civil qui sont appuyés contre la berge) (Lachat 1998). De plus, en cas de forte crue, ils auront tendance à céder ponctuellement à cause de faiblesses locales, plutôt que de céder dans leur entier, sauf si le fond du lit est complètement déstabilisé (Leblois et al. 2016). Il existe en outre un risque de déchaussement par affouillement, les racines ne protégeant pas la berge en profondeur sous le niveau de l'eau.

Enfin, certains critères concernent les chantiers de mise en place de ces ouvrages : est performant un ouvrage dont le chantier aura un faible impact écologique et un coût réduit. A ce titre, les ouvrages de génie végétal font preuve d'un avantage comparatif indéniable par rapport aux ouvrages de génie civil : les matériaux peuvent être prélevés sur place, ce qui simplifie le transport (gain énergétique et impact réduit sur le paysage car il n'y a pas besoin de créer des pistes de chantier), coûts de chantier réduits par le faible recours aux machines (même si l'intervention d'une main d'œuvre formée est nécessaire) (Lachat 1998). Une étude comparant trois techniques (enrochements, caissons végétalisés, lits de plants et de plançons) montre que pendant la phase de production et de construction, la technique de l'enrochement présente une consommation d'énergie totale supérieure de 60% à celle des caissons végétalisés et de 80% supérieure à celle des lits de plants et de plançons (Thannen et al. 2017).

- **Protocole d'évaluation**

Les protocoles d'évaluation des performances peuvent être de deux types : prospectifs et rétrospectifs. Quelques études prospectives existent, qui servent à évaluer *a priori* les performances des ouvrages de génie végétal. Citons par exemple le modèle Simulfascine, qui modélise les coûts et bénéfices des techniques de génie végétal et la quantification des volumes stockés annuellement par des ouvrages situés dans des ravines, ce qui permet de comparer les coûts de l'installation d'ouvrages de génie végétal et ceux d'actions curatives en aval (Lavandier et al. 2010). Un autre modèle permet d'identifier la technique de génie végétal la plus performante pour stabiliser les berges des cours d'eau, en s'appuyant sur la caractérisation du risque érosif (modélisé à partir d'informations spatiales multi-échelles), de la simulation des conditions de site et des caractéristiques du cours d'eau (Pinto et al. 2019). Enfin, il existe des outils d'aide à la décision, comme des arbres de décision portant sur la régénération des forêts rivulaires de saules, qui ont aussi pour vocation à accompagner les gestionnaires dans les opérations de restauration des milieux rivulaires (González et al. 2018). Cependant, les modèles disponibles pour anticiper les performances des ouvrages de génie végétal restent peu nombreux, en raison de la complexité de modélisation de la performance des matériaux vivants, par opposition aux matériaux utilisés dans le génie civil. La conception et le dimensionnement des ouvrages reposent donc davantage sur l'expérience et le savoir-faire des praticiens que sur des calculs (Bonin et al. 2013).

Par ailleurs, des études rétrospectives existent pour évaluer *a posteriori* la performance des ouvrages de génie végétal, en particulier en ce qui concerne le vieillissement et la dégradation des ouvrages. Ainsi, au sein du projet GeniAlp, un retour d'expérience a été fait sur le vieillissement de 18 ouvrages, tous situés en milieu montagnard. Les ouvrages sont décrits à partir de différents critères : la pente du lit, la

contrainte tractrice, la technique employée et l'année de construction. Les conclusions montrent que les ouvrages de génie végétal et de techniques mixtes sont durables, puisqu'ils sont toujours en place après 15 à 20 ans sur des cours d'eau ayant des pentes supérieures à 2 % et charriant des blocs de grosse dimension (Bonin et al. 2013). Un autre retour d'expérience, situé dans un contexte de plaine, a permis d'évaluer le vieillissement de 19 ouvrages de génie végétal, dont certains se sont dégradés, principalement en raison de l'énergie de la crue destructrice¹. Ce travail a permis de mettre en évidence une valeur de puissance spécifique limite, c'est-à-dire la valeur maximale à laquelle peut résister un ouvrage. Les données sont de 130 W/m² pour des fascines, 65 W/m² pour des peignes, 200 W/m² pour des caissons et 150 W/m² pour des épis végétaux (Peeters et al. 2018). Plutôt que de s'intéresser au vieillissement des ouvrages, Recking et al. (2019) ont mesuré l'efficacité des fascines dans leur phase initiale (avant l'implantation du système racinaire), c'est-à-dire au moment où les ouvrages sont les plus fragiles. 145 simulations ont été réalisées en laboratoire, sur un canal à taille réelle reproduisant les conditions des cours d'eau de montagne. Les résultats montrent que si aucun ouvrage n'a subi d'arrachement direct par la force du cours d'eau, des destructions ont pu être observées du fait de l'affouillement ou de l'affaissement des berges autour des structures. Les auteurs concluent qu'un levier pour augmenter la durabilité des ouvrages est de limiter la contrainte tractrice au droit de l'ouvrage, par exemple par la mise en place de ramilles anti-affouillement. Les auteurs insistent également sur l'importance du suivi des ouvrages les premières années pour pouvoir intervenir dès le début des défaillances.

Une étude récemment menée sur l'analyse de 223 ouvrages de génie végétal défaillants a montré que les principales causes de mauvaise reprise de la végétation étaient l'enneigement, l'assèchement de la végétation, l'ombrage, l'absence de contact avec le substrat et la concurrence entre espèces. Les érosions sur les ouvrages étaient les plus souvent observées en pied de berge suivies par celles à l'arrière des ouvrages (Leblois et al 2022). Cette étude préconise également un suivi régulier des ouvrages après leur conception afin de bloquer les processus de dégradation dès leur apparition.

● **Spécificité des ouvrages de génie végétal**

Certaines spécificités des ouvrages de génie végétal doivent être prises en compte, en particulier en ce qui concerne la dimension temporelle et spatiale de la protection.

Concernant la dimension temporelle, l'efficacité de la stabilisation par les ouvrages de génie végétal augmente avec le temps, au fur et à mesure de la croissance des matériaux (Lachat, 1998). Il en résulte une fragilité des ouvrages dans les premières années suivant leur installation, qui peut être compensée par le recours aux matériaux inertes comme le géotextile, qui visent à protéger le sol les premières années et à favoriser l'installation des végétaux. Une fois dégradés, les géotextiles seront rapidement remplacés par les végétaux vivants (Evette and Frossard 2009). A l'inverse, l'efficacité des ouvrages de génie civil est optimale dès la mise en place, mais diminue avec le temps (Pinto et al. 2016).

Concernant la dimension spatiale, à la différence du génie civil, qui vient rompre la continuité écologique de la berge, les ouvrages de génie végétal prennent en compte le continuum aquatique, et les connectivités longitudinale et transversale des cours d'eau (Nicolas et al. 2014, Martin et al 2021). Par ailleurs, au-delà de protéger contre

¹ La crue destructrice est la crue la plus importante subie par l'aménagement depuis sa mise en place

l'érosion, les ouvrages de génie végétal ont aussi un impact positif sur le fonctionnement du cours d'eau, par l'effet de l'action hydromécanique de la végétation dans le sol (interception, absorption et transpiration d'eau, augmentation de la cohésion, effet de cintrage, ralentissement des vitesses d'écoulement...) ou dans le cours d'eau (autoépuration, bon fonctionnement avec la nappe phréatique...) (Lachat 1998). Ainsi, les spécificités des ouvrages de génie végétal impliquent d'évaluer leur performance sur le temps long, et à l'échelle de l'écosystème aquatique dans son ensemble, mais aussi de mesurer les services écosystémiques fournis par ces ouvrages (Symmank et al 2020). Pour conclure, il faut rappeler que l'efficacité des ouvrages de génie civil et de génie végétal est souvent combinée à travers des techniques mixtes (enrochements végétalisés, etc.). D'un point de vue écologique, les techniques mixtes constituent un pis-aller, mais elles sont préférables à l'enrochement pur, lorsque les contraintes sont trop fortes pour envisager du génie végétal (présence d'enjeux, contraintes foncières, contraintes hydrauliques comme la présence de seuils, etc.) (Evette et al. 2015).

De façon plus générale, on note un manque de recul et de données sur la performance des ouvrages de génie végétal. Cela peut s'expliquer par leur renouveau récent ainsi que par leur forte variabilité d'un site à l'autre, ce qui peut compliquer l'évaluation de leur performance selon les méthodes standardisées (Leblois et al. 2016).

Les services écosystémiques fournis par les berges aménagées avec le génie végétal

La caractéristique principale des ouvrages de génie végétal est d'imiter le fonctionnement des berges de cours d'eau faiblement anthropisées. Ce faisant, à la différence des ouvrages de génie civil, les ouvrages de génie végétal produisent de nombreux services écosystémiques (SE).

Si les végétaux plantés dans un premier temps sont assez homogènes (les salicacées étant surreprésentées), la diversification de la végétation s'opère au fur et à mesure du vieillissement des ouvrages. On observe alors un retour d'espèces post-pionnières ligneuses, compétitrices et tolérantes au stress et à l'ombre (Frossard and Evette 2009 ; Tisserant 2019). Ainsi, une étude menée sur 38 sites dans les Alpes Suisses et Françaises a montré la présence de 177 espèces de plantes, la richesse spécifique étant meilleure pour les berges aménagées grâce au génie végétal. La richesse spécifique présente une forte dominance du genre *Salix*, en particulier pour les fascines et pour les caissons végétalisés (Cavaillé 2014).

Les berges végétalisées fournissent également une grande diversité d'habitats. Les racines immergées servent de micro-habitats pour les macro-invertébrés benthiques, et fournissent ombre et abri pour les poissons (Harris 2005 ; Janssen et al. 2019). Les ouvrages de type matelas de branches de saule ou lits de roseaux constituent des habitats favorables pour les oiseaux ou les amphibiens (Schmitt et al. 2018). Par ailleurs, les ouvrages de génie végétal cherchent à reproduire les écotones naturels, c'est-à-dire des zones de transition entre l'écosystème aquatique et terrestre, présentant un gradient biologique (des ligneux tendres aux ligneux durs, des scirpes jusqu'aux roseaux etc.). Les berges jouent ainsi un rôle de corridor écologique, assurant la connexion entre des milieux fragmentés (Adam et Lachat 2008 ; Nicolas et al. 2014).

Les ouvrages de génie végétal contribuent aussi au maintien de la biodiversité en jouant sur la qualité physico-chimique des cours d'eau. En effet, la végétation rivulaire va apporter diminuer les charges de polluant provenant du bassin versant, elle va aussi

créer un ombrage et donc maintenir une température fraîche, ce qui permet de maintenir la solubilité de l'oxygène dans l'eau, indispensable à la vie aquatique. L'ombre régule aussi la quantité de lumière qui y pénètre, limitant l'eutrophisation du milieu (Adam and Lachat 2008). Enfin, les ouvrages de génie végétal ont un rôle positif dans la lutte contre les espèces exotiques envahissantes comme la renouée du Japon. Par exemple, une étude a montré que la fréquence relative des espèces exotiques était plus élevée dans les ouvrages de génie civil que dans les ouvrages mixtes ou de génie végétal (Cavaillé et al. 2013). Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer cela : les ouvrages de génie civil ne présentent pas d'espèces compétitrices, elles ont une température plus élevée et un substrat colonisable favorables au développement des espèces exotiques, qui sont fréquemment des espèces pionnières et compétitrices peu exigeantes sur les conditions d'installation (Cavaillé et al. 2013).

Finalement, les berges aménagées avec des ouvrages de génie végétal présentent une biodiversité plus élevée que les berges aménagées avec des ouvrages de génie civil. Ainsi, les techniques de génie végétal permettent d'atteindre des diversités taxonomiques et fonctionnelles végétales, en coléoptères et macrobenthos proches de celles des berges naturelles, même si des différences persistent en termes de diversité, d'abondance et de composition spécifique, en fonction des taxons et du type d'aménagement (Evette et al. 2014; Cavaillé et al. 2015).

Les techniques mixtes, comme les enrochements de pied de berge associés à un haut de berge en génie végétal, présentent plus de biodiversité taxonomique et fonctionnelle, ainsi qu'une meilleure résistance à l'installation des espèces exotiques envahissantes, que celles qui sont réalisées en génie civil (Cavaillé et al. 2013). De même, une étude menée sur le Maine et le Danube a comparé la végétation (plus spécifiquement la composition d'espèces, les traits fonctionnels et écologiques et la diversité floristique) de trois types de berges : enrochées, « front-fixed banks » et berges non-fortifiées. Les résultats montrent que les « front fixed banks » et les berges non-fortifiées sont plus à même de favoriser les espèces riveraines que les enrochements. Ces différences sont notamment dues à la différence d'inclinaison des berges et à la variation de submersion (Wollny et al. 2019).

Cette biodiversité va rendre de nombreux services à la société. Le premier de ces services écosystémiques est la lutte contre l'érosion. En effet, la végétation assure la protection de la surface du sol : les tiges aériennes souples produisent un effet de peigne qui limite la vitesse du courant, ce qui diminue l'érosion. La végétation piège également les matériaux charriés. Les parties aériennes des ligneux et des herbacées peuvent venir se coucher sur la berge et la protéger par effet tapis. Enfin, les végétaux permettent la consolidation en sub-surface et la stabilisation du sol en profondeur, grâce à la combinaison et l'interaction de végétaux différents ayant des systèmes racinaires à la fois denses, profonds et traçants (Adam and Lachat 2008).

A la différence des ouvrages de génie civil, les ouvrages de génie végétal fournissent de nombreux services écosystémiques complémentaires :

- **Les services d'approvisionnement** : les berges végétalisées fournissent du matériel végétal, pouvant être utilisé pour la construction d'autres ouvrages de génie végétal (permettant aux gestionnaires d'être autonomes, voire excédentaires en matériel végétal), pour le bois énergie ou pour la vannerie (Adam and Lachat 2008; Druard et al. 2013).
- **Les services de régulation** : outre la protection contre l'érosion, les ouvrages de génie végétal offrent une protection des biens et des

personnes contre les dégâts des inondations, mais ils peuvent aussi agir de façon préventive, en ralentissant la vitesse d'écoulement et en limitant les crues. Les épis en génie végétal par exemple, installés obliquement au courant, diminuent les forces érosives sur les berges. Par ailleurs, les ouvrages de génie végétal permettent d'assurer le bon fonctionnement du cycle de l'eau, puisqu'à la différence des ouvrages de génie civil, les échanges entre l'eau et le sol ne sont pas empêchés, ce qui permet une meilleure connexion avec les eaux souterraines. Les ouvrages de génie végétal ont aussi un impact positif sur la qualité physico-chimique de l'eau : les espèces herbacées et buissonnantes présentes sur les berges permettent de piéger les particules en transport dans les eaux ruisselantes, limitant les pollutions diffuses, principalement d'origine agricole. Enfin, la végétalisation des cours d'eau permet de contribuer au stockage du carbone et d'atténuer le changement climatique (Adam and Lachat 2008; Bonin et al. 2013; Nicolas et al. 2014; Warot et al. 2020).

- **Les services culturels** : le premier service culturel fourni par les ouvrages de génie végétal est lié à la valeur d'existence de la biodiversité. On l'a vu, les ouvrages de génie végétal assurent une bonne diversité tant floristique que faunistique, et assurent un rôle de corridor écologique (Harris 2005; Adam and Lachat 2008; Frossard and Evette 2009; Nicolas et al. 2014; Evette et al. 2014; Cavaillé et al. 2015; Tisserant 2019; Janssen et al. 2019). Le second type de service culturel est lié à la santé humaine. Dans un contexte urbain fortement minéralisé, la végétation et la surface de l'eau permettent l'évapotranspiration par les plantes ou l'évaporation au niveau des surfaces de l'eau, créant ainsi des îlots de fraîcheur en particulier en périodes de canicule (amenées à s'intensifier dans un contexte de changement climatique) (Alonso and Renard 2020; Warot et al. 2020). Les berges végétalisées fournissent également des services de valeur esthétique et paysagère (nous y reviendrons), et elles peuvent être le support de pratiques spécifiques, comme la pêche, la promenade, la sociabilité, etc. (Warot et al. 2020). La présence de végétaux a également un impact positif sur la santé physique et mentale des habitants (Bergou et al., 2022). Enfin, les techniques de génie végétal étant anciennes, leur utilisation s'inscrit dans une dynamique patrimoniale, qui permet d'entretenir les savoirs locaux (Clark and Howell 1992 ; Evette et al. 2009).

Des études ponctuelles existent pour évaluer certains des services rendus par les ouvrages de génie végétal (Cavaillé et al. 2013 ; Cavaillé 2014 ; Tisserant 2019 ; Evette et al. 2014; Richet et al. 2017). Les évaluations multi-services se développent également. Ainsi, Symmank et al. (2020) ont mis en évidence l'effet positif des techniques de génie végétal sur les services de régulation (dénitrification, rétention de phosphore, séquestration de carbone).

Les conditions de performance des ouvrages de génie végétal

Pour que les ouvrages de génie végétal puissent atteindre une grande performance, certaines conditions doivent être réunies, qu'elles concernent les ouvrages eux-mêmes ou le contexte bioclimatique.

Les premiers facteurs sont liés aux ouvrages eux-mêmes et à l'interaction entre cours d'eau et ouvrage. La cause principale d'échec des ouvrages de génie végétal est liée à l'énergie de la crue destructrice et l'arrachement des ouvrages par la force mécanique. Viennent ensuite les facteurs liés à la végétation : choix de végétaux

inadaptés, mauvaise reprise de la végétation (liée à un problème d'exposition, à une sécheresse la première année après l'installation, à des coupes non gérées et aux dégâts provoqués par le bétail ou les rongeurs, l'invasion d'insectes, ou des maladies des plantes). Des défauts de conception des aménagements (remplissage inadapté, mauvais dimensionnement, mauvaise préparation du sol : nivellement, drainage), et une mauvaise prise en compte des caractéristiques géomorphologiques de la rivière peuvent également nuire à la performance des ouvrages de génie végétal (Li and Eddleman 2002; Peeters et al. 2018, Leblais et al 2022).

Les facteurs stationnels, liés au contexte bioclimatique entrent aussi en compte : contraintes physico-chimiques de l'eau (débits, régime, niveaux et périodicité des crues, vitesse du courant, qualité de l'eau, période de glaciation, débâcle glaciaire, inondation de la végétation, etc.), morphologie du terrain (nature des sols, pentes, ensoleillement, etc.), propriétés physiques et chimiques du sol (teneur en matériaux fins et en eau, granulométrie, Ph, etc.), propriétés biologiques et mécaniques du sol (activité microbologique, érosion etc.), conditions climatiques et environnementales (ensoleillement, altitude, présence d'animaux ou d'activités anthropiques, pollutions, sécheresse, etc.) (Lachat 1997 ; Poulin et al. 2019 ; Bonin et al. 2013). Tous ces facteurs conditionnent la reprise de la végétation, ainsi que sa résistance aux crues. Ils sont donc déterminants lors de la mise en place des végétaux et dans le premier cycle de végétation de l'ouvrage. Ainsi, dans un contexte de climat continental humide au Québec, la mise en place des ouvrages de génie végétal est fortement contrainte : en hiver, la période la plus propice pour la mise en place des matériaux, l'humidité et la neige compliquent la phase de travaux, et au printemps, période où les végétaux sont les plus récents donc les plus fragiles, la débâcle glaciaire printanière peut provoquer des crues qui peuvent fragiliser les ouvrages (Poulin et al. 2019). On retrouve des contraintes proches dans les milieux alpins (Bonin et al 2013).

D'autres types de facteurs relèvent de l'organisation des acteurs et de la filière, en particulier les aspects de formation et de reconnaissance de ce champ au sein de la communauté des praticiens et des scientifiques, ou des facteurs liés à la réglementation (Lachat 1997 ; Mitsch 2012 ; Poulin et al. 2019). Nous développerons ces points dans la partie 4 et 5 de cette synthèse.

Les fronts de connaissances techniques concernant le génie végétal

Plusieurs fronts de connaissances existent aujourd'hui, qui constituent autant des freins pour les acteurs de l'aménagement que des opportunités de questionnements pour les chercheurs et les bureaux d'étude.

Le premier front de recherche est lié à la connaissance du fonctionnement des écosystèmes fluviaux, en particulier en ce qui concerne le charriage et le transport sédimentaire, ainsi que des modèles prospectifs sur le fonctionnement des hydrosystèmes (Nicolas et al. 2014). Les réponses de ces écosystèmes aux actions anthropiques constituent un autre champ de recherche, que ce soit la modélisation des réponses écologiques aux modifications géomorphologiques et à leurs interactions, ou des données historiques sur l'évolution holocène des systèmes fluviaux et leurs interactions avec les sociétés du passé (Nicolas et al. 2014).

Le second front de recherche concerne les ouvrages de génie végétal eux-mêmes : leur durabilité, leur résistance aux contraintes hydriques, sédimentaires ou gravitaires (en particulier à un horizon supérieur à 3 ans), la dynamique de la végétation après installation et enfin la performance du matériel végétal sur le contrôle de l'érosion, de la sédimentation, de la stabilisation des bassins versants (Rey et al. 2015 ; Nicolas et al.

2014 ; Leblois et al. 2016). Les autres fronts de connaissances concernent le dimensionnement des ouvrages, calculé à partir de la contrainte tractrice, ainsi que les risques d'arrachement ou d'affouillement des ouvrages, qui sont considérés aujourd'hui comme l'une des principales limites de ces techniques (Bonin et al. 2013; Leblois et al. 2016, Leblois et al 2022).

Hypothèses de recherche liées à la technique

A la suite de cette revue de la littérature, plusieurs hypothèses de recherche peuvent être esquissées.

- 1) A la différence des ouvrages de génie civil, la performance des ouvrages de génie végétal semble moins facile à prédire, en raison de l'influence de paramètres croisés et difficilement maîtrisables liés à la nature vivante des matériaux, de la forte variabilité des ouvrages, et d'une plus faible masse de données disponibles.

Hypothèse : l'empirisme est central dans la définition de la performance, et fait appel à l'observation, au retour d'expérience et à une démarche d'adaptation (essai/erreur).

- 2) La performance des ouvrages de génie végétal ne se mesure pas, contrairement à celle des ouvrages de génie civil, de façon ponctuelle autour des enjeux à protéger. Les techniques de génie végétal prennent en compte le continuum de l'écosystème aquatique, et leur efficacité s'accroît avec le temps.

Hypothèse : la performance du génie végétal ne peut être mesurée selon les mêmes critères que celle du génie civil, et implique un changement d'échelle spatiale et temporelle.

- 3) Outre la lutte contre l'érosion, les berges végétalisées fournissent un grand nombre de SE, principalement des SE de régulation (amélioration de la qualité physico-chimique des cours d'eau, écrêtage des crues, etc.) et des SE culturels (valeur d'existence de la biodiversité, contribution à la santé humaine, etc.). L'évaluation multi-SE reste encore limitée.

Hypothèse : Sur le terrain, peu de protocoles d'évaluation existent pour mesurer les bénéfices fournis par les berges végétalisées, ce qui peut constituer un frein pour un recours plus large à ces techniques.

- 4) Des fronts de connaissances existent concernant la performance des ouvrages de génie végétal, en particulier en ce qui concerne leur durabilité, leur dimensionnement ou les risques d'arrachement.

Hypothèse : ces fronts de connaissances constituent autant un frein qui peut rendre les aménageurs réticents pour mobiliser ces techniques, que des défis à relever qui stimulent l'innovation et fédèrent les acteurs de la filière.

2.2. Les facteurs d'influence liés aux perceptions et aux représentations : quels sont les services écosystémiques perçus par le grand public ?

Si les protocoles de recherche en écologie démontrent que le génie végétal fournit de nombreux services écosystémiques, le grand public peut en avoir une perception différente. On peut en particulier s'interroger sur les écarts entre SE mesurés et perçus. Parmi ces SE, le service lié à la valeur esthétique des paysages produits par le génie végétal mérite une attention particulière, puisque la réception des ouvrages est souvent réalisée à l'aune des critères esthétiques par les personnes n'ayant pas acquis de savoirs spécialisés sur le fonctionnement des cours d'eau. Cette valeur esthétique perçue peut également se traduire en un certain nombre d'attentes en matière de gestion de la végétation des ouvrages de génie végétal.

Perception des services écosystémiques fournis par les berges végétalisées

Le concept de SE permet de décrire la contribution des écosystèmes au bien-être des sociétés. Dans une perspective constructiviste, les SE n'existent pas « en soi », mais dans la mesure où ils sont perçus comme tels par des bénéficiaires (Barnaud and Antona 2014; Barnaud et al. 2018). L'analyse des perceptions se révèle donc indispensable dans le processus d'évaluation des SE.

Par perception, on entend le processus complexe qui permet à un individu de prendre connaissance de son environnement, par le biais de « traitement de l'information où se succèdent des tâches automatiques, liées à des réflexes sensoriels et d'autres, plus contrôlées, liées à une activité cognitive » (Rivière-Honegger et al. 2014). Ces modèles cognitifs préexistants (connaissances, attentes, vécus, motivations) donnent du sens aux données sensorielles : elles permettent une catégorisation et véhiculent des connotations positives ou négatives aux stimuli (Rivière-Honegger et al. 2014). A la différence des représentations, qui est un phénomène cognitif ("une forme de connaissance spécifique, un savoir de sens commun" selon Jodelet, 1997), la perception est un phénomène physiologique, qui ne s'opère qu'en présence de l'objet perçu (Lévy and Lussault 2013).

Plusieurs études ont déjà été menées pour comparer les SE fournis par les écosystèmes fluviaux et les SE perçus. Citons par exemple une étude menée dans un parc urbain rivulaire dans l'agglomération de Nicosie (Chypre), qui mesure la perception du SE de lutte contre les îlots de chaleur. L'étude montre que 84% des visiteurs s'estimaient satisfaits par l'effet de rafraîchissement du parc urbain, alors même que les mesures micro-météorologiques relèvent un effet sur la température limité, de l'ordre de 0,5°C. Les auteurs l'expliquent par une bonne tolérance de la population aux fortes chaleurs, 63% des répondants ne s'estimant pas gênés par une température comprise entre 27°C et 37°C (Giannakis et al. 2016). Une autre étude confronte la perception des habitants riverains des cours d'eau en Roumanie avec le savoir scientifique. Les résultats montrent que les SE perçus sont principalement des SE d'approvisionnement, et que les répondants identifient une faible variété de SE. En outre, les répondants ne font pas de distinction entre les services écosystémiques des cours d'eau et ceux des cours d'eau modifiés. Ces différents éléments témoignent d'une faible connaissance des processus éco-hydrologiques et hydro-climatiques (Ioana-Toroimac et al. 2020).

Ces études montrent une possible déconnexion entre l'évaluation des SE réalisée par des protocoles en écologie et leur perception par les habitants. Dès lors, si les écologues identifient d'après leurs travaux les SE fournis par les ouvrages de génie végétal, cela ne sera pas forcément le cas pour les autres acteurs. Or, la perception que les acteurs ont de ces techniques est déterminante : les riverains ou les usagers interviennent dans l'aménagement des berges directement (dans le cas de propriétaires riverains) ou indirectement en formulant une demande sociale à laquelle tentent de répondre les élus et, en conséquence, les aménageurs. La confrontation entre les SE mesurés et les SE perçus sera donc un point particulièrement important dans notre analyse.

Méthodes d'évaluation des SE esthétiques

Le SE de la valeur esthétique est un cas à part : à la différence des autres SE, il ne peut être estimé que sous l'angle de la perception. En effet, ce SE présente une forte subjectivité, et donc une forte variabilité d'un individu ou d'un groupe social à l'autre. Dès lors, comment le mesurer ?

Un premier groupe d'études s'appuie sur des questionnaires directs, présentant une liste prédéfinie de SE. Les répondants doivent évaluer le niveau des SE sur une échelle de satisfaction (Giannakis et al. 2016), ou sélectionner et hiérarchiser les SE fournis par un écosystème donné (Ioana-Toroimac et al. 2020). Les données sont parfois récoltées *in situ* (House and Sangster 1991). D'autres études mobilisent des photo-questionnaires, qui reposent sur un jeu de photographies de paysages dites "obliques". A la différence des photos prises verticalement (par satellite ou par avion), ces photographies retranscrivent mieux le point de vue de l'observateur, ce qui permet de standardiser le protocole car l'ensemble des personnes interrogées réagissent sur une base commune. Les répondants doivent répondre à des questions fermées et attribuer une note à chacune des photographies à l'aide d'une échelle d'évaluation souvent bipolaire, basée sur des critères esthétiques (beau/laid...) ou sur d'autres critères (agréable, naturel, etc.) (Gregory and Davis 1993; Le Lay et al. 2012; Le Lay et al. 2013; Cottet et al. 2010). Des données oculométriques, obtenues grâce à des lunettes « eye-tracker », qui enregistrent le mouvement de l'œil, et qui permettent d'identifier les zones qui focalisent l'attention visuelle, sont parfois utilisées (Cottet et al. 2014). Enfin, certaines études ont recours à des méthodes qualitatives classiques de sciences sociales, comme les enquêtes par entretiens semi-directifs (De Groot and De Groot 2009; Westling et al. 2014; Cottet et al. 2014).

Les SE de valeur esthétique : quels critères d'évaluation ?

Bien que la valeur esthétique soit largement subjective, elle répond toutefois à des critères objectivables. Ainsi, on peut expliquer les préférences esthétiques par des caractéristiques visuelles, par des indicateurs de qualité écologique, ou par des représentations de la nature.

- **Les critères paysagers**

Plusieurs études ont cherché à isoler les composantes visuelles d'un paysage, afin de savoir quels sont les éléments qui influencent la valeur esthétique perçue. L'hydrologie, la morphologie et la qualité physico-chimique des cours d'eau sont des critères déterminants. Ainsi, les cours d'eau jugés les plus esthétiques sont ceux qui présentent une eau claire, des berges non canalisées, un tracé sinueux, une certaine profondeur et une quantité d'eau intermédiaire (c'est-à-dire l'absence de crue ou d'étiage) (Gregory and Davis 1993; Le Lay et al. 2013; Westling et al. 2014). La présence de végétation sur les berges concourt aussi à la beauté du cours d'eau, tout comme la

présence de faune (Cottet et al. 2014; Westling et al. 2014). En particulier, House et Sangster (1991) ont montré que les riverains sont sensibles à la présence d'arbres et à une diversité végétale, tant en termes de strates que d'espèces. Les sédiments présents dans le cours d'eau (e.g. bancs de graviers) sont quant à eux tantôt perçus comme améliorant la valeur esthétique (House and Sangster 1991), tantôt comme dégradant (Le Lay et al. 2013). Enfin, la présence de débris ou de bois flottant est perçue majoritairement négativement (Gregory and Davis 1993; Le Lay 2006).

De la même façon, nous pourrions identifier quels sont les éléments visuels qui concourent à la valeur esthétique des berges végétalisées par génie végétal. On peut s'attendre à ce que ces berges soient perçues comme plus esthétiques que les berges aménagées avec des techniques mixtes ou de génie civil, dans la mesure où elles présentent plus de végétaux et une morphologie du cours d'eau moins artificielle.

Des nuances doivent toutefois être apportées, notamment en ce qui concerne la variabilité des réponses. Ainsi, les bois flottants sont perçus comme inesthétiques par les gestionnaires du risque et les usagers, tandis qu'ils améliorent l'esthétique pour les gestionnaires en charge de la conservation des écosystèmes (Le Lay 2006). Ce constat illustre l'influence des savoirs environnementaux dans la construction des valeurs environnementales (le bois flottant étant envisagé tantôt comme un risque puisqu'il peut créer des embâcles, tantôt comme un objet de richesse écologique puisqu'il crée une diversité d'écoulement et accueille une biodiversité riche et variée).

- **Les critères fonctionnels**

Selon la théorie de l'écologie du paysage, le paysage est "composé d'ensembles d'écosystèmes en interaction et est considéré comme un niveau d'organisation des systèmes écologiques, supérieur à l'écosystème" (Burel et Baudry, 1999). Tout paysage peut donc être lu au prisme du (bon) fonctionnement de ces systèmes écologiques. On peut ainsi s'interroger sur l'adéquation entre ces critères de fonctionnement et la valeur esthétique perçue. Autrement dit, les indicateurs de bon état écologique des cours d'eau (e.g. fonctionnalité des habitats, richesse de la biodiversité, mobilité des cours d'eau, etc.), sont-ils également des indicateurs esthétiques ?

Une étude portant sur les bras morts fluviaux de l'Ain et du Rhône compare la valeur accordée à ces milieux selon leur niveau trophique (charges de substances nutritives) et conclut que plus le niveau trophique est élevé, moins les personnes interrogées considèrent le bras mort comme esthétique. Cela montre l'existence de liens entre certains indicateurs utilisés pour décrire le fonctionnement des écosystèmes et la valeur esthétique perçue (Cottet et al. 2013). Ce résultat questionne toutefois l'adéquation entre ce que l'on juge être le bon fonctionnement des écosystèmes et les goûts esthétiques puisque l'on sait que le caractère eutrophe des bras morts n'est pas forcément le signe d'un mauvais fonctionnement (à la différence d'autres types de milieux où de tels niveaux trophiques rendent généralement compte d'une pollution) mais qu'il peut être le signe d'un vieillissement de ces milieux, conforme à leurs dynamiques naturelles.

Les cours d'eau les plus appréciés sont souvent les plus naturels. Toutefois, ce critère de naturalité semble être une catégorie très subjective qui ne correspond pas forcément à une faible anthropisation des milieux. Ainsi, House et Sangster (1991) avancent que les riverains, tout en valorisant la naturalité des cours d'eau, sont également attachés aux interventions humaines, par exemple en préférant une herbe tondue plutôt qu'une herbe haute. Dans l'agglomération lyonnaise, si le naturel est valorisé au détriment de l'artificiel, certains éléments, comme la pelouse, sont clivants

et peuvent être considérés comme naturels ou artificiels selon que l'on ait acquis, ou non, des savoirs experts sur le fonctionnement des écosystèmes (Cottet et al. 2014). C'est donc la question des représentations de la nature qui au cœur de la réflexion.

- **Les critères liés aux représentations de la nature**

Les représentations sont des images, des interprétations de l'environnement, qui produisent une grille de lecture de la réalité, rendant ainsi possible l'organisation d'actions (Rivière-Honegger et al. 2014). Les représentations divergent des perceptions dans la mesure où la perception est d'ordre physiologique et ne se réalise qu'en présence de la chose perçue alors que la représentation suppose un temps différé, de courte ou de longue durée (Lévy and Lussault 2013). On distingue les représentations mentales, propres à un individu, et les représentations partagées au sein d'un groupe social.

L'élaboration de typologies permet d'appréhender les représentations. Ainsi, Van Den Born et al. (2001) ont identifié plusieurs types de représentations de la nature parmi la population néerlandaise : la nature arcadienne, résultant d'interactions harmonieuses entre les hommes et leur environnement ; la nature sauvage, où la présence, le développement et la reproduction des organismes sont spontanés ; la nature invasive, source de nuisances dans un lieu familier ; et enfin la nature domestiquée, où la nature est perçue comme étant au service de l'homme. Ces représentations de la nature sont également des modèles de gestion, qui peuvent régir la conception ou l'entretien des espaces de nature. Ainsi, dans l'agglomération lyonnaise, on trouve des paysages apparentés à la nature sauvage (ripisylve et île du Parc de Brétillod), des paysages entretenus (Parc de Gerland) correspondant à l'idéal de la nature arcadienne, et enfin des paysages de nature aménagée (berges du Rhône) (Arnould et al. 2011).

Dans le cas des petites rivières urbaines, il faudra en outre interroger les relations entre la ville et la nature. En effet, les masses d'eau, les végétaux, la faune qui constituent les écosystèmes aquatiques sont autant d'éléments de nature dans un environnement urbain, ce dernier étant conçu traditionnellement en opposition à la nature (Arnould et al. 2011).

Les représentations de la nature influencent le jugement esthétique : est jugé beau, un cours d'eau qui correspond à un certain idéal de nature. Plusieurs études ont analysé ce lien entre perception de la valeur esthétique et représentations. Deux études portant sur l'Yzeron ont ainsi montré que le cours d'eau était apprécié car il présente l'image d'une nature arcadienne, c'est-à-dire qui apparaît naturelle, sans pour autant être sauvage ou au contraire trop entretenue ; l'alignement d'arbres en étant l'emblème (Flaminio et al 2015). Les données oculométriques montrent quant à elles une certaine tolérance envers la nature désordonnée, produite à l'issue des opérations de restauration, contrairement aux hypothèses de départ qui prévoyaient une préférence pour les paysages propres et nets (Cottet et al. 2014).

On pourra alors se demander quels types de paysages de nature sont produits par les ouvrages de génie végétal, et quelles représentations de la nature en ville ils véhiculent. Deux éléments seront particulièrement importants : la place de ces ouvrages dans un gradient naturel/artificiel, et les représentations des relations entre l'humain et la nature ; ces deux points étant déterminants dans le jugement de la valeur esthétique. Les divergences possibles de représentations, entre les riverains et les aménageurs, devront faire l'objet d'une attention particulière.

De la perception à la demande sociale

Les acteurs qui ne sont pas impliqués directement dans la gestion des cours d'eau vont souvent juger les opérations de restauration et d'entretien à l'aune de leurs perceptions et de leurs représentations paysagères. Autrement dit, seront jugées acceptables les opérations qui améliorent l'esthétique perçue du fleuve et qui concourent à un certain idéal de nature. Cet idéal étant influencé par les savoirs que les personnes ont acquis sur les cours d'eau, on pressent une possible différence de jugement selon les acteurs considérés (riverains, élus, gestionnaires ou scientifiques).

Le premier point de fracture s'explique par une faible connaissance du fonctionnement des cours d'eau chez nombre d'habitants riverains. Certains éléments sont jugés inesthétiques, comme la présence de bancs de graviers ou de bois flottant, alors qu'elle concourt au bon fonctionnement écologique des cours d'eau (Gregory and Davis 1993 ; Le Lay 2006 ; Le Lay et al 2013). En outre, les habitants riverains affichent parfois une méconnaissance du lien entre état écologique des cours d'eau et SE fournis (Ioana-Toroimac et al. 2020). Il peut être alors utile de sensibiliser la population sur le fonctionnement hydro-écologique des cours d'eau ; par exemple sur le rôle du bois mort dans la fourniture d'un habitat pour les poissons et dans la réduction de la vitesse d'écoulement (Gregory and Davis 1993), ou sur le rôle des bancs de graviers dans l'existence d'une mosaïque d'habitats, garante de la diversité des espèces (Le Lay et al 2013).

Le second point de fracture concerne l'adéquation entre les pratiques de gestion (ou plus généralement, les paradigmes de gestion), leurs effets sur les paysages et la demande sociale. Plusieurs cas d'étude ont montré que les techniques de génie végétal s'appuient sur une gestion dite différenciée des espaces verts, qui s'inspire du modèle de la nature sauvage, alors que les habitants désirent plutôt une nature arcadienne (Flaminio et al 2015; Rivière-Honegger et al 2014). Des opérations de médiation ou de sensibilisation permettent d'atténuer cet écart d'appréciation (De Groot and De Groot 2009).

Finalement, on voit que les perceptions et les représentations se traduisent en une demande sociale en termes de gestion, et une fracture se dessine souvent entre experts et non-experts. Dans le cas de la protection des berges contre l'érosion, on peut s'interroger sur l'adéquation entre les techniques de génie végétal et la demande sociale, que ce soit au niveau des pratiques de gestion (fréquence des coupes, type d'espèces implantées etc.) et ou en termes de paradigmes de gestion (place du végétal en ville par exemple).

Hypothèses de recherche liées aux perceptions et aux représentations

A la suite de cette revue de la littérature, plusieurs hypothèses de recherche peuvent être esquissées.

- 1) Il peut exister une déconnexion entre l'évaluation des SE réalisée par des protocoles en écologie et leur perception par les habitants.

Hypothèse : Les acteurs n'identifient pas forcément les SE fournis par les berges végétalisées, et ne font pas forcément le lien entre le type d'ouvrage, le niveau de biodiversité et les SE fournis.

- 2) Les caractéristiques jugées naturelles des cours d'eau (arbre, tracé sinueux, absence de minéraux) augmentent leur valeur esthétique perçue. Il peut exister une convergence entre les indicateurs de bon état des cours d'eau et les critères de valeur esthétique, sans que cela soit systématique.

Hypothèse : Les berges végétalisées seront jugées plus esthétiques que celles aménagées avec les techniques mixtes ou dures, car elles sont considérées comme naturelles et en bon état écologique.

- 3) Le critère de naturalité est central dans le jugement esthétique, mais il est fortement subjectif, car il renvoie à différentes représentations de la nature.

Hypothèse : La nature produite par les ouvrages de génie végétal ne correspondra pas forcément à l'idéal de nature construit par les différents acteurs du territoire.

- 4) Les perceptions et les représentations liées à la nature se traduisent par une demande sociale en termes de gestion des espaces de nature en ville. Il peut exister une fracture entre experts et non-experts liée à une différence de savoirs .

Hypothèse : Les techniques de génie végétal créent des paysages qui ne sont pas forcément en adéquation avec la demande sociale, ce qui questionne les modalités de gestion qui doivent être mises en œuvre à leur égard (c'est-à-dire les pratiques et le paradigme de gestion).

2.3. Les facteurs d'influence liés au contexte territorial : en quoi le recours aux techniques de génie végétal en territoire urbain est-il paradoxal ?

Les techniques de génie végétal semblent particulièrement opportunes en milieu urbain. En effet, on assiste à un mouvement de revalorisation des petits cours d'eau en ville, où leur rôle écologique, patrimonial, urbanistique est reconnu. Le génie végétal semble pouvoir concilier ces différents rôles. Toutefois, le milieu urbain comporte de nombreuses contraintes qui compliquent l'implantation d'ouvrages de génie végétal. On peut donc parler de paradoxe dans la mesure où le milieu urbain rend ces techniques particulièrement nécessaires mais aussi particulièrement délicates à mettre en œuvre.

Le génie végétal, fer de lance de la revalorisation des cours d'eau en ville ?

Au cours du 19^{ème} siècle, sous l'effet des courants hygiéniste et moderniste, les cours d'eau ne sont plus perçus en premier lieu comme des vecteurs de transports et d'énergie, mais comme des sources de nuisances (odeurs, insalubrités...) ou de fragmentation urbaine (Bonin 2007 ; Dournel and Sajaloli 2012 ; Rode 2017). Fossés et rivières sont donc comblés ou enterrés, à l'exception de cours d'eau trop larges ou de ceux qui servent à la navigation. La végétation, considérée comme un élément de fragilisation des ouvrages hydrauliques, est elle aussi largement contrôlée, par le biais de coupes ou d'arrachage (Vennetier et al 2004). Les cours d'eau en territoire urbain présentent alors trois symptômes : une hydrologie complexifiée, une géomorphologie simplifiée et une fonctionnalité écologique réduite (Walsh et al 2005 cité par Flaminio et al 2015). Cela est particulièrement marqué dans le cas des petites rivières urbaines, c'est-à-dire celles dont « la majeure partie du bassin versant est urbanisée et présentent une amplitude importante de débits dans un lit parfois non visible » (Warot et al. 2020). Plus que les autres, ces cours d'eau ont été artificialisés, en raison des faibles débits et de la facilité technique à intervenir, des usages réduits (loisirs ou transports) et d'un déficit d'attention de la part des habitants comme des politiques (Warot et al. 2020). Par exemple, la Bièvre, petit affluent de la Seine, a concentré des activités industrielles polluantes du 17^{ème} au 19^{ème} siècle, avant d'être transformé en égout au 20^{ème} siècle (Roux and Le 2010). La Rize, ancien bras mort du Rhône, a quant à lui disparu à partir du 19^{ème} siècle, sous l'effet de l'urbanisation, de l'industrialisation et de l'absence d'entretien (Brun et al. 2018).

A partir des années 1970, après leur avoir tourné le dos pendant près d'un siècle, les villes s'intéressent de nouveau à leur fleuve. Cette tendance, qui a commencé en Amérique du Nord, au Royaume Uni et en Europe rhénane, touche la France à partir des années 1990 (Bonin 2007; Dournel and Sajaloli 2012). Par exemple, à St Etienne, après avoir été une ressource hydraulique convoitée (période préindustrielle), puis enfouie et utilisée comme un exutoire pour les eaux usées (période industrielle), la rivière Furan a fait l'objet d'une revalorisation matérielle et idéale, pendant la période contemporaine (Ultsch 2010).

La revalorisation des cours d'eau s'appuie sur trois piliers : la renaturation (restauration des fonctions écologiques du fleuve), la patrimonialisation (valorisation des cours d'eau comme des vecteurs d'histoire et de culture), et la réhabilitation urbaine (mise en valeur de la contribution des cours d'eau au lien social et au cadre de vie).

Le premier volet de la revalorisation s'appuie sur la renaturation des cours d'eau, qui vise à restaurer leurs fonctions écologiques, et s'appuie sur l'écologie urbaine (Dournel and Sajaloli 2012). La renaturation des cours d'eau répond à des objectifs réglementaires, puisque le bon état des cours d'eau constitue une obligation de résultat depuis la Loi sur l'eau de 1992 et surtout la Directive Cadre sur l'Eau de 2000, transcrite en droit français par la Loi sur l'eau de 2006 (Barles and Thébaud 2018). Au-delà des impératifs réglementaires, il s'agit d'assurer la fourniture de SE rendus par les cours d'eau (atténuation du changement climatique, lutte contre les îlots de chaleur urbains, valeur d'existence de la biodiversité, réduction de la pollution atmosphérique, traitement des eaux usées etc.) que la technologie pourrait offrir dans des conditions plus coûteuses, dégradées ou moins résilientes (Arnould et al. 2011; Barles and Thébaud 2018; Warot et al. 2020). On assiste alors, entre les années 1970 et 2000, à deux types de mesure : des opérations de restauration hydro-géomorphologiques (découverte de cours d'eau enterrés, revégétalisation des berges...) ou des opérations visant à désimpermeabiliser les sols pour infiltrer directement les eaux pluviales à la parcelle et sortir d'un raccordement systématique au réseau d'assainissement souterrain. Ce raccordement est en effet source de pollutions pour les cours d'eau, du fait de débordements en cas de grosse pluie, et d'un déficit de recharge des eaux souterraines. Ces évolutions contribuent à restaurer les fonctions biochimiques et écologiques des cours d'eau (Barles and Thébaud 2018). Les petites rivières urbaines sont particulièrement concernées par ce changement de gestion : alors qu'elles étaient considérées jusqu'alors comme de simples exutoires pour les eaux usées, on met en évidence leur rôle essentiel dans le fonctionnement hydrologique de la ville (Barles and Thébaud 2018; Warot et al. 2020). Ce passage d'une gestion hydraulique à une gestion écologique permet de restaurer ou de maintenir différents SE fournis par les petites rivières urbaines (dilution de la pollution résiduelle, zone d'expansion des inondations, maintien de la biodiversité...), tout en protégeant les milieux aquatiques (Carré 2011).

Le deuxième pilier de la restauration des cours d'eau en ville concerne leur patrimonialisation, c'est-à-dire le fait que les cours d'eau soient reconnus comme des héritages dignes d'être valorisés et qui méritent d'être préservés et pérennisés (Rivière-Honegger et al 2014). Ce mouvement de patrimonialisation s'appuie sur le culturalisme, qui promeut les héritages urbains du Moyen Âge et de l'Ancien Régime (Dournel and Sajaloli 2012), ainsi que sur l'apport des sciences sociales dans les paradigmes de gestion de l'eau, qui permettent de replacer les cours d'eau comme des objets vivants et culturels (Ghiotti 2009). De nombreuses communes ont lancé des opérations de mise en valeur de leurs petits cours d'eau, à travers la mise en place d'itinéraires pédestres ou d'aménagements des berges à des fins touristiques (Warot et al. 2020).

Enfin, le troisième aspect concerne la réhabilitation urbaine. En ville, les fleuves ont un rôle structurant : ils peuvent être un axe névralgique de la ville pour la circulation ou le lien entre différents quartiers ou, à l'inverse, fragmenter l'espace urbain. Ils peuvent être des vecteurs d'attractivité (lieu de promenade, esthétique, îlot de verdure, et de fraîcheur etc.) ou, au contraire, être des espaces répulsifs (risques d'inondation, coupures urbaines, insalubrité, lieux de marginalité). Lors des opérations de réhabilitation urbaine, la place des cours d'eau dans les quartiers est réinventée : les projets encouragent la réappropriation des cours d'eau par les habitants, les berges devenant des lieux de lien social (cheminement piéton, lieu de rassemblement ou d'événements festifs, opérations d'éducation à l'environnement). Les cours d'eau deviennent aussi l'emblème de la « ville durable » et la renaturation urbaine devient un élément de marketing, qui concourt à l'image de marque de la ville ou d'un quartier,

visible notamment par l'augmentation des prix immobiliers (Arnould et al. 2011 ; Dournel and Sajaloli 2012 ; Rode 2017 ; Rivière-Honegger et al. 2019).

Les techniques de génie végétal semblent particulièrement adaptées pour accompagner la renaturation, la patrimonialisation et la réhabilitation urbaine des petits cours d'eau. Ces techniques, présentées comme traditionnelles, voire ancestrales, peuvent aussi s'inscrire dans une optique de patrimonialisation et de valorisation des savoirs locaux (Clark and Howell 1992 ; Evette et al. 2009 ; Barles and Thébaud 2018). Enfin, les berges végétalisées ont une fonction esthétique et peuvent contribuer à l'amélioration du cadre de vie, en permettant certains usages (pêche, promenade etc.). Le mouvement de restauration des petits cours d'eau en ville fait donc émerger une attente très forte autour des techniques de génie végétal, capables de concilier des objectifs écologiques, patrimoniaux et urbanistiques.

Les villes, marquées par de fortes contraintes pour la mise en place du génie végétal

Malgré cette forte attente autour de la végétalisation des berges en milieu urbain, des freins vont contraindre la mise en place des ouvrages de génie végétal en ville.

D'un point de vue technique, paradoxalement, plus le milieu est artificialisé avec des opérations « traumatisantes » pour le milieu (curage des fossés, remblais établis en rive, drainage de zone humide, murs, etc.), plus il sera difficile d'avoir recours aux techniques de génie végétal pour retrouver une certaine naturalité du milieu (Adam and Lachat 2008).

Par ailleurs, les linéaires de cours d'eau en milieu urbain sont bordés par de nombreux enjeux humains (habitations, infrastructures, activités économiques...), qui seront vulnérables en cas d'érosion des berges. Pour décider d'intervenir (ou non) sur les berges de cours d'eau, les gestionnaires doivent hiérarchiser les enjeux selon leur valeur économique et sociale, et évaluer en parallèle le coût et l'impact du déplacement d'une infrastructure de façon préventive ou de sa destruction en cas de crue. Ainsi, l'érosion sera tolérée dans les lieux où les enjeux et la vulnérabilité seront les plus faibles (Bonin et al. 2013).

Cette tendance s'est renforcée depuis trois décennies avec une exigence plus forte envers les élus concernant la sécurité de leurs habitants, qui s'exprime aussi bien d'un point de vue de la demande sociale que d'un point de vue législatif (loi Barnier du 2 février 1995, Code général des collectivités territoriales en 2000, loi Bachelot du 30 juillet 2003, loi portant engagement national pour l'environnement du 12 juillet 2010) (Rode 2010b ; Douvinet et al. 2011). On constate toutefois certaines tensions entre les politiques urbaines, les villes étant confrontées à des injonctions contradictoires en matière de développement durable et de protection contre l'érosion et les inondations. D'un côté, les règlements d'urbanisme (Grenelle II par exemple) vantent une ville compacte, qui limite l'étalement urbain, ce qui peut encourager les villes, dans un contexte de tension foncière, à mener des opérations en zone inondable, augmentant alors l'exposition au risque. D'un autre côté, ces mêmes règlements d'urbanisme invitent à penser des villes adaptables et résilientes face aux risques, via la lutte contre l'imperméabilisation des sols et la sauvegarder les espaces végétalisés, afin de rendre la ville plus résiliente (Gralepois and Guevara 2015).

Finalement, on comprend donc que, même si l'érosion et la mobilité des berges des cours d'eau est considérée comme indispensable à leur fonctionnement, en milieu urbain, l'omniprésence des enjeux va conduire les aménageurs à considérer que la non-intervention est rarement une option.

L'adaptation des techniques de génie végétal aux territoires urbains questionne donc la performance des ouvrages. En particulier, la vulnérabilité des ouvrages de génie végétal dans les premières années suivant leur installation, et la possible fragilisation, sous l'effet de la végétalisation, des digues et des ouvrages de génie civil déjà en place semblent être des freins importants.

Un deuxième point qui questionne l'adéquation des techniques de génie végétal aux enjeux des territoires urbains tient aux questions foncières. En effet, les techniques de génie végétal nécessitent une emprise au sol plus importante dans la mesure où, hormis pour les ouvrages construits à la verticale (caissons végétalisés par exemple), les ouvrages de génie végétal ne pourront être mis en place que sur un talus à faible pente (parfois inférieure à 5H/1V) (Adam and Lachat 2008). Or, les contraintes foncières sont très fortes en territoire urbain, au point que les zones inondables ou soumises à l'érosion sont souvent considérées comme des zones d'urbanisation potentielles (Gralepois and Guevara 2015). Dans ce contexte, il sera plus difficile d'abaisser la pente des berges ou *a fortiori* de laisser un espace de mobilité à la rivière.

Par ailleurs, le foncier va conditionner largement les possibilités de mise en place du génie végétal. 90% du linéaire des cours d'eau en France sont non domaniaux, et sont donc soumis au régime de propriété privée (Nicolas et al. 2014). L'entretien du cours d'eau incombe à leur propriétaire, mais peut être pris en charge par les collectivités territoriales selon les conditions suivantes : si un accord a été trouvé entre la collectivité et le propriétaire ; si la collectivité utilise la procédure de la déclaration d'intérêt général ou si la collectivité se substitue au propriétaire défaillant, après mise en demeure et aux frais de ce dernier, ou enfin dans un contexte d'une expropriation pour utilité publique, avec indemnisation (Goliard 2011). Les gestionnaires des cours d'eau (syndicats de rivière ou syndicats mixtes) ont donc rarement la maîtrise foncière des berges, et vont devoir agir en prenant en compte les propriétaires. Enfin, une autre contrainte qui va peser dans les territoires urbains est l'encombrement des sous-sols par les différents réseaux, qui encouragent à concevoir des travaux avec une faible emprise foncière (Warot et al. 2020).

L'omniprésence des enjeux humains et les contraintes foncières poussent donc les aménageurs à avoir recours aux techniques de génie civil, qui semblent présenter des niveaux de risque et d'incertitude moins élevés, qui tolèrent des pentes plus fortes et donc, qui nécessitent moins d'emprise foncière.

Cependant, plusieurs expériences de génie végétal en milieu urbain prouvent que ces techniques ne sont pas incompatibles avec cet environnement, comme nous le montrons dans la partie suivante.

Identification des facteurs de réussite à partir de cas d'utilisation du génie végétal en territoire urbain

Les retours d'expérience des projets de génie végétal menés dans des contextes urbains permettent d'identifier différents facteurs de réussite dans la conduite de ces projets. Nous en avons identifié six : prendre en compte les usages et pratiques des habitants et impulser des changements, encourager la réappropriation du cours d'eau, prendre en compte les représentations concurrentes, prendre en compte les jeux d'acteurs, impliquer la population dès la conception du projet, avoir une approche intégrée.

- **Perpétuer les pratiques et impulser des changements**

En territoire urbain plus qu'ailleurs, les berges sont fréquentées et font l'objet de différents usages : rassemblement, pêche, promenade, etc. Les opérations de réaménagement des berges doivent donc identifier les usages et les pratiques qui ont déjà lieu pour, autant que possible, les faire perdurer. Dans certains cas, elles peuvent aussi être l'occasion de proposer et d'impulser de nouvelles pratiques. En effet, il n'est pas rare que les berges soient le lieu de pratiques considérées comme marginales (trafic de stupéfiants, squat...). Les projets de génie végétal, par la revalorisation des territoires urbains qu'ils induisent, peuvent alors contribuer à encourager des pratiques plus acceptées socialement (promenade par exemple) (Rode 2010b ; Warot et al. 2020). Un exemple de projet de réhabilitation par génie végétal mené dans la Communauté Urbaine de Bordeaux sur douze bassins d'étalement d'eau pluviale à plan d'eau permanent montre bien en quoi la prise en compte des pratiques sociales est indispensable. Selon les sites, on observe que les ouvrages se sont plus ou moins dégradés, en fonction de deux paramètres : l'organisation (ou non) de collectifs d'usagers d'une part, qui permettent un suivi en temps réel de l'état des ouvrages et, le cas échéant, le déclenchement d'opérations d'entretien ; et le contexte social d'autre part, qui va déterminer le comportement des usagers (piétinement intensif, coupe sauvage de la végétation ou actes de vandalisme) (Jacopin L'Azou and Gross 2010).

- **Encourager l'appropriation du cours d'eau par les habitants**

Les petits cours d'eau en ville sont souvent mal connus, voire mal aimés (Warot et al. 2020). Leur restauration est aussi l'occasion de restaurer le lien entre les habitants et ces cours d'eau. C'est ce qui s'est passé dans le cas de la Rize, une résurgence du Rhône située à Villeurbanne, en agglomération lyonnaise. Après avoir été une ressource essentielle pour les ménages, l'industrie et l'agriculture, la Rize a été malmenée (pollution, réduction de son débit, création d'un lit artificiel, assèchement de son lit et enfouissement). Il a donc fallu réinventer le lien entre la ville et la rivière, à travers un travail de scénarisation impliquant les habitants. A partir du tracé historique du cours d'eau, le parcours d'une nouvelle Rize a été esquissé puis sectorisé afin de faire des diagnostics techniques et architecturaux et d'élaborer des scénarios de restauration et d'aménagement (Brun et al. 2018; Brun et al. 2018). Un autre exemple est donné à Sarcelles avec la réouverture du petit Rosne. Alors que la rivière était enterrée depuis des années, la réouverture du cours d'eau a permis de montrer l'existence de cette rivière aux habitants. Les abords du cours d'eau sont devenus un lieu de promenade et de sociabilité. Dans ce cas, une réappropriation a été rendue possible par l'implication des élus, qui se sont faits défenseurs du projet (Warot et al. 2020).

- **Prendre en compte les représentations concurrentes**

Le moment de l'élaboration et de la mise en œuvre du projet révèle souvent l'existence de différentes représentations autour des cours d'eau, qui peuvent entrer en conflit (Rivière-Honegger et al. 2014). Le cas de l'aménagement des zones humides dans l'agglomération de Rennes, s'il s'éloigne du cas des petites rivières urbaines, peut malgré tout illustrer ces enjeux de concurrence des représentations de la nature liée à l'eau en territoire urbain. Dans la phase de conception du projet, différents « motifs aquatiques » se sont opposés, ils se traduisent par différentes catégorisations des espaces selon la place et la forme d'eau souhaitée. L'auteur en dénombre quatre : le motif écologique, qui exclut la présence humaine, le motif paysager, qui valorise l'eau dans l'espace public, le motif de la nature urbaine hygiénisée et contrôlée (en particulier vis-à-vis du risque inondation), et le motif historique et social, eau plurielle et pérennisation des usages antérieurs. Les différentes étapes du projet montrent que

les représentations « paysagères esthétisantes et écologisantes » ont pris de plus en plus de poids, au détriment des autres motifs (Hellier et al. 2019).

- **Prendre en compte les jeux d'acteurs**

Une autre particularité du territoire urbain tient à la complexité des jeux d'acteurs. Ainsi, l'histoire du projet de restauration de l'Yzeron montre que le projet tente d'intégrer une multitude d'enjeux au fil du temps, devenant de plus en plus complexe : à la restauration du cours d'eau et au réaménagement des collecteurs d'eau pluviales, s'ajoute la requalification de la voirie et de l'urbanisme. Cela se traduit par une complexification des jeux d'acteurs. En plus des acteurs historiques, comme le syndicat de rivière, la mairie d'Oullins et le Grand Lyon, de nombreux acteurs interviennent : des associations d'habitants, qui s'opposent au projet, l'Agence de l'Eau, qui devient partenaire du projet et financeur, des acteurs associatifs comme la FRAPNA ou encore un bureau d'études spécialisé en restauration fluviale. Finalement, les échanges entre ces différents acteurs ont abouti à un projet conciliant des objectifs écologiques et hydromorphologiques et urbanistiques (Flaminio et al. 2015).

- **Impliquer la population dès la conception du projet**

L'implication précoce de la population dans la conception du projet pourrait permettre, en instaurant un dialogue, de limiter les oppositions, voire les blocages du projet. Ainsi, dans le cas de l'Yzeron, une association d'habitants s'est montée en opposition au premier projet, élaboré en 1997, car ces derniers estimaient ne pas avoir été assez consultés. Le projet finalement retenu est issu d'une co-construction, mais a en définitive davantage impliqué les experts et les élus plutôt que les habitants (Flaminio et al. 2015). Le cas de la réhabilitation des bassins d'étalement d'eau pluviale à plan d'eau permanent dans l'agglomération bordelaise montre que l'implication des acteurs a été plus ou moins précoce et efficace selon les sites. Plusieurs facteurs peuvent faciliter l'implication des habitants dans le projet : une implication dès la phase de diagnostic et régulière tout au long du projet, la présence de collectifs déjà constitués (associations d'usagers, fédération de pêche, etc.), une réelle volonté politique de la part de la collectivité territoriale, ou un investissement de la part des services techniques (Jacopin L'Azou and Gross 2010).

- **Avoir une approche intégrée**

Fournissant simultanément différents types de SE, les cours d'eau en ville semblent le lieu idéal pour penser la multifonctionnalité. Cependant, il peut y avoir une concurrence entre ces différentes fonctions. Le cas de l'aménagement des zones humides dans l'agglomération rennaise (Hellier et al. 2019) et celui de la restauration de l'Yzeron (Flaminio et al. 2015) montrent que les différentes fonctions de ces milieux aquatiques entrent en concurrence et les différents acteurs impliqués dans le projet priorisent et défendent la valorisation de fonctions différentes. Alors que le cas de l'Yzeron semble montrer une prise en compte simultanée des différents enjeux, celui de l'agglomération rennaise montre une difficulté à prendre en compte les enjeux paysagers (autres qu'esthétique) et culturels. Enfin, certains objectifs peuvent être instrumentalisés au service d'autres. Rode (2017) montre par exemple que malgré les objectifs affichés, la restauration du Têt ne semble pas vraiment suivre des objectifs de restauration physique du cours d'eau, mais sert avant tout des objectifs d'aménagement urbain.

Hypothèses de recherche liées au contexte territorial

A la suite de cette revue de la littérature, plusieurs hypothèses de recherche peuvent être esquissées.

- 1) On observe depuis les années 1970 un basculement dans la relation entre les villes et les petits cours d'eau, ces derniers faisant l'objet d'une renaturation, d'une patrimonialisation et d'une réhabilitation urbaine.

Hypothèse : Il existe une forte attente autour du génie végétal en ville, qui permet de concilier en même temps des objectifs écologiques, patrimoniaux et urbanistiques.

- 2) Les territoires urbains sont particulièrement contraignants pour la mise en place des techniques de génie végétal : les cours d'eau sont fortement anthropisés, les enjeux sociaux et économiques sont omniprésents, et le foncier est fortement contraint.

Hypothèse : En territoire urbain, les techniques de génie végétal seront soit associées aux techniques de génie civil *via* des techniques mixtes (qui diminuent les contraintes, notamment sécuritaires et foncières), soit implantées dans des secteurs où l'urbain est le moins dense.

- 3) La réussite des projets de génie végétal en ville tient à plusieurs facteurs, particulièrement ceux liés aux représentations et aux jeux d'acteurs.

Hypothèse : Malgré une apparente facilité à concilier des objectifs variés, les projets impliquant des techniques de génie végétal peuvent aussi susciter des conflits et des concurrences entre les objectifs et entre les acteurs.

2.4. Les facteurs d'influence liés à la profession : dans quel paradigme de gestion le génie végétal s'inscrit-il ?

Le génie végétal requiert de nouvelles connaissances et de nouvelles compétences techniques, qui diffèrent de celles habituellement mobilisées par les acteurs de l'ingénierie civile. Au-delà de ces nouvelles compétences, c'est aussi une nouvelle façon d'envisager l'érosion des berges, c'est-à-dire de définir le problème, de poser un diagnostic et de proposer une façon d'agir. Le recours au génie végétal demanderait donc un changement en profondeur dans les pratiques professionnelles individuelles des acteurs de l'aménagement, comme à l'échelle de la filière.

Une filière structurée autour d'une vision commune ?

Le génie végétal est une filière professionnelle qui implique différents acteurs, qui vont intervenir à différents moments de la vie de l'ouvrage : l'innovation (organismes de recherche scientifique, bureaux d'étude), la conception (bureaux techniques, maîtres d'ouvrage, assistants aux maîtres d'ouvrage), la construction (maîtres d'œuvre, fournisseurs de matériel, entreprises) et l'entretien (maîtres d'ouvrage, maître d'œuvre ou entreprises). Cette filière rencontre des défis qui lui sont propres.

La spécificité de la filière du génie végétal est de faire cohabiter deux champs habituellement cloisonnés : l'ingénierie et l'écologie (Doré et al. 2014). Il découle de cela deux enjeux pour la filière : faire travailler ensemble des professionnels ayant des pratiques et des savoirs professionnels différents, et s'appuyer sur des praticiens avec un profil hybride, c'est-à-dire qui ont de multiples compétences et champs d'expertise (Ewing and Fridley 2017). Or, ces aspects liés à l'organisation de la filière peuvent être déterminants. Ainsi, Sher et al. (2020) ont comparé le rôle respectif des facteurs biologiques liés à la végétation et des facteurs humains dans le succès des opérations de restauration des berges. Les résultats montrent que les succès sont associés à un nombre de collaborateurs élevés, à un grand nombre de sources d'informations et de la priorité donnée aux objectifs visant la végétation, tandis que les échecs sont associés au fait que les gestionnaires cumulent plusieurs rôles ou qu'ils ont un niveau de diplômes élevé. Dans la sphère scientifique, plusieurs défis se posent. Au-delà des fronts de connaissances (identifiés dans la partie 1), il s'agit pour les scientifiques de trouver leur place au sein de la communauté scientifique de l'ingénierie, et de gagner en légitimité. Mitsch (2012) témoigne d'un accueil prudent de ces scientifiques au sein du système universitaire et du monde professionnel). Un autre défi concerne le lien entre le monde académique et celui des praticiens, c'est-à-dire à la fois le transfert mutuel des connaissances, et la formulation de nouvelles questions de recherche émanant tant des laboratoires de recherche que du terrain. Rey et al. (2019) identifient plusieurs pistes pour stimuler ces interactions : encourager une approche pluridisciplinaire, éditer des guides et des outils pour la conception d'ouvrages, mettre en place des protocoles de suivi des ouvrages, mieux analyser les besoins émanant des praticiens sur le terrain (par exemple, sur la sélection des espèces, ou sur l'identification d'indicateurs permettant de fixer des seuils pour l'installation des ouvrages) (Rey et al. 2019).

Enfin, peut-on parler d'une vision commune partagée par les acteurs du génie végétal ? Doré et al. (2014) ont identifié trois types d'incertitudes, face auxquelles les acteurs ont des positions contrastées : les incertitudes sémantiques, qui résultent d'une tension entre deux champs traditionnellement opposés (l'ingénierie et l'écologie), qui va soulever la question du degré de naturalité visé ; les incertitudes épistémologiques, qui révèlent des débats sur les rapports de la science et à l'action (paradigme

conversationniste ou utilitariste) ; et les incertitudes éthiques (avec deux pôles, schématiquement, la non-intervention et le contrôle des écosystèmes). Selon les auteurs, en raison de ces débats et de ces incertitudes, il serait difficile de parler d'une communauté de valeurs, mais pour autant, cela n'entrave pas le déroulé des projets et la collaboration entre les praticiens.

Finalement, on voit que le génie végétal est un champ d'interface, entre l'écologie et l'ingénierie, et entre scientifiques et praticiens. Cette interface peut être source de tensions comme d'émulations, et peut expliquer tant des réticences ou des attrait pour les techniques de génie végétal.

Quelles sont les compétences propres aux acteurs du génie végétal ?

Le recours au génie végétal nécessite de nouvelles compétences pour les acteurs de la filière. Ces compétences sont à comprendre au sens large, c'est-à-dire non seulement des connaissances théoriques ou liées à l'expérience (savoirs), des connaissances pratiques (savoirs faire), mais aussi des qualités éthique et personnelle (savoirs être). On peut s'interroger sur la facilité pour les praticiens à acquérir ces compétences, à la fois à l'échelle individuelle et à l'échelle de la filière.

Un premier type de professionnel du génie végétal s'appuiera sur sa formation initiale. Le génie végétal nécessite que les praticiens maîtrisent des connaissances multiples et variées : en écologie des plantes et en botanique, en hydrologie et en hydraulique (modélisation), en pédologie, en géotechnique et en géomorphologie (stabilisation des sols et contrôle de l'érosion), mais aussi en ingénierie (Ewing and Fridley 2017). Ce besoin de combiner plusieurs champs de compétence fait naître deux logiques parallèles : l'hybridation vers des profils polyvalents d'une part et la micro-spécialisation de niches d'autre part, ce qui peut aboutir à une mise en compétition quant à la légitimité de leurs pratiques et parcours disciplinaires (Gralepois and Guevara 2015) ou au contraire, à de la coopération (comme cela a été le cas avec le travail interdisciplinaire mené dans le projet génie-eaux).

Le génie écologique, tel qu'il a été défini par Odum, nécessite d'avoir une bonne connaissance en écologie, mais aussi une ouverture aux sciences humaines et sociales afin d'avoir la capacité de redéfinir la problématique proposée par l'ingénierie, pour y intégrer des enjeux moraux, politiques ou sociaux. Or, une étude menée à l'échelle internationale montre une réduction des cours en sciences humaines et sociales dans les cursus de génie écologique (Diemont et al. 2010). Ces études américaines identifient ainsi des freins au recours à l'ingénierie écologique, soit parce que les étudiants issus des cursus d'ingénierie sont peu familiarisés aux problématiques du génie écologique, ce qui peut encourager l'inertie et la perpétuation des usages de techniques lourdes, soit parce que la vision du génie écologique diffusée auprès des étudiants est étroite, et n'intègre que trop peu les enjeux politiques ou sociaux.

Les professionnels se forment aussi en cours de carrière, par le biais de leur propre expérience ou de la formation continue. Il faut souligner le rôle important des associations (comme l'ARRAA, Association Rivière Rhône Alpes Auvergne, en France), les centres de formation initiale ou continue (Licence pro, CFPF, CFPPA, Master Sciences de l'Eau) et des bureaux d'étude (comme BIOTEC, y compris en formation initiale) pour dispenser des formations et permettre un retour d'expérience entre les professionnels. A notre connaissance, le rôle de ces organismes dans la diffusion des techniques de génie végétal n'est pas documenté dans la littérature scientifique.

Dans un milieu professionnel où l'ingénierie traditionnelle domine, il est important de se demander qui détient les compétences liées au génie végétal ? Dans certains cas, des praticiens ou des entreprises seront spécialisées dans certaines techniques, tandis que d'autres praticiens ou certaines entreprises généralistes mobiliseront d'autres techniques. Dans ce dernier cas, il est important que la sensibilité et les connaissances soient bien développées, afin que génie écologique ne rime pas avec verdissement et simplement visée esthétique (Clark and Howell 1992).

Enfin, au-delà des savoirs et des savoirs faire, le génie végétal va faire appel aux savoirs être, et plus spécifiquement aux valeurs, notamment environnementales, portées par les praticiens dans l'exercice de leur travail. La place des préoccupations environnementales chez les ingénieurs a fait l'objet de plusieurs études. Une étude quantitative, menée auprès de 27 000 diplômés ingénieurs français, montre une attente très forte de la société vis-à-vis des ingénieurs en ce qui concerne les problèmes de dégradation de l'environnement. Perçus tantôt comme l'origine du problème, tantôt comme des vecteurs de solutions, les ingénieurs ne semblent pas pouvoir se dérober collectivement à cette question. Les résultats montrent que les ingénieurs affichent un optimisme technique, c'est-à-dire une confiance dans la technique pour limiter la dégradation de l'environnement liée aux activités humaines (Didier and Talin 2015). Une autre étude montre qu'à la différence d'autres professions comme les médecins, les avocats ou les juges, l'invocation d'un « bien commun » fondant le travail des ingénieurs n'est pas forcément clair même si l'objectif est de fournir un accès fondamental aux droits humains (accès à l'eau, à la nourriture, à l'habitat, etc.). Les ingénieurs voient leur rôle principalement comme un rôle instrumental, c'est-à-dire relativement détaché des questions éthiques, et sont fortement influencés par la relation avec leur employeur (privé, public) (El-Zein and Hedemann 2016). Les auteurs appellent à un travail réflexif sur l'ethos des ingénieurs, et un meilleur lien de cette communauté professionnelle avec les défis sociaux et politiques.

Le génie végétal va donc redessiner le champ des valeurs, en remettant au cœur de la pratique des praticiens les enjeux environnementaux. Dans un contexte de montée en puissance des préoccupations environnementales, on peut supposer que le recours aux techniques de génie végétal réduit les dissonances cognitives chez des praticiens qui se définissent comme sensibles aux problématiques environnementales. La question de l'optimisme technique mériterait d'être approfondie : si cet optimisme est confirmé, est-ce que le génie végétal est perçu comme un archétype d'une réponse technique efficace pour résoudre un défi environnemental ? Ou au contraire, comme l'expression d'une limite de la technique (comprise ici comme le génie civil) pour répondre aux enjeux environnementaux, et la recherche d'une alternative par le biais des solutions fondées sur la nature ?

Les techniques de génie végétal : un nouveau paradigme de gestion ?

En amont du choix de la technique pour la protection des berges, il y a un paradigme de gestion, c'est-à-dire une certaine façon de définir le problème, de poser un diagnostic et de proposer une façon d'agir. Les paradigmes, tels que définis par Kuhn (1962), ont une force stratégique, puisqu'ils permettent de faire le lien entre un problème donné et des enjeux épistémologiques, c'est-à-dire des enjeux liés à nos connaissances, mais aussi à notre perception des risques ou à nos objectifs (Halbe et al. 2015). Le paradigme d'intervention fait donc appel non seulement aux connaissances et aux pratiques des praticiens, mais aussi à leurs valeurs morales, à leurs croyances, à la définition qu'ils donnent à leur mission et au « bien commun ». Les pratiques sont directement dépendantes du paradigme de gestion, puisque ce dernier va permettre,

parfois de façon inconsciente, de distinguer ce qui n'a pas vocation à changer (les constantes), et ce sur quoi on peut agir (le problème) (El-Zein and Hedemann 2016).

Ainsi, la protection des berges contre l'érosion sera considérée différemment selon que l'on considère que l'érosion est en elle-même un problème qu'il faut contrôler afin de protéger les enjeux humains, ou si l'on considère que l'érosion et la mobilité des berges de cours d'eau est un phénomène normal voire souhaitable et que le problème réside plutôt dans l'implantation d'enjeux humains à proximité directe du lit du fleuve. Il est donc important de savoir dans quel paradigme de gestion se positionnent les praticiens car cela va déterminer grandement leurs choix techniques.

Dans la gestion de l'environnement en général, plusieurs paradigmes de gestion coexistent. Halbe et al. (2015) en mettent en évidence cinq différents : le paradigme « prédire et contrôler », qui vise à réduire l'incertitude et à augmenter la prévisibilité des réponses apportées aux problèmes ; le paradigme adaptatif, basé sur l'expérimentation, l'itération, la résilience et où l'incertitude est considérée comme partie prenante du problème ; le paradigme économique, basé sur la recherche de la viabilité économique ; le paradigme traditionnel et le paradigme participatif. Historiquement, le paradigme « prédire et contrôler » est dominant en ingénierie, bien que les paradigmes adaptatif et participatif soient en plein essor, sous l'effet de la montée des enjeux liés à la durabilité. L'approche de « résolution de problème », inhérente à la démarche « prédire et contrôler » a montré ses limites, puisqu'elle circonscrit l'enjeu à un problème précis, empêche les ingénieurs de reformuler le problème et de prendre en compte ses composantes environnementales, économiques et sociales (El-Zein and Hedemann 2016).

Dans la gestion des cours d'eau, et en particulier dans ses aspects réglementaires, on note le passage d'un paradigme techniciste (où le cours d'eau est considéré comme une ressource, et l'inondation comme un risque voué à être supprimé par des aménagements structurels) à un paradigme environnementaliste (où le cours d'eau est considéré comme un milieu naturel, et l'inondation comme un risque devant être régulé à une échelle plus large, notamment à travers l'usage des sols) (Rode 2010a).

Dans cette optique, le passage du génie civil au génie végétal semblerait correspondre au passage du paradigme « prédire et contrôler » au paradigme adaptatif. Le paradigme adaptatif s'inscrit dans une approche heuristique, qui considère les projets de restauration comme des processus itératifs, dans lesquels les échecs sont considérés comme une opportunité d'apprentissage, à condition de mener des opérations de suivi et d'évaluation du projet et d'en communiquer les résultats (Johnson et al. 2002). Des retours d'expérience autour du génie végétal ont déjà été réalisés, dans le cadre par exemple des projets Génie'Alp (Bonin et al. 2013) du travail de Peeters et al (2018) sur 19 ouvrages, de l'analyse de 223 ouvrages défailants (Leblois et al (2022) ou d'un suivi mené dans trois sites de restauration de cours d'eau dans le Maryland, où ont été comparées différentes techniques de lutte contre l'érosion (fibre de coco, mottes racinaires, enrochements, etc.) (Johnson et al. 2002).

Si l'on questionne les paradigmes de l'action, deux questions se posent. Tout d'abord, est-ce que l'érosion des berges en milieu urbain est un problème d'ordre technique, devant être résolu par des techniques d'ingénierie, comme dans le paradigme « prédire et contrôler » ou est-ce un problème plus complexe, impliquant l'ensemble de la société, qui devra être résolu dans le cadre des paradigmes adaptatifs et/ ou participatifs ? En effet, le paradigme adaptatif est plus adapté pour les « *messy problem situation* », c'est-à-dire des problèmes complexes, où les incertitudes sont élevées et où les enjeux sociaux sont forts, qui rendent inadaptée la posture de l'expert

prenant seul une décision (Halbe et al. 2015). Par ailleurs, à quel point tolère-t-on l'incertitude dans la gestion de l'érosion des berges ? Le paradigme « prédire et contrôler », auquel se réfère le génie civil, cherche à réduire cette incertitude, tandis que le paradigme adaptatif tolère un degré d'incertitudes plus fort, les processus itératifs permettant justement d'adapter la réponse au cours du processus (Halbe et al. 2015).

Enfin, il est intéressant de se demander si ces paradigmes de gestion sont partagés au sein des institutions, ou s'ils sont propres à chaque praticien. En effet, au sein d'une même institution et parfois même chez un même individu, plusieurs paradigmes coexistent. Ainsi, au sein des Agences de l'Eau, les agents peuvent mobiliser trois types de répertoires : le répertoire équipementier (où l'eau est considérée comme un bien public, et où l'Agence de l'Eau agit comme une caisse d'épargne chargée de renouveler ce bien et de construire les équipements nécessaires pour le rendre accessible), le répertoire de coordination (où l'eau est un objet de conflits pour lequel l'Agence a un rôle de médiation), et le répertoire de l'écologie, qui émerge depuis les années 1990 (où l'eau est un écosystème que l'Agence doit en priorité protéger) (Bouleau 2015). Cette question du paradigme de gestion dépend aussi des relations entre l'institution et ses agents. Milly (2012) analyse l'effet, sur les agents, du remplacement du Ministère de l'Équipement par le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables dès 2007. Il montre une tension entre les différents agents : (i) les « bétonneurs », porteurs du champ de l'équipement du Ministère tel qu'il était conçu dans les années 1970 (barrages, stations d'épuration, réseaux) et qui se sentent délégitimés ; (ii) les spécialistes légitimés, dont les compétences spécifiques (urbanisme, énergie, habitat...) sont aujourd'hui mieux reconnues ; (iii) les hiérarchiques, en charge du management et du pilotage du projet, qui sont soumis au principe de loyauté ; (iv) les néo-professionnels, qui n'ont pas connu l'ancien Ministère et qui défendent le virage vers le développement durable. L'autonomie des agents est aussi une question importante. Ainsi, la DCE a renforcé le répertoire écologique en instituant l'obligation d'atteindre le bon état des masses d'eau. Cela confère une responsabilité aux agents, qui sont désormais responsables de la qualité des milieux sans pouvoir toutefois décider des indicateurs de la qualité de l'eau. Les agents se sentent donc dessaisis de leur expertise (Bouleau 2015).

En ce qui concerne l'érosion des berges en territoire urbain, on peut donc se demander si les paradigmes d'intervention sont partagés au sein des organismes, ou s'ils sont plutôt portés par des visions individuelles. De là peuvent découler des tensions entre les praticiens, ou des tensions entre les agents et leur institution. On peut aussi s'interroger sur le degré d'autonomie des agents pour définir leur stratégie d'intervention.

Hypothèses de recherche liées à la profession

A la suite de cette revue de la littérature, plusieurs hypothèses de recherche peuvent être esquissées.

- 1) Le génie végétal est né de l'interface entre deux mondes, l'écologie et l'ingénierie. Il en résulte des professionnels au profil hybride, combinant les deux approches, mais aussi la cohabitation de professionnels aux savoirs professionnels et aux valeurs contrastées.

Hypothèse : Cette interface est source d'innovation et de créativité technique, mais elle peut aussi générer des tensions dans les pratiques individuelles ou à l'échelle de la filière.

- 2) Les techniques de génie végétal nécessitent des compétences spécifiques, en particulier une polyvalence et une forte adaptabilité. Le parcours de formation des praticiens, et leur discipline d'origine, semblent déterminants.

Hypothèses : Le rôle de la formation continue et de l'empirisme est central dans l'apprentissage des techniques de génie végétal.

Les professionnels issus de l'ingénierie traditionnelle sont peu exposés dans leur cursus aux méthodes alternatives de génie végétal, ce qui entretient l'inertie des techniques dures.

- 3) L'éthique des praticiens oriente leurs pratiques, en particulier en ce qui concerne leur positionnement vis-à-vis des problématiques environnementales et leur relation à la technique.

Hypothèses : Le génie végétal peut s'inscrire dans le cadre d'un optimisme technique ou, à l'inverse, dans le cadre d'un scepticisme vis-à-vis de l'approche techniciste, en favorisant une approche orientée vers les solutions fondées sur la nature.

Le génie végétal replace au cœur des pratiques des aménageurs les préoccupations environnementales, ce qui peut constituer un levier, car cela réduit les dissonances cognitives des aménageurs qui se définissent comme sensibles aux préoccupations environnementales.

- 4) Les pratiques de gestion traditionnelles s'inscrivent dans un paradigme d'intervention. Les préoccupations autour de la durabilité ont renforcé le paradigme adaptatif, au détriment du paradigme « prédire et contrôler ».

Hypothèse : La mise en place des techniques de génie végétal implique un véritable changement de paradigme et une nouvelle façon d'aborder le problème de l'érosion des berges, ce qui peut expliquer des réticences vis-à-vis de ces techniques.

2.5. Les facteurs d'influence liés au contexte réglementaire et institutionnel : quelles sont les incitations et les blocages pour le recours au génie végétal ?

Les choix techniques des aménageurs sont influencés par le contexte juridique, réglementaire et financier, qui peut inciter ou freiner le recours au génie végétal. Par ailleurs, les interactions entre ces acteurs (coopération, conflit, concurrence...) vont aussi interférer dans ce choix. Finalement, il s'agit de replacer les choix techniques des individus ou des équipes de gestion dans un contexte institutionnel et de gouvernance plus large.

Le contexte juridique et réglementaire : la GEMAPI, une nouvelle approche de la protection des berges favorable au génie végétal ?

Depuis le 1^{er} janvier 2018, la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations (GEMAPI) est une compétence confiée aux intercommunalités (métropoles, communautés urbaines, communautés d'agglomération, communautés de communes) par les lois de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (MAPTAM) du 27 janvier 2014 et du 7 août 2015. Les outils à disposition des gestionnaires pour la mise en place de la GEMAPI sont principalement des outils déjà existants : schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et schéma d'aménagement et de gestion de l'eau (SAGE), contrats de milieux, documents de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme (SCOT, PLU...), plans de gestion du risque inondation, plans de prévention des risques d'inondation, etc.

La GEMAPI impacte à la fois la stratégie en matière de gestion des cours d'eau et la responsabilité des structures porteuses.

La compétence GEMAPI concentre deux compétences autrefois morcelées (la GEMA et la PI), et permet d'envisager conjointement le fonctionnement écologique des cours d'eau et une approche axée sur l'urbanisme et l'aménagement du territoire (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse 2020 ; Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2020). A ce titre, la réforme GEMAPI s'inscrit dans la continuité des précédentes politiques qui encourageaient, dès 1992, l'évolution vers une gestion intégrée (Rey et al. 2018). Cette dernière est caractérisée par une gestion à l'échelle du bassin versant, ainsi que par des normes en matière de gestion de l'eau (participation et retrait de l'Etat comme maîtres d'œuvre notamment) (Trottier et al. 2012). La GEMAPI témoigne aussi de la montée en puissance des enjeux environnementaux dans la gestion de l'eau. Ainsi, l'analyse rétrospective de la réglementation sur l'eau montre qu'à partir des SDAGE de 1996 et des 7^{èmes} programmes (1997-2001), l'approche selon laquelle l'eau est envisagée avant tout comme un milieu aquatique se développe : c'est à cette époque que les concepts comme l'espace de mobilité sont intégrés dans les SDAGE (Nicolas et al. 2014).

Le transfert de compétences induit également un transfert de responsabilité. En effet, à partir de 2018, les Établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) à fiscalité propre sont les maîtres d'ouvrage désignés par la loi pour les travaux de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations. Cette compétence peut être transférée à des Établissements publics territoriaux de bassin (EPTB) ou des Établissements publics d'aménagement et de gestion de l'eau (EPAGE) (Agence de l'eau

Rhône Méditerranée Corse 2020 ; Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2020). Selon le code de l'environnement, la responsabilité vis-à-vis des inondations et des submersions est elle aussi transférée à la collectivité compétente dès la mise à disposition des ouvrages (Heitz et al. 2018). A noter également, le désengagement des conseils départementaux et régionaux, lié à la fois à l'exercice exclusif de la compétence par les communes tel que prévu par la loi MAPTAM et à la suppression, par la loi NOTRe, de la Clause générale de compétences (Heitz et al. 2018).

L'approche GEMAPI semble favorable aux techniques de génie végétal, puisque ces dernières apportent une réponse à la fois aux enjeux de la GEMA et de la PI. Ainsi, l'implantation de la végétation en bordure ou dans le lit du cours d'eau peut contribuer à prévenir les inondations en ralentissant la vitesse de l'eau et permet également de mieux intégrer les ouvrages de protection contre les inondations dans leur environnement (Rey et al. 2018).

Concrètement, selon les textes en vigueur (articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement, rubrique 3.1.4.0.), les opérations de consolidation ou de protection des berges, à l'exclusion des canaux artificiels, par « des techniques végétales vivantes » ne sont pas soumises à autorisation ou à déclaration. A l'inverse, les opérations impliquant des techniques mixtes ou de génie civil sont soumises à déclaration pour une longueur de 20 à 200 m et à autorisation pour une longueur supérieure à 200 m.

Cependant, il faut s'intéresser à la mise en place de cette réglementation sur le terrain et à la perception qu'en ont les gestionnaires. Ainsi, les opérations de restauration écologique sont *a priori* encouragées par la réglementation en place (DCE et loi sur l'eau et les milieux aquatiques), qui fixe l'objectif d'atteindre un bon état écologique avec une obligation de résultats. Toutefois, la mise en place de ces opérations paraît complexifiée par les démarches juridiques et administratives, puisqu'elles sont traitées de la même façon que n'importe quelle autre opération susceptible d'avoir des impacts négatifs sur les milieux ; les gestionnaires ont donc tendance à considérer la réglementation comme un obstacle pour la mise en place des opérations de restauration (Gallet et al. 2017).

On pourrait ainsi s'interroger sur le ressenti des gestionnaires concernant la réglementation en place sur les techniques de génie végétal.

Des modalités de financement incitatives ?

La réglementation en vigueur prévoit que le coût de l'entretien des berges soit à la charge des propriétaires des berges de cours d'eau. Toutefois, les opérations menées à l'échelle du cours d'eau ou présentant un intérêt général sont prises en charge par les EPCI. Afin de faire face à ces dépenses, la réforme MAPTAM prévoit une « taxe GEMAPI », perçue par les EPCI, dans la limite de 40 euros par habitant. Cette mesure montre toutefois ses limites : elle est conçue pour être acceptée à la fois par les élus et par les contribuables, mais ne suffirait pas à couvrir les frais de la compétence GEMAPI dans son intégralité, et elle risque d'instaurer de fortes disparités entre les territoires (Heitz et al. 2018 ; Barone and Dedieu 2015).

Les opérations d'entretien des berges sont donc fortement dépendantes de subventions, en particulier de celles octroyées par les Agences de l'Eau. L'analyse historique des programmes de financement des Agences de l'Eau montre une évolution progressive des dépenses répondant à des enjeux liés à l'aménagement du territoire vers des enjeux liés à la préservation des milieux aquatiques. En effet, les agences financières de bassin, créées par la loi sur l'eau de 1964, ont financé dans un premier

temps des programmes axés sur les usages (assainissement, alimentation en eau, baignade). Dans les années 1980, les liens entre qualité du milieu et valeur d'usage sont mieux compris et on voit pour la première fois une déconnexion entre les redevances et leur utilisation, ce qui donne aux Agences la possibilité de financer des actions qui ne sont pas en lien direct avec l'assiette principale de leur collecte, notamment la lutte contre l'érosion. A partir des SDAGE de 1996, la préservation des milieux éclipse en partie les objectifs d'aménagement. Cela passe notamment par la préservation et le maintien des fonctions des zones humides, des zones d'expansion de crue, ou l'utilisation de zones tampon (Nicolas et al. 2014). Cette évolution se retrouve plus généralement dans les politiques publiques, avec par exemple l'évolution du Ministère de l'Équipement, créé en 1966, en Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables en 2007 ; le déclin de la priorité politique à l'équipement étant perceptible dès les années 1980 (Milly 2012).

Par ailleurs, les modalités d'octroi des aides ont évolué. En effet, depuis la DCE (2000), la logique d'obligation de résultats s'impose. On assiste à une remise en cause du fonctionnement « en guichet » des Agences de l'Eau selon lequel les aides ne sont pas conditionnées à la performance écologique. S'impose alors, dans la lignée du « new public management », la conditionnalité de la dépense publique à des résultats (Bouleau 2015).

Le rôle de l'Agence de l'Eau ne se limite pas à financer des projets de restauration dont les contours sont ficelés. Les orientations stratégiques de l'Agence de l'Eau amènent aussi à reformuler ou à compléter les objectifs des maîtres d'ouvrages. De manière générale, le financement peut aller jusqu'à 80% des projets de restauration des milieux aquatiques, si ce projet répond aux objectifs de la DCE (Nicolas et al. 2014). Par ailleurs, l'Agence de l'Eau apporte également un soutien technique aux collectivités.

A ce titre, les opérations mobilisant le génie végétal peuvent être à double tranchant. Les techniques de génie végétal contribuent certes à maintenir, sinon à restaurer le fonctionnement écologique des cours d'eau. Toutefois, les techniques de génie végétal visent aussi à limiter l'érosion des berges et donc leur mobilité, ce qui est une entrave au fonctionnement naturel du cours d'eau. La mobilisation de ces techniques peut donc à la fois favoriser et entraver le financement de projets de restauration.

Gouvernance et jeux d'acteurs

De nombreux acteurs sont impliqués dans la vie d'un ouvrage de génie végétal (Figure 2). Ces acteurs jouent différents rôles : la maîtrise foncière (les propriétaires riverains des cours d'eau et les collectivités territoriales), la gestion des cours d'eau (intercommunalités, syndicats de rivière, etc.), l'innovation, la conception, la construction et l'entretien des ouvrages (centres de recherche, bureaux d'études, bureaux techniques, entreprises de travaux, fournisseurs de matériaux, etc.), le financement de projet (Agence de l'Eau, Etat, Département, EPCI), l'animation de filière (associations, OFB, *via* le centre de ressource sur le génie écologique) et enfin, l'encadrement réglementaire (DDT, OFB, garde-pêche).

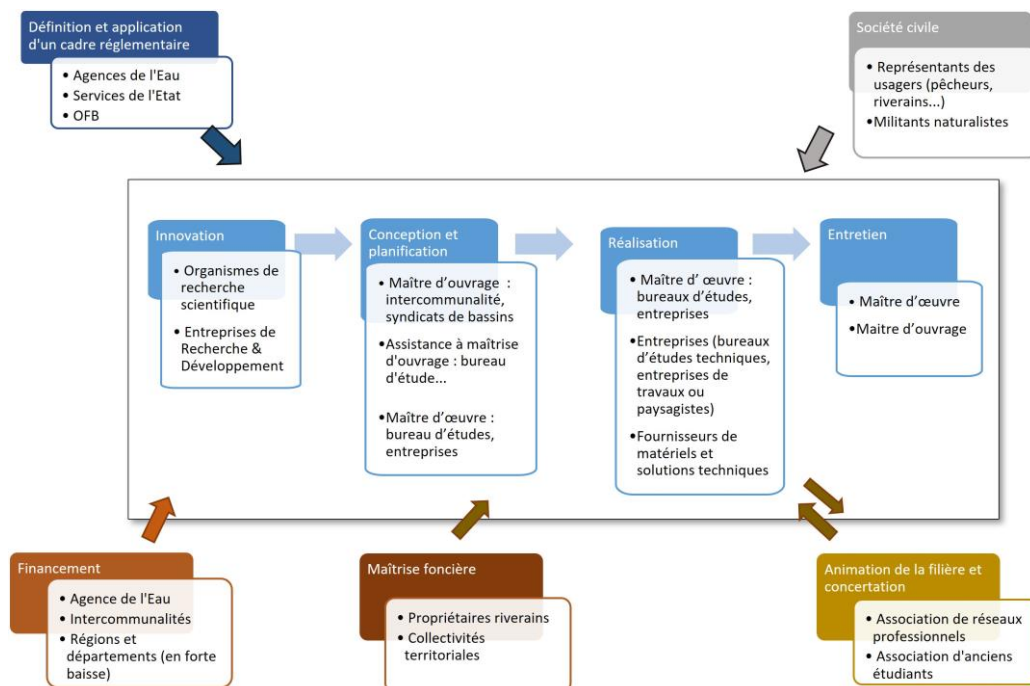


Figure 2 : Les acteurs impliqués dans la gestion des ouvrages de protection des berges

Plutôt que de détailler le rôle précis de chacun de ces acteurs, nous nous intéressons ici à trois types d'interactions entre acteurs : les interactions autour de la conception de l'ouvrage, qui impliquent les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre et les élus ; les interactions liées au foncier, qui impliquent les riverains, les élus et les gestionnaires ; et enfin les interactions liées à la responsabilité, qui impliquent les élus, les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrage.

- **Interactions autour de la conception des ouvrages**

Le choix d'une technique de protection des berges incombe au maître d'œuvre, en discussion avec les maîtres d'ouvrage.

Lors de la rédaction du cahier des charges, deux types de difficultés peuvent entraver le recours au génie végétal. D'une part, la rédaction du cahier des charges suppose une bonne connaissance des techniques visées. Or les maîtres d'œuvre ne maîtrisent pas forcément les techniques de génie végétal, ce qui peut entraîner des difficultés à élaborer des cahiers des charges pertinents. Certains cahiers des charges, peu précis ou peu pertinents, peuvent limiter l'accès des entreprises spécialisées en génie végétal dans les marchés publics, ou à l'inverse, permettre la sélection d'entreprises n'ayant pas de compétence spécifique sur le génie végétal (Nicolas et al. 2014). D'autre part, il faut noter que les maîtres d'œuvre ou les Assistants à Maîtrise d'ouvrage se rémunèrent proportionnellement au montant des travaux, ce qui pousse parfois à exclure les techniques les moins coûteuses, dont celles du génie végétal (Nicolas et al. 2014).

Les relations entre les différents métiers peuvent aussi intervenir dans les choix techniques. Une étude consacrée à l'aménagement des zones inondables montre les relations qui existent entre trois professions : l'hydraulicien, l'architecte et le paysagiste. L'étude montre une forte concurrence entre ces trois professions, qui s'explique par des logiques corporatistes, mais également par la nébuleuse des

professionnels qui interviennent dans les projets et qui aboutit à une concurrence autour de la légitimité des pratiques et des parcours disciplinaires. Cela conduit à deux tendances : une hyperspécialisation ou une hybridation de ses compétences, y compris pour les métiers protégés par un diplôme (Gralepois and Guevara 2015).

Ainsi, dans le cas du génie végétal, on pourra s'interroger sur les stratégies des professionnels pour asseoir leur légitimité (spécialisation ou hybridation des compétences), ainsi que sur les concurrences entre les différents métiers, en particulier à l'interface entre écologie, paysagisme et ingénierie.

Au-delà de ce duo entre maître d'œuvre et maître d'ouvrage, quel est le rôle des élus et à quel point prennent-ils part à ces discussions techniques dans la conception des ouvrages ? Une étude sur les élus de l'eau (exerçant au minimum une fonction dans une petite structure de gestion), montre que ces élus ont des connaissances et des compétences sur l'eau du fait de leur formation, de leur profession ou de leur appartenance associative (Barone et al. 2017).

On peut donc s'attendre à ce que ces élus soient impliqués dans les discussions techniques et qu'ils se positionnent en tant qu'experts dans ces discussions. Toutefois, les élus vont mobiliser des critères techniques, mais aussi politiques. Ainsi, les élus sont parfois attachés au caractère visible des ouvrages, qui est une trace tangible des montants investis (Rey et al. 2015). Or, les ouvrages de génie végétal vont se fondre dans le paysage au bout de quelques années. Cela peut expliquer une certaine réticence de la part des élus.

- **Interactions liées au foncier**

En France, on estime que 90% des cours d'eau sont non domaniaux, c'est-à-dire qu'ils sont régis par le système de propriété privée (Nicolas et al. 2014). Les propriétaires riverains sont propriétaires des berges et du lit jusqu'à la moitié du cours d'eau. Ils ont la responsabilité de l'entretien des berges, mais les collectivités peuvent également les prendre en charge, sous réserve d'un accord avec le propriétaire et la collectivité, d'une déclaration d'utilité publique (pouvant conduire à l'expropriation) ou après une mise en demeure (Goliard 2011).

Les propriétaires riverains sont donc des acteurs essentiels dans la gestion des cours d'eau, et les relations qu'ils entretiennent avec les gestionnaires sont déterminantes. Les propriétaires riverains peuvent également s'impliquer dans la phase de conception du projet, comme ce fut le cas dans le projet de restauration de l'Yzeron, où une association de riverains s'est constituée pour s'opposer au projet (Flaminio et al. 2015).

La maîtrise foncière des berges du cours d'eau (qui peut impliquer une acquisition si ce n'est pas déjà le cas au début du projet) peut être une stratégie suivie par les EPCI, comme en témoignent plusieurs retours d'expérience (Nicolas et al. 2014 ; Warot et al. 2020). Toutefois, cette démarche semble coûteuse et complexe.

Les propriétaires riverains sont un acteur clé de la gestion des berges. La relation qu'ils entretiennent avec les gestionnaires sera déterminante pour la mise en place des projets et la perception qu'ils ont des techniques de génie végétal va donc jouer un grand rôle dans leur diffusion.

- **Interactions autour de la responsabilité**

La responsabilité de la gestion des ouvrages et de la prévention du risque inondation incombe aux élus des EPCI. Il faut distinguer d'une part la responsabilité

pour faute simple ou pour faute lourde et, d'autre part, la responsabilité liée à l'information et à la signalisation du risque, ou encore celle en termes d'urbanisme. Ainsi, le maire peut être impliqué pour faute lourde s'il est prouvé qu'il y a une défaillance dans la signalisation et l'information d'un risque connu de tous, ou s'il est prouvé que la commune a montré une défaillance dans les travaux destinés à réduire les effets du risque. Le préfet doit agir en cas de défaillance du maire, sa responsabilité pouvant être engagée dans le cas contraire. Concernant les compétences en urbanisme, un unique régime de responsabilité s'applique, la faute simple, si un permis de construire a été accordé en zone rouge ou n'a pas été assorti de recommandation nécessaire. Mais le préfet et la victime peuvent également être tenus pour responsables (Douvinet et al. 2011).

Pour les élus, la gestion du risque les met en position délicate : elle constitue une contrainte en termes d'urbanisme, elle engage leur responsabilité vis-à-vis de la sécurité des biens et des personnes et représente une obligation réglementaire à laquelle ils ne peuvent se dérober. Deux tendances contradictoires s'affrontent, entre le souhait de renforcer le développement économique et l'injonction d'adapter les projets d'aménagement aux zones inondables. Les élus subissent la pression par le bas des administrés (habitants ou acteurs économiques qui souhaitent développer leur activité) et par le haut des instances institutionnelles (Douvinet et al. 2011; Gralépois and Guevara 2015). Finalement, la négociation joue un grand rôle, décelable à travers la multiplication des zonages, comme les zones violettes, constructibles alors que l'aléa est moyen.

Aux yeux des élus, les techniques de génie végétal apparaissent plus risquées que les techniques dures, dans la mesure où leurs résultats sont moins prévisibles. Ils sont donc plus réticents à avoir recours à ces techniques (Nicolas et al. 2014).

Hypothèses de recherche liées au contexte réglementaire et institutionnel

A la suite de cette revue de la littérature, plusieurs hypothèses de recherche peuvent être esquissées.

- 1) Dans les contextes où la restauration de la mobilité n'est pas possible compte tenu des enjeux en présence, les techniques de génie végétal sont davantage en phase avec les doctrines actuelles en vigueur dans la gestion de l'eau, en particulier la GEMAPI et la gestion intégrée de l'eau, que ne le sont les techniques de génie civil. La réglementation en vigueur est favorable au génie végétal.

Hypothèse : La réglementation en vigueur peut avoir un effet levier pour le recours au génie végétal. Toutefois, l'application de la réglementation et la perception qu'en ont les gestionnaires peuvent différer sensiblement.

- 2) Le coût de l'entretien des berges est pris en charge par les EPCI, et dans une moindre mesure par les propriétaires riverains. Malgré des capacités de financement propres avec la « taxe GEMAPI », les EPCI dépendent largement des subventions, en particulier celles de l'Agence de l'Eau.

Hypothèse : La mention des techniques de génie végétal dans les projets peut à la fois faciliter le financement, étant donné l'impact positif de ces techniques sur le fonctionnement du cours d'eau comparé au génie civil, et l'entraver, car ces techniques s'inscrivent tout de même dans une logique de limiter la mobilité des berges.

- 3) Le choix d'une technique de protection des berges dépend des jeux d'acteurs lors de la conception de l'ouvrage, notamment entre maître d'ouvrage et maître d'œuvre.

Hypothèse : La rédaction du cahier des charges est un moment déterminant, qui implique une négociation, en particulier entre maître d'œuvre et maître d'ouvrage.

Hypothèse : Les relations entre les différents métiers peuvent influencer le choix des techniques.

Hypothèse : Les élus prennent part aux discussions techniques et s'appuient sur des critères parfois plus politiques que techniques.

- 4) Les propriétaires riverains sont des acteurs incontournables dans la protection des berges et les relations qu'ils entretiennent avec les gestionnaires sont déterminantes.

Hypothèse : La maîtrise foncière peut être une stratégie des collectivités pour contourner les problèmes liés au foncier.

Hypothèse : Les propriétaires riverains peuvent agir directement soit en mettant en place des ouvrages de protection à l'échelle de leur parcelle, ce qui peut contrecarrer la stratégie des gestionnaires à l'échelle des cours d'eau, soit en prenant part à la conception du projet. La perception qu'ils ont des techniques de génie végétal sera déterminante.

- 5) La responsabilité de la gestion des ouvrages et de la prévention du risque inondation incombe aux élus. La réduction du risque sera donc leur priorité.

Hypothèses : Les techniques de génie végétal, dont les résultats semblent moins prévisibles, apparaissent plus risquées aux yeux des élus, qui peuvent afficher une certaine réticence.

PARTIE 2 - CARACTERISATION DES REPRESENTATIONS DES PROFESSIONNELS DE LA FILIERE : LA TRANSITION VERS LE GENIE VEGETAL, UN CHANGEMENT PUREMENT TECHNIQUE OU UN CHANGEMENT DE PARADIGME ?

Le passage du génie civil au génie végétal n'est peut-être pas un simple changement technique, mais peut reposer sur un changement en profondeur des pratiques professionnelles, tant au niveau individuel que collectif. Cette hypothèse fait référence à ce qui a été théorisé - dans le domaine de l'innovation scientifique - comme un changement de paradigme (Kuhn, 1962). Cette théorie soutient que la science ne progresse pas par une accumulation linéaire de connaissances, mais par des révolutions périodiques, au cours desquelles les concepts de base et les pratiques expérimentales d'une discipline scientifique peuvent changer brusquement. Plusieurs études ont déjà utilisé ce concept de changement de paradigme pour discuter des changements récents dans la gestion des rivières urbaines. Par exemple, Rode (2010a) a analysé l'évolution des politiques publiques relatives aux risques d'inondation en territoire urbain et a mis en évidence le passage d'un paradigme technique à un paradigme environnemental. Bark et al. (2021) ont mené une enquête sur les perceptions des parties prenantes concernant la gestion des inondations à l'aide des solutions fondées sur la nature et ont conclu que l'acceptabilité de ces techniques nécessite un changement de paradigme pour "travailler avec la nature". Dans la continuité de ces réflexions, le passage du génie civil au génie végétal pour protéger les berges contre l'érosion pourrait correspondre à un changement de paradigme.

L'objectif est ici de vérifier cette hypothèse d'un changement de paradigme qui pourrait expliquer pourquoi l'utilisation du génie végétal reste encore marginale aujourd'hui. Nous avons donc voulu comprendre comment les professionnels de la filière abordent l'érosion des berges (définition du problème, diagnostic et proposition d'action). Dans ce but, nous avons mené une enquête par entretiens semi-directifs et avons interrogé les différentes catégories de professionnels qui interviennent aux différentes étapes d'un projet d'installation d'ouvrage de génie végétal (innovation, conception et planification, construction et entretien). Nous nous sommes concentrés sur les professionnels travaillant dans des territoires urbains situés en région Auvergne Rhône Alpes (France).

1. Méthode

1.1. Conception de l'enquête

Nous avons conçu un protocole d'enquête qualitative basé sur des entretiens individuels semi-directifs. Nous avons d'abord établi une liste des profils que nous souhaitions interroger afin d'avoir une vue d'ensemble des professionnels qui interviennent aux différentes étapes d'un projet d'ouvrage de génie végétal (Figure 3).

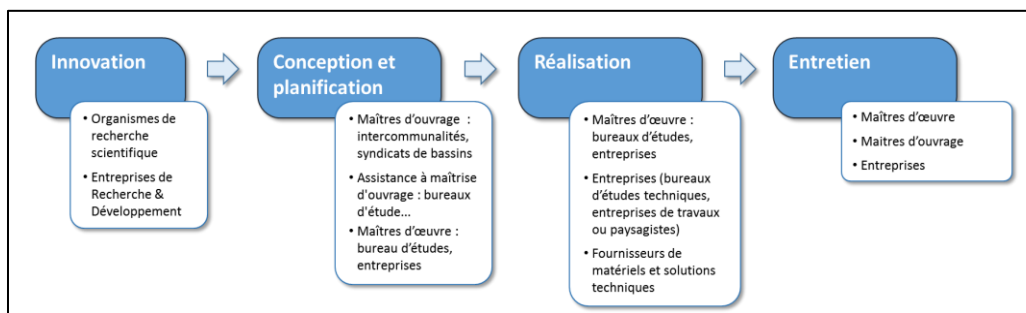


Figure 3 : Praticiens impliqués dans les différentes étapes d'un projet d'ouvrage de génie végétal

Un guide d'entretien a été produit. Trois thèmes principaux ont été abordés au cours des entretiens :

1. Présentation générale : parcours professionnel, principales missions, employeur
2. Techniques de protection des berges : techniques utilisées, personnes impliquées dans les choix techniques, critères utilisés pour définir la performance des ouvrages, perception des services écosystémiques rendus par les ouvrages de berge.
3. Facteurs influençant les choix techniques (suivant les cinq facteurs mentionnés précédemment, cf partie PARTIE 1 – 2.)

1.2. Recrutement et passation des entretiens

Dans un premier temps, nous avons contacté des personnes (par téléphone ou par courriel) impliquées dans le projet de recherche Géni-eaux (équipe scientifique du projet, partenaires institutionnels), puis nous avons progressivement élargi notre liste de contacts professionnels en utilisant la technique d'échantillonnage par boule de neige (c'est-à-dire en demandant aux personnes interrogées de suggérer d'autres personnes que nous pourrions contacter). Au total, nous avons contacté 25 personnes, dont 17 ont accepté de participer, une personne a refusé par manque de temps et 7 n'ont pas répondu.

Notre panel final représente la variété des praticiens ciblés, avec six personnes travaillant pour des maîtres d'ouvrage, six personnes pour des maîtres d'œuvre, deux personnes dans des associations, une dans une entreprise, une dans un organisme scientifique et une pour un financeur. Le panel comportait beaucoup plus d'hommes que de femmes (14/17) sans savoir, faute de données, si cela est représentatif de la répartition des genres dans le secteur.

Les entretiens ont été réalisés de mai à novembre 2020 et ont duré 1 heure 20 en moyenne (de 1 à 2 heures). En raison du contexte sanitaire provoqué par la pandémie de Covid-19, nous avons réalisé les entretiens en ligne à l'aide d'un logiciel de visioconférence et en suivant les principes de l'entretien qualitatif en ligne (Janghorban et al., 2014). A la fin de chaque entretien, nous avons évalué l'impact qu'il ait été fait en ligne. Les personnes interrogées ont répondu que cela n'avait pas d'impact (n=10) ou un impact limité (i.e. convivialité, possibilité de donner plus de détails, de partager un document ou de montrer le site d'étude ; n=7). Nous avons donc considéré que les méthodes en ligne ne constituaient pas un biais important affectant notre étude. Sur la

base d'un document envoyé avant l'entretien, les personnes interrogées ont donné leur accord oral pour l'enregistrement de l'entretien et la communication de l'analyse anonymisée.

Nous avons mené les entretiens en tandem, en suivant les principes de l'entretien semi-structuré, notamment l'écoute empathique, la triangulation, l'itération et la saturation (de Sardan, 2004).

1.3. L'analyse

Les entretiens ont été intégralement retranscrits. Nous avons mené notre analyse en suivant trois principes.

Premièrement, notre grille d'analyse a été construite sur la base des cinq hypothèses mentionnées précédemment.

Deuxièmement, nous avons suivi les principes de l'analyse thématique de contenu, définie comme "une méthode pour identifier, analyser et rendre compte des motifs (thèmes) dans les données" (Braun & Clarke, 2006). Conformément à cette méthode, nous avons classé des portions de discours dans différents thèmes, en suivant les hypothèses. Cette classification permet d'identifier comment les thèmes se répètent d'un entretien à l'autre, comment ils se chevauchent, se rejoignent, se contredisent ou se complètent (Paillé & Mucchielli, 2012).

Troisièmement, nous avons suivi un processus itératif. Le dialogue constant entre les aspects théoriques et la réalité du terrain a enrichi l'analyse et a permis d'affiner les questions pour l'entretien suivant, en approfondissant les points les plus intéressants. Certains résultats présentés dans cet article découlent de nos hypothèses (par exemple, la posture professionnelle), d'autres ont émergé au cours des entretiens et de l'analyse (par exemple, l'acceptation et le partage des risques).

2. Résultats

L'analyse des entretiens a mis en évidence trois spécificités des techniques de génie végétal par rapport au génie civil qui supposent une évolution des pratiques : une redéfinition de la performance, une nouvelle acceptation du risque, et une posture professionnelle spécifique pour les praticiens. Ces caractéristiques constituent l'essence de l'approche par génie végétal, mais peuvent également expliquer pourquoi l'utilisation de ces techniques reste marginale dans la gestion des rivières urbaines.

2.1. Redéfinir la performance des ouvrages de stabilisation de berges

La performance d'une technique est définie comme sa capacité à atteindre un objectif prédéfini sans (ou avec de faibles) contreparties négatives. L'objectif principal du génie végétal et du génie civil reste le même : contrôler l'érosion des berges, et donc protéger les biens et les personnes. Cependant, selon les praticiens interrogés, il n'est pas possible de comparer les deux techniques avec des critères strictement équivalents. C'est pourquoi une nouvelle caractérisation des performances mécaniques, écologiques et sociales des ouvrages de berge est préconisée.

Tout d'abord, l'évaluation de la performance des ouvrages de génie écologique nécessite des changements d'échelle temporelle et spatiale. En ce qui concerne la

dimension temporelle, les personnes interrogées ont affirmé que, alors que la performance du génie civil est optimale immédiatement après l'installation puis décroît dans les années ou décennies suivantes, la performance des ouvrages de génie végétal est faible au dans les premiers temps de l'installation mais augmente avec le temps. En effet, les plantes ont besoin de développer leurs racines et leurs branches pour remplir leur fonction structurelle. En ce qui concerne la dimension spatiale, les ouvrages de génie civil ont tendance à limiter l'érosion à proximité immédiate du site concerné, sans prendre en compte l'ensemble de la dynamique d'un cours d'eau. Au contraire, le génie végétal est, d'après les personnes interrogées, plus pertinent à une échelle plus large, en tenant compte du fonctionnement de l'hydrosystème (par exemple, ces ouvrages peuvent contribuer à dissiper l'énergie de la rivière ; Tableau 1 A1). C'est pourquoi sa performance doit être évaluée non pas à l'échelle stricte des enjeux à protéger (par exemple, la zone urbaine), mais à l'échelle de la rivière dans son ensemble. En conclusion, pour l'objectif de lutte contre l'érosion, le génie végétal peut sembler moins performant localement et sur des échelles de temps courtes, mais présente de nombreux avantages si l'on élargit les échelles considérées.

Outre ces aspects mécaniques, le génie végétal présente des avantages écologiques et sociaux. D'un point de vue écologique, le génie végétal est beaucoup moins traumatisant pour les écosystèmes que le génie civil. Pendant la phase de travaux en effet, le génie végétal repose sur plus de travail manuel et moins de machinerie lourde que le génie civil, et génère donc moins de perturbations pour les écosystèmes (Tableau 1 A2). Les plantes utilisées pour le génie végétal sont autant que possible collectées localement ou élevées en pépinière par les maîtres d'ouvrage eux-mêmes (Tableau 1 A3). En outre, les ouvrages de génie écologique offrent de nombreux services écosystémiques tels que le soutien de la biodiversité, le stockage du carbone, la valeur esthétique et paysagère, la contribution à la qualité du cadre de vie et aux opportunités récréatives, l'atténuation des îlots de chaleur urbains et le contrôle des espèces invasives. Un autre avantage des ouvrages de génie végétal est leur intégration (également appelée transparence) dans le paysage, à la fois d'un point de vue visuel et écologique (tableau 1 A4). Il semble y avoir un consensus sur ce point parmi les praticiens (tableau 1 A5) ; cet avantage est par ailleurs également perçu par les élus et les habitants. En ce qui concerne la performance des berges végétalisées au regard de critères sociaux, les praticiens convergent sur l'idée que les travaux de génie végétal redéfinissent les usages sociaux. Des berges considérées comme des espaces marginaux avec des usages indésirables ou illégaux (par exemple, consommation de drogue ou d'alcool, dépôt de déchets) peuvent être revalorisées aux yeux des acteurs et perçues comme plus utiles socialement après des travaux de génie végétal (par exemple, pour les promenades en famille, les sports de plein air ; Tableau 1 A6). Les opinions sur la valeur esthétique des berges aménagées par génie végétal divergent : certains gestionnaires pensent que les techniques de génie végétal sont perçues positivement car elles sont associées au verdissement des villes (tableau 1 A7), tandis que d'autres affirment que les habitants considèrent ces berges comme mal entretenues ou qu'ils ne remarquent tout simplement pas les ouvrages de génie végétal (tableau 1 A8) ; d'autres encore mentionnent qu'ils ne savent pas comment ces berges sont perçues et utilisées par les habitants (tableau 1 A9). Nous avons approfondi cette question de la perception de la valeur esthétique à travers une enquête par photo-questionnaire (voir PARTIE 3).

Les dimensions écologiques et sociales de la performance restent mal mesurées, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il n'existe pas de protocole standardisé pour évaluer les SE fournis par les berges végétalisées (Tableau 1 A10). Ensuite, l'évaluation

est rarement incluse dans le financement des projets et n'est pas considérée comme une priorité par les financeurs, les collectivités locales ou les bureaux d'études (Tableau 1 A11). Il en résulte une situation paradoxale, avec un consensus sur la valeur écologique et sociale des berges végétalisées, mais peu d'évaluations sur le terrain pour soutenir ce consensus.

En résumé, selon les personnes interrogées, les ouvrages de génie végétal n'ont pas seulement une fonction de contrôle de l'érosion, mais jouent également un rôle dans la restauration des écosystèmes et le bien-être humain. C'est pourquoi les parties prenantes plaident pour une redéfinition de la performance qui serait évaluée à des échelles spatiales et temporelles plus larges, et selon trois dimensions : mécanique, écologique et sociale. Actuellement, l'absence de telles approches minimise les avantages des techniques de génie végétal.

Tableau 1 : Onze citations sur la performance des structures de génie végétal obtenues à partir des entretiens

A. Citations relatives à la performance des ouvrages de protection de berge		Interviewé
A1	Le génie civil est en très bon état au début, et ensuite il ne fait que se dégrader, tandis que le génie végétal démarre avec une protection assez réduite et va augmenter avec le temps.	Interviewé 8 Maître d'œuvre
A2	Les premières années, si jamais on a une sécheresse ou que la végétation ne prend pas, effectivement, là, la technique végétale ne va pas tenir. Les incertitudes sont plus fortes avec le génie végétal sur les premières années.	Interviewé 12 Maître d'ouvrage
A3	Le Gier, c'est une rivière très puissante, avec des fortes variations de débit. Du coup, elle a tendance à faire son chemin, elle a besoin de sédiments pour dissiper son énergie. Donc si à un endroit on l'empêche de bouger, de mettre des techniques dures, il va aller gratter en face. Naturellement, le végétal est très présent. Du coup, la technique mixte ou en génie végétal, elle vient un peu d'elle-même.	Interviewé 13 Maître d'ouvrage
A4	Certaines entreprises de génie végétal travaillent aux ciseaux à ongle, ils n'agissent quasiment pas avec les pelles mécaniques.	Interviewé 17 Scientifique

A5	Quand on fait des enrochements, bien souvent ce n'est pas des carrières qui sont à côté, donc c'est des coûts et des impacts de transport. En génie végétal, ce qu'on essaie de faire, c'est les prélèvements locaux. On a aussi un client qui va créer sa propre pépinière, le but c'est de ne pas aller chercher des boutures à l'autre bout de la France, qui ne sont pas du milieu.	Interviewé 7 Maître d'œuvre
A6	Moi, je parle de transparence écologique. Ça veut dire que l'ouvrage, il s'est intégré, il ne se voit plus, mais on retrouve les cortèges d'espèces associés qui sont présents dans des milieux similaires en amont/en aval.	Interviewé 5 Maître d'ouvrage
A7	On n'a pas besoin de convaincre les chargés de mission de l'utilité du génie végétal, c'est un débat qu'on n'a jamais !	Interviewé 6 Maître d'ouvrage
A8	Avant, c'était le repère des fumeurs de pétard et des buveurs de bière. Maintenant, c'est devenu la balade de tout un chacun. Oui, il y a réellement une grosse réappropriation de ce site-là.	Interviewé 15 Maître d'ouvrage
A9	J'ai toujours eu des échos favorables de la part des habitants : c'est beau, c'est accueillant, c'est plus accessible, avec un cheminement, des bancs, des grenouilles, des oiseaux. On l'a vu pendant le confinement d'ailleurs.	Interviewé 6 Maître d'œuvre
A10	On n'a jamais trop entendu dire : « C'est bien ce que vous faites. » Peut-être parce que c'est très rapidement des ouvrages qui passent inaperçus puisque ça a un aspect très naturel, donc les gens pensent que ça fait partie du décor. Et les gens préfèrent presque une berge minérale à une berge naturelle, qui semble moins entretenue, qui fait un peu plus désordre. Et c'est vrai qu'en France, on a une culture du jardin à la française : faut que les choses soient bien propres, bien lisses, bien rectilignes.	Interviewé 14 Maître d'ouvrage
A11	Je ne suis pas sûr que les gens passent plus par là depuis les travaux de génie végétal, je n'en sais rien. En tout cas, je n'ai pas de données qui me permettent de l'affirmer.	Interviewé 16 Maître d'ouvrage

A12	Sur les indicateurs de performance... C'est une très bonne question, il y a très peu de choses là-dessus, dans la littérature, il n'y a quasiment rien.	Interviewé 17 Scientific
A13	Le suivi, dans la gestion des milieux aquatiques, c'est un peu le parent pauvre. Déjà, il n'y a pas toujours nécessité d'un suivi systématique, et puis il y a des nouvelles technologies qui sont à mettre en place, qui sont parfois beaucoup trop chronophages et qui ne sont pas toujours adaptées à l'ambition du projet.	Interviewé 2 Association
A14	L'impact du génie végétal sur le milieu, tout le monde le sait, généralement. Mais dans les évaluations, le transport, la production, la dégradation, le prélèvement des matériaux, ces aspects-là ne sont pas pris en compte.	Interviewé 8 Maître d'œuvre

2.2. Accepter et partager les risques

Par rapport au génie civil, les techniques de génie végétal sont perçues comme plus risquées. En particulier, les praticiens ont rapporté au cours des entretiens certaines préoccupations exprimées par les élus et les habitants. Ainsi, l'adoption de ces techniques nécessite à la fois de réduire la perception du risque qui lui est associée et d'accepter un niveau de risque plus élevé, en particulier au cours des premières années qui suivent la construction des structures de berges.

Les praticiens considèrent que les techniques de génie végétal sont fiables lorsque les plantes atteignent un certain stade de développement. Ils admettent qu'il est presque impossible de prédire la performance des techniques de génie végétal par une approche théorique en raison de la complexité des interactions entre les plantes, le sol et l'eau (Tableau 2 B1). Cependant, ils affirment qu'il y a suffisamment de manuels techniques, de recul et de retour d'expérience pour pouvoir dimensionner les structures et prédire leur performance avec une approche empirique (Tableau 2 B2). Selon les personnes interrogées, les élus et les habitants ont tendance à percevoir les techniques de génie végétal comme plus risquées car le béton utilisé en génie civil leur paraît rassurant. Une des missions des praticiens du génie végétal est donc de convaincre les maîtres d'ouvrage et les usagers de la viabilité et de la fiabilité de ces techniques (Tableau 2 B3).

Les praticiens peuvent adopter plusieurs stratégies pour améliorer la confiance du public dans le génie végétal. Parfois, ces techniques sont mises en œuvre dans les zones potentiellement non dommageables ou sur de courtes longueurs, afin de tester leur efficacité (Tableau 2 B4). Cela est possible parce que les techniques sont flexibles et peu coûteuses. Grâce à cette approche par essais et erreurs, les praticiens accumulent des connaissances et de l'expertise, et ils peuvent affiner les techniques et ainsi réduire le risque (Tableau 2 B5). En outre, ces essais peuvent servir de vitrine pour convaincre les collectivités locales et les élus (Tableau 2 B6). Cependant, même avec l'utilisation de

ces stratégies, le risque de défaillance partielle est réel au cours des premières années suivant l'installation. L'adoption des techniques de génie végétal nécessite donc d'augmenter le niveau d'acceptation des risques (Tableau 2 B7).

Une question importante se pose alors : qui prend la responsabilité ? Si nous devons accepter de prendre des risques, qui doit les prendre ? Légalement, l'entrepreneur principal ou l'entreprise de construction doit offrir une garantie pour l'aménagement de l'ouvrage pendant les premières années suivant l'installation (généralement trois ans). Toutefois, cette garantie ne s'applique qu'aux petits événements de crue et certaines personnes interrogées font état d'incertitudes juridiques en ce qui concerne la garantie (Tableau 2 B8). Les négociations entre le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre autour de la question de la responsabilité peuvent conduire à un surdimensionnement des ouvrages, car les maîtres d'œuvre veulent limiter leur prise de risque financier et juridique (Tableau 2 B9). C'est pourquoi les praticiens demandent un meilleur partage des risques entre professionnels (Tableau 2 B10).

Tableau 2 : 10 citations sur l'acceptation des risques extraites des entretiens

B. citations relatives à l'acceptation des risques		
B1	Il y a beaucoup de bouquins, de recherches sur ces techniques, des cas-tests, des retours d'expérience. On a des données sur la résistance aux forces tractrices par exemple. Ce dont on manque peut-être un peu, c'est de retours d'expérience de dix, quinze ans sur des techniques végétales assez ambitieuses. Mais aujourd'hui, sur le dimensionnement, on a ce qu'il faut.	Interviewé 9 Maître d'œuvre
B2	Les élus au départ étaient plutôt très frileux par rapport aux techniques végétales. Il y avait une grosse culture d'enrochement sur notre bassin versant. Puis progressivement on a pu, grâce notamment aux travaux post-crues, réaliser des techniques végétales ; et comme on a eu après une succession de crues, les élus ont pu voir que finalement ça tenait bien le coup.	Interviewé 14 Maître d'ouvrage
B3	On est sur du vivant, donc on est sur un truc qui est en fait multi-scalaire dans le sens de la théorie de la hiérarchie. On travaille sur des modèles vivants qui ne sont pas quantifiables, enfin ils ne sont pas modélisables de façon productive.	Interviewé 17 Scientific
B4	Sur 4-5 m de long, il y a une fascine qui est partie. Ce n'est pas grave, au contraire. On laisse faire, on va regarder comment ça évolue, mais on n'a pas d'enjeu à proximité immédiate, on n'est pas en pied de digue, du coup, on peut se permettre de laisser la rivière travailler comme elle le souhaite.	Interviewé 16 Maître d'ouvrage

B5	Un technicien a voulu tenter le coup des rangées de pieux. C'est un peu expérimental. Moi, j'ai dit « oui, ça nous coûte pas cher ». On fournit les pieux, ça ne nous a rien coûté si ce n'est un peu de main d'œuvre de la Brigade Verte. De cette façon, petit à petit, on a appris sur le transport solide, sur la capacité de réserve, sur l'implantation des fascines... Petit à petit, on a fait évoluer nos méthodes comme ça, par ajustements.	Interviewé 10 Maître d'ouvrage
B6	La grande difficulté des techniciens dans les collectivités, c'est d'aller convaincre les riverains, les partenaires, les chambres d'agriculture ou l'agriculteur du coin, les élus, qu'on peut protéger les berges sans utiliser forcément des matériaux délirants. Mais... voilà, ça se diffuse, il y a pas mal de sites vitrines qui ont été réalisés et des chantiers pilotes.	Interviewé 2 Association
B7	Le génie végétal, sur les premières années, l'effet de stabilisation et de maintien de berges est très limité, et c'est pour ça que c'est aussi un choix du maître d'ouvrage de dire : « On va sur du génie végétal ». Même si on sait qu'au début on prend un risque, ça peut être un beau pari à gagner. Donc c'est là aussi que se passe la phase d'acceptation.	Interviewé 8 Maître d'œuvre
B8	Normalement, il y a une garantie par l'entreprise sur les trois premières années, mais elle est pour des événements de très faible envergure. Donc elle est très peu utilisée, parce que c'est compliqué, ça peut être des sommes énormes, s'il y a une crue par exemple. C'est un gros point qui n'est encore accepté par personne parce que personne ne veut prendre cette responsabilité. Donc d'un point de vue réglementaire c'est quelque chose qui est un peu manquant.	Interviewé 8 Maître d'ouvrage
B9	C'est vraiment le point d'achoppement. Je vous laisse un peu imaginer le genre de discussion... le client demande à son architecte de lui mettre en place une technique moins résistante, tout en lui disant : « Tu garderas quand même la responsabilité si jamais ça se barre. » Chacun défend son bout de gras... Au final, malgré le rapport de force, même si c'est le syndicat de rivière le client, c'est souvent celui qui dimensionne, c'est-à-dire le bureau d'études, qui a le dernier mot. Ça conduit à du surdimensionnement d'ouvrage.	Interviewé 15 Maître d'ouvrage
B10	Il y a un sujet sensible : la problématique de partage du risque. Comment est-ce qu'on peut discuter avec les maîtres d'ouvrage de ces sujets ? Qu'est-ce qu'ils attendent de nous ? Qu'est-ce qu'on attend d'eux, en tant que maître d'œuvre ? Comment est-ce qu'on partage ça ? Parce que bien souvent, on a l'impression qu'on est un peu chacun dans notre coin.	Interviewé 9 Maître d'œuvre

2.3. Adopter une posture humble et audacieuse

Même s'il peut y avoir de la concurrence ou des tensions entre les praticiens du génie végétal, ils partagent toutefois une vision commune sur la posture inhérente à cette approche.

La filière française du génie végétal est récente et fraîchement structurée. Elle est composée d'associations, de maîtres d'ouvrage, de petites entreprises spécialisées dans le génie végétal ou de grandes entreprises qui ont récemment ouvert une branche sur les techniques vertes. Des tensions peuvent exister entre les entreprises locales et nationales, ou entre les grandes entreprises généralistes et les petites entreprises spécialisées (Tableau 3 C1). Ces tensions se manifestent en particulier au cours de la procédure d'appel d'offres (Tableau 3 C2). Des négociations existent également entre le maître d'ouvrage et les entrepreneurs principaux, autour des questions susmentionnées du partage des risques ou de la question de l'expertise. En effet, il arrive que le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre soient en désaccord sur des aspects techniques et, plus généralement, qu'ils s'affrontent sur leur capacité à être "l'expert" (Tableau 3 C3). Des tensions peuvent également exister au sein des différentes entreprises travaillant sur le même projet, notamment entre les entreprises de génie civil et de génie végétal (Tableau 3 C4) ou même au sein d'une institution (Tableau 3 C5).

Malgré ces tensions, les praticiens partagent une vision commune de leur travail et leur profil présente certaines similitudes. Tout d'abord, ils ont un profil pluridisciplinaire, combinant des compétences en écologie et en botanique, en hydrologie, en hydraulique et en ingénierie, mais aussi des compétences non techniques telles que l'observation de la nature, ou la capacité à dialoguer avec des parties prenantes nombreuses et variées. Ensuite, ils soulignent tous l'importance de la formation continue, principalement basée sur l'expérience empirique (plus que sur la formation initiale), dans l'acquisition des connaissances et des compétences sur le génie végétal (Tableau 3 C6). Les échanges collectifs, par exemple les journées techniques mises en place par l'association ARRAA, sont mentionnés à plusieurs reprises dans les entretiens. Ces échanges permettent aux praticiens de partager leur expérience, tant sur les réussites que sur les échecs, et les incitent à faire preuve d'audace et d'humilité (Tableau 3 C7). Ces deux qualités humaines reviennent dans les discours des personnes interviewées (Tableau 3 C8, C9). Elles permettent aux professionnels de se remettre en question et de revenir en arrière si nécessaire, ce qui est essentiel pour entamer un processus d'essai/erreur et prendre des risques (Tableau 3 C10).

Un autre point récurrent dans le discours des praticiens concerne la convergence entre l'éthique professionnelle et l'éthique personnelle. Deux types de professionnels coexistent. La majorité des personnes interrogées sont spécialisées dans les techniques de génie végétal. Elles sont diplômées en écologie, en hydrologie ou en ingénierie avec une composante environnementale. Pour eux, la pratique du génie végétal est un moyen de combiner développement humain et conservation (Tableau 3 C11). Pour d'autres, travaillant dans des collectivités locales ou des entreprises de construction, le génie végétal n'est qu'une partie de leurs activités. Ils soulignent la satisfaction qu'ils ressentent dans ces projets par rapport à d'autres (Tableau 3 C12). Pour toutes les personnes interrogées, les techniques de génie végétal contribuent au bien commun (Tableau 3 C13), et elles sont parfois considérées comme une mission (Tableau 3 C14).

Sans ignorer les tensions qui peuvent exister entre les praticiens, il y a une vision partagée et l'existence d'une communauté de pratiques, qui est un véritable levier pour une utilisation plus large des techniques de génie végétal.

Tableau 3 : 14 citations sur la posture extraites des entretiens

C. Citations relatives à la posture professionnelle		
C1	Il y a beaucoup d'entreprises, je vais critiquer certaines boutiques, qui sont aussi spécialisées dans du génie végétal mais qui ont une ampleur nationale, donc quelles garanties elles amènent ? Quand les mecs, ils viennent de l'autre bout de la France, on sait bien qu'une fois qu'ils ont planté, ils ne viendront pas arroser !	Interviewé 3 Entreprise
C2	La procédure marché public est basée sur une analyse des offres. Vous attribuez une note aux candidats sur la base de la valeur technique de l'offre et sur le prix. Si vous avez un prix qui se tient à peu près entre les deux entreprises et que vous avez un mémoire technique d'un côté qui est très bien léché parce que c'est grand groupe et à côté, la petite entreprise qui a un mémoire technique un peu plus rustre...vous attribuez le marché au grand groupe, sauf qu'une fois les pelles sur le terrain, ce n'est plus du tout la même !	Interviewé 15 Maître d'ouvrage
C3	Parfois, je m'engueule avec des donneurs d'ordre, et les maîtres d'ouvrage, je les trouve trop interventionnistes. Mais au bout d'un moment, je n'ai pas d'autre possibilité que de lâcher, je ne suis que maître d'œuvre.	Interviewé 6 Maître d'œuvre
C4	On fonctionne par alotissement, c'est-à-dire qu'on a vraiment séparé les lots génie civil et génie végétal. On demande une co-activité entre les entreprises qui n'est pas forcément évidente pour eux. La mise en place des techniques végétales, ça prend du temps, en plus c'est à la main, ce n'est pas le même rendement que la pelle mécanique... En termes de relation avec les entreprises, ça a été compliqué, elles étaient là : « toi, tu me retardes ».	Interviewé 11 Maître d'ouvrage
C5	On va passer beaucoup de temps à monter des processus, à passer des lettres de commande, tout ça parce qu'on est en silos. Plus la structure est grosse, plus on sectorise...	Interviewé 12 Maître d'ouvrage

C6	Mes connaissances sur le génie végétal... j'ai une formation de technicien agricole, donc déjà par ce biais-là, et puis après dans mes études, et par le fait que je me suis toujours intéressé à l'environnement. J'ai pu aussi bénéficier d'une formation organisée par l'association des techniciens de l'environnement, en partenariat avec un bureau d'études. Après on a appris en faisant. En sachant que ce n'est pas non plus hyper complexe comme technique... C'est du bon sens.	Interviewé 14 Maître d'ouvrage
C7	C'est quand même un trait de personnalité de notre profession. L'ARRAA en est le témoin, la partie émergée de l'iceberg. C'est cette espèce de réseau, je ne connais ça dans aucune autre profession, ce réseau autour d'expériences en disant : « Tiens les gars, chez moi j'ai fait ça. Ma rivière est comme ça. J'ai fait ça, ça a marché. » Ça n'existe pas ailleurs. Cette adaptabilité-là, je crois que c'est un peu le cœur du métier.	Interviewé 15 Maître d'ouvrage
C8	Si je devais donner un seul conseil, c'est oser, tout simplement, y aller, et oser prendre des risques, oser faire et tester.	Interviewé 2 Association
C9	Il faut être très humble. C'est-à-dire ne pas vouloir faire des choses trop grosses, et ne pas vouloir être sûr de soi. Ce n'est pas parce que je vais mettre des arbres que mes arbres vont tout de suite pousser...	Interviewé 12 Maître d'ouvrage
C10	Ce qui manque c'est la remise en question et l'humilité. C'est pouvoir dire : « On pense que ça évoluera comme ça. » Et si jamais on s'est trompé, on se garde la possibilité de venir ré-intervenir après.	Interviewé 15 Maître d'ouvrage
C11	C'est sûr que l'aspect génie végétal et plus globalement restauration, pour moi c'est un gros « plus » dans le métier. On essaie quand même de faire du bien, même si c'est une intervention humaine.	Interviewé 8 Maître d'œuvre
C12	Moi, dans mon métier de bâtisseur, on est des hommes de l'ombre, ça ne se voit pas ce qu'on fait. L'eau potable par exemple, quand j'interviens, à la fin du chantier, souvent la rue, elle est dans un état pire qu'avant. Quand je fais de la rivière, c'est magnifique... Par du terrassement, de l'enrochement et du végétal, on a créé une espèce d'alchimie de minéral, de végétaux et compagnie.	Interviewé 3 Entreprise

C13	Moi, je fais ce métier parce qu'il y a du génie végétal. Je sais que si on me demande sur un cours d'eau, de tirer des kilomètres d'enrochement ou de mettre des kilomètres de palplanches, je ne ferai pas, ce n'est pas mon job. Moi, je suis là pour faire de l'environnement, de l'écologie. Je ne veux pas mettre mes connaissances sur quelque chose qui ne va pas dans le bon sens.	Interviewé 12 Maître d'ouvrage
C14	Moi, je trouve ça bien de pouvoir valoriser ces techniques végétales. C'est une espèce de petit combat, sans grande ambition, mais oui, ça fait partie d'une image positive en tout cas que je peux avoir de mon métier.	Interviewé 11 Maître d'ouvrage

3. Discussion

Les résultats qui précèdent permettent de discuter dans quelle mesure l'adoption de techniques de génie végétal nécessite un changement de paradigme. Selon la définition de Kuhn et les travaux antérieurs sur les paradigmes de gestion (Halbe et al., 2015 ; Kuhn, 1962 ; Pahl-Wostl et al., 2011), nous avons identifié trois conditions d'existence d'un changement de paradigme de gestion : (i) le paradigme doit être partagé au sein d'une communauté de pratique ; (ii) le paradigme doit aider à articuler les aspects épistémologiques et les stratégies de solutions trouvées au cas par cas ; (iii) l'émergence de ce paradigme doit entrer en conflit avec le paradigme précédent ou le paradigme dominant dans le domaine. Dans les paragraphes suivants, nous résumons d'abord en quoi les pratiques de génie végétal sont spécifiques, puis nous explorons les raisons pour lesquelles ces pratiques constituent un changement de paradigme.

Travailler avec le vivant : freins et leviers pour une utilisation plus large des techniques de génie végétal

L'analyse des entretiens a permis de mettre en lumière trois spécificités des pratiques de génie végétal : la définition de la performance, qui doit intégrer les dimensions écologiques et sociales, comme le mentionnent déjà Sotir (2001) et Morris et Moses (1999) ; une nouvelle approche du risque, qui doit être mieux accepté et partagé ; et une posture humble et audacieuse.

Ces spécificités se résument en une phrase qui revient plusieurs fois dans les entretiens : " Nous travaillons avec le vivant ". En effet, alors que la végétation est considérée comme une faiblesse potentielle dans les ouvrages de génie civil, leur rôle structurel est central dans le génie végétal (Lavandier et al., 2010 ; Vennetier et al., 2004). Cependant, la performance mécanique des ouvrages de stabilisation de berge est moins facile à prévoir, en raison de la complexité des interactions entre les plantes, le sol et la rivière. La dynamique du vivant peut également échapper au contrôle des praticiens, par exemple en cas de mauvais développement des plantes. Ils doivent donc davantage accepter les risques et faire preuve d'audace et d'humilité. L'adoption de pratiques de génie végétal nécessite de réinventer la relation entre l'homme et la rivière, dans laquelle la technique n'est pas utilisée pour contrôler et limiter les

dynamiques vivantes ; mais les propriétés vivantes sont utilisées au bénéfice de la société et de la nature (Mitsch, 2012).

Les spécificités mentionnées précédemment constituent également des freins et des leviers pour une utilisation plus large du génie végétal dans les territoires urbains. La définition actuelle de la performance, axée sur des critères mécaniques, minimise les avantages de cette technique, et il y a donc une grande opportunité autour de l'amélioration de l'évaluation écologique et sociale des ouvrages de génie végétal. La fragilité initiale des ouvrages constitue un frein à l'utilisation de ces techniques en ville, où les enjeux sont omniprésents (Evette et al., 2018 ; Pinto et al., 2016 ; Sotir, 2001). Cependant, les personnes interrogées notent que l'acceptation des risques est en progression et elles plaident pour un meilleur partage des risques entre les praticiens. Enfin, la vision partagée de leur travail, et l'existence d'une communauté de pratiques constituent un véritable levier. Grâce à elles, les praticiens pourront améliorer la compréhension mutuelle (par exemple entre les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrage), surmonter les difficultés et relever les défis associés au génie végétal.

L'existence d'une communauté de pratique

Selon Kuhn, un paradigme est partagé par une communauté épistémique, avec un consensus sur ce qui doit être observé et analysé (Kuhn, 1962). Comme nous nous concentrons ici sur la perspective des praticiens, nous ferons plutôt référence à une communauté de pratiques, c'est-à-dire un groupe de personnes "qui partagent une préoccupation ou une passion pour quelque chose qu'ils font et qui apprennent à mieux le faire en interagissant régulièrement" (Wenger, 1999).

Doré et al. (2014) se sont interrogés sur l'existence d'une vision commune pouvant s'appliquer au secteur du génie végétal. Il est d'après eux difficile de considérer qu'il existe une communauté de valeurs, mais cela n'empêche pas l'avancement des projets et la collaboration entre praticiens (Doré et al., 2014).

Nos résultats montrent que malgré certaines tensions ou concurrences, les praticiens convergent vers une vision commune de leur travail : ils ont tous un profil pluridisciplinaire, ils s'accordent sur l'importance de la formation continue, ils partagent une posture humble et audacieuse face aux dynamiques naturelles, et ils apprécient la convergence entre éthique personnelle et éthique professionnelle. La présence d'espaces d'échanges collectifs (par exemple le réseau professionnel régional des praticiens des rivières) corrobore l'existence d'une communauté de pratique. Les positions divergentes citées par Doré et al. (2014) n'apparaissent pas dans nos résultats. Ceci peut s'expliquer par le fait que, comme nous nous concentrons sur des contextes territoriaux fortement anthropisés (i.e. des rivières urbaines où la non-intervention n'est pas envisageable), les praticiens partagent une vision pragmatique de leur travail : selon eux, le génie végétal joue certes un rôle dans le contrôle des écosystèmes, mais il peut aussi contribuer à maintenir ou restaurer la dynamique naturelle des berges pour un bénéfice partagé entre les écosystèmes et les citoyens.

L'existence d'une communauté de pratique est essentielle car elle permet l'apprentissage social, défini comme "un changement dans la compréhension qui va au-delà de l'individu pour se situer dans des unités sociales plus larges ou des

communautés de pratique à travers des interactions sociales entre les acteurs au sein des réseaux sociaux" (Reed et al., 2010). En effet, l'adoption de techniques de génie végétal nécessite non seulement un apprentissage technique, mais aussi un changement en profondeur de la compréhension des problèmes et de ses solutions, partagé au sein d'un groupe de praticiens.

Un exemple typique de "paradigme adaptatif"

Dans la gestion des ressources naturelles, plusieurs paradigmes de gestion coexistent. Halbe et al. (2015) en ont identifié cinq. Le "paradigme prédiction et contrôle" vise à minimiser l'incertitude et à augmenter la prévisibilité des réponses aux problèmes. Le "paradigme adaptatif" est basé sur l'expérimentation, l'itération et la résilience ; il vise à faire face à des incertitudes élevées par le biais d'un suivi et d'une révision continus des mesures. Le "paradigme économique" vise à atteindre la viabilité économique. Dans le "paradigme traditionnel", les connaissances et les approches traditionnelles occupent une place centrale. Enfin, le "paradigme de l'implication de la communauté" est fondé sur la participation des groupes de parties prenantes.

Notre analyse montre que les praticiens se réfèrent au paradigme adaptatif. En effet, tous les praticiens mentionnent l'importance du processus d'essai et d'erreur. Ils mettent également en avant leurs stratégies pour limiter - ou au moins apprendre - les risques, en testant ces techniques sur des situations de pertes potentielles faibles, ou sur des techniques peu coûteuses. Lors des échanges entre pairs, les praticiens peuvent également faire un retour d'expérience sur leurs essais et leurs échecs et échanger sur les solutions possibles. Enfin, les deux qualités humaines, l'audace et l'humilité, sont centrales dans la gestion adaptative, car elles permettent d'expérimenter de nouvelles techniques, mais aussi de les adapter si nécessaire, en suivant un processus itératif.

Dépasser le paradigme "prédire et contrôler"

Le paradigme "prédire et contrôler" est historiquement dominant dans l'ingénierie. Cependant, sous l'impulsion des enjeux croissants liés à la durabilité, les paradigmes "adaptatif" et "d'implication de la communauté" sont en plein essor (Halbe et al., 2015). En effet, dans le domaine de la gestion des ressources naturelles, les problèmes sont la plupart du temps complexes et désordonnés, avec un niveau élevé d'incertitude et des opinions divergentes concernant la définition du problème et les stratégies de solution potentielles (Halbe et al., 2015). Dans ce contexte, l'approche de résolution de problèmes, inhérente au paradigme "predict and control", montre ses limites : en circonscrivant le problème, cette approche privilégie des horizons temporels limités et met en avant les aspects technologiques au détriment des dimensions sociales et politiques (El-Zein & Hedemann, 2016).

Les techniques de génie végétal rompent clairement avec le paradigme de gestion "prédire et contrôler". Tout d'abord, nos résultats montrent que prédire la performance des ouvrages de génie végétal avec une approche théorique est complexe, voire impossible, du fait de la complexité des interactions avec le vivant. Ainsi, le dimensionnement des ouvrages est principalement basé sur une approche empirique (Evette et al., 2018). De plus, si les techniques de génie végétal relèvent du

contrôle de l'écosystème (à l'inverse de la doctrine de mobilité des cours d'eau), elles nécessitent une acceptation du risque plus importante que le génie civil. Enfin, les techniques de génie végétal conduisent à redéfinir la performance, en incluant les dimensions sociales et écologiques et en changeant les échelles spatiale et temporelle de l'évaluation. Ce faisant, elles proposent un nouveau cadrage du problème.

Cependant, notre étude montre que les techniques de génie végétal ne s'inscrivent pas dans le "paradigme de l'implication de la communauté". En effet, la lutte contre l'érosion est encore définie comme un problème technique, avec une faible implication des citoyens, alors même que la nécessité d'inclure les parties prenantes a déjà été relevée par des études antérieures (Morris & Moses, 1999), et que des expériences concluantes ont déjà été menées dans d'autres villes (City of Calgary, 2017). Ainsi, inclure les élus et les habitants dans le choix des techniques peut être un levier pour améliorer l'acceptation du risque et donc l'utilisation de la technique de génie végétal. En effet, dans un contexte urbain, les enjeux sociaux liés à la nature en ville sont élevés : santé mentale, lieux récréatifs, atténuation des îlots de chaleur, etc. (Andersson et al., 2014). La partie qui suit dans ce rapport abordera plus spécifiquement ces enjeux liés aux perceptions du grand public.

PARTIE 3 – DIVERSITE DES PERCEPTIONS ET DES VALEURS ASSOCIEES AUX OUVRAGES DE GENIE VEGETAL SELON L'EXPERTISE ENVIRONNEMENTALE

Le succès ou l'échec d'une innovation dépend d'un réseau capable de lier des acteurs hétérogènes (Akrich et al. 2006). La mobilisation du réseau participe à l'élaboration et à la diffusion de l'innovation. Le réseau se consolide ou s'affaiblit en fonction des différentes controverses qui émergent en son sein et qui résultent de l'expression des acteurs concernés : expression de leurs intérêts et de leur identité. Ces controverses créent des arènes où les savoirs et les positionnements se confrontent, contribuant à la diffusion ou à l'abandon de l'innovation socio-technique. L'étude des interactions entre les savoirs, les représentations, les valeurs des acteurs et donc, leurs positionnements à l'égard de certaines modalités d'action environnementale permet de mieux comprendre les conditions de leur adoption ou au contraire, les freins à leur diffusion. Ces interactions ont été au cœur de notre attention ici, dans le cas de l'usage du génie végétal en solution de protection de berge.

La confrontation des acteurs et des savoirs est au cœur de l'action publique, notamment dans le domaine de l'action territoriale et environnementale. On distingue notamment, sans qu'ils s'opposent nécessairement dans leur contenu (Agrawal, 1995), les savoirs dits « experts » – ceux des « savants », du monde scientifique ou encore des techniciens issus des institutions étatiques (Damay et al., 2011) – des savoirs dits « ordinaires » ou « profanes », qui correspondent à des savoirs expérientiels, de « plein air » (Callon et al., 2001). Ces différentes formes de savoirs influencent les représentations des acteurs, leurs valeurs et *in fine* leurs positionnements à l'égard d'un problème donné. Selon Linton et Budds (2014), les profanes utilisent "des formes de connaissances spécifiques au contexte et non scientifiques" pour évaluer la qualité d'une rivière, ce qui crée parfois des différences avec les évaluations des experts. La « rationalité technique est parfois mise en doute par la rationalité culturelle », qui repose sur les « expériences personnelles et familiales plutôt que sur les calculs techniques et dépersonnalisés » (Fischer, 2004, p.87). Aujourd'hui, dans l'action publique, la toute puissance de l'expertise classique est remise en cause, y compris par la valorisation des savoirs « profanes » (Fromentin et Wojcik, 2008). Il est de plus en plus admis que les citoyens sont dotés de savoirs propres et qu'ils sont porteurs d'une « vision » pour le développement de leur cadre de vie (Damay *et al.*, 2011). Tout comme il est de plus en plus admis que le savoir scientifique ne constitue pas une entité monolithique et « certaine » mais qu'il correspond à une « juxtaposition des savoirs recourant à des cultures épistémiques variées » (Bourblanc, 2013). Les profanes conquièrent ainsi une certaine légitimité dans les processus de décision et prennent notamment une place croissante dans les décisions sociotechniques aux côtés des experts scientifiques, y compris dans le domaine de l'eau (Aubriot, 2013).

Les perceptions négatives du grand public ont été identifiées comme un obstacle majeur à la diffusion des SFN (Ramírez-Agudelo et al., 2020; Kabisch et al., 2016). Compte tenu des paragraphes qui précèdent, on peut donc imaginer qu'une différence

de savoirs soit à l'origine de cette différence de perception entre le grand public et les experts de la gestion des milieux aquatiques. Anderson et Renaud (2021) et Han et Kuhlicke (2019) ont montré que trois dimensions liées à la perception influençaient le soutien aux SFN : la perception de l'efficacité, la perception du risque et l'importance attachée aux bénéfices annexes produits par ces ouvrages. Il se pourrait donc que le grand public, d'une part, n'identifie pas les bénéfices annexes écologiques et sociaux produits par ces ouvrages, et d'autre part, qu'il doute de l'efficacité de leur protection.

Notre objectif ici est d'explorer cette hypothèse et d'étudier dans quelle mesure l'expertise environnementale influence les perceptions et les valeurs socio-culturelles associées aux ouvrages de génie végétal. Il s'agit notamment de voir si le grand public a confiance, au même titre que les experts, en la protection assurée par ces SFN et s'il identifie et valorise, tout comme eux, les bénéfices annexes écologiques ou sociaux. Il s'agit également de voir si les éventuelles différences peuvent créer des controverses ou des conflits de valeur susceptibles de nuire à la cohésion du réseau d'acteurs concernés et donc, de nuire à la diffusion de ces ouvrages. Pour ce faire, nous avons réalisé une étude interdisciplinaire originale basée sur une confrontation d'enquêtes sociologiques et de mesures écologiques de terrain. Ces méthodes ont été combinées pour caractériser : (1) la valeur perçue que les acteurs associent à 12 berges équipées de différentes structures de protection des berges (vertes, hybrides ou grises) selon leur niveau d'expertise du milieu aquatique ; (2) les interactions entre ces valeurs perçues et les valeurs écologiques mesurées *in natura* à l'aide de plusieurs indicateurs ; et (3) les avantages et inconvénients perçus de l'utilisation des techniques de génie végétal (Figure 4).

1. Méthode

Afin de croiser les évaluations, la valeur écologique mesurée (sur base d'indicateurs) et les valeurs perçues des berges ont été évaluées par le biais d'enquêtes sociologiques et de relevés écologiques portant sur 12 sites équipés de structures de protection des berges – vertes (i.e. techniques de génie végétal), hybrides (i.e. techniques mixtes) ou grises (i.e. techniques de génie civil). L'enquête sociologique est basée sur un photo-questionnaire (Figure 4).

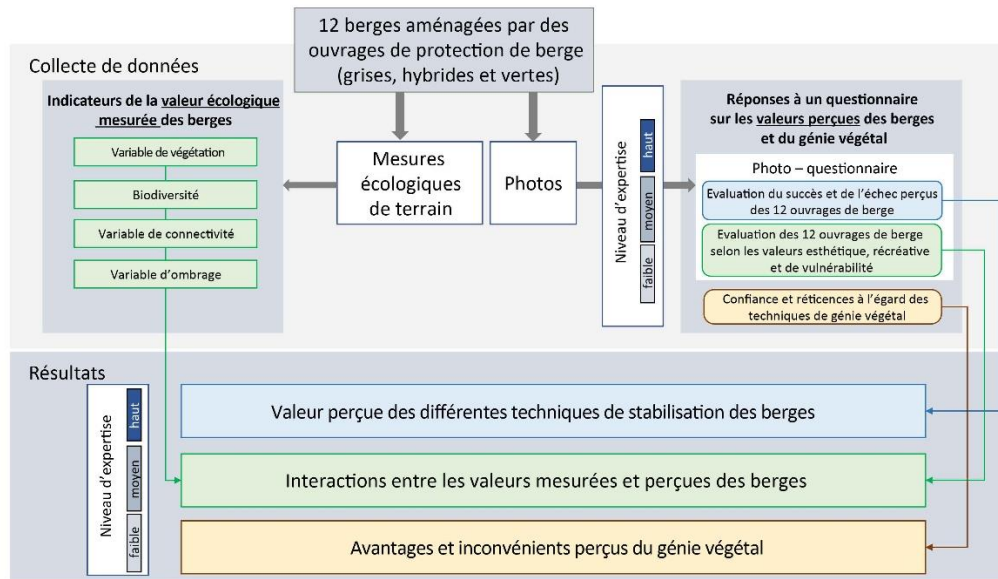


Figure 4 : Schéma de traitement des données

1.1. Terrain d'étude

Nous avons étudié les berges de 12 petites rivières protégées par des infrastructures vertes, hybrides ou grises : cinq grises (des enrochements ; Grise.1 à Grise.5), trois structures hybrides avec une combinaison d'enrochements en pied de berge et de techniques végétales dans la partie supérieure de la berge (Hybride.1 à Hybride.3), et quatre structures vertes utilisant le génie végétal (Verte.1 à Verte.4) (Figure 5). Ces rivières sont situées dans des territoires urbains ou périurbains de la région Auvergne-Rhône-Alpes en France. Les berges étudiées ont été caractérisées selon un gradient de végétation.

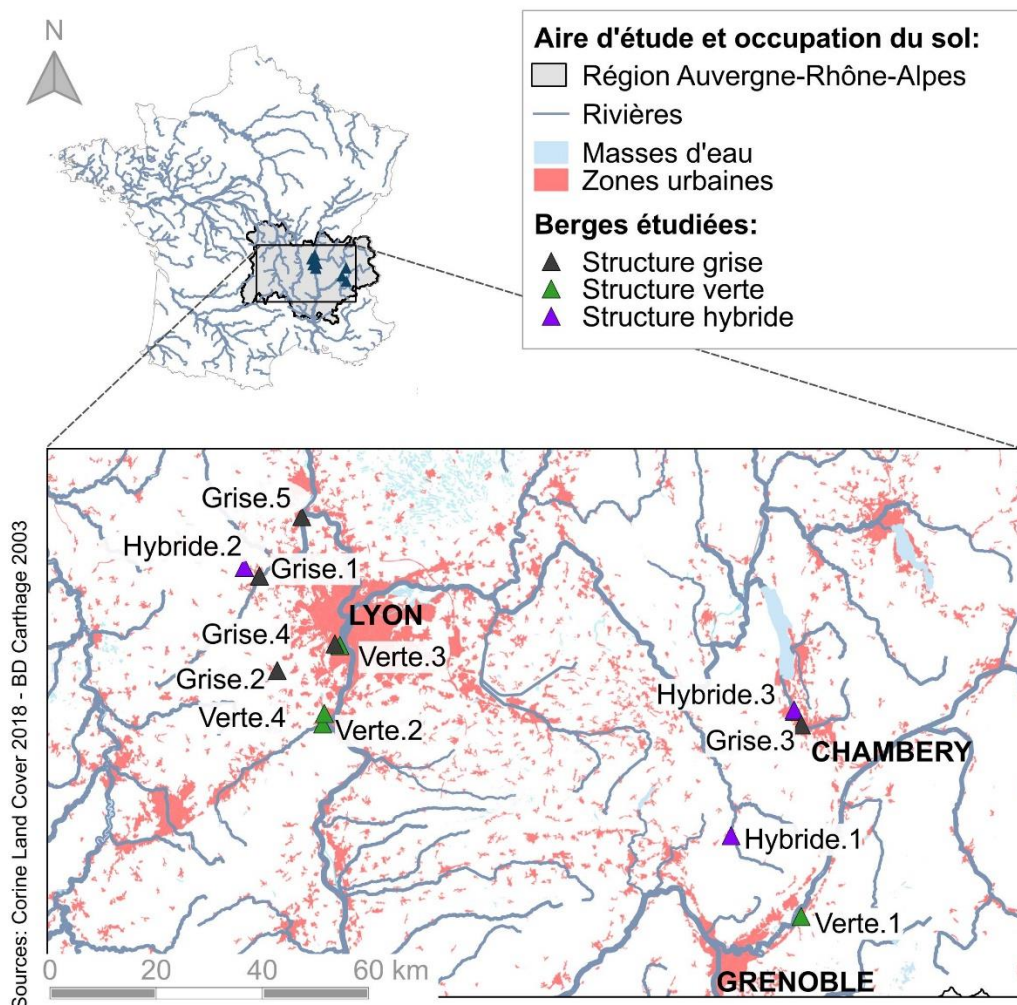


Figure 5 : Aire d'étude et distribution des ouvrages urbains de berge considérés

1.2. Enquête sociologique

Nous avons analysé les perceptions du génie végétal à l'aide d'un photo-questionnaire en ligne créé avec le logiciel LimeSurvey. Cette enquête a été diffusée entre février et mars 2021.

Nous avons cherché à interroger à la fois des profanes et des professionnels (des gestionnaires de milieux naturels, notamment aquatiques) ayant une expertise environnementale variée. Pour les atteindre, nous avons constitué une base de contacts. Les profanes ont été ciblés à l'aide de la presse (journaux locaux et départementaux, presse quotidienne régionale) et de réseaux associatifs (d'activités récréatives, d'intérêt naturaliste, de voisinage, d'étudiants, de mobilité durable) en utilisant leurs adresses électroniques institutionnelles et les réseaux sociaux. Les professionnels ont été ciblés en contactant des institutions ou des réseaux professionnels spécialisés dans la gestion de l'eau et de l'environnement (syndicats de rivière, bureaux d'études, agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse).

Au final, 429 réponses ont été collectées. Nous considérons que cet échantillon est raisonnablement représentatif de la population française en ce qui concerne certains

critères sociodémographiques tels que le sexe (45% de femmes dans notre échantillon contre 49,6% dans la population française) et le lieu de vie (29,1% de résidents ruraux contre 32,8% au niveau national). En revanche, l'échantillon recueilli est nettement déséquilibré en termes d'âge et de niveau d'études, avec un biais en faveur d'une population plus jeune (30 % des 30-44 ans contre 18,3 % au niveau national) et d'un niveau d'études élevé (73,7 % ont un niveau supérieur au baccalauréat contre 30 % au niveau national). Cependant, les diplômes des répondants ne sont pas nécessairement liés au domaine environnemental : 45,2% des personnes interrogées déclarent ne pas avoir d'expertise particulière dans ce domaine de par leur travail ou leur formation (et sont donc considérées comme des profanes), 32,6% déclarent avoir une expertise moyenne, et 22,1% une expertise élevée.

La méthode du photo-questionnaire utilise des photographies comme support d'évaluation des paysages étudiés. Dans cette méthode, les participants ont été invités à évaluer la qualité du paysage représenté sur la photographie selon un ou plusieurs critères définis par l'enquêteur. Les différents scores sont ensuite comparés pour classer les valeurs associées aux différents paysages (Shafer, 1969 ; Le Lay et al., 2012). Dans notre cas, les 12 photographies de berges utilisées (Figure 6) ont été prises sur le terrain lors des relevés écologiques. Un soin particulier a été apporté à l'homogénéité de la composition des photographies (un même angle de vue a été adopté). Le questionnaire était structuré en trois sections. La première section visait à caractériser les valeurs associées aux différents types de structures de berges et à comprendre les critères utilisés pour les évaluer : les répondants ont été invités à sélectionner la structure de berge qu'ils jugeaient la plus et la moins réussie², à justifier leur choix à l'aide d'une question ouverte et à évaluer chacune des structures de berges à l'aide d'une échelle visuelle analogique selon les trois critères de la valeur esthétique, de la valeur récréative et de la vulnérabilité³. La deuxième section s'intéressait à la confiance, aux réticences et aux avantages perçues et exprimées à l'égard des structures de génie végétal. La troisième section visait à caractériser les profils sociodémographiques des répondants, leur rapport à la rivière et leur expertise environnementale, évaluée sur un mode déclaratif⁴.

² L'utilisation du terme "réussi" - vague et largement subjectif dans la façon dont nous pouvons le comprendre - était délibérée, puisque l'objectif de cette question était de comprendre les critères utilisés par les répondants pour évaluer la performance globale des structures de protection de berge.

³ Ces trois critères ont été formulés dans l'enquête de la manière suivante : Dans quelle mesure êtes-vous d'accord avec les affirmations suivantes (0 : pas du tout d'accord / 10 : tout à fait d'accord) : "Cette berge est un beau paysage" (valeur esthétique), "Cette berge est propice aux loisirs" (valeur récréative), "Cette berge est vulnérable à l'érosion, ce qui peut entraîner des inondations" (valeur de vulnérabilité).

⁴ La question suivante a été utilisée pour évaluer l'expertise environnementale : " Avez-vous, étant donné votre métier ou votre formation, une expertise particulière liée à la gestion des milieux aquatiques ou à la gestion de l'environnement ?", les réponses possibles étant "aucune", "moyenne" ou "élevée".

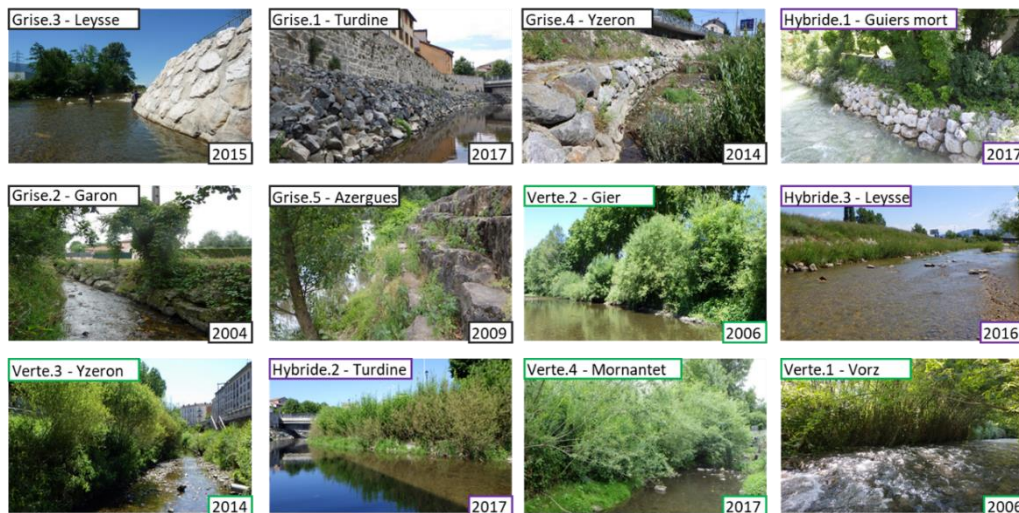


Figure 6 : Jeu de photographies des structures de berge (grises, hybrides et vertes) utilisées dans le photo-questionnaire, classées selon la variable végétation croissante

1.3. Mesures écologiques

Nous avons évalué la valeur écologique des berges au moyen de mesures du recouvrement végétal au sol, de la biodiversité, de la connectivité écologique et de l'ombrage moyen, évaluées lors de relevés de terrain menés en mai et juin 2020. La méthode du point de contact a été utilisée pour estimer la densité de végétation, les caractéristiques du sol en surface et obtenir des indicateurs de biodiversité. Trois transects de 20 mètres de long ont été positionnés parallèlement à la rive (près du rivage, au point le plus haut de la rive et à une hauteur intermédiaire), sur lesquels les espèces, et les caractéristiques du sol (e.g. roche, sol, litière) ont été notés tous les 20 cm. Sur chaque point de contact, les relevés d'espèces ont été classés selon 3 strates (herbes, arbustes ou arbres). Pour évaluer la biodiversité, la richesse spécifique totale, l'indice de Shannon et la densité relative en espèces exotiques envahissantes (EEE) ont été calculés à partir des données recueillies sur les transects.

Pour comprendre les capacités potentielles de connectivité écologique des structures de protection de berges, nous avons évalué : (i) la connectivité transversale du bas vers le haut de la berge, (ii) la connectivité longitudinale de la végétation, et (iii) la connectivité du paysage reliant la bande de végétation riveraine à d'autres bandes de végétation dans le paysage (González del Tánago, et al. 2011) (Tableau 4). La connectivité latérale a été estimée à l'aide de deux variables quantitatives (pente de la berge, couverture végétale de la berge) et de deux variables semi-quantitatives (pente au-delà de la berge dans un rayon de 5 m, et végétation au-delà de la berge dans un rayon de 5 m). La pente a été mesurée à l'aide d'un télémètre laser (TruPulse 200x). La connectivité longitudinale a été estimée à l'aide de deux variables semi-quantitatives représentant la connectivité longitudinale de la végétation le long de la berge, l'une pour les arbustes, l'autre pour les arbres. La connectivité paysagère a été estimée à l'aide d'une variable semi-quantitative représentant le caractère artificiel du paysage entourant la structure de la berge. Les détails du codage de ces variables semi-quantitatives sont disponibles en annexe dans le Tableau X.A.1.

L'ombrage moyen a été utilisé comme indicateur de la fonctionnalité d'« îlot de fraîcheur » et a été estimé sur le transect central à l'aide d'un densiomètre sphérique concave (Ganey, 1994).

En utilisant les valeurs moyennes des cinq variables de couverture du sol et des sept variables de connectivité, nous avons construit, par analyse multivariée, deux indices synthétiques reflétant la similarité entre les berges. Pour ce faire, nous avons utilisé le premier axe de chacune des deux analyses en composantes principales (Annexe., Figure X.A.1). La première variable synthétique représente un gradient de couverture végétale, appelé variable végétation, et la seconde un gradient de connectivité, appelé variable connectivité. Les détails du codage de ces variables semi-quantitatives sont disponibles dans le Tableau X.A.1.

Tableau 4 : Description des variables utilisées pour construire les variables de végétation et de connectivité

Variable	Description (unité)	Moyenne (ET)	Amplitude
<i>Variables de recouvrement du sol</i>			
Enrochement	Recouvrement en enrochement (%)	52.67 (± 37.28)	[5.33–100]
Sol nu	Recouvrement en sol nu (%)	14.47 (± 16.61)	[0–50]
Litière	Recouvrement en litière (%)	31.89 (± 27.63)	[0–69.33]
Herb.cov	Recouvrement de la strate herbacée - <1.5 m (%)	72.06 (± 37.62)	[7.33–100]
ArbustArbor.cov	Recouvrement de la strate arbustive et arborée - over 1.5 m (%)	39.47 (± 36.07)	[0–105.6]
<i>Variables de connectivité</i>			
<u><i>Connectivité transversale</i></u>			
Pente	Pente de la berge (°)	39.14 (± 13.78)	[18.47–60.73]
Veg.cov	Recouvrement végétal de la berge	75.25 (± 37.11)	[7.33–100]
Pente.env	Indice de la pente dans les 5 m au delà de la berge (Classe de 1 à 5)	3.75 (± 1.42)	[1–5]
Latérale.veg	Indice de vegetation dans les 5 m au delà de la berge (Classe de 1 à 5)	2.42 (± 0.90)	[1–5]
<u><i>Connectivité longitudinale</i></u>			
Arbust.connect	Indice de connectivité longitudinale de la strate arbustive (Classe de 1 à 3)	2.67 (± 0.65)	[1–3]
Arbor.connect	Indice de connectivité longitudinale de la strate arborée (Classe de 1 à 3)	1.75 (± 0.87)	[1–3]
<u><i>Connectivité paysagère</i></u>			
CP	Contexte paysagé (Classe de 1 à 5)	2.67 (± 1.50)	[1–5]

1.4. Traitement des données

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R v. 4.1.0 (R Core team 2021).

Pour l'évaluation écologique, les liens entre les variables de végétation, de biodiversité, de connectivité et d'ombrage moyen des 12 berges ont été testés à l'aide d'une corrélation de rang de Spearman non paramétrique en raison de la petite taille de l'échantillon.

Pour l'évaluation basée sur les perceptions, les différences de réponses aux questions fermées ou aux échelles d'évaluation entre les groupes de répondants, notamment en fonction de leur niveau d'expertise, ont été analysées à l'aide de tests du chi deux. Les réponses ouvertes pour justifier le choix de l'ouvrage le plus performant ont été traitées par analyse thématique de contenu, qui repose sur "l'identification, l'analyse et la présentation de motifs (thèmes) au sein des données" (Braun et Clarke, 2006 ; Berelson, 1952).

Pour déterminer si la valeur des ouvrages de berges estimée par les perceptions d'une part et par les mesures écologiques de terrain d'autre part sont corrélées, nous avons produit des modèles mixtes généralisés et étudié la significativité des coefficients estimés. Les évaluations basées sur les perceptions - esthétique, récréative et vulnérabilité – représentaient dans ces modèles les variables dépendantes, tandis que les évaluations basées sur l'écologie - variable de végétation, variable de connectivité, richesse spécifique et ombrage moyen - représentaient les variables explicatives. Les variables écologiques ont été centrées et réduites. Des modèles ont été construits pour chaque paire de valeur perçue et de valeur écologique mesurée. Les perceptions pouvant être influencées par le niveau d'expertise environnementale des personnes interrogées, nous avons considéré cette variable comme un facteur explicatif avec un effet d'interaction. Nous avons ajusté les modèles avec une distribution d'erreur bêta et un coefficient de liaison logit puisque les variables dépendantes des "évaluations basées sur la perception" prenaient des valeurs continues positives dans des intervalles allant de 0 à 10 (Cribari-Neto et Zeileis, 2010). Les variables dépendantes ont été normalisées entre 0 et 1 à l'aide de la méthode de Smithson et Verkuilen (2006). Nous avons choisi le modèle qui s'ajustait le mieux aux données, avec l'ajout ou non d'un effet quadratique selon les équations (1), ou (2). Ensuite, des statistiques de test partiel de Wald (valeur Z) et une valeur p ont été calculées pour chaque coefficient estimé afin de vérifier la significativité des valeurs estimées et des interactions entre les évaluations basées sur l'écologie et le niveau d'expertise déclaré.

Équation (1) : $\text{logit}(\text{valeur perçue}) = \text{variable écologique} * \text{niveau d'expertise déclaré}$

Équation (2) : $\text{logit}(\text{valeur perçue}) = \text{variable écologique} * \text{niveau d'expertise déclaré} + \text{variable écologique}^2$

2. Résultats

2.1. Valeur perçue des différentes techniques de stabilisation des berges

Suite à l'observation du jeu de photographies, les préférences des répondants à l'enquête se sont clairement orientées vers le génie végétal (Figure 7). Les structures Verte.3, Verte.1 et Verte.2 ont été perçues comme les plus réussies par le plus grand nombre de personnes (selon un ordre décroissant). Grise.3 a quant à elle été identifiée comme la structure la moins réussie par 65% des répondants. On peut noter que les préférences des répondants ayant une expertise moyenne ou nulle sont plus variées que celles des répondants ayant une expertise élevée : les répondants ayant une expertise moyenne ou nulle ont parfois déclaré une préférence pour les solutions grises (Grise.5, Grise.2) ou hybrides (Hybride.1), ce qui est rarement le cas des répondants ayant une expertise élevée.

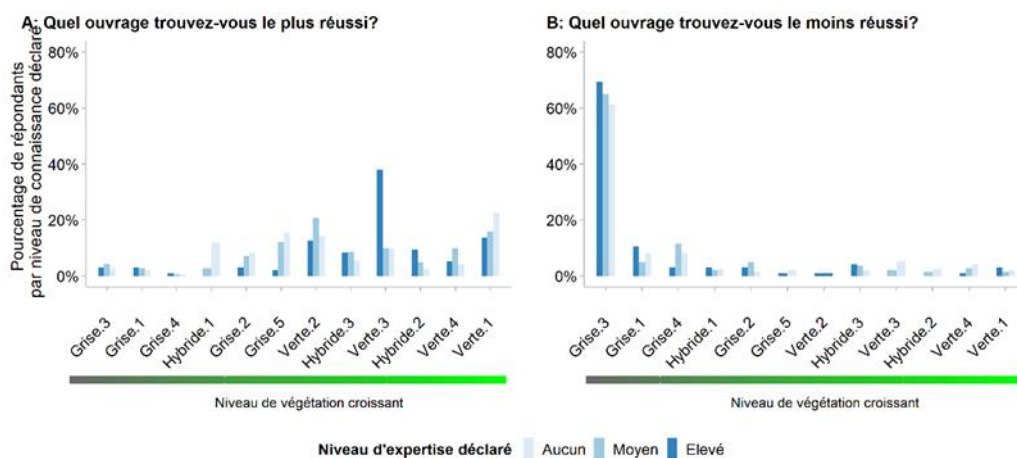


Figure 7 : Pourcentage de répondants ayant sélectionné chaque structure de protection de berge comme la plus (A) et la moins (B) réussie en fonction du niveau d'expertise déclaré (aucun, moyen et élevé, n = 194, 140 et 95, respectivement)

Les solutions vertes étaient de loin les préférées. Toutefois, ces préférences n'étaient que partiellement liées au degré de végétalisation des berges (Figure 7), certaines structures à végétalisation modérée étant jugées comme les plus réussies par un grand nombre de personnes (Verte.2), et certaines structures à forte végétalisation (Hybride.2 et Verte.4) n'étant jugées comme les plus réussies que par un petit nombre de personnes. Les raisons évoquées par les répondants pour justifier leur préférence permettent de mieux comprendre les critères utilisés pour évaluer le succès des structures (Figure 8). La réussite perçue d'un ouvrage dépendait principalement de la naturalité perçue des berges et de la présence de végétation⁵. La naturalité perçue a été significativement plus utilisée par les personnes sans expertise environnementale ($\chi^2 = 9,72$, $p = 0,008$, $df = 2$), tandis que la présence de végétation l'a été par les personnes ayant une expertise élevée ($\chi^2 = 8,69$, $p = 0,013$, $df = 2$). D'autres critères, bien que moins dominants, ont également été mis en évidence dans les réponses. Les

⁵ Dans l'analyse de contenu effectuée, le thème "naturalité" se réfère aux réponses qui ont utilisé des qualificatifs subjectifs tels que "naturel" ou "sauvage" pour décrire les berges, tandis que le thème "végétation" se réfère aux réponses qui ont noté la présence de végétation, sans utiliser de qualificatifs.

personnes sans expertise environnementale ont accordé plus d'importance à l'accès physique et visuel à la rivière ($\chi^2 = 11,535$, $p = 0,031$, $df = 2$), tandis que les personnes ayant une expertise élevée ont accordé plus d'importance à la diversité de la végétation⁶ (stratification et espèces ; $\chi^2 = 33,912$, $p = 4,33 \cdot 10^{-8}$, $df = 2$) et à la fonctionnalité écologique des berges ($\chi^2 = 17,145$, $p = 0,0002$, $df = 2$). Les personnes ayant une grande expertise se sont également davantage référées à la géomorphologie ($\chi^2 = 16,53$, $p = 0,0003$, $df = 2$).

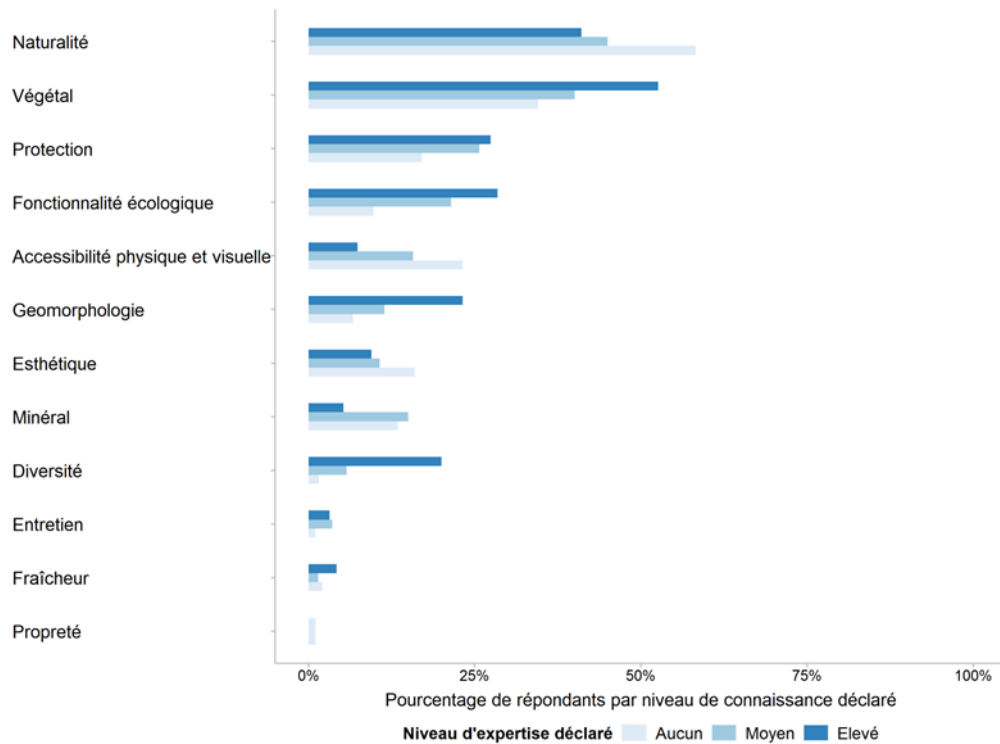


Figure 8 : Critères utilisés par les répondants pour justifier leur choix de la structure la plus réussie et la moins réussie, en fonction de leur niveau d'expertise environnementale

2.2. Interactions entre les valeurs mesurées et perçues des berges

Les mesures écologiques effectuées sur le terrain ont permis d'enregistrer 191 espèces parmi les 7989 comptages effectués dans les strates arborées, arbustives et herbacées des 12 berges. Vingt espèces ont été classées comme espèces exotiques envahissantes (EEE). Les cinq espèces les plus abondantes étaient *Salix purpurea* L. (1 385 fois), *Urtica dioica* L. (523 fois), *Salix viminalis* L. (473 fois), *Rubus fruticosus* L. (406 fois), *Galium aparine* L. (358 fois) et *Anisantha sterilis* L. (338 fois). La richesse spécifique moyenne était de 32 espèces par site, allant de 8 à 52, et était significativement corrélée positivement avec la variable végétation (rho de Spearman = 0,59, $p = 0,049$) (Figure 9).

⁶ Dans l'analyse de contenu effectuée, le thème "biodiversité" se réfère aux réponses qui mentionnent une diversité d'espèces ou de strates végétales ; le thème "fonctionnalité écologique" aux réponses qui mentionnent des habitats en bon état pour la flore et la faune, la connectivité longitudinale et latérale, ou l'ombrage pour les poissons ; et le thème "géomorphologie" aux réponses qui mentionnent les formes du paysage fluvial, telles que la pente des berges ou la largeur du lit.

L'indice de biodiversité de Shannon était en moyenne de 2,4, allant de 1,36 à 2,96. La couverture en EEE dépassait 10 % (jusqu'à 35 %) sur cinq des structures (Grise.1, 5, 2, Verte.4, Grise.4 ; classées par ordre décroissant de couverture en EEE). L'ombrage moyen (allant de 7,8 % à 90,3 %, avec une moyenne de 47 %) et la variable de connectivité ont montré des corrélations positives significatives avec la variable de végétation (rho de Spearman = 0,690 et 0,615, $p = 0,013$ et $0,037$, respectivement).

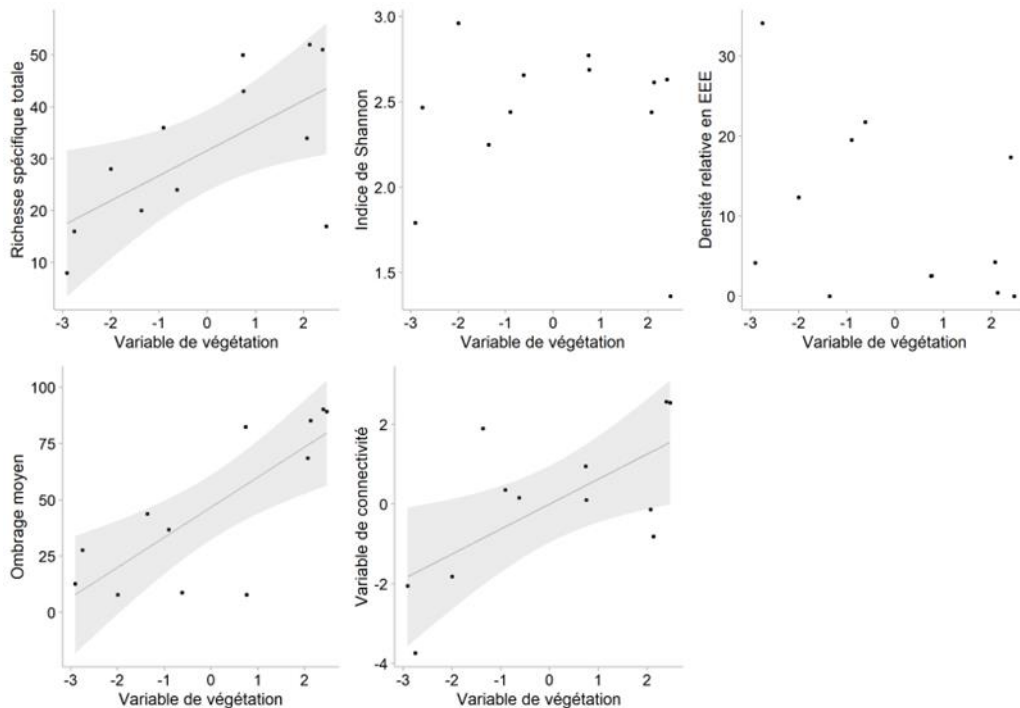


Figure 9 : Variables écologiques (richesse spécifique, indice de Shannon, densité relative en EEE, ombrage moyen et variable de connectivité) en fonction de la variable de végétation des berges échantillonnées ($n=12$). Les lignes grises représentent les relations entre les variables écologiques et la variable végétation, et les zones grises les intervalles de confiance à 95 %.

La Figure 10 montre une relation significative entre chaque type de valeur perçue et chaque variable écologique mesurée sur les sites : variable de végétation, variable de connectivité, richesse spécifique et ombrage moyen. Les équations et les coefficients des modèles sont disponibles en annexe (tableaux X.A.3 et X.A.4).

La valeur esthétique montre une dépendance significative avec chaque variable écologique : plus les berges sont végétalisées et plus la richesse spécifique et la variable de connectivité sont élevées, plus la valeur esthétique perçue est élevée. Cette relation était significativement plus prononcée chez les personnes ayant une expertise élevée, en particulier en ce qui concerne la variable végétation et la richesse spécifique. Ces répondants ont moins bien évalué l'esthétique des berges présentant de faibles valeurs pour les variables écologiques que les répondants ayant une expertise moyenne ou nulle.

La valeur récréative est liée à la fois à la végétation et à la variable de connectivité, et varie en fonction d'une relation quadratique négative significative. De faibles valeurs récréatives ont été attribuées aux berges les moins végétalisées et les plus végétalisées, tandis que les valeurs récréatives les plus élevées ont été attribuées aux berges

modérément végétalisées. Une tendance similaire a été observée pour la variable de connectivité. La valeur récréative perçue montre une augmentation linéaire significative avec la richesse spécifique et l'ombrage moyen. Les répondants ayant une forte expertise ont donné une valeur récréative plus faible aux berges ayant de faibles valeurs de végétation, de richesse spécifique et d'ombrage moyen, comparé aux répondants ayant une expertise moyenne ou nulle.

Enfin, l'évaluation de la vulnérabilité augmente significativement avec les trois variables écologiques : la variable de végétation, la variable de connectivité et la richesse spécifique. Plus les berges sont végétalisées, plus leur diversité et leur connectivité sont grandes, plus elles sont jugées vulnérables à l'érosion. Les personnes ayant une expertise environnementale moyenne ou faible font moins confiance à la protection des berges les plus végétalisées que les personnes ayant une expertise élevée.

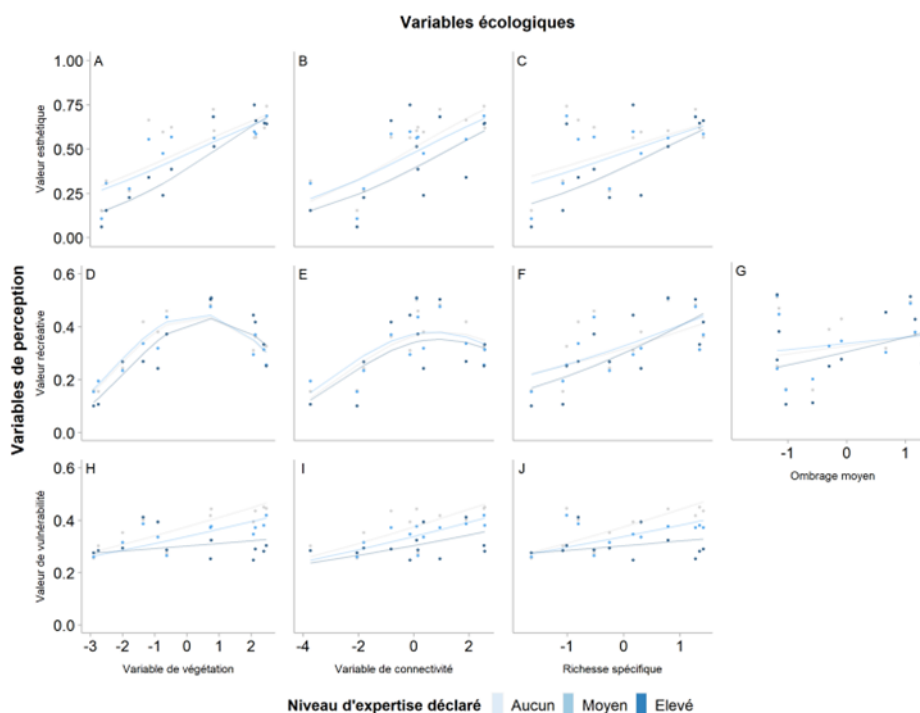


Figure 10 : Relation entre les valeurs perçues (esthétique, récréative et de vulnérabilité) et chaque variable écologique mesurée pour les 12 structures de berge représentées sur les photographies. Toutes les variables écologiques (c'est-à-dire la variable végétation, la variable connectivité, la richesse spécifique et la couverture d'ombre moyenne) sont centrées et réduites. Les points représentent la moyenne des notes attribuées par les 429 personnes interrogées, et les lignes représentent le modèle d'ajustement pour chaque niveau d'expertise environnementale. Les lettres A-J permettent de relier chaque courbe aux équations et coefficients des modèles disponibles dans les tableaux A.3 et A.4 en annexe

2.3. Avantages et inconvénients perçus du génie végétal

Plus de la moitié des personnes interrogées (57%) se sont déclarées très confiantes dans la protection offerte par le génie végétal. Ce niveau de confiance augmente de manière significative avec le niveau d'expertise (46%, 58% et 77% des personnes sans

expertise, avec une expertise moyenne et avec une expertise élevée, respectivement). Ce gradient met en évidence une plus grande réticence à l'égard du génie végétal chez les personnes ayant une expertise moyenne ou nulle (Tableau 5). Les personnes se déclarant peu ou pas confiantes constituent néanmoins une minorité des répondants (7 %), quelle que soit leur expertise.

Tableau 5 : Niveau de confiance dans les structures de génie végétal pour la protection des berges selon le niveau d'expertise environnementale

Si votre propriété devait être protégée de l'érosion du cours d'eau, auriez-vous confiance en ces techniques de génie végétal ?				
	Expertise élevée (%)	Expertise moyenne (%)	Pas d'expertise (%)	Echantillon complet : tous niveaux d'expertises combinés (%)
Tout à fait confiance	77	58	46	57
<i>Un peu confiance</i>	14	24	33	26
<i>Ni confiance, ni pas confiance</i>	5	9	14	10
<i>Pas vraiment confiance</i>	2	6	5	5
<i>Pas du tout confiance</i>	2	3	2	2
<i>Total</i>	100	100	100	100

Les personnes interrogées ont attribué aux structures de génie végétal d'autres avantages que la simple protection des berges (Figure 11). Elles ont souligné leur rôle dans la préservation de la biodiversité urbaine (29,6 %), dans l'esthétique de la ville (11,4 %) et dans l'effet de rafraîchissement (13,8 %). Des différences significatives ont été observées selon le niveau d'expertise en ce qui concerne la biodiversité et l'effet de rafraîchissement ($\chi^2 = 7,04$, $p=0,030$, $df = 2$; et $\chi^2 = 6,28$, $p=0,043$, $df = 2$, respectivement) ; plus le niveau d'expertise est élevé, plus les répondants ont cité les avantages liés à la biodiversité. Plus le niveau d'expertise est faible, plus les répondants ont cité les avantages liés au rafraîchissement.

Près de la moitié des répondants ont indiqué qu'ils n'avaient aucune réticence à l'égard du génie végétal (49,2 %). Toutefois, cette absence de réticence dépend du niveau d'expertise environnementale, les participants les plus experts étant les plus confiants : 42,3 %, 45,7 % et 68,4 % des répondants ayant une expertise respectivement nulle, moyenne et élevée, considèrent que le génie végétal est assez efficace et sûr pour protéger les berges. Si l'on s'intéresse aux raisons des réticences exprimées, les trois les plus citées (à partir d'une liste proposée dans une question à choix multiple) étaient liées au fait que la construction de cette technique implique souvent de détruire la nature en place (10 % ; par exemple, en coupant des arbres), qu'elles sont nouvelles avec un faible recul (8,2 %), et que les berges construites par le génie végétal ont l'air mal entretenues (6,5 % ; par exemple, « les végétaux n'étaient pas bien taillés, ce qui ne fait pas propre et n'est pas joli »). Les raisons des réticences n'étaient pas fortement liées au niveau d'expertise environnementale, à deux exceptions près : la nouveauté des techniques et le manque de recul ($\chi^2 = 6,74$, $p = 0,034$, $df = 2$), mentionnés davantage par les personnes sans expertise ou avec une expertise moyenne ; et la

certitude moindre envers la protection, qui augmente le risque de dommages aux habitations ($\chi^2 = 7,69$, $p = 0,021$, $df = 2$), qui a été mentionnée davantage par les personnes sans expertise. Les réticences liées aux coûts des ouvrages ou à leur invisibilité dans le paysage ont été très peu citées. Tous les résultats sont disponibles dans le Tableau X.A.5 en annexe.



Figure 11 : Avantages (A) et réticences (B) aux ouvrages de génie végétal en fonction du niveau d'expertise environnementale

3. Discussion

Notre travail a permis de mettre en évidence trois résultats principaux que nous discuterons dans les sections suivantes.

1. Quel que soit leur niveau d'expertise, les répondants accordent une plus grande valeur aux berges aménagées par des ouvrages de génie végétal que par du génie civil en raison des bénéfices écologiques et sociaux qu'ils produisent. Cependant, on a pu mettre en évidence une différence dans la façon dont ces bénéfices sont évalués : la plupart des experts ont mentionné davantage les bénéfices écologiques (par exemple, la biodiversité, la connectivité), tandis que les moins experts ont davantage fait référence aux bénéfices socioculturels (par exemple, la naturalité, l'esthétique, les aménités récréatives).

2. Bien qu'il y ait une forte convergence entre ces bénéfices écologiques et socioculturels, nos données montrent également des conflits de valeurs qui pourraient entraver la diffusion des solutions de génie végétal.

3. Le principal point de désaccord entre les experts et les non-experts concerne la qualité de la protection apportée par les solutions de génie végétal. Les personnes les moins expertes ont fait état d'un sentiment de vulnérabilité plus élevé avec les solutions de génie végétal qu'avec les solutions de génie civil, ce sentiment de

vulnérabilité étant une source de réticence importante à l'égard de l'approche par le génie végétal.

3.1. Des valeurs partagées concernant les bénéfices écologiques et sociaux induits par le génie végétal

Nos résultats montrent une différence de perception entre ceux qui ont déclaré un niveau élevé d'expertise environnementale et ceux qui ont déclaré ne pas avoir une telle expertise. Les premiers se concentrent sur les bénéfices écologiques, tandis que les seconds se réfèrent davantage aux bénéfices socioculturels. Ces perceptions différentes peuvent s'expliquer par des relations différentes aux écosystèmes urbains. Dans le premier cas, nous observons un prisme cognitif dans la relation, avec une approche scientifique des écosystèmes de rivière qui met l'accent sur leur fonctionnalité (par exemple, sur leur diversité végétale, sur la qualité des habitats, sur leur connectivité). Dans le second cas, on observe un prisme sensible dans la relation, avec une approche expérientielle des écosystèmes qui met l'accent sur des enjeux relationnels (ex : maintien d'un accès visuel et physique à la rivière, contribution à la fraîcheur de la ville). Pour évaluer la valeur des berges stabilisées par différentes techniques (vertes, hybrides et grises), la plupart des experts ont donc tendance à s'appuyer davantage sur des critères écologiques fonctionnels, tandis que ceux qui ont le moins d'expertise s'appuient davantage sur des critères relationnels. Ces différences liées à l'expertise pour évaluer la qualité des milieux aquatiques ont déjà été mises en évidence dans des travaux antérieurs (Cottet et al., 2013 ; Boyer et al., 2018). Certains auteurs en appellent même à un tournant relationnel dans les champs scientifiques liés à la durabilité, de manière à disposer de connaissances plus diverses pour la prise de décision (West et al., 2020). Bien que les critères d'évaluation diffèrent selon l'expertise, les résultats des évaluations sont globalement convergents : les berges végétalisées, également perçues comme les plus naturelles, sont fortement valorisées, et les berges aménagées par des solutions vertes sont préférées à celles aménagées par des solutions grises. Kabisch et al. (2017) avaient déjà souligné cette convergence entre les enjeux écologiques et sociaux en lien avec l'utilisation des SFN en territoire urbain. Dans le cas du génie végétal, la végétalisation des berges bénéficie généralement à la fois à la fonctionnalité des écosystèmes et au bien-être des citoyens. C'est pourquoi certains auteurs qualifient ces techniques de solutions gagnant-gagnant (Anderson et al., 2022). Anderson et al. (2022) ont également souligné, dans leurs travaux relatifs aux contextes côtiers et ruraux, la valeur accordée aux bénéfices écologiques et sociaux induits par les SFN. Ils ont démontré que ces fonctions dites auxiliaires sont plus appréciées que les fonctions primaires de stabilisation des berges et de protection des biens et des personnes. Cette convergence de valeurs est susceptible de renforcer la cohésion du réseau d'acteurs qui gravite autour de ces solutions, créant ainsi des conditions favorables à leur diffusion (Akrich, et al., 2006). Les bénéfices écologiques et sociaux induits par le génie végétal en territoire urbain constituent ainsi un levier important pour sa promotion dans la mesure où ils sont largement reconnus et valorisés.

3.2. Des valeurs parfois concurrentes qui exigent certains compromis

Malgré la reconnaissance partagée des bénéfices écologiques et sociaux apportés par le génie végétal, les valeurs différentes accordées aux fonctionnalités écologiques et aux liens relationnels selon le niveau d'expertise de l'évaluateur (cf. partie 4.1.) peuvent conduire à des conflits et à l'émergence de controverses à l'égard du génie végétal. Tout d'abord, la valeur récréative des berges peut entrer en conflit avec leur valeur écologique : une végétation riveraine dense, bien que favorable à la continuité écologique, a été considérée dans notre enquête comme moins adaptée aux pratiques récréatives, surtout par des personnes sans expertise, probablement parce qu'elle empêche l'accès physique et visuel à la rivière. L'accès à la rivière est considéré comme une dimension importante des aménités récréatives des berges dans un contexte urbain, notamment parce qu'il contribue à l'expérience locale de la nature dans des territoires où la présence de la nature est marginale (Gobster et Westphal, 2004). Adam et al. (2020) ont montré que les sentiers qui permettent d'accéder facilement à un cours d'eau contribuent à augmenter sa valeur perçue. Ainsi, certains auteurs appellent à restaurer la « connectivité sociale » des rivières urbaines (Kondolf et Pinto, 2017). À l'inverse, les activités récréatives menées aux abords des cours d'eau peuvent nuire à la qualité écologique du site (ex : piétinement du sol, dérangement de la faune, pollution...) (Venohr et al., 2018 ; Meyer et al., 2021).

D'autres exemples de conflit de valeurs ont pu être mis en évidence en fonction du niveau d'expertise, en lien notamment avec la définition que les répondants donnent à la Nature. Lors de l'évaluation des berges, les personnes ayant un niveau d'expertise élevé ont eu tendance à se référer au concept de biodiversité et à s'appuyer sur des indicateurs synthétiques prenant en compte à la fois la richesse spécifique et l'abondance relative des espèces dans un assemblage donné. Cette définition de la nature est sans doute éloignée de celle des personnes sans expertise, qui peuvent comprendre la nature d'une manière moins technique, mais davantage liée à des dimensions esthétiques, récréatives ou spirituelles (Gobster, 2001 ; Buijs, 2009). Par exemple, nos résultats ont montré que certains non-experts étaient réticents à l'égard du génie végétal car ils jugeaient les paysages en résultant comme insuffisamment entretenus. Cela fait écho à des travaux antérieurs montrant que les profanes apprécient les paysages naturels considérés comme propres et ordonnés, et faisant l'objet de soins de la part de l'homme (Nassauer, 1992). Cette différence dans la définition de la nature, et par extension dans ce que signifie restaurer la nature, peut conduire à des conflits. L'utilisation du génie végétal implique souvent de redessiner la morphologie des berges et donc d'enlever la végétation existante, y compris les arbres. Or, pour beaucoup de profanes, les arbres représentent un élément symbolique de la nature et possèdent donc une grande valeur spirituelle (Dwyer et al., 1991). L'abattage des arbres peut en conséquence susciter une forte opposition, même dans un contexte de la restauration écologique. Cela met en évidence un décalage entre l'approbation des objectifs de la restauration et la désapprobation des moyens pour les atteindre (Barro et Bright, 1998). La transformation importante des paysages induite par le génie végétal peut par ailleurs entrer en conflit avec l'attachement des gens à un lieu. Han et al. (2023) ont ainsi démontré que le concept de « place identity » était un prédicteur négatif d'une attitude favorable à l'égard des SFN.

La diffusion du génie végétal pour protéger les berges pourrait donc bénéficier de certaines adaptations de la part des acteurs concernés par l'innovation. Selon Callon et al. (1999), il n'y a "pas d'adoption sans adaptation", c'est-à-dire que le destin d'une innovation sociotechnique repose sur la transformation conjointe de l'environnement (y compris l'environnement social) et du contenu de l'innovation, par le biais de compromis, de négociations et d'adaptations successives pour faire correspondre les attentes des acteurs avec les solutions proposées. Dans le cas du génie végétal, on peut imaginer des compromis tels que la création de fenêtres dans le corridor de la végétation riveraine pour favoriser l'accès physique et visuel à l'eau, et privilégiant des scénarios limitant au maximum la suppression des arbres existants lors de la conception d'un projet.

3.3. Perception d'un risque élevé chez les profanes

Les plus grandes différences de perception selon l'expertise concernent la perception du risque et le sentiment de vulnérabilité induits par l'utilisation du génie végétal. Selon Anderson et al. (2022), les SFN ne sont acceptées que si l'on se sent efficacement protégé. Notre enquête montre que la perception du risque induit une certaine réticence à l'égard de l'utilisation du génie végétal, cette réticence augmentant au fur et à mesure que l'expertise environnementale diminue. Les professionnels impliqués dans des projets de SFN (Seddon et al., 2020 ; Brillinger et al., 2021) ont déjà noté la réticence des riverains et des élus vis-à-vis de ces techniques, qui remettent en cause leur efficacité pour faire face aux risques. Ces acteurs perçoivent l'utilisation des solutions grises comme rassurantes, moins risquées, plus contrôlées, et avec une antériorité plus importante. Il est vrai que la protection assurée par le génie végétal est difficile à modéliser en raison de la complexité des systèmes vivants, notamment des interactions entre la végétation, le sol, l'eau et d'autres organismes vivants (herbivores, agents pathogènes). La conception des ouvrages de génie végétal est généralement basée sur des approches empiriques (Evette et al., 2018). Si les professionnels de la filière du génie végétal et la littérature scientifique soulignent effectivement la moindre efficacité des ouvrages de génie végétal immédiatement après leur installation, ils ne remettent pas en cause leur efficacité à plus long terme (Moreau et al., 2022). En effet, certains auteurs soulignent l'augmentation des performances du génie végétal au fil du temps et la nécessité de développer les connaissances sur ce sujet (Pinto et al 2016). La diffusion de ces solutions nécessite donc davantage de preuves de leur efficacité en termes de protection contre les risques. Les gestionnaires manquent généralement de telles preuves lorsqu'ils souhaitent promouvoir ces solutions auprès du public et des élus (Brillinger et al., 2021). Sans preuve, et face à la remise en cause de la légitimité de l'expert dans l'action publique (Damay et al., 2011), la diffusion des solutions de génie végétal pourrait être compromise au regard des forts enjeux de protection des biens et des personnes. Pour remédier à cette situation, certains experts réclament la mise en place de projets pilotes pouvant servir de vitrine et démontrer aux acteurs l'efficacité des solutions de génie végétal, que ces derniers soient ou non des experts des milieux aquatiques (Evette et al., 2023).

PARTIE 4 – PRINCIPALES CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nos résultats mettent en lumière la spécificité des techniques de génie végétal en contexte urbain. Plus qu'un changement technique, ces techniques nécessitent un changement dans la définition du problème, le diagnostic et la proposition d'action. En effet, travailler avec le vivant implique de redéfinir la performance des ouvrages de contrôle de l'érosion, de renégocier le partage et l'acceptation des risques, et d'adopter une posture professionnelle humble et audacieuse. En définitive, les techniques de génie végétal s'inscrivent dans le "paradigme adaptatif", basé sur l'expérimentation et l'affinement itératif des stratégies. Il rompt avec le paradigme dominant "prédire et contrôler", ce qui pourrait expliquer que les techniques de génie végétal restent encore marginales dans la gestion des cours d'eau, malgré leurs avantages, *a fortiori* en territoire urbain.

Notre étude permet d'identifier trois leviers pour une utilisation plus large du génie végétal en ville :

- (i) Une évaluation plus intégrative des bénéfices écologiques, économiques et sociaux liés aux techniques de protection de berge et qui semblent aujourd'hui sous-évalués. Cette évaluation apparaît d'autant plus importante que ces bénéfices sont largement reconnus et valorisés par l'ensemble des acteurs, experts ou profanes en matière d'environnement, et qu'à ce titre, ils représentent un levier important pour la promotion de ces techniques.
- (ii) L'encouragement des échanges entre pairs et des retours techniques sur les expériences de terrain, afin de favoriser l'apprentissage social entre praticiens ; mais aussi afin de pouvoir faire la démonstration de l'efficacité de ces solutions en termes de protection, y compris dans des territoires à forts enjeux en matière de protection des biens et des personnes.
- (iii) Une meilleure inclusion des habitants et des élus dans le choix de la technique de contrôle de l'érosion, puisqu'il ne s'agit pas seulement d'un choix technique mais qu'il questionne aussi notre acceptation du risque et la place de la nature dans les villes. A cet égard, la diffusion des techniques de génie végétal peut nécessiter certains compromis pour arbitrer entre de potentielles concurrences entre les bénéfices écologiques et sociaux induits par des telles techniques.

La diffusion plus large des solutions de génie végétal dans les territoires urbains ouvre donc plusieurs perspectives de travail tant opérationnelles que scientifiques.

Sur le plan opérationnel, il s'agit de créer et d'animer des réseaux de professionnels favorisant les retours d'expérience et l'apprentissage mutuel, tant sur les plans techniques (retours d'expérience, dans différents contextes biophysiques et territoriaux, selon les types de technique utilisés, leur résistance, les gains en termes de biodiversité...) que sociaux (retours d'expérience sur les démarches de participation

avec les parties prenantes, sur les freins liés aux perceptions et les bénéfices observés en termes d'appropriation des espaces riverains ou de qualité du cadre de vie...). Il s'agit aussi de créer des sites pilotes instrumentés permettant non seulement un suivi des aménagements et une évaluation des performances dans la durée (possiblement accompagné par les scientifiques), mais pouvant aussi servir de sites vitrines pour démontrer aux parties prenantes la performance de ces solutions, tant sur les plans de la protection contre les risques, que sur les plans écologiques, sociaux et économiques.

Sur le plan scientifique, nos résultats appellent à la poursuite des travaux en écologie pour évaluer la résistance des ouvrages et l'efficacité des protections mises en place. Il encourage également le développement de travaux en sciences sociales pour accompagner la réflexion sur l'acceptation des risques liés à l'utilisation des solutions fondées sur la nature. Enfin, notre étude montre l'importance d'un regard juridique sur les questions réglementaires liées à l'utilisation des SFN, notamment la clarification et la définition des responsabilités.

Bibliographie

- Acharya, M.S., 2020. "Bamboo Crib Wall: A Sustainable Soil Bioengineering Method to Stabilize Slopes in Nepal." *Journal of Development Innovations* 4 (1): 99–118. <https://ideas.repec.org/a/kqi/journal/2020-4-1-7.html>.
- Adam, P., and Bernard, L., 2008. *Le Génie Végétal : Un Manuel Technique Au Service de l'aménagement et de La Restauration Des Milieux Aquatiques*. Edited by Ministère de l'écologie et du développement durable. Paris: Documentation française.
- Agrawal, A., 1995. « Dismantling the divide between indigenous and western knowledge », *Development and Change*, 26(3), p. 413-439
- Akrich, M., Callon, M., Latour, B., 2006. *Sociologie de la traduction : textes fondateurs*. Presses des Mines.
- Anderson, C. C., Renaud, F. G., 2021. A review of public acceptance of nature-based solutions: the 'why', 'when', and 'how' of success for disaster risk reduction measures. *Ambio*. 50(8), 1552-1573.
- Anderson, C. C., Renaud, F. G., Hanscomb, S., Gonzalez-Ollauri, A., 2022. Green, hybrid, or grey disaster risk reduction measures: What shapes public preferences for nature-based solutions?. *Journal of Environmental Management*. 310, 114727.
- Andersson, E., Barthel, S., Borgström, S., Colding, J., Elmqvist, T., Folke, C., Gren, Å., 2014. Reconnecting cities to the biosphere: stewardship of green infrastructure and urban ecosystem services. *Ambio*. 43, 445-453.
- Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2020. "La Gestion de l'eau En France." 2020. https://www.eaurmc.fr/jcms/vmr_6415/fr/la-gestion-de-l-eau-en-france.
- Alonso, L., and Renard, F., 2020. "A Comparative Study of the Physiological and Socio-Economic Vulnerabilities to Heat Waves of the Population of the Metropolis of Lyon (France) in a Climate Change Context." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (3). <https://doi.org/10.3390/ijerph17031004>.
- Arnould, P., Le Lay, Y.-F., Dodane, C., Méliani, I., 2011. "La Nature En Ville : L'improbable Biodiversité." *Geographie Economie Societe* 13 (1): 45–68. <https://doi.org/10.3166/ges.13.45-68>.
- Aubriot, O., Riaux, J., 2013. *Savoirs sur l'eau: les techniques à l'appui des relations de pouvoir?*. Autrepart. 2, 3-26.
- Bariteau, L., Bouchard, D., Gagnon, G., Levasseur, M., Lapointe, S., Bérubé, M., 2013. "A Riverbank Erosion Control Method with Environmental Value." *Ecological Engineering* 58 (September): 384–92. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.004>.
- Barles, S., and Thébault, E., 2018. "Des Réseaux Aux Écosystèmes : Mutation Contemporaine Des Infrastructures Urbaines de l'eau En France." *Tracés*, no. 35: 117–36. <https://doi.org/10.4000/traces.8299>.
- Bark, Rosalind H., Martin-Ortega, J., Waylen, K. A., 2021. Stakeholders' views on natural flood management: implications for the nature-based solutions paradigm shift? *Environ. Sci. Pol.* 115, 91–98.
- Barnaud, C., and Antona, M., 2014. "Deconstructing Ecosystem Services: Uncertainties and Controversies around a Socially Constructed Concept." *Geoforum* 56: 113–23. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2014.07.003>.

- Barnaud, C., Corbera, E., Muradian, R., Salliou, N., Sirami, C., Vialatte, A., Choisis, J.-P., et al., 2018. "Ecosystem Services, Social Interdependencies, and Collective Action: A Conceptual Framework." *Ecology and Society* 23 (1). <https://doi.org/10.5751/ES-09848-230115>.
- Barone, S., and Dedieu, C., 2015. "GEMAPI : La Réforme de l'eau Au Milieu Du Gué." *Pouvoirs Locaux : Les Cahiers de La Gouvernance Publique* 3: 9–15. <https://hal.inrae.fr/hal-02602940>.
- Barone, S., Sannier, B., Razès, M., Campardon, M., Guérin-Schneider, L., and Richard-Ferroudji, A., 2017. "Qui Sont Les « élus de l'eau » ? À Propos de l'investissement Sectoriel Des Élus Locaux." *Développement Durable et Territoires*, no. Vol. 8, n°2 (July). <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.11832>.
- Berelson, B., 1952. *Content analysis in communication research*, Glencoe, Ill.: Free Press, 220p.
- Bergou, N., Hammoud, R., Smythe, M., Gibbons, J., Davidson, N., Tognin, S., ... & Mechelli, A. (2022). The mental health benefits of visiting canals and rivers: An ecological momentary assessment study. *Plos one*, 17(8), e0271306.
- Bonin, L., Evette, A., Frossard, P.-A., Prunier, P., Roman, D. and Valé N., 2013. *Génie Végétal En Rivière de Montagne - Connaissances et Retours d'expériences Sur l'utilisation d'espèces et de Techniques Végétales : Végétalisation de Berges et Ouvrages Bois*. Union Europeenne, Interreg, Confédération Suisse.
- Bonin, S., 2007. "Fleuves En Ville: Enjeux Écologiques et Projets Urbains." *Strates. Matériaux Pour La Recherche En Sciences Sociales* 13 (mis en ligne le 22 octobre 2008).
- Born Van Den, R.J.G., Lenders R.H.J., De Groot, W.T., and Huijsman, E., 2001. "The New Biophilia: An Exploration of Visions of Nature in Western Countries." *Environmental Conservation* 28 (1): 65–75. <https://doi.org/10.1017/S0376892901000066>.
- Bouleau, G., 2015. "L'agence de l'eau n'est Pas Un Guichet. Les Spécificités de l'instruction Des Aides Environnementales." In *Les Activités Professionnelles à l'épreuve de l'environnement*, edited by Isabelle Arpin, Gabrielle Bouleau, Jacqueline Candéau, and Audrey Richard-Ferroudji, 169–88. Octares.
- Bourblanc, M., 2013. Les trajectoires bifurquées de la « Réserve écologique » sud-africaine : d'une logique aménagiste à une logique écologique. *Autrepart*. 65, 27-45.
- Boyer, A. L., Comby, E., Flaminio, S., Le Lay, Y. F., Cottet, M., 2019. The social dimensions of a river's environmental quality assessment. *Ambio*. 48, 409-422.
- Braun, V., Clarke, V., 2006. Using thematic analysis psychol. *Qualit. res. psychol.* 3 (2), 77–101.
- Brillinger, M., Henze, J., Albert, C., Schwarze, R., 2021. Integrating nature-based solutions in flood risk management plans: A matter of individual beliefs?. *Science of The Total Environment*. 795.
- Brun, A., Caltran, H., Garcias, P., and Albertin, J., 2018. "Recréer La Rize, Une Rivière Disparue à Lyon : Diagnostic et Premières Orientations." In *Novatech, 9e Conférence Internationale*. Lyon.
- Brun, A., Caltran, H., Maléfant, L., and Garcias, P., 2018. "La Rivière Imaginée. Pourquoi et Comment Récréer La Rize à Lyon?" *Géocarrefour* 92 (92). <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.10430>.
- Buijs, A. E., 2009. Lay people's images of nature: Comprehensive frameworks of values, beliefs, and value orientations. *Society and Natural Resources*. 22(5), 417-432.
- Burel F. et Baudry, J., *Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*, Paris, Tech.& Doc., 1999

Callon, M., Lhomme, R., Fleury, J., 1999. Pour une sociologie de la traduction en innovation. *Recherche & Formation*, 31, 113-126.

Callon, M., Lascoumes, P., Barthe, Y., 2001. *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*, Paris, Le Seuil, 358 pages.

Carré, C., 2011. "Les Petites Rivières Urbaines d'Île-de-France. Découvrir Leur Fonctionnement Pour Comprendre Les Enjeux Autour de Leur Gestion et de La Reconquête de La Qualité de l'eau." Paris: Agence de l'Eau Seine-Normandie. <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-00671351>.

Castellar, J., Popartan, L., Pueyo-Ros, J., Atanasova, N., Langergraber, G., Samuel, I., Corominas, L., Comas, J., Acuna, V., 2021. Nature-based solutions in the urban context: terminology, classification and scoring for urban challenges and ecosystem services. *Sci. Total Environ.* 779, 146237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146237>.

Cavaillé, P., 2014. "Biodiversité Spécifique et Fonctionnelle Des Berges de Cours d'eau : Caractérisation Des Ouvrages de Protection de Berges Suivant Un Gradient de « naturalité »,» 1–220.

Cavaillé, P., Cavaillé, P. Evette, A., and Huyghe, G., 2015. "Quelle Biodiversité Pour Les Berges Aménagées ?," no. September.

Cavaillé, P., Dommange, F., Daumergue, N., Loucougaray, G., Spiegelberger, T., Tabacchi, E., and Evette, A., 2013. "Biodiversity Assessment Following a Naturality Gradient of Riverbank Protection Structures in French Prealps Rivers." *Ecological Engineering* 53: 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.105>.

City of Calgary. (2017). *The Riparian Action Program: A Blueprint for Resilience*. 72. <https://www.calgary.ca/content/dam/www/uep/water/documents/water-documents/riparian-action-program-report.pdf>

Clark, J. E., and Howell, J. H., 1992. "Development of Bioengineering Strategies in Rural Mountain Areas." *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions. Proc. International Symposium, Chengdu, 1992*, no. 209: 387–97.

Cohen-Schacham, Emmanuelle, G Walters, C Janzen, and S Maginnis. 2016. "Nature-Based Solutions to Address Global Societal Challenges." *Nature-Based Solutions to Address Global Societal Challenges*. Gland, Switzerland. <https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2016.13.en>.

Cottet, Marylise, Marie Augendre, Mathilde Bozonnet, Vincent Brault, Dimitri Magnet, Jeannice Marchand, Dad Roux-Michollet, Marie-Laure Trémélo, Hervé Tronchère, and Lise Vaudor. 2014. "Traquer Le Regard, Vers Une Caractérisation Des Bénéfices Sociaux Induits Par Les Travaux de Restauration." Lyon. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01098183/document>.

Cottet, Marylise, Anne Rivière-Honegger, and Hervé Piegay. 2010. "Mieux Comprendre La Perception Des Paysages de Bras Morts En Vue d'une Restauration Écologique : Quels Sont Les Liens Entre Les Qualités Esthétique et Écologique Perçues Par Les Acteurs ?" *Http://Journals.Openedition.Org/Norois*, no. 216 (November): 85–103. <https://doi.org/10.4000/NOROIS.3408>.

Cottet, M., Piégay, H., & Bornette, G. (2013). Does human perception of wetland aesthetics and healthiness relate to ecological functioning?. *Journal of environmental management*, 128, 1012-1022.

Cousins, Joshua J. 2021. "Justice in Nature-Based Solutions: Research and Pathways." *Ecological Economics* 180 (February): 106874. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106874>.

- Cribari-Neto, F., Zeileis, A., 2010. Beta Regression in R. *J. Stat. Softw.* 34.
- Damay, L., Duez, D., Denis B., 2011. Introduction "Savoirs experts et profanes dans la construction des problèmes publics", in Damay, L., Duez, D., and Denis, B. (eds), *Savoirs experts et profanes dans la construction des problèmes publics*, Publications des Facultés universitaires Saint-Louis : Bruxelles, p.9-25.
- De Sardan, O., 2004. La rigueur du qualitatif. *L'anthropologie comme science empirique. Espaces Temps* 84 (1), 38–50. <https://doi.org/10.3406/espato.2004.4237>.
- Didier, Christelle, and Kristoff Talin. 2015. "Attitudes et Dynamiques Environnementales Des Ingénieurs." *SociologieS*, no. Enjeux environnementaux et dynamiques des groupes professionnels, : 0–19. <https://sociologies.revues.org/5105>.
- Diemont, Stewart A.W., Timothy J. Lawrence, and Theodore A. Endreny. 2010. "Envisioning Ecological Engineering Education: An International Survey of the Educational and Professional Community." *Ecological Engineering* 36 (4): 570–78. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.004>.
- Doré, Antoine, Frédéric Gosselin, and Freddy Rey. 2014. "L'écologie Au Service de l'ingénierie : L'organisation d'un Collectif Scientifique et Pratique." In *Ingénierie Écologique Action Par et/Ou Pour Le Vivant ?*, Synthèses, 139–49. Quae.
- Dournel, Sylvain, and Bertrand Sajaloli. 2012. "Les Milieux Fluviaux et Humides En Ville, Du Déni à La Reconnaissance de Paysages Urbains Historiques." *Urban History Review. Revue d'histoire Urbaine* 41 (1): 5–21.
- Douvinet, Johnny, Arnaud Anselle, Stéphanie Defossez, and Anne Sophie Denolle. 2011. "Les Maires Face Aux Plans de Prévention Du Risque Inondation (PPRI)." *Espace Géographique* 40 (1): 31–46. <https://doi.org/10.3917/eg.401.0031>.
- Druard, Philippe, Martine Leclercq, Marie-Anne Joussemet, Jerry Bender, Anne Chandelier, Dominique Mingeot, Jean-François Hausman, et al. 2013. "Construction et Développement d'une Filière de Production d'écotypes Ligneux Pour l'application Des Techniques Végétales à La Renaturation Des Berges de Cours d'eau." In *Renaturation Des Berges de Cours d'eau et Phytoremédiation*, edited by Philippe Druard, Claude Husson, and Paul Roger, 121–55. Les Presses agronomiques de Gembloux.
- Dwyer, J. F., Schroeder, H. W., Gobster, P. H., 1991. The significance of urban trees and forests: toward a deeper understanding of values. *Journal of Arboriculture*. 17(10), 276-284.
- El-Zein, Abbas H., and Chris Hedemann. 2016. "Beyond Problem Solving: Engineering and the Public Good in the 21st Century." *Journal of Cleaner Production* 137 (November): 692–700. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.129>.
- Evette, A., Jaymond, D., Recking, A., Piton, G., Rauch, H.P., Frossard, P.-A., 2018. Mechanical resistance limits of soil bioengineering works for riverbank protection, 6. <https://hal.inrae.fr/hal-02608705>.
- Evette, André, Frank Baz, Paul Cavallé, Pierre-André Frossard, and Pierre Raymond. 2015. "Quelles Techniques Pour Végétaliser Des Enrochements de Berges de Cours d'eau ?" *Sciences Eaux & Territoires* 19: 1–7.
- Evette, André, and Pierre-André Frossard. 2009. "Les Végétaux Ont Du Génie." *Espaces Naturels*, 2009.

- Evette, André, Sophie Labonne, Freddy Rey, Frederic Liebault, Oliver Jancke, and Jacky Girel. 2009. "History of Bioengineering Techniques for Erosion Control in Rivers in Western Europe." *Environmental Management* 43 (6): 972–84. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9275-y>.
- Evette, André, Caroline Zanetti, Paul Cavaillé, Fanny Dommaget, Patrice Mériaux, and Michel Vennetier. 2014. "La Gestion Paradoxale Des Ripisylves Des Cours d'eau de Piedmont Alpin Endigués." *Revue de Géographie Alpine*, no. 102–4: 0–14. <https://doi.org/10.4000/rga.2212>.
- Evette, A., Poulin, M., Cottet, M., Moreau, C., 2023. Promouvoir le génie végétal au Québec. *Sciences Eaux & Territoires*, 43, 73–80.
- Ewing, Kern, and Jim Fridley. 2017. "Ecological Engineering Principles in a Restoration Curriculum." *Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.050>.
- Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., de Boissezon, B., Vandewoestijne, S., 2017. Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environmental Research*. 159, 509–518.
- Fischer, F., 2004. "Citizen deliberation and the problem of expertise: resituating knowledge in practical reason", in Castagna, B., Gallais, S., Ricaud, P., and Roy, J.-P. (eds), *La situation délibérative dans le débat public*, vol. 1, Presses universitaires François-Rabelais, Tours.
- Flaminio, Silvia, Marylise Cottet, and Yves François Le Lay. 2015. "A La Recherche de l'Yzeron Perdu : Quelle Place Pour Le Paysage Dans La Restauration Des Rivières Urbaines ?" *Norois*, no. 237: 65–79. <https://doi.org/10.4000/norois.5793>.
- Fromentin, T., and Wojcik, S., 2008. *Le profane en politique. Compétences et engagements du citoyen*, L'Harmattan, Paris, 2008.
- Frossard, Pierre-André, and André Evette. 2009. "Le Génie Végétal Pour La Lutte Contre l'érosion En Rivière : Une Tradition Millénaire En Constante Évolution." *Ingénieries-Eau Agriculture Territoires*, 99–109.
- Gallet, S., R. Jaunatre, B. Regnery, J.-F. Alignan, A. Heckenroth, I. Muller, I. Bernez, et al. 2017. "L'écologie de La Restauration En France. Dynamique Actuelle et Rôle d'un Réseau Multi-Acteurs, REVER." www.revue-naturae.fr.
- Ganey, J., 1994. Technical Note A Comparison of Two Techniques for Measuring Canopy Closure. *Western Journal of Applied Forestry*. 9, 21–23.
- Ghiotti, Stéphane. 2009. "La Patrimonialisation Des Fleuves et Des Rivières. Une Comparaison France-Liban." *Mondes En Développement* 37 (1): 73–91. <https://doi.org/10.3917/med.145.0073>.
- Giannakis, Elias, Adriana Bruggeman, Dimitra Poulou, Christos Zoumides, and Marinos Eliades. 2016. "Linear Parks along Urban Rivers: Perceptions of Thermal Comfort and Climate Change Adaptation in Cyprus." *Sustainability* 8 (10): 1023. <https://doi.org/10.3390/su8101023>.
- Girel, Jacky. 1996. "La Prise En Compte de l'histoire Dans La Gestion Des Corridors Fluviaux : Les Enseignements Des Aménagements Anciens / Historical Reconstruction and the Present Management of Stream Corridors : Lessons from Past Techniques." *Revue de Géographie de Lyon* 71 (4): 341–52. <https://doi.org/10.3406/geoca.1996.4352>.
- Gobster, P. H., 2001. Visions of nature: conflict and compatibility in urban park restoration. *Landscape and urban planning*. 56(1-2), 35-51.
- Gobster, P. H., Westphal, L. M., 2004. The human dimensions of urban greenways: planning for recreation and related experiences. *Landscape and urban planning*. 68(2-3), 147-165.

- Goliard, François. 2011. "Les Cours d'eau : Entre Droit de Propriété et Droits d'usage. L'exemple Français." *Les Cahiers de Droit* 51 (3–4): 637–58. <https://doi.org/10.7202/045727ar>.
- González, Eduardo, Vanesa Martínez-Fernández, Patrick B. Shafroth, Anna A. Sher, Annie L. Henry, Virginia Garófano-Gómez, and Dov Corenblit. 2018. "Regeneration of Salicaceae Riparian Forests in the Northern Hemisphere: A New Framework and Management Tool." *Journal of Environmental Management*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.069>.
- González del Tánago, M., García de Jalón, D., 2011. Riparian Quality Index (RQI): A methodology for characterising and assessing the environmental conditions of riparian zones. *Limnetica*. 30(2): 0235-0254.
- Gralepois, Mathilde, and Sofia Guevara. 2015. "L'adaptation Aux Risques d'inondation Façonnée Par Les Métiers de La Ville." *Développement Durable et Territoires* 6 (3): 0–20.
- Gregory, K. J., and R. J. Davis. 1993. "The Perception of Riverscape Aesthetics: An Example from Two Hampshire Rivers." *Journal of Environmental Management* 39 (3): 171–85. <https://doi.org/10.1006/jema.1993.1062>.
- Groot, Mirjam De, and Wouter T. De Groot. 2009. "Room for River Measures and Public Visions in the Netherlands: A Survey on River Perceptions among Riverside Residents." *Water Resources Research* 45 (7): 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008WR007339>.
- Han, S., Kuhlicke, C., 2019. Reducing hydro-meteorological risk by nature-based solutions: what do we know about people's perceptions? *Water*. 11 (12), 2599.
- Halbe, Johannes, Jan Adamowski, and Claudia Pahl-Wostl. 2015. "The Role of Paradigms in Engineering Practice and Education for Sustainable Development." *Journal of Cleaner Production* 106 (November): 272–82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.093>.
- Harris, Richard R. 2005. "Monitoring the Effectiveness of Riparian Vegetation Restoration Final Report California Department of Fish and Game Salmon and Steelhead Trout Restoration Account Agreement No. P0210566."
- Heitz, Carine, Sara Fernandez, and Vincent Laumin. 2018. "Enquêteur Sur La GEMAPI : Quelles Origines et Quels Effets Sur Les Territoires de l'eau ?" *Sciences Eaux & Territoires Numéro* 26 (2): 6. <https://doi.org/10.3917/set.026.0006>.
- Hellier, Emmanuelle, Catherine Carré, and Nadia Dupont. 2019. "Des Représentations Concurrentes de l'eau Dans Les Projets Urbains. Le Cas Des Prairies Saint-Martin à Rennes." *Sud-Ouest Européen* 47.
- House, Margaret A., and E. K. Sangster. 1991. "Public Perception of River-Corridor Management." *Water and Environment Journal* 5 (3): 312–16. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1991.tb00624.x>.
- Ioana-Toroimac, Gabriela, Liliana Zaharia, Gianina Neculau, Dana Maria Constantin, and Florentina Iuliana Stan. 2020. "Translating a River's Ecological Quality in Ecosystem Services: An Example of Public Perception in Romania." *Ecohydrology and Hydrobiology* 20 (1): 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.10.005>.
- Jacopin L'Azou, Chantal, and Françoise Gross. 2010. "Intégration Originale et Réhabilitation de Bassins à Plan d'eau Permanent Dans Le Cadre d'un Développement Urbain." In *Novatech*. Lyon.
- Janghorban, R., Roudsari, R.L., Taghipour, A., 2014. Skype interviewing: the new generation of online synchronous interview in qualitative research. *Int. J. Qual. Stud. Health Well-Being* 9 (1). <https://doi.org/10.3402/qhw.v9.24152>.

- Janssen, P., P. Cavallé, A. Vivier, and A. Evette. 2019. "Le Génie Végétal Favorise Une plus Grande Diversité de Micro-Habitats Aquatiques et de Macro-Invertébrés Benthiques." *Techniques Sciences Méthodes*, no. 9: 55–64. <https://doi.org/10.1051/tsm/201909055>.
- Jodelet, D. 1997, « Représentation sociale : phénomènes, concept et théorie », in Serge Moscovici (dir.), *Psychologie sociale*, Paris, PUF, coll. « Le psychologue », p. 365.
- Johnson, Peggy A., Rachel L. Tereska, and Eric R. Brown. 2002. "Using Technical Adaptive Management to Improve Design Guidelines for Urban Instream Structures." *Journal of the American Water Resources Association* 38 (4): 1143–52. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2002.tb05552.x>.
- Kabisch, N., Frantzeskaki, N., Pauleit, S., Naumann, S., Davis, M., Artmann, M., Bonn, A., 2016. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecology and society*. 21(2).
- Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., Bonn, A., 2017. *Nature-based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas, Theory and Practice*, Springer Nature.
- Kondolf, G. M., Pinto, P. J., 2017. The social connectivity of urban rivers. *Geomorphology*. 277, 182-196.
- Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. The University of Chicago Press, 2, 90.
- Lachat, B. 1997. "Conditions de Réussite Des Techniques de Génie Végétal En Cours d'eau." In *Programme de Stabilisation Des Berges Du Lacs Saint-Jean. Les Techniques de Génie Végétal*, 1–25.
- Lachat, B. 1998. "Conserver, Aménager, Revitaliser Les Cours d'eau Avec Une Logique Naturelle." *Annales de Limnologie* 34 (2): 227–41. <https://doi.org/10.1051/limn/1998021>.
- Langergraber, G., Castellar, J.A., Pucher, B., Baganz, G.F., Milosevic, D., Andreucci, M.-B., Kearney, K., Pineda-Martos, R., Atanasova, N., 2021. A framework for addressing circularity challenges in cities with nature-based solutions. *Water* 13 (17), 2355. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/17/2355>.
- Lavandier, Géraud, Laure Dangla, Max Bruciamacchie, and Freddy Rey. 2010. "Modélisation Spatio-Temporelle et Approche Économique Du Piégeage de Sédiments Dans Des Ravines Marneuses Végétalisées Par Génie Biologique : Le Modèle Simulfascine." *Revue Forestière Française*, no. 5: 525–40. <https://doi.org/10.4267/2042/39864>.
- Lay, Yves François Le. 2006. "L'évaluation Environnementale Du Bois En Rivière Par Les Gestionnaires Des Cours d'eau Français." [Http://Journals.Openedition.Org/Geocarrefour](http://Journals.Openedition.Org/Geocarrefour), no. vol. 81/4 (October): 265–75. <https://doi.org/10.4000/GEOCARREFOUR.1632>.
- Lay, Yves François Le, Marylise Cottet, Hervé Piégay, Anne Riviere-Honegger, and M. Cossin. 2012. "Ground Imagery and Environmental Perception : Using Photo-Questionnaires to Evaluate River Management Strategies." In *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*, Wiley-Blac, 405–29. J. Wiley and Sons.
- Lay, Yves François Le, Hervé Piégay, and Anne Rivière-Honegger. 2013. "Perception of Braided River Landscapes: Implications for Public Participation and Sustainable Management." *Journal of Environmental Management* 119 (April): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.006>.

Leblois, S., André Evette, G. Favier, and A. Recking. 2016. "Amélioration Des Méthodes de Dimensionnement Des Ouvrages de Génie Végétal En Berges de Cours d'eau Par Une Approche Empirique." *Sciences Eaux & Territoires*, 65–73.

Leblois, S., A. Evette, D. Jaymond, G. Piton and A. Recking (2022). "Processus et causes de défaillance du génie végétal pour la stabilisation des berges de rivière: retour d'expérience sur un large jeu de données issues de la BD GeniVeg." *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 28(2).

Lévy, Jacques, and Michel Lussault. 2013. "Dictionnaire de Géographie et de l'espace Des Sociétés," 1137 p.

Li, Ming Han, and Karen E. Eddleman. 2002. "Biotechnical Engineering as an Alternative to Traditional Engineering Methods a Biotechnical Streambank Stabilization Design Approach." *Landscape and Urban Planning* 60 (4): 225–42. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00057-9).

Linton, J., Budds, J., 2014. The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. *Geoforum*. 57, 170-180.

Martin, F.-M., P. Janssen, L. Bergès, B. Dupont and A. Evette (2021). "Higher structural connectivity and resistance against invasions of soil bioengineering over hard-engineering for riverbank stabilisation." *Wetlands Ecology and Management* 29(1): 27-39.

Meyer, N., Schafft, M., Wegner, B., Wolter, C., Arlinghaus, R., Venohr, M., & von Oheimb, G. (2021). A day on the shore: Ecological impacts of non-motorised recreational activities in and around inland water bodies. *Journal for Nature Conservation*, 64, 126073.

Mickovski, S.B., 2021. Re-thinking soil bioengineering to address climate change challenges. *Sustainability* 13 (6), 3338. <https://doi.org/10.3390/su13063338>.

Millennium Ecosystem Assessment. 2005. "Living beyond Our Means: Natural Assets and Human Well-Being: Statement from the Board."

Milly, Bruno. 2012. "De l'équipement Au Développement Durable. Les Transformations Institutionnelles de l'aménagement Du Territoire." In *L'institution Plurielle*, edited by Yves Bonny and Lise Demailly, 139–55. Villeneuve d'Ascq: Presses universitaires du Septentrion. <https://doi.org/10.4000/books.septentrion.9619>.

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. 2020. "Gestion Des Milieux Aquatiques et Prévention Des Inondations (GEMAPI) | Ministère de La Transition Écologique et Solidaire." 2020. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/gestion-des-milieux-aquatiques-et-prevention-des-inondations-gemapi>.

Mitsch, William J. 2012. "What Is Ecological Engineering?" *Ecological Engineering* 45 (August): 5–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.013>.

Moreau, C., Cottet, M., Rivière-Honegger, A., François, A., Evette, A., 2022. Nature-based solutions (NbS): A management paradigm shift in practitioners' perspectives on riverbank soil bioengineering. *Journal of Environmental Management*. 308.

Morris, S. and T. Moses (1999). "Urban stream rehabilitation: a design and construction case study." *Environmental management* 23(2): 165-177.

Nassauer, J. I., 1992. The appearance of ecological systems as a matter of policy. *Landscape Ecology*. 6(4), 239-250.

Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K. N., Rusch, G. M., Waylen, K. A., Delbaere, B., Haase, D., Jones-Walters, L., Keune, H., Kovacs, E., Krauze, K., Külvik, M., Rey, F., van Dijk, J., Vistad, O. I.

- Wilkinson, M. E., Wittmer, H., 2017. The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of The Total Environment*. 579, 1215-1227.
- Nicolas, V, B Chocat, D Lourdière, Pierre Dupont, S Le Fur, Freddy Rey, S Moussard, E Babut, C Pagotto, and E Oppeneau. 2014. "Ingénierie Écologique Appliquée Aux Milieux Aquatiques. Pourquoi ? Comment ?"
- Pahl-Wostl, C., Jeffrey, P., Isendahl, N., Brugnach, M., 2011. Maturing the new water management paradigm: progressing from aspiration to practice. *Water Resour. Manag.* 25 (3), 837–856. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9729-2>.
- Paillé, P., Mucchielli, A., 2012. *L'analyse qualitative en sciences humaines et sociales*. Armand Colin, Coll. U.
- Peeters, A, G Houbrechts, E Hallot, J Van Campenhout, G Verniers, and F Petit. 2018. "Efficacité et Résistance de Techniques de Protection de Berges En Génie Végétal." *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement* 24. <https://journals.openedition.org/geomorphologie/11927>.
- Pinto, A., Fernandes, L., Maia, R., 2016. Monitoring Methodology of Interventions for Riverbanks Stabilization: Assessment of Technical Solutions Performance. *Water Resources Management*. 1-18.
- Pinto, António Augusto Sampaio, Luís Filipe Sanches Fernandes, and Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia. 2019. "A Method for Selecting Suitable Technical Solutions to Support Sustainable Riverbank Stabilisation." *Area* 51 (2): 285–98. <https://doi.org/10.1111/area.12488>.
- Pinto, António, L. F.Sanches Fernandes, and Rodrigo Maia. 2016. "Monitoring Methodology of Interventions for Riverbanks Stabilization: Assessment of Technical Solutions Performance." *Water Resources Management* 30 (14): 5281–98. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1486-4>.
- Poulin, M, M Tisserant, N Keita, André Evette, V Breton, P Biron, P Raymond, G Charbonneau, and I Falardeau. 2019. "Le Génie Végétal Pour La Protection Des Berges de Cours d'eau Au Québec : État Des Lieux et Perspectives Pour Les Basses-Terres Du Saint-Laurent." *Sciences Eaux & Territoires*, 1–7.
- Potschin, M., Kretsch, C., Haines-Young, R., E. Furman, Berry, P., Baró, F. (2015): Nature-based solutions. In: Potschin, M. and K. Jax (eds): *OpenNESS Ecosystem Service Reference Book*. EC FP7 Grant Agreement no. 308428. Available via: www.openness-project.eu/library/reference-book
- Preti, F., Capobianco, V., Sangalli, P., 2022. Soil and water bioengineering (SWB) is and has always been a nature-based solution (NBS): a reasoned comparison of terms and definitions. *Ecological Engineering*. 181.
- Ramírez-Agudelo, N. A., Porcar Anento, R., Villares, M., Roca, E., 2020. Nature-based solutions for water management in peri-urban areas: barriers and lessons learned from implementation experiences. *Sustainability*, 12(23).
- Rauch, H. P., von der Thannen, M., Raymond, P., Mira, E., Evette, A., 2022. Ecological challenges for the use of soil and water bioengineering techniques in river and coastal engineering projects. *Ecological Engineering*. 176.
- Recking, A., G. Piton, L. Montabonnet, S. Posi, and A. Evette. 2019. "Design of Fascines for Riverbank Protection in Alpine Rivers: Insight from Flume Experiments." *Ecological Engineering* 138 (November): 323–33. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.019>.
- Reed, M.S., Evely, A.C., Cundill, G., Fazey, I., Glass, J., Laing, A., Newig, J., Parrish, B., Prell, C., Raymond, C., Stringer, L.C., 2010. What is social learning? *Society* 15 (Issue 4). <http://www.ecologyandsociety.org/volXX/issYY/artZZ/>.

- Rey, Freddy. 2018. "Restaurer Les Milieux et Prévenir Les Inondations Grâce Au Génie Végétal." Edited by Quae Edition. Restaurer Les Milieux et Prévenir Les Inondations Grâce Au Génie Végétal. Montpellier: Université de Montpellier. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-2778-5>.
- Rey, Freddy, C. Bifulco, G. B. Bischetti, F. Bourrier, G. De Cesare, F. Florineth, F. Graf, et al. 2019. "Soil and Water Bioengineering: Practice and Research Needs for Reconciling Natural Hazard Control and Ecological Restoration." *Science of the Total Environment* 648 (January): 1210–18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.217>.
- Rey, Freddy, V Breton, P Breil, and Patrice Mériaux. 2018. "Les Solutions Fondées Sur La Nature Pour Accorder La Prévention Des Inondations Avec La Gestion Intégrée Des Milieux Aquatiques." *Sciences Eaux et Territoires*, 26: 36–41.
- Rey, Freddy, Yves Crosaz, François Cassotti, and Manuel de Matos. 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>.
- Richet, Jean Baptiste, J. F. Ouvry, and M. Saunier. 2017. "The Role of Vegetative Barriers Such as Fascines and Dense Shrub Hedges in Catchment Management to Reduce Runoff and Erosion Effects: Experimental Evidence of Efficiency, and Conditions of Use." *Ecological Engineering* 103 (June): 455–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.08.008>.
- Riis, T., Kelly-Quinn, M., Aguiar, F.C., Manolaki, P., Bruno, D., Bejarano, M.D., Clerici, N., Fernandes, M.R., Franco, J.C., Pettit, N., Portela, A.P., Tammeorg, O., Tammeorg, P., Rodríguez-González, P.M., Dufour, S., 2020. Global Overview of Ecosystem Services Provided by Riparian Vegetation. *BioScience*. 70, 501–514.
- Rivière-Honegger, Anne, Marylise Cottet, and Bertrand Morandi. 2014. *Connaître Les Perceptions et Les Représentations : Quels Apports Pour La Gestion Des Milieux Aquatiques?*
- Rivière-Honegger, Anne, Sylvie Servain, Gilles Armani, Dominique Andrieu, and Hervé Parmentier. 2019. "Saisir Les Liens Entre Trame Bleue, Paysages de l'eau et Projets Urbains. Regards Croisés Sur Trois Villes de Confluence : Lyon, Nantes et Strasbourg." *Projets de Paysage*, no. 20 (June). <https://doi.org/10.4000/paysage.752>.
- Rode, Sylvain. 2010a. "De l'aménagement Au Ménagement Des Cours d'eau: Le Bassin de La Loire, Miroir de l'évolution Des Rapports Entre Aménagement Fluvial et Environnement." *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://journals.openedition.org/cybergeo/23253>.
- Rode, Sylvain. 2010b. "Reconquête Urbaine de La Loire et Risque d'inondation : Des Représentations Aux Aménagements Urbains." *Géocarrefour* 85 (3): 221–28. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.7960>.
- Rode, Sylvain. 2017. "Reconquérir Les Cours d'eau Pour Aménager La Ville." *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://journals.openedition.org/cybergeo/27933>.
- Roux, Thomas Le, and Thomas Le. 2010. "Une Rivière Industrielle Avant l'industrialisation : La Bièvre et Le Fardeau de La Prédestination, 1670-1830." [Http://journals.openedition.org/geocarrefour](http://journals.openedition.org/geocarrefour), no. Vol. 85/3 (September): 193–207. <https://doi.org/10.4000/GEOCARREFOUR.7952>.
- Shafer E. L., 1969. Perception of natural environments. *Environment and behavior*. 8, p. 71-82.
- Schiechtl, H. M. and R. Stern (1997). *Water Bioengineering Techniques for Watercourse, Bank and Shoreline Protection*. Oxford (UK), Blackwell Science.

- Schmitt, Kathrin, Michael Schäffer, Jochen Koop, and Lars Symmank. 2018. "River Bank Stabilisation by Bioengineering: Potentials for Ecological Diversity." *Journal of Applied Water Engineering and Research* 6 (4): 262–73. <https://doi.org/10.1080/23249676.2018.1466735>.
- Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C.A.J.J., Smith, A., Turner, B., 2020. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 375.
- Sher, Anna A., Lisa Clark, Annie L. Henry, Alexander R.B. Goetz, Eduardo González, Anit Tyagi, Isabelle Simpson, and Bérenger Bourgeois. 2020. "The Human Element of Restoration Success: Manager Characteristics Affect Vegetation Recovery Following Invasive Tamarix Control." *Wetlands*. <https://doi.org/10.1007/s13157-020-01370-w>.
- Shijun, M. 1985. Ecological engineering: application of ecosystem principles. *Environmental Conservation*, 12(4), 331-335.
- Simon, K., Steinemann, A., 2000. Soil bioengineering: challenges for planning and engineering. *J. Urban Plann. Dev.* 126 (2).
- Smithson, M., Verkuilen, J., 2006. A better lemon squeezer? Maximum-likelihood regression with beta-distributed dependent variables. *Psychol. Methods*. 11, 54–71.
- Sotir, R. B. (2001). Integration of soil bioengineering techniques for watershed management. *Wetlands Engineering & River Restoration 2001*: 1-8.
- Symmank, Lars, Stephanie Natho, Mathias Scholz, Uwe Schröder, Katharina Raupach, and Christiane Schulz-Zunkel. 2020. "The Impact of Bioengineering Techniques for Riverbank Protection on Ecosystem Services of Riparian Zones." *Ecological Engineering* 158 (December). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106040>.
- Thannen, Magdalena von der, Stephan Hoerbinger, Roman Paratscha, Roman Smutny, Thomas Lampalzer, Alfred Strauss, and Hans Peter Rauch. 2017. "Development of an Environmental Life Cycle Assessment Model for Soil Bioengineering Constructions." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 24 (2): 141–55. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1369460>.
- Tisserant, Maxime. 2019. "Réponse Taxonomique et Fonctionnelle Des Communautés Végétales Riveraines Aux Facteurs Environnementaux et à La Stabilisation de Berge." Université de Laval.
- Trimmel, H., Weihs, P., Leidinger, D., Formayer, H., Kalny, G., 2016. Can riparian vegetation shade mitigate the expected rise in stream temperatures during heat waves in a pre-alpine river?. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1-27.
- Trottier, Julie, Alexandre Brun, and F. Lasserre. 2012. "L'avènement de La Gestion Intégrée de La Ressource En Eau." In *Gestion de l'eau. Approche Territoriale et Institutionnelle*, edited by Presse de l'Université du Québec. Québec.
- Ultsch, Justine. 2010. "Les Temporalités de l'interface Ville-Rivière à Travers Le Cas de Saint-Étienne et Du Furan." [Http://Journals.Openedition.Org/Geocarrefour](http://Journals.Openedition.Org/Geocarrefour), no. Vol. 85/3 (September): 209–19. <https://doi.org/10.4000/GEOCARREFOUR.8011>.
- Vennetier, M, C Ripert, O Chandiooux, P Meriaux, and G Doirat. 2004. "Gestion de La Végétation Des Dignes et Des Berges Sous Contrainte de Sécurité." *Ingénieries*, no. Numéro spécial 2004 : Ingénierie écologique: 25–36.
- Venohr, M., Langhans, S. D., Peters, O., Hölker, F., Arlinghaus, R., Mitchell, L., & Wolter, C. (2018). The underestimated dynamics and impacts of water-based recreational activities on freshwater ecosystems. *Environmental Reviews*, 26(2), 199-213.

Verniers, Gisèle, François Petit, Eric Hallot, and Geoffrey Houbrechts. 2009. "Techniques Végétales - Conception, Application et Recommandations." In *Direction Des Cours d'Eau Non Navigables*, edited by Groupe Interuniversitaire de Recherche en Ecologie Appliquée and Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale, 66. http://environnement.wallonie.be/publi/de/guide_techniques_vegetales.pdf.

Walsh, Christopher J., Allison H. Roy, Jack W. Feminella, Peter D. Cottingham, Peter M. Groffman, and Raymond P. Morgan. 2005. "The Urban Stream Syndrome: Current Knowledge and the Search for a Cure." *Journal of the North American Benthological Society* 24 (3): 706–23. <https://doi.org/10.1899/04-028.1>.

Warot, Gilles, Eric Chanal, Stéphane Guerin, and Maiwenn Lothode. 2020. *La Réhabilitation Des Petites Rivières Urbaines : Retours d'expériences Sur Des Projets Multi-Bénéfices*. ASTEE.

Wenger, E., 1999. *Communities of practice: learning, meaning and identity* (Cambridge). <https://doi.org/10.1023/A:1023947624004>.

West, S., Haider, L. J., Stålhammar, S., Woroniecki, S. (2020). A relational turn for sustainability science? Relational thinking, leverage points and transformations. *Ecosystems and People*, 16(1), 304-325.

Westling, Emma L., Ben W.J. SurrIDGE, Liz Sharp, and David N. Lerner. 2014. "Making Sense of Landscape Change: Long-Term Perceptions among Local Residents Following River Restoration." *Journal of Hydrology* 519 (PC): 2613–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.029>.

Wollny, Julia T., Annette Otte, and Sarah Harvolk-Schöning. 2019. "Dominance of Competitors in Riparian Plant Species Composition along Constructed Banks of the German Rivers Main and Danube." *Ecological Engineering* 127 (February): 324–37. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.013>.

Table des matières

Introduction	2
Contexte	2
Question et objectifs de recherche	3
Approches retenues dans le cadre de ce travail	3
PARTIE 1 - ETAT DE L'ART	5
1. Le génie végétal, une technique ancienne réactualisée face aux enjeux environnementaux	5
1.1. Définitions et vocabulaire	5
1.2. Histoire du génie végétal.....	6
1.3. Les techniques contre l'érosion des berges de cours d'eau.....	7
1.4. L'ambivalence du génie végétal en ville : entre opportunités et difficultés de mise en œuvre.....	8
2. Synthèse des facteurs capables d'influencer les choix techniques des gestionnaires pour protéger les berges de cours d'eau urbains	9
2.1. Les facteurs d'influence liés à la technique : quelle est la performance du génie végétal pour protéger les berges ?.....	9
2.2. Les facteurs d'influence liés aux perceptions et aux représentations : quels sont les services écosystémiques perçus par le grand public ?	18
2.3. Les facteurs d'influence liés au contexte territorial : en quoi le recours aux techniques de génie végétal en territoire urbain est-il paradoxal ?	24
2.4. Les facteurs d'influence liés à la profession : dans quel paradigme de gestion le génie végétal s'inscrit-il ?	31
2.5. Les facteurs d'influence liés au contexte réglementaire et institutionnel : quelles sont les incitations et les blocages pour le recours au génie végétal ?	37
PARTIE 2 - CARACTERISATION DES REPRESENTATIONS DES PROFESSIONNELS DE LA FILIERE : LA TRANSITION VERS LE GENIE VEGETAL, UN CHANGEMENT PUREMENT TECHNIQUE OU UN CHANGEMENT DE PARADIGME ?	45
1. Méthode.....	45
1.1. Conception de l'enquête	45
1.2. Recrutement et passation des entretiens	46
1.3. L'analyse	47
2. Résultats	47
2.1. Redéfinir la performance des ouvrages de stabilisation de berges	47
2.2. Accepter et partager les risques.....	51
2.3. Adopter une posture humble et audacieuse.....	54
3. Discussion	57

Travailler avec le vivant : freins et leviers pour une utilisation plus large des techniques de génie végétal.....	57
L'existence d'une communauté de pratique.....	58
Un exemple typique de "paradigme adaptatif"	59
Dépasser le paradigme "prédire et contrôler"	59
PARTIE 3 – DIVERSITE DES PERCEPTIONS ET DES VALEURS ASSOCIEES AUX OUVRAGES DE GENIE VEGETAL SELON L'EXPERTISE ENVIRONNEMENTALE	61
1. Méthode.....	62
1.1. Terrain d'étude.....	63
1.2. Enquête sociologique	64
1.3. Mesures écologiques.....	66
1.4. Traitement des données.....	68
2. Résultats	68
2.1. Valeur perçue des différentes techniques de stabilisation des berges.....	69
2.2. Interactions entre les valeurs mesurées et perçues des berges	70
2.3. Avantages et inconvénients perçus du génie végétal	72
3. Discussion	74
3.1. Des valeurs partagées concernant les bénéfices écologiques et sociaux induits par le génie végétal	75
3.2. Des valeurs parfois concurrentes qui exigent certains compromis	76
3.3. Perception d'un risque élevé chez les profanes.....	77
PARTIE 4 – PRINCIPALES CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	78
Bibliographie.....	80
Table des matières	92
Liste des Figures	94
Liste des Tableaux	95
Annexes.....	96

Liste des Figures

Figure 1 : Exemples de types d'ouvrage de génie végétal : a. Ensemencement hydraulique sur une berge (© N Daumergue) ; b. Clayonnage en pied de berge (© A Evette)	8
Figure 2 : Les acteurs impliqués dans la gestion des ouvrages de protection des berges	40
Figure 3 : Praticiens impliqués dans les différentes étapes d'un projet d'ouvrage de génie végétal	46
Figure 4 : Schéma de traitement des données.....	63
Figure 5 : Aire d'étude et distribution des ouvrages urbains de berge considérés	64
Figure 6 : Jeu de photographies des structures de berge (grises, hybrides et vertes) utilisées dans le photo-questionnaire, classées selon la variable végétation croissante	66
Figure 7 : Pourcentage de répondants ayant sélectionné chaque structure de protection de berge comme la plus (A) et la moins (B) réussie en fonction du niveau d'expertise (aucun, moyen et élevé, n = 194, 140 et 95, respectivement).....	69
Figure 8 : Critères utilisés par les répondants pour justifier leur choix de la structure la plus réussie et la moins réussie, en fonction de leur niveau d'expertise environnementale	70
Figure 9 : Variables écologiques (richesse spécifique, indice de Shannon, densité relative en EEE, ombrage moyen et variable de connectivité) en fonction de la variable de végétation des berges échantillonnées (n=12). Les lignes grises représentent les relations entre les variables écologiques et la variable végétation, et les zones grises les intervalles de confiance à 95 %	71
Figure 10 : Relation entre les valeurs perçues (esthétique, récréative et de vulnérabilité) et chaque variable écologique mesurée pour les 12 structures de berge représentées sur les photographies. Toutes les variables écologiques (c'est-à-dire la variable végétation, la variable connectivité, la richesse spécifique et la couverture d'ombre moyenne) sont centrées et réduites. Les points représentent la moyenne des notes attribuées par les 429 personnes interrogées, et les lignes représentent le modèle d'ajustement pour chaque niveau d'expertise environnementale. Les lettres A-J permettent de relier chaque courbe aux équations et coefficients des modèles disponibles dans les tableaux A.3 et A.4 en annexe	72
Figure 11 : Avantages (A) et réticences (B) aux ouvrages de génie végétal en fonction du niveau d'expertise environnementale	74

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Onze citations sur la performance des structures de génie végétal obtenues à partir des entretiens.....	49
Tableau 2 : 10 citations sur l'acceptation des risques extraites des entretiens.....	52
Tableau 3 : 14 citations sur la posture extraites des entretiens	55
Tableau 4 : Description des variables utilisées pour construire les variables de végétation et de connectivité.....	67
Tableau 5 : Niveau de confiance dans les structures de génie végétal pour la protection des berges selon le niveau d'expertise environnementale.....	73

Annexes

1. Matériels et Méthodes

1.3. Mesures écologiques

Tableau X.A.1: Codage des variables semi-quantitative utilisées pour décrire la connectivité des ouvrages

Variable semi-quantitative de connectivité	Description	Modalité	Valeur
<i>Connectivité transversale</i>			
Pente.env	Indice de la pente dans les 5 m au-delà de la berge	Verticale	1
		Pentue puis verticale	2
		Pentue	3
		Pentue puis plane	4
		Plane	5
Latérale.veg	Indice de végétation dans les 5 m au-delà de la berge	Végétation absente	1
		Végétation discontinue	2
		Végétation herbacée continue	3
		Végétation arbustive continue	4
		Végétation arborée continue	5
<i>Connectivité longitudinale</i>			
Arbust.connect	Indice de connectivité longitudinale de la strate arbustive	Absente	1
		Discontinue	2
		Continue	3
Arbor.connect	Indice de connectivité longitudinale de la strate arborée	Absente	1
		Discontinue	2
		Continue	3
<i>Connectivité paysagère</i>			
CP	Contexte paysagé	Autoroute, route	1
		Ville - urbain	2
		Zone d'activité économique	3
			4

Variable semi-quantitative de connectivité	Description	Modalité	Valeur
<i>Connectivité transversale</i>			
		Zone résidentielle	5
		Terrain de sport	

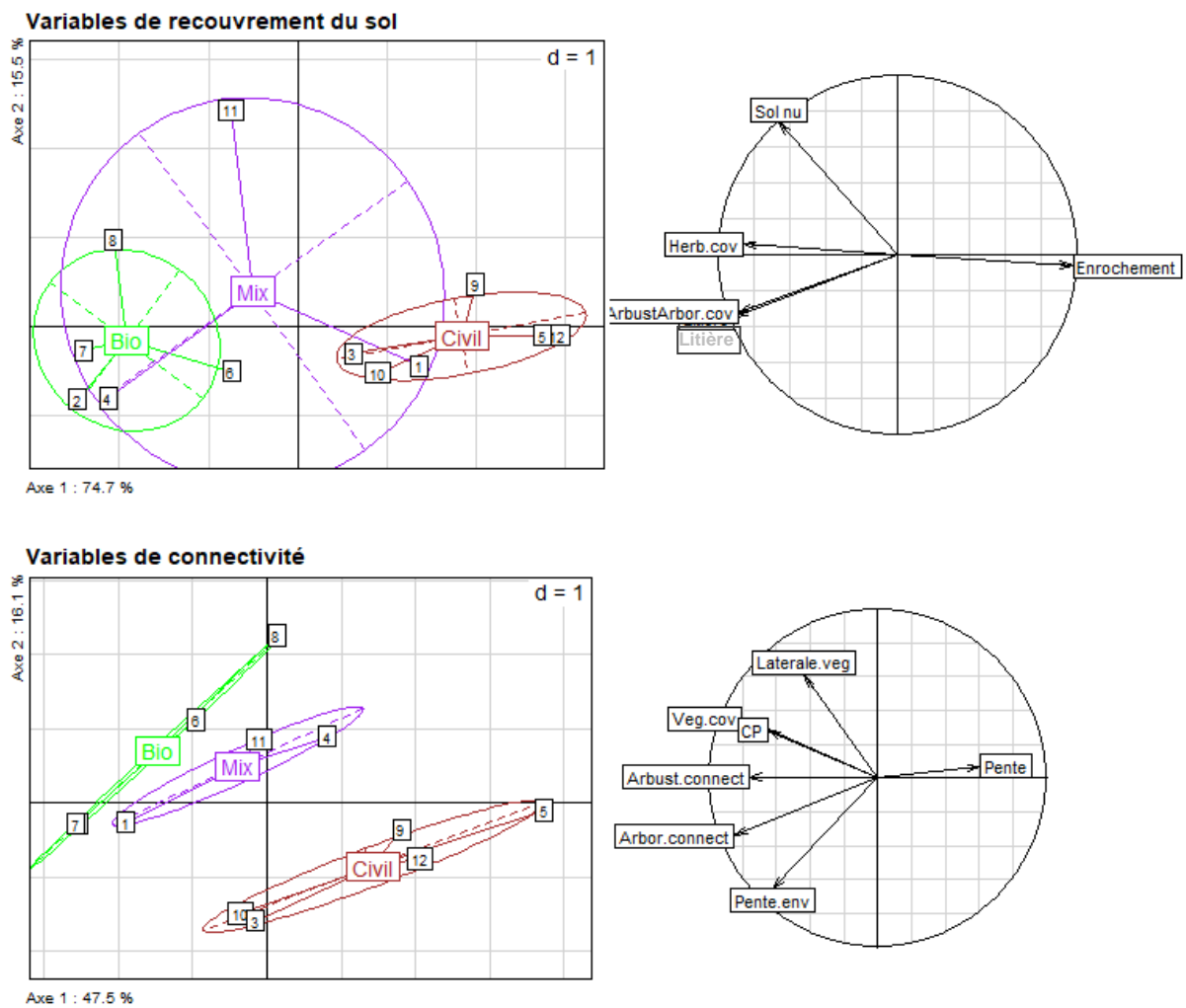


Figure X.A.1: Biplots d'ACP montrant la distribution des ouvrages de protections étudiés le long des deux axes, en relation avec 1) les variables de recouvrements du sol et 2) de connectivité. (Voir le tableau 4 pour le détail des variables utilisées).

2. Résultats

2.1 Valeur perçue des différentes techniques de stabilisation des berges

Tableau X.A.2: Résultats de l'analyse thématique de contenu : Effectifs, pourcentage et p-value associée, calculés pour chaque critère utilisé par les répondants selon leur niveau d'expertise pour justifier le choix de classement d'un ouvrage comme étant le plus ou le moins réussi,

Les étoiles représentent le caractère significatif de la valeur du test du χ^2 (*: $\alpha = [0.01-0.05]$, **: $\alpha = [0.001-0.01]$, ***: $\alpha = <0.001$).

Critères	Effectif			Pourcentage			P-value	Signifi.
	none	medium	high	none	medium	high		
Naturalité	113	63	39	58.247	45.000	41.053	0.0078	**
Végétal	67	56	50	34.536	40.000	52.632	0.0130	*
Protection	33	36	26	17.010	25.714	27.368	0.0638	
Fonctionnalité écologique	19	30	27	9.794	21.429	28.421	0.0002	***
Accessibilité physique et visuelle	45	22	7	23.196	15.714	7.368	0.0031	**
Géomorphologie	13	16	22	6.701	11.429	23.158	0.0003	***
Esthétique	31	15	9	15.979	10.714	9.474	0.1979	
Minéral	26	21	5	13.402	15.000	5.263	0.0613	
Diversité	3	8	19	1.546	5.714	20.000	4.33e-08	***
Entretien	2	5	3	1.031	3.571	3.158	-	
Fraicheur	4	2	4	2.062	1.429	4.211	-	
Propreté	2	NA	NA	1.031	NA	NA	-	

2.2 Interactions entre les valeurs mesurées et perçues des berges

Tableau X.A.3. Equations des modèles de prédiction des valeurs de perception en fonction des variables écologiques mesurées et du niveau d'expertise des répondants. Les étoiles informent du caractère significatif des tests de Wald appliqués aux coefficients des équations (*: $\alpha = [0.01-0.05]$, **: $\alpha = [0.001-0.01]$, ***: $\alpha = <0.001$). Les graphiques sont disponibles dans la figure 10 du rapport.

Gra phi que ss	Y : Valeur de perception	X: Variable écologiques	Niveau d'expertise déclaré	Equations et significativité des coefficients
A: B: C:	ESTHETIQUE	Variable de végétation	Aucun	Logit(esth.) = 0.04 + 0.31VEG***
			Moyen	Logit(esth.) = -0.07** + 0.32VEG***
			Elevé	Logit(esth.) = -0.39*** + 0.47VEG ***
		Variable de connectivité	Aucun	Logit(esth.) = 0.03 + 0.37CONNECT ***
			Moyen	Logit(esth.) = -0.08* + 0.32CONNECT **
			Elevé	Logit(esth.) = -0.44*** + 0.34CONNECT ***
		Richesse spécifique	Aucun	Logit (esth.) = 0.02 + 0.40Rs***
			Moyen	Logit (esth.) = -0.08* + 0.44 Rs***
			Elevé	Logit(esth.) = -0.42*** + 0.62Rs***
D: E: F: G:	RECREATIVE	Variable de végétation	Aucun	Logit(recr.) = -0.26*** + 0.10VEG*** - 0.14VEG ² *** -
			Moyen	Logit(recr.) = -0.22*** + 0.09VEG*** - 0.14VEG ² ***
			Elevé	Logit(recr.) = -0.34*** + 0.19VEG*** - 0.14VEG ² ***
		Variable de connectivité	Aucun	Logit(recr.) = -0.55*** + 0.13CONNECT*** - 0.06CONNECT ² ***
			Moyen	Logit(recr.) = -0.52*** + 0.09CONNECT*** - 0.06CONNECT ² ***
			Elevé	Logit(recr.) = -0.66*** + 0.12CONNECT*** - 0.06CONNECT ² ***
		Richesse spécifique	Aucun	Logit(recr.) = -0.77*** + 0.29Rs***
			Moyen	Logit(recr.) = -0.72*** + 0.34Rs***
			Elevé	Logit(recr.) = -0.85*** + 0.46Rs***
Ombrage moyen	Aucun	Logit(recr.) = -0.76*** + 0.14ombrage***		
	Moyen	Logit(recr.) = -0.71*** + 0.10ombrag***		
	Elevé	Logit(recr.) = -0.86*** + 0.24ombrage***		
H: I: J:	VULNERABILITE	Variable de végétation	Aucun	Logit(vuln.) = -0.51*** + 0.15VEG ***
			Moyen	Logit(vuln.) = -0.67*** + 0.12VEG ***
			Elevé	Logit(vuln.) = -0.84*** + 0.05VEG *
		Variable de connectivité	Aucun	Logit(vuln.) = -0.51*** + 0.14CONNECT ***
			Moyen	Logit(vuln.) = -0.67*** + 0.12CONNECT ***
			Elevé	Logit(vuln.) = -0.83*** + 0.09CONNECT *
		Richesse spécifique	Aucun	Logit(vuln.) = -0.51*** + 0.28Rs ***
			Moyen	Logit(vuln.) = -0.67*** + 0.19Rs***
			Elevé	Logit(vuln.) = -0.83*** + 0.08Rs*

Tableau X.A.4: Résultats des modèles de prédiction des valeurs de perception en fonction des variables écologiques mesurées (VEG=variable de végétation, CONNECT=variable de connectivité, Rs=Richesse spécifique, Ombrage moyen) et du niveau d'expertise des répondants (NivExp). Les étoiles informent du caractère significatif des tests de Wald appliqués aux coefficients des équations. (*: $\alpha = [0.01-0.05]$, **: $\alpha = [0.001-0.01]$, ***: $\alpha = <0.001$). Les graphiques sont disponibles dans la figure 10 du rapport.

	Graph.	Est.	Std. Er.	Z value	Pr (> z)	Signifi.	
Logit(ESTHETIQUE)=	A:	NivExp Aucun	0.040	0.026	1.559	0.119	
		VEG*NivExpAucun	0.314	0.014	23.152	< 2e-16	***
		NivExpMoy	- 0.111	0.040	-2.790	0.005	**
		NivExpElevé	- 0.432	0.044	-9.759	< 2e-16	***
		VEG*NivExpMoy	0.004	0.020	0.222	0.824	
		VEG* nivExp Elevé	0.152	0.022	6.757	1.41e-11	***
	B:	NivExpAucun	0.031	0.026	1.192	0.233	
		CONNECT*NivExpAucun	0.366	0.014	25.828	< 2e-16	***
		NivExpMoy	-0.111	0.040	-2.786	0.005	**
		NivExpElevé	-0.470	0.045	-10.430	< 2e-16	***
		CONNECT*NivExpMoy	-0.050	0.021	-2.338	0.019	*
		CONNECT*NivExpElevé	-0.028	0.024	-1.188	0.235	
	C:	NivExpAucun	0.018	0.026	0.666	0.506	
		Rs*NivExpAucun	0.400	0.027	14.946	< 2e-16	***
		NivExpMoy	-0.100	0.041	-2.450	0.0143	*
		NivExpElevé	-0.439	0.046	-9.615	< 2e-16	***
		Rs*NivExpMoy	0.045	0.041	1.108	0.268	
		Rs*NivExpElevé	0.222	0.046	4.945	7.62e-07	***
Logit(RECREATIVE)=	D:	NivExpAucun	-0.258	0.035	-7.412	1.124e-13	***
		VEG*NivExpAucun	0.100	0.013	7.782	7.16e-15	***
		NivExpMoy	0.039	0.039	1.015	0.310	
		NivExpElevé	-0.087	0.044	-1.992	0.046	*
		I(VEG^2)	-0.135	0.006	-21.696	< 2e-16	***
		VEG*NivExpMoy	-0.011	0.020	-0.548	0.584	
		VEG*NivExpElevé	0.088	0.022	3.971	7.15e-05	***
	E:	NivExpAucun	-0.552	0.030	-18.278	< 2e-16	***
		CONNECT*NivExpAucun	0.128	0.014	9.204	< 2e-16	***
		NivExpMoy	0.032	0.039	0.791	0.429	
		NivExpElevé	-0.107	0.044	-2.419	0.016	*
		I(CONNECT^2)	-0.061	0.004	-13.927	<2e-16	***
		CONNECT*NivExpMoy	0.038	0.021	-1.800	0.072	
		CONNECT*NivExpElevé	-0.011	0.023	-0.456	0.649	
	F:	NivExpAucun	-0.769	0.026	-28.885	< 2e-16	***
		Rs*NivExpAucun	0.295	0.025	11.562	< 2e-16	***
		NivExpMoy	0.052	0.039	1.331	0.183	
		NivExpElevé	-0.076	0.044	-1.733	0.083	
		Rs*NivExpMoy	0.043	0.039	1.086	0.277	
		Rs*NivExpElevé	0.162	0.044	3.693	0.0002	***
	G:	NivExpAucun	-0.758	0.027	-28.188	< 2e-16	***
	Ombrage*NivExpAucun	0.140	0.026	5.441	5.29e-08	***	
	NivExpMoy	0.043	0.040	1.080	0.2799		
	NivExpElevé	-0.103	0.044	-2.309	0.0210	*	
	Ombrage*NivExpMoy	-0.035	0.040	-0.881	0.3783		

		Ombrage*NivExpElevé	0.108	0.044	2.426	0.0153	*
Logit(VULNERABILITE) =	H:	NivExpAucun	-0.510	0.026	-19.507	< 2e-16	***
		VEG*NivExpAucun	0.151	0.013	11.341	< 2e-16	***
		NivExpMoy	-0.160	0.039	-4.058	4.94e-05	***
		NivExpElevé	-0.326	0.044	-7.360	1.84e-13	***
		VEG*NivExpMoy	-0.028	0.020	-1.391	0.164	
		VEG*NivExpElevé	-0.105	0.023	-4.581	4.62e-06	***
	I:	NivExpAucun	-0.512	0.026	-19.551	< 2e-16	***
		CONNECT*NivExpAucun	0.140	0.014	10.007	< 2e-16	***
		NivExpMoy	-0.158	0.040	-4.005	6.20e-05	***
		NivExpElevé	-0.316	0.044	-7.121	1.07e-12	***
		CONNECT*NivExpMoy	-0.023	0.021	-1.052	0.2927	
		CONNECT*NivExpElevé	-0.050	0.024	-2.010	0.0444	*
	J:	NivExpAucun	-0.510	0.026	-19.482	< 2e-16	***
		Rs* NivExpAucun	0.278	0.026	10.748	< 2e-16	***
		NivExpMoy	-0.162	0.040	-4.106	4.02e-05	***
		NivExpElevé	-0.322	0.044	-7.276	3.44e-13	***
		Rs*NivExpMoy	-0.089	0.040	-2.251	0.0244	*
		Rs*NivExpElevé	-0.193	0.044	-4.365	1.27e-05	***

2.3. Avantages et inconvénients perçus du génie végétal

Tableau X.A.5: Résultats du sondage questionnant les avantages et inconvénients perçus des techniques de génie végétal : Effectifs, pourcentage de répondants et p-value associée selon leur niveau d'expertise pour évaluer le génie végétal. Les étoiles représentent le caractère significatif de la valeur du test du χ^2 (*: $\alpha = [0.01-0.05]$, **: $\alpha = [0.001-0.01]$, ***: $\alpha = <0.001$).

		Effectif			Pourcentage			P-value	Signifi.
		aucun	moyen	élevé	aucun	moyen	élevé		
Avantages aux techniques de génie végétal	Elles contribuent à la biodiversité	45	48	34	23.196	34.286	35.789	0.0296	*
	Elles favorisent la présence d'animaux en villes (oiseaux, rongeurs...)	37	21	13	19.072	15.000	13.684	0.4270	
	Elles apportent de la fraîcheur à la ville	35	12	12	18.041	8.571	12.632	0.0433	*
	Elles améliorent l'esthétique des paysages urbains	19	19	11	9.794	13.571	11.579	0.5627	
	Elles favorisent la reconnexion des citoyens à la nature	20	14	5	10.309	10.000	5.263	0.3375	
	Elles créent des espaces de ressourcement et de relaxation	16	7	NA	8.247	5.000	NA	0.3485	
	Elles créent des espaces de loisir agréables	8	5	7	4.124	3.571	7.368	-	
	Elles permettent de limiter les espèces exotiques envahissantes	5	10	5	2.577	7.143	5.263	-	
Inconvénients aux techniques de	Aucune réticence ; le génie végétal est tout à fait efficace et sûr pour protéger les berges	82	64	65	42.268	45.714	68.421	0.0001	***
	Les travaux impliquent dans un premier temps de détruire la nature (ex : coupe d'arbres)	22	15	6	11.340	10.714	6.316	0.3877	
	Ces techniques sont nouvelles, on a peu de recul dessus	17	16	2	8.763	11.429	2.105	0.0344	*

Les berges ont l'air mal entretenues, les végétaux ne sont pas bien taillés, ça ne fait pas propre, ce n'est pas joli	16	9	3	8.247	6.429	3.158	0.2578	
Ces techniques mobilisent des végétaux vivants qui sont plus fragiles	15	5	5	7.732	3.571	5.263	0.2677	
Ces techniques doivent représenter un coût financier important pour l'action publique	4	6	2	2.062	4.286	2.105	-	
Ces techniques amènent moins de certitudes ; le risque de destruction des habitations est plus grand	18	4	3	9.278	2.857	3.158	0.0213	*
Autre	5	7	5	2.577	5.000	5.263	-	
Ces techniques basées sur des végétaux vivants sont moins durables dans le temps	10	10	4	5.155	7.143	4.211	0.5912	