



HAL
open science

Évaluation de la réussite d'un ouvrage de protection de berge par des techniques de génie végétal et analyse des facteurs abiotiques conditionnant le développement de la végétation

Camille Delage

► To cite this version:

Camille Delage. Évaluation de la réussite d'un ouvrage de protection de berge par des techniques de génie végétal et analyse des facteurs abiotiques conditionnant le développement de la végétation. Sciences agricoles. 2016. dumas-01415638

HAL Id: dumas-01415638

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01415638>

Submitted on 13 Dec 2016

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

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

Année universitaire : 2015-2016

Spécialité : Génie de l'Environnement

Spécialisation (et option éventuelle) :
Protection et Aménagement des Milieux –
Écologie Quantitative (PAMEQ)

Mémoire de fin d'études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Évaluation de la réussite d'un ouvrage de protection de berge par des techniques de génie végétal et analyse des facteurs abiotiques conditionnant le développement de la végétation

Par : Camille Delage

Soutenu à Rennes, le 15 Septembre 2016,

Devant le jury composé de :

Président : Jacques Haury

Maître de stage : André Evette

Enseignant référent : Ivan Bernez

Autres membres du jury : Isabelle Muller, INRA

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Patrimoine-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ : le 31 août 2016



A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur ⁽³⁾ Delage Camille autorise la diffusion de son travail

Oui Non

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement(4)
- la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

Date et signature de l'auteur : le 03 septembre 2016



Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé

Oui Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement(4)
- la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

“To Plant a Seed Is a Noble Deed”

Norman C. Deno, Professeur Émérite de Chimie, 1993.

Remerciements

À travers ces quelques lignes, je tiens à remercier les personnes qui m'ont apportée leur aide pour la réalisation de ce mémoire, et qui ont rendu l'expérience plus qu'enrichissante.

En premier lieu, un grand merci à André Evette, mon maître de stage, pour son accompagnement ainsi que la confiance et l'autonomie qu'il m'a accordée pendant ces six mois.

Je remercie également Ghislain Huyghe, pour ses prises de recul et l'humilité avec laquelle il m'a fait partager sa passion pour l'écologie végétale.

Un grand merci à Nathan, pour son aide sur le terrain et sa bonne humeur (même quand il s'agit de prononcer 500 fois de suite *Salix daphnoides* !). Merci aussi de m'avoir introduit « paupiette », « tête rousse » et « galopin », une sacrée première approche avec un animal mythique.

Merci Gilles et Bertrand pour vos trucs et astuces côté logistique et technique ! Vous étiez toujours prêts pour m'aider à transporter, déplacer, optimiser mes expérimentations. J'ai appris à déplier des tréteaux et aussi à couler un collègue en canoë.

Merci également aux collègues et stagiaires qui m'ont accompagnée sur le terrain : Dolma, Mia, Paul et particulièrement Sophie, Nadège et Mathilde (Anti-Jacky team), sans qui les relevés de végétation n'auraient pas été possibles.

Je remercie Gregory, Renaud et Fanny pour leur aide précieuse dans l'identification des plantules, la mise en place du protocole et aussi pour les astuces sur R, un charmant logiciel avec qui j'ai partagé de longs moments.

Merci à Patrick Bourdige (Entreprise Zygene), qui a pris le temps de répondre à mes questions et qui m'a expliqué avec passion et patience son métier. Merci également à Fanny Greulich et Sylvain Abdulhak (CBNA) pour leur appui sur la création de mon protocole.

Enfin, je remercie les enseignants encadrants de l'option PAMEQ.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Remerciements | 4 |
| Table des matières | 5 |
| Liste des figures | 6 |
| Liste des tableaux | 7 |
| Liste des annexes | 7 |
| Glossaire | 8 |
| Préambule | 9 |
| Le génie végétal | 9 |
| Introduction..... | 11 |
| Le projet Romanche-Gavet et ses objectifs..... | 11 |
| L'évaluation de la restauration écologique par des indicateurs | 12 |
| Les modalités de recolonisation de la végétation sontanée..... | 13 |
| Objectifs du stage | 14 |
| Matériels et méthodes | 15 |
| A. Description et caractérisation du site d'étude | 15 |
| 1/ Description du site d'étude et des aménagements réalisés | 15 |
| 2- Etude de la variabilité spatiale du site | 17 |
| B. Analyse de la végétation | 18 |
| 1- La végétation ligneuse plantée..... | 18 |
| a) Les massifs de boutures et massifs de plants | 18 |
| b) Les lits de plants et plançons | 18 |
| 2- La végétation herbacée..... | 19 |
| a) La végétation herbacée semée | 19 |
| b) La végétation herbacée spontanée..... | 20 |
| C. Analyse des relevés et analyses statistiques | 20 |
| 1- Étude de la réussite des plantations de ligneux | 20 |
| a) Les taux de mortalité | 20 |
| b) La croissance des boutures | 20 |
| 2- Étude des semis et de la recolonisation | 20 |
| a) Analyse des relevés de végétation | 20 |
| <input type="checkbox"/> Évaluation des filtres biogéographiques et du contexte environnemental | 20 |
| <input type="checkbox"/> Évaluation biotique | 21 |
| <input type="checkbox"/> Étude de certains traits biologiques | 21 |
| b) Tests statistiques sur les facteurs biotiques confrontés aux facteurs abiotiques | 21 |
| c) Analyses statistiques sur les traits biologiques confrontés aux facteurs abiotiques | 22 |
| Résultats..... | 23 |
| A. Étude de la réussite des plantations de ligneux | 23 |
| 1- Taux de mortalité des boutures, plants et lits de plants et plançons en fonction du contexte géographique..... | 23 |
| 2- La croissance des boutures | 24 |
| B. Étude des herbacées | 26 |
| 1- Evaluation de la réussite des deux types de semis | 26 |
| a) Recouvrement du sol par la végétation herbacée..... | 26 |
| b) Composition des semis | 26 |

| | |
|---|----|
| 2- Evaluation du semis et de la recolonisation naturelle en fonction des facteurs abiotiques..... | 27 |
| a) Étude de l'effet des variables abiotiques sur le nombre de points de contact et la richesse spécifique..... | 27 |
| b) Indice de renaturation..... | 28 |
| c) Étude des espèces végétales exotiques envahissantes..... | 29 |
| 3- Etude des traits biologiques d'Ellenberg | 29 |
| Discussion | 31 |
| A. Étude de la réussite des plantations de ligneux | 31 |
| 1- Taux de mortalité des boutures, plants et lits de plants et plançons en fonction du contexte géographique..... | 31 |
| 2- La croissance des boutures | 32 |
| B. Étude des herbacées..... | 32 |
| 1- Evaluation de la réussite des deux types de semis | 32 |
| a) Recouvrement du sol par la végétation herbacée..... | 32 |
| b) Composition des herbacées..... | 34 |
| 2- Evaluation du semis et de la recolonisation naturelle en fonction des facteurs abiotiques..... | 35 |
| a) Étude de l'effet des variables abiotiques sur le nombre de points de contact et la richesse spécifique..... | 35 |
| b) Indice de renaturation..... | 35 |
| c) Étude des espèces végétales exotiques envahissantes..... | 35 |
| 3- Etude des traits biologiques d'Ellenberg | 36 |
| Conclusion..... | 37 |
| Bibliographie..... | 38 |
| Annexes..... | 43 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure n°1: Les différents types d'aménagement de berge (Cavaillé et al., 2015)..... | 9 |
| Figure n°2: Photographie des aménagements réalisés en aval direct..... | 11 |
| Figure n°3 : Règles d'assemblages des communautés végétales (Keddy, 1992 ; Cristofoli et Mahy, 2010) | 13 |
| Figure n°4 : Photographie des lits de plants et plançons et des massifs de boutures (bas de berge) réalisés en aval rive droite du barrage (Mars 2016)..... | 15 |
| Figure n°5 : Photographie des massifs de plants (haut de berge)..... | 16 |
| Figure n°6 : Photographie d'un transect de relevés au sein d'un massif de boutures en amont rive droite du barrage et estimation visuelle du recouvrement (Août 2016)..... | 19 |
| Figure n°7 : a) Taux de mortalité des boutures en fonction de leur secteur et b) Taux de mortalité des plants en fonction de leur secteur | 23 |
| Figure n°8 : Taux de mortalité des lits de plants et plançons | 24 |
| Figure n°9 : a) Hauteur des boutures (cm) de <i>Salix daphnoides</i> en fonction de leur secteur et b) Hauteur des boutures (cm) de <i>Salix eleagnos</i> en fonction de leur secteur | 24 |
| Figure n°10 : Hauteur en cm des boutures de <i>Salix purpurea</i> en fonction du secteur de mise en œuvre..... | 25 |

| | |
|--|----|
| Figure n°11 : Recouvrement du sol par la végétation herbacée, en haut de berge et bas de berge (%) | 26 |
| Figure n° 12 : Composition des communautés herbacées en Poaceae, Plantaginaceae, Fabaceae, Equisetaceae et Asteraceae | 26 |
| Figure n°13 : a) Nombre de points de contact des semis en fonction des différents secteurs et b) Richesse spécifique des semis en fonction des différents secteurs | 27 |
| Figure n°14 : Indice de renaturation (% d'espèces spontanées)..... | 28 |
| Figure n°15 : Analyse en Composantes Principales (ACP) des indices d'Ellenberg L, N et F. Projection des individus (96 transects) sur le premier plan factoriel..... | 29 |
| Figure n°16 : Photographie de la rive droite, en amont du barrage montrant l'hétérogénéité de développement des espèces herbacées et la présence de friches (Août 2016)..... | 33 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau n°1 : Répartition des surfaces de massifs | 18 |
| Tableau n°2 : Tableau des p-valeurs relatives aux tests de comparaison de moyenne effectués sur les indices d'Ellenberg L, N et F en fonction de différentes variables explicatives (Rive, Position par rapport au barrage, Secteur, Aménagement, Type de semis) | 30 |

Liste des annexes

| | |
|---|----|
| Annexe I : Cartographie des plantations (en amont et en aval du barrage)..... | 43 |
| Annexe II : Cartographie des plantations avec le plan d'échantillonnage..... | 45 |
| Annexe III : Liste des transects de relevés réalisés sur les herbacées. Les numéros de l'identifiant correspondent aux numéros inscrits sur la cartographie (Annexe II) | 46 |
| Annexe IV : Tableaux des p-valeurs associées aux tests statistiques réalisés | 48 |
| Annexe V : Proportion des semis en espèces annuelles et vivaces..... | 51 |
| Annexe VI : Fréquence relative des espèces par secteur (Uniquement les espèces dont la fréquence relative est > à 0,01). | 52 |
| Annexe VII : Espèces relevées sur les transects | 54 |

Glossaire

Génie v/s ingénierie : le génie représente le corps des connaissances théoriques, l'ensemble des connaissances raisonnées (scientifiques) et des moyens appropriés (techniques) propres à un domaine d'activités. Alors que l'ingénierie correspond aux applications concrètes pratiques (Coulon, 2009).

Génie écologique : implique la manipulation de matériaux naturels, d'organismes vivants et de l'environnement physico-chimique pour atteindre les buts spécifiques des hommes et résoudre les problèmes techniques (Laugier, 2012).

Génie civil : il s'appuie sur des matériaux fabriqués par l'homme, comme l'acier ou le béton (Laugier, 2012).

Génie végétal : ensemble des techniques et méthodes utilisant des végétaux, notamment les propriétés mécaniques et/ou biologiques du vivant, afin de :

- Contrôler, stabiliser et gérer des sols érodés
- Restaurer, réhabiliter ou renaturer des milieux dégradés
- Epurer et dépolluer des sols et des eaux par phytoréhabilitation ou phytoremédiation (Rey, 2012).

Restauration écologique : procédé de réparation des dommages causés par l'homme à la diversité ou à la dynamique d'écosystèmes indigènes (Jackson et al., 1995).

Trait biologique : Les traits biologiques sont décrits comme caractérisant le cycle de vie, les potentialités de résistance, ou de résilience, mais aussi la morphologie, la physiologie ou le comportement d'un taxon (Archambault et al., 2010).

Trait écologique : Les traits écologiques sont décrits par des variables caractérisant les affinités d'un taxon (sensibilité/tolérance) pour certaines caractéristiques de l'habitat, comme sa distribution spatiale, ses préférences en matière d'habitat ou encore aux principaux paramètres physico-chimiques de la colonne d'eau : nutriments, matière organique, salinité, oxygénation... (Archambault et al., 2010).

Préambule

Le génie végétal

Les berges de cours d'eau constituent des milieux à l'interface des écosystèmes aquatiques et terrestres, fournissant un grand nombre de fonctions et services écologiques d'importance. Ils assurent entre autres un rôle de corridor écologique, de filtration des eaux et de récréation pour les populations locales (Evette et Cavaillé, 2011). Les milieux riverains naturels sont également reconnus pour leur grande biodiversité qui s'avère disproportionnellement élevée par rapport à leur étendue (Verniers, 1995).

Même si l'érosion des berges est de plus en plus reconnue comme un processus géomorphologique nécessaire au maintien du bon fonctionnement hydromorphologique et écologique des rivières, les ouvrages de stabilisation de berges sont inévitables si l'on veut protéger les infrastructures (transport, bâtiments...) de l'érosion et des inondations.

Les perturbations liées à l'homme sont nombreuses sur les berges et interviennent à plusieurs échelles. Tout d'abord, avec les gigantesques travaux d'aménagement et de chenalisation menés en France dès le XIX^{ème} siècle, la valeur écologique des cours d'eau et des berges, avec leur cortège d'espèces végétales et animales, a vu sa qualité fortement diminuer (Lachat, 1999). S'ajoutent à ces perturbations, la construction de barrages, le développement des pratiques agricoles (eutrophisation, utilisation de produits chimiques, pâturage), l'exploitation de bois, l'extraction de graviers et de sable ou encore les activités de récréation (Richardson et al., 2007).

Ces ouvrages de protection de berge peuvent être limités à des techniques lourdes comme l'enrochement, le bétonnage et l'endiguement, mais peuvent également représenter une plus grande naturalité, en faisant appel aux techniques de génie végétal (Cf. Figure n°1).

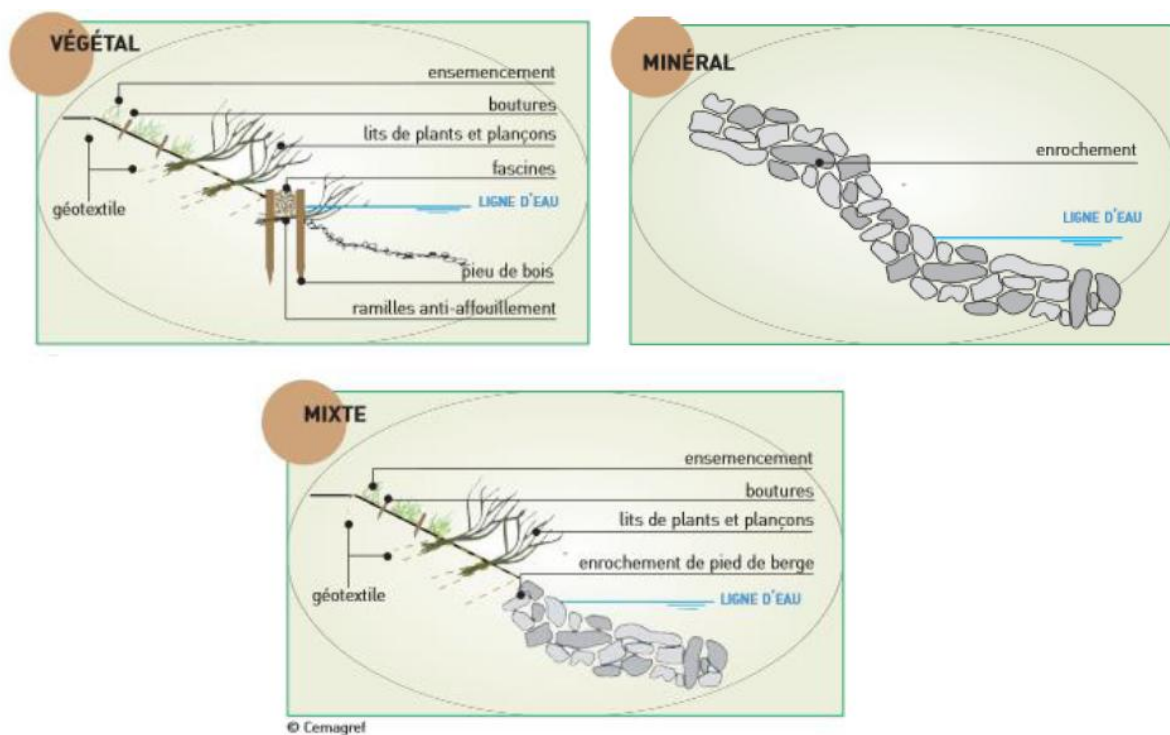


Figure n°1: Les différents types d'aménagement de berge (Cavaillé et al., 2015)

Le génie végétal, qui constitue un sous-ensemble du génie écologique, s'inspire des capacités naturelles du végétal et les utilise comme matériel de base à la construction d'ouvrages de protection de berge notamment. Il est utilisé depuis plus de 2000 ans et connaît un regain d'intérêt en Europe depuis le XIXème siècle (Labonne et al., 2007). En effet, ce procédé concerne aujourd'hui des linéaires de plus en plus importants le long des berges de cours d'eau (Cavaillé et al., 2015).

Surell déclarait déjà en 1841 que : « la végétation est le meilleur moyen de défense à opposer aux torrents. [...] L'art alors se bornera à imiter la nature, à s'emparer de ses procédés, et à opposer habilement les forces de la vie organique à celles de la matière brute » (Surell 1841). Pour de nombreux autres auteurs, le génie biologique correspond à une protection vivante inspirée de modèles naturels, voire à une imitation de la nature (Zeh, 2007 ; Adam et al. 2008).

Les matériaux utilisés dans les ouvrages de génie végétal sont donc principalement des végétaux vivants (semences, boutures, plançons, plants...) mais également des matériaux inertes à base de matière végétale (tronc, pieux, géotextile...). Lorsque des matières minérales sont utilisées (enrochement, pieux et agrafes métalliques, grillages...) en association avec des matériaux végétal, ces techniques sont nommées techniques mixtes (Lachat, 1999) (Cf. Figure n°1).

Introduction

Le projet Romanche-Gavet et ses objectifs

Dès la fin du XIXème siècle, la vallée de la Romanche devient, comme la plupart des vallées alpines, un secteur recherché pour l'énergie qu'elle recèle, fournissant de l'électricité à des industries électrochimiques et métallurgiques (carbure de calcium, ferro-alliages, fonte, silicium, aluminium, etc). En 1914, sur la commune de Livet-et-Gavet (38) turbinent sept centrales hydroélectriques (Isère patrimoine).

Pour rentabiliser les coûts et augmenter la production hydroélectrique, Électricité de France (EDF) a débuté en 2010 d'importants travaux sur les aménagements des berges de la Romanche. En effet, EDF a pour objectif de remplacer six centrales existantes, vétustes, par une seule, plus sûre, optimisant la chute disponible et permettant une réduction importante de l'impact environnemental.

Pour éviter, réduire, ou compenser les conséquences néfastes sur la faune, la flore et les milieux naturels, des propositions de mesures ont été faites par le bureau d'étude KARUM. Parmi elles, le « réaménagement des berges de la Romanche » et la « renaturation de l'emprise du chantier » visent à « [maintenir] voire [améliorer] la diversité actuelle des habitats de ce tronçon » (KARUM, 2011).

Les mesures de réduction d'impact prévues sur le site de la prise d'eau se traduisent par un réaménagement des berges du tronçon concerné à l'aide de techniques mixtes, associant enrochement en pied de berge et génie végétal en haut de berge.

La revégétalisation des berges de la Romanche s'est matérialisée par la plantation de boutures et de plants en différentes tâches hétérogènes et par l'ensemencement de l'intégralité du géotextile. Des lits de plants et plançons ont également été installés en bas de berge. L'ensemble des végétaux utilisés (semés ou plantés) ont été récoltés dans un rayon maximal de 25 kms. Ce choix délibéré d'utiliser des végétaux situés à proximité avait pour objectif de se rapprocher au maximum d'un aménagement respectant les normes du signe de qualité « végétal local ».



Figure n°2: Photographie des aménagements réalisés en aval direct

En 2014, une convention de recherche a été signée entre Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) et EDF. Cette dernière a pour objectif principal d'élaborer des méthodes de suivi et d'évaluation de l'efficacité des techniques mixtes d'aménagement des berges concernées (Evette et al., 2016).

L'évaluation de la restauration écologique par des indicateurs

L'évaluation du succès d'une restauration peut être biotique, pour caractériser la fonctionnalité du cortège d'espèces de l'écosystème restauré, ou bien abiotique, pour identifier les perturbations possibles liées au climat (gradient d'humidité et de température) et aux propriétés physicochimiques du sol (González et al., 2015 ; Temperton et al., 2013). Une approche par les traits biologiques* et écologiques* est également souvent envisagée pour expliquer les mosaïques des communautés d'espèces étudiées en fonction des caractéristiques abiotiques temporelles et spatiales de leur habitat (Lavorel, 2002 ; Archaimbault et al., 2010).

Classiquement, l'évaluation biotique d'une restauration repose généralement sur une approche « communauté » (Cristofoli et Mahy, 2010) faisant appel à des indicateurs classiques. C'est l'approche la plus utilisée et préconisée par l'International Primer on Ecological Restoration. On définit un bon indicateur pour sa mesure simple, son coût faible, ses facilités taxonomiques et sa sensibilité aux mesures de restauration (Cristofoli et Mahy, 2010). Plusieurs composantes générales sur la communauté végétale sont prises en compte et la plupart des études incluent au moins une mesure de chaque composante (Ruiz-Jaen et Mitchell Aide, 2005 ; SERI, 2004) :

- La composition et la diversité (richesse et diversité spécifique) (González et al., 2015 ; Cavaillé et al., 2015), qui nous renseignent sur la fonctionnalité de la végétation installée, la part de végétation indigène ayant recolonisé et la dispersion des espèces allochtones (Ruiz-Jaen et Mitchell Aide, 2005).
- La structure de la végétation (recouvrement, densité, strates...) (González et al., 2015), qui va nous informer sur ses fonctions stabilisatrices du sol, le rétablissement de la faune et surtout des oiseaux mais également nous aider à prédire les successions végétales (Ruiz-Jaen et Mitchell Aide, 2005).

L'évaluation de l'environnement abiotique porte généralement sur des mesures directes sur le terrain de différents paramètres concernant : le sol, le régime d'humidité, les facteurs climatiques ainsi que tous les autres processus et caractéristiques maintenant le biote (Laugier, 2012). Ces dernières représentent des facteurs d'échec potentiels lors d'opérations de restauration.

Pour faire le lien entre ces facteurs biotiques et abiotiques et expliquer comment des variations environnementales peuvent influencer les communautés végétales, une approche par les traits bioécologiques, a souvent été menée en écologie (Violle et al., 2007). En effet, cette quête de règles générales associant les espèces, leur condition environnementale et, en particulier les relations des facteurs biotiques et abiotiques avec les caractéristiques des espèces (Grime et al., 2014 ; Ellenberg, 1974 ; Southwood, 1977), est poursuivie par de nombreux auteurs depuis des décennies (Lavorel et Garnier, 2002). Divers types de traits sont aujourd'hui utilisés pour évaluer la structure et la dynamique des communautés ainsi que le fonctionnement d'un écosystème (Lavorel et Garnier, 2002 ; Violle et al., 2007).

Les modalités de recolonisation de la végétation santonée

Afin d'évaluer la réussite d'un aménagement de berge sur le plan environnemental, il est indispensable de comprendre les mécanismes et processus de recolonisation et de développement de la végétation sur un site ayant été entièrement mis à nu (Young et al., 2001).

En effet, plusieurs contraintes peuvent entraver la colonisation, l'établissement ou la persistance à long terme de certaines espèces. Selon les auteurs, ces contraintes sont identifiées sous différentes catégories de filtres environnementaux. De manière générale, trois grandes classes ressortent fréquemment (Keddy, 1992, Cristofoli et Mahy, 2010):

- Les filtres biogéographiques
- Les filtres abiotiques
- Les filtres biotiques

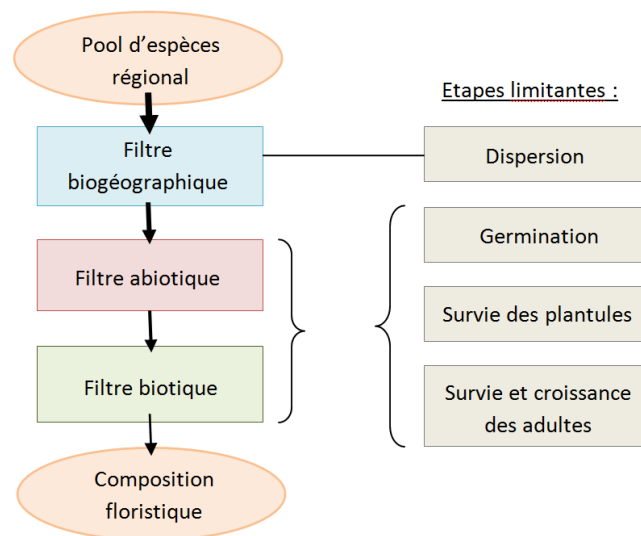


Figure n°3 : Règles d'assemblages des communautés végétales (Keddy, 1992 ; Cristofoli et Mahy, 2010)

Filtres biogéographiques

Les végétaux se dispersent par le vent et l'eau, à l'aide d'autres espèces, ou par leurs propres mouvements (Cristofoli et Mahy, 2010). Dans un contexte de berges de cours d'eau, la rivière offre un corridor de propagules très large et dont les mécanismes d'implantations sont parfois complexes (Goodson et al., 2001) mais reconnus comme importants dans la structuration de la flore et le maintien de la richesse des berges (Richardson et al., 2007). En effet, la localisation finale des propagules hydrochores dépend du régime de la rivière (débit) et de la morphologie de son lit (Richardson et al., 2007). Toutefois, il existe aussi une forte influence des inondations et crues, limite majeure pour la distribution des espèces des berges. En effet, les opportunités de recrutement se font souvent à la suite d'une inondation, et la disponibilité en eau influence l'établissement, la croissance et la survie des plantes des berges (Richardson et al., 2007 ; Goodson et al., 2001). Dans notre étude, nous prendrons en compte certaines caractéristiques géographiques pour expliquer des recolonisations différentes suivant les aménagements.

De plus, le remaniement total du sol pour la construction du nouveau barrage peut permettre une remobilisation de propagules présentes dans la banque du sol, susceptibles de s'exprimer (Gurnell et al., 2006).

Filtres abiotiques

Ces derniers sont liés au climat (gradient de température et d'humidité) ainsi qu'aux facteurs physiques et chimiques du sol (Temperton et al., 2013).

Filtres biotiques

Lorsqu'une espèce végétale réussit à franchir les filtres de dispersion et n'est pas contrainte par les filtres abiotiques, son inclusion dans l'assemblage d'espèces sera déterminée par les filtres biotiques (Goodson et al., 2001 ; Cristofoli and Mahy, 2010). Ces derniers font référence aux multiples interactions pouvant survenir entre les différentes espèces (compétition, facilitation, ...) (Fisher, 1990 ; Cristofoli et Mahy, 2010).

L'évaluation des interactions et des assemblages de la végétation sera limitée la première année de suivi. En effet, ces deux derniers paramètres seront fortement conditionnés par la composition et la réussite du semis, un an après travaux. Nous pourrions toutefois, évaluer si cet ensemencement n'entrave pas la recolonisation naturelle, suivant les différents aménagements

Objectifs du stage

Ce stage s'inscrit dans la convention passée entre EDF et IRSTEA, visant à évaluer sur le plan fonctionnel et environnemental l'efficacité des techniques mixtes d'aménagement mises en œuvre sur le site de Romanche-Gavet.

Cette étude se bornera à l'identification et l'analyse des facteurs de réussite et des causes d'échec de cet ouvrage. Nous ferons dans un premier temps l'hypothèse de la bonne prise en compte des contraintes biophysiques ainsi que des conditions hydro-géomorphologiques du site, par les concepteurs de l'ouvrage. Nous nous concentrerons alors uniquement sur l'explication de la réussite des aménagements par les caractéristiques biotiques et abiotiques du milieu, ainsi que par les conditions de mise en œuvre.

Pour préciser cette dernière problématique, nous poserons une seconde hypothèse. En effet, nous partirons du principe que le site d'étude présente une variabilité au sein même des caractéristiques abiotiques qui le décrivent. Nous admettrons que cette variabilité abiotique peut influencer de façon différente le développement des espèces présentes sur le site.

L'évaluation portera sur les deux types de végétations présentes, à savoir, la végétation ligneuse plantée, représentée par les massifs de boutures et de plants, ainsi que les lits de plants et plançons et la végétation herbacée semée. On inclura également l'analyse du développement des espèces spontanées, issues de la recolonisation naturelle.

Il vient alors la problématique suivante : « Quels sont les caractéristiques abiotiques du milieu pouvant influencer le développement des espèces végétales mises en œuvres et issues de la recolonisation naturelle, lors d'un ouvrage de génie végétal ? »

Matériels et méthodes

A. Description et caractérisation du site d'étude

Le projet hydro-électrique de Romanche-Gavet est situé sur la commune de Livet et Gavet, dans la vallée de Bourg d'Oisans, au Sud Est de Grenoble (38). Les berges concernées (rives gauche et droite) par cette restauration se trouvent en amont et en aval direct du barrage de prise d'eau sur un linéaire total de 800 mètres.

1/ Description du site d'étude et des aménagements réalisés

Les berges étudiées ont été aménagées à l'aide de techniques mixtes associant enrochement de pied de berge et génie végétal en haut de berge. La partie supérieure de la berge est protégée avec un géotextile en fibres coco.

Différentes techniques de génie végétal y sont employées en fonction des contraintes et de la hauteur de berge.

Les lits de plants et plançons

Cette technique est adaptée pour la végétalisation et la consolidation de talus de profil de pente élevée, présentant des risques de glissement (Adam et al., 2008).

1 à 4 rangées de lits de plants et plançons ont été disposées juste au-dessus des enrochements (Cf. Figure n°4). 25 espèces composent ces lits de plants et plançons, dont 4 espèces de saules. Un mètre linéaire de lit est constitué de 25 ramilles de saules et de 2 arbustes. On compte au total environ 2130 mètres linéaires de lits de plants et plançons sur cet ouvrage.

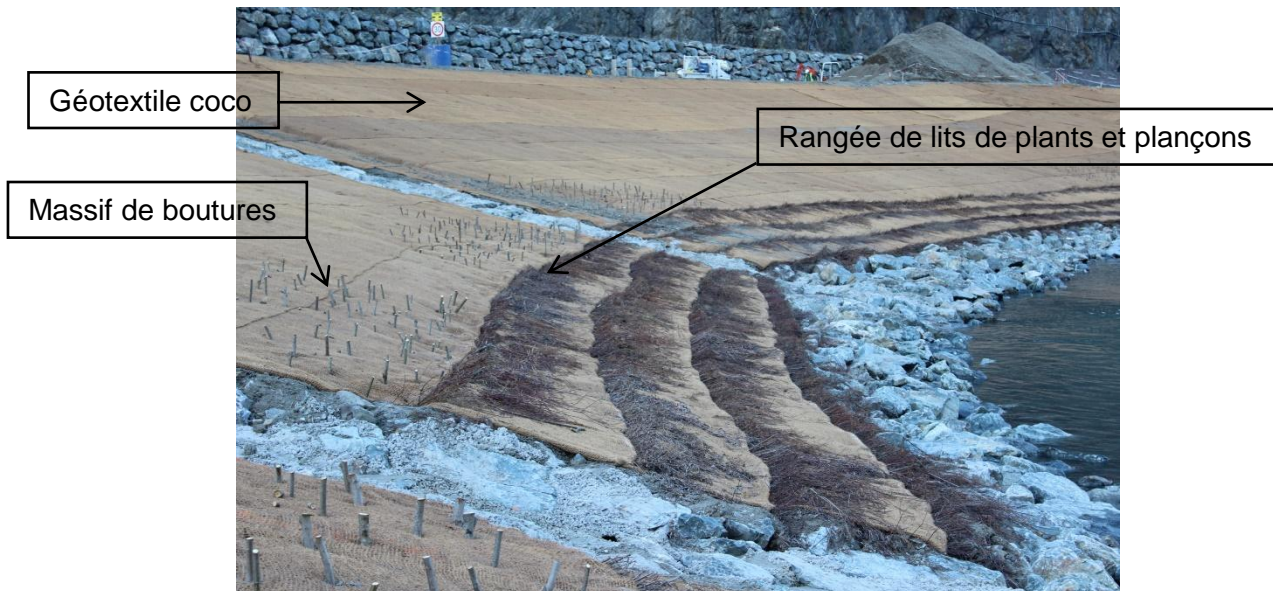


Figure n°4 : Photographie des lits de plants et plançons et des massifs de boutures (bas de berge) réalisés en aval rive droite du barrage (Mars 2016)

Les massifs de bouture

Les boutures sont utilisées pour densifier le couvert végétal. La stabilisation de la berge n'est pas immédiate, et est souvent non immédiat (toujours accompagné d'autres techniques) (Adam et al., 2008).

Des massifs de boutures de saule (3 à 4 unités par m²) ont été plantés en bas de berge, au-dessus des lits de plants et plançons (Cf. Figure n°4). 3 espèces différentes composent majoritairement ces massifs (*Salix daphnoides*, *Salix eleagnos* et *Salix purpurea*) qui représentent une surface totale d'environ 1450 m².

Les massifs de plants

Cette technique vise à favoriser le développement de formations végétales riveraines, tant au niveau des essences que des strates et aux qualités complémentaires dans l'utilisation de l'espace sous-terrain, aspect de stabilisation de la berge non immédiat (toujours accompagné d'autres techniques) (Adam et al., 2008).

Des massifs de jeunes plants à racines nues à dominante arbustive ont également été plantés un peu plus haut sur la berge avec une densité de 1 à 1,5 unités par m². Ces massifs sont composés de plusieurs espèces d'arbustes et couvrent une surface totale d'environ 9000 m² (Cf. Figure n°5).

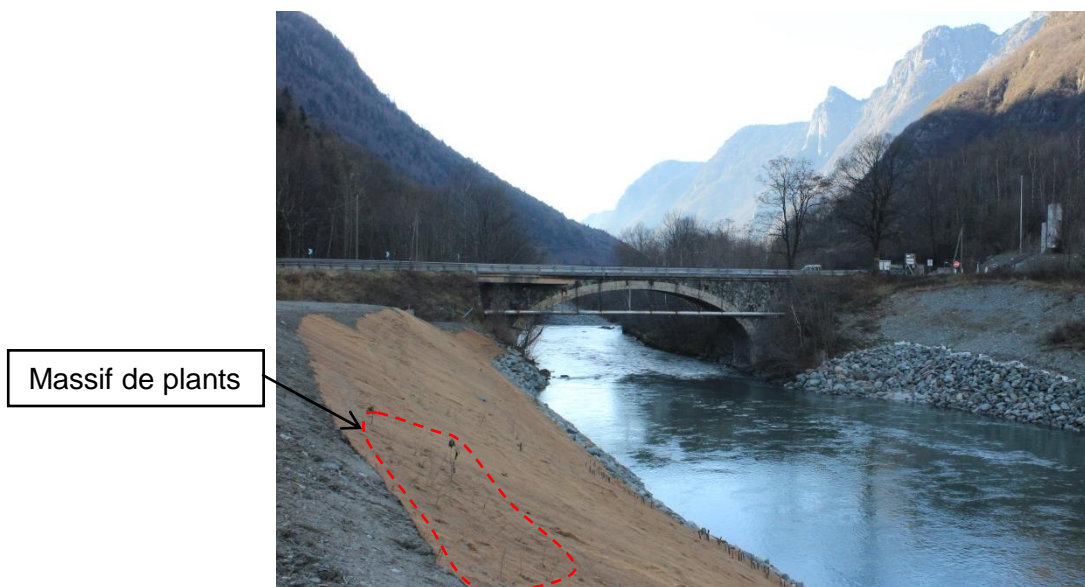


Figure n°5 : Photographie des massifs de plants (haut de berge) mis en oeuvre en aval rive gauche du barrage (Mars 2016)

Les ensemencements

L'ensemencement est une pratique accompagnant systématiquement la plupart des autres techniques issues du génie végétal, dans le souci de favoriser au plus tôt l'émergence d'un tapis protecteur contre les effets du ruissellement et, plus généralement, contre les phénomènes d'érosion de surface, ainsi que dans le but de limiter l'installation d'espèces invasives indésirables sur des sols fraîchement remaniés. Beaucoup d'espèces herbacées possèdent cependant un réseau racinaire suffisamment développé pour que l'on puisse, en

outre, leur attribuer un rôle stabilisateur dans les zones faiblement sollicitées (Adam et al., 2008).

Un ensemencement avec deux mélanges de graines a été réalisé : Le premier, en pied de berge (dans les lits de plants et plançons et les massifs de boutures) à une densité de 10 à 15g/m². Il est composé d'espèces provenant de prairies plutôt hygrophiles et est définitif. On le nommera semis BB pour Bas de Berge. Le second, est mis en place à partir du milieu jusqu'au sommet de la berge, à une densité de 3g/m². Il provient de prairies plus xérophiles et sera réensemencé en automne 2016 pour atteindre la même densité que le mélange en pied de berge. On le nommera semis HB pour Haut de Berge. Ce semis est également mis en œuvre dans les massifs de boutures et de plants.

Des relevés GPS (GPS de précision Trimble) ont également été réalisés pour cartographier sous QGIS (Quantum Gis Development Team, 2012) (Cf. Annexe I).

2- Etude de la variabilité spatiale du site

Dans le but de prendre en compte la variabilité spatiale du site d'étude, ce dernier a été divisé en quatre secteurs (AMD, AVD, AMG, AVG) suivant les deux variables abiotiques suivantes :

La position par rapport au barrage

Les deux modalités « Amont » (AM) et « Aval » (AV) permettent de prendre en compte la variabilité du niveau de l'eau, qui fluctue différemment en amont et en aval. En effet, en amont du barrage, malgré une hauteur importante des enrochements (entre 6 et 8 mètres pour une côte de la Romanche à 2,5 mètres), des mises en eau répétées mais ponctuelles ont lieu jusqu'aux lits de plants et plançons. En aval, la distance entre le niveau de l'eau et les premiers lits de plants et plançons reste faible (0,5 à 1,5 mètres pour une côte de la Romanche à 2,5 mètres), ce qui laisse cette zone plus sensible à d'éventuelles crues. Cette variable pourrait donc influencer le recrutement par hydrochorie des espèces indigènes, au moins sur les enrochements et les lits de plants et plançons (Goodson et al., 2001 ; Jansson et al., 2005 ; Richardson et al., 2007).

La rive

Les modalités « rive gauche » (G) et « rive droite » (D) sont essentielles à prendre en compte pour évaluer la réussite d'un aménagement de berge par du génie végétal. C'est particulièrement vrai en montagne, où les deux rives sont soumises à des expositions lumineuses différentes (adret et ubac). Ces conditions climatologiques particulières peuvent jouer sur la sécheresse subie par la végétation plantée, considérée comme l'un des principaux facteurs limitant le succès des techniques de génie végétal (Lavaine et al., 2009).

Cette variabilité géographique peut expliquer une variation dans la recolonisation des espèces spontanées au sein des quatre secteurs évoqués mais également un développement différent de la végétation semée et plantée suivant les conditions environnementales de chaque secteur. Les abréviations AMG, AMD, AVG et AVD seront utilisées pour la représentation graphique des résultats.

B. Analyse de la végétation

1- La végétation ligneuse plantée

a) Les massifs de boutures et massifs de plants

Echantillonnage : Tout d'abord, l'aire totale des massifs a été calculée à partir de la cartographie QGIS pour chaque quart de site, à la fois pour les plants et pour les boutures. Le plus grand massif (de bouture et de plants) a ensuite été retenu et 8% de sa surface totale calculée (Cf. Tableau n°1).

Tableau n°1 : Répartition des surfaces de massifs (plants et boutures) par quart de site

| Type d'aménagement | Position par rapport au barrage | Rive | Aire totale (m ²) | 8% de l'aire totale (m ²) |
|--------------------|---------------------------------|--------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Plants | Amont | Droite | 2688 | 215 |
| | Amont | Gauche | 1336 | 107 |
| | Aval | Droite | 2440 | 195 |
| | Aval | Gauche | 2548 | 204 |
| Boutures | Amont | Droite | 410 | 33 |
| | Amont | Gauche | 365 | 29 |
| | Aval | Droite | 178 | 14 |
| | Aval | Gauche | 517 | 41 |

Pour obtenir une représentativité suffisante, des relevés par quart de site ont été effectués sur la base de ces 8 %, soit environ 200m² pour les massifs de plants et 40 m² pour les massifs de boutures. En ce qui concerne les plants, les relevés ont été effectués sur 8 quadrats de 25m² (5m sur 5m) placés de façon aléatoire, sous contrainte d'hétérogénéité spatiale des massifs. Sachant que la densité de plantation est de 3 à 4 plants par m², cela correspond à un relevé de 600 à 800 individus sur 34 espèces présentes en quantité inégale. Pour les massifs de boutures, les relevés représentent 8 quadrats de 5 m² (5m sur 1m) placés également aléatoirement par quart de site. Sachant que la densité de plantation est également de 3 à 4 boutures par m², cela correspond à un relevé de 120 à 160 individus sur 3 espèces présentes. La répartition des quadrats est illustrée en Annexe II.

Protocole : Pour chaque type de massif et sur chaque quadrat relevé, chaque individu est identifié et les plants morts sont comptabilisés. Dans le cas des massifs de boutures, en faisant l'hypothèse d'une plantation homogène, la hauteur maximale depuis le sol jusqu'au bourgeon terminal est mesurée pour chaque plante vivante (Breton et al., 2014).

b) Les lits de plants et plançons

Échantillonnage : Huit transects linéaires ont été répartis entre les rangées de lits de plants et plançons le long de chaque secteur, soit 32 transects sur l'intégralité du site. Ces transects ont été placés uniquement sur les rangées inférieures et supérieures dans le but de prendre en compte un maximum de variabilité le long du gradient vertical de la berge (Cf. Annexe II).

Protocole : Sur deux mètres linéaires, chaque rameau sortant directement du boudin de géotextile a été identifié et les rameaux morts ont été comptabilisés.

2- La végétation herbacée

a) La végétation herbacée semée

Échantillonnage : Grâce à la cartographie réalisée, 24 transects de relevés ont été répartis équitablement sur chaque secteur. Cela correspond à 6 transects, soit 150 points de contact par modalité pour chaque type de semis (Cavaillé et al., 2013 ; Harris et al., 2005). Pour les semis situés au sein des massifs de boutures et de plants, les transects ont été positionnés au sein de 6 quadrats sur 8 de façon aléatoire. Le positionnement des quadrats est illustré en Annexe II et les numéros des transects relevés sont listés en Annexe III.

La détermination de la longueur et le positionnement des transects dans les zones ensemencées ont été contraints par l'hétérogénéité spatiale des différents aménagements.

En ce qui concerne le semis BB, situé dans les lits de plants et plançons, les mêmes transects ont été utilisés pour effectuer à la fois les relevés sur les semis bas de berge et ceux sur les lits de plants et plançons. Pour le semis HB, l'emplacement des massifs de bouture majoritairement en bas de berge et des massifs de plants en haut de berge, ont contraint à positionner les transects en milieu de berge. Pour éviter une nouvelle fois les effets de bordure, les transects ont été positionnés à 1,5 mètre minimum d'un autre type d'aménagement (massifs ou lit de plants et plançons). Pour les deux types de semis, les transects ont été positionnés équitablement tout le long de la rive.

Protocole : La méthode des points de contact (Daget et Poissonnet, 1971) a été utilisée pour analyser cette revégétalisation des berges. En effet, cette méthode permet de relever aussi bien la végétation herbacée qu'arbustive et conserve une bonne précision fréquentielle sur chaque strate (Goodall, 1952). Les relevés ont été effectués sur 24 transects linéaires parallèles au cours d'eau sur chaque type de semis. A l'aide d'une tige d'1 mètre de long et d'un centimètre de diamètre, des points de contact sont effectués tous les 20 cm le long d'un transect de 5 mètres. Sur chaque point, tous les contacts de la tige avec une espèce sont comptabilisés.

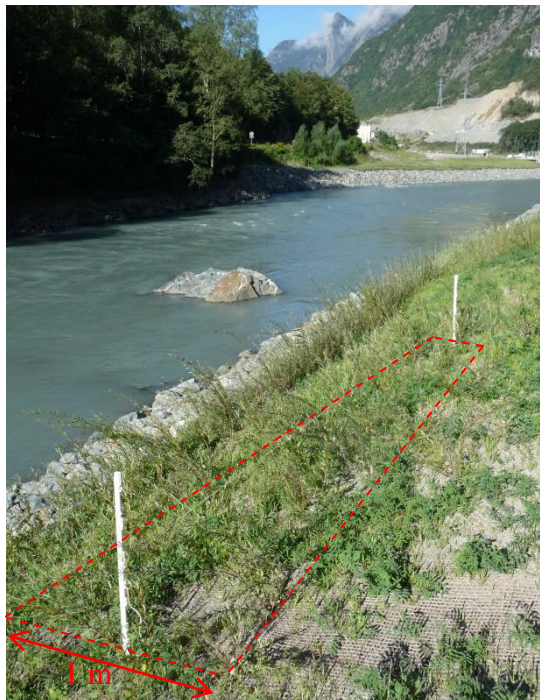


Figure n°6 : Photographie d'un transect de relevés au sein d'un massif de boutures en amont rive droite du barrage et estimation visuelle du recouvrement (Août 2016)

Pour chaque relevé floristique effectué par la méthode des points de contact, la distance à l'eau du transect et la pente sont relevées. Le recouvrement du sol par la végétation herbacée est également estimé visuellement, sur un rectangle allant à 50cm de chaque côté du transect, matérialisé sur la Figure n°6.

b) La végétation herbacée spontanée

Un seul relevé floristique sur chaque type de semis et d'aménagement a servi à répondre à deux objectifs différents : évaluer le semis réalisé et le recrutement des espèces végétales spontanées.

C. Analyse des relevés et analyses statistiques

1- Étude de la réussite des plantations de ligneux

a) Les taux de mortalité

Protocole : Tout d'abord, les taux de mortalité des plants, boutures et lits de plants et plançon, qui représentent la variable à expliquer (biotique) ont été calculés pour l'ensemble du site sur le logiciel R (R Development Core Team, 2005). Les conditions d'application d'une ANOVA ont été vérifiées pour chaque confrontation de variables abiotique et biotique (dépendance et normalité de distribution des variables biotiques, conditions d'homoscédasticité des échantillons) (Lyazrhi, 2005). Lorsque les variables biotiques respectaient toutes ces conditions, elles ont été soumises à une ANOVA. Dans le cas contraire, un test non paramétrique de Wilcoxon a été réalisé sur les variables abiotiques « Rive » et « Position par rapport au barrage » et un test de Kruskal-Wallis a été effectué sur la variable abiotique « Secteur » (Rasch, 1993). L'ensemble des tests ont été réalisés sur le logiciel R (R Development Core Team, 2005).

b) La croissance des boutures

Protocole : Les variables à expliquer sont ici les hauteurs des boutures de *Salix daphnoides*, *Salix eleagnos* et *Salix purpurea*. Les mêmes tests que précédemment ont été réalisés, suivant les caractéristiques de chaque variable étudiée (Rasch, 1993 ; Lyazrhi, 2005).

2- Étude des semis et de la recolonisation

a) Analyse des relevés de végétation

➤ Évaluation des filtres biogéographiques et du contexte environnemental

Des relevés de pente et de distance à l'eau ont été réalisés sur chaque transect. En effet, la pente et ses risques d'érosion peuvent expliquer des taux de recouvrement bas de la végétation, la distance à l'eau est à corrélérer avec un manque d'humidité ou un excès de sécheresse.

➤ *Évaluation biotique*

Plusieurs variables ou indices biotiques ont été calculés à l'échelle de chaque transect à partir de la base de données issue des relevés de végétation :

- le nombre de points de contacts, qui nous informe sur la densité de végétation sur un transect (González et al., 2015 ; Ruiz-Jaen et Mitchell Aide, 2005).
- la richesse spécifique, qui correspond au nombre d'espèces sur chaque transect (Cavaillé et al., 2015 ; González et al., 2015)
- le nombre d'Espèces Végétales Exotiques Envahissantes (EVEE) (Terrin et al., 2014).
- l'indice de renaturation (Huc, 2016). Il est égal au nombre d'espèces non semées par rapport au nombre d'espèces totales inventoriées (plus cet indice tend vers 1, plus la végétation étudiée peut être qualifiée de « naturelle ». Les espèces ont été catégorisées de « semées » ou « spontanées » sur dire d'expert (Ghislain Huyghe, Biotec).

$$\text{Indice de renaturation} = \frac{\text{Nb d'espèces non semées}}{\text{Nb d'espèces total}}$$

➤ *Étude de certains traits biologiques*

Les traits biologiques sont des caractéristiques physiques, physiologiques ou évolutives, intégrables à l'échelle de l'espèce et que l'on peut relier à des stratégies ou des processus écologiques comme le cycle de vie, les dynamiques de communautés, ou la capacité de dispersion (Cavaillé, 2014).

Les indices d'Ellenberg (Ellenberg, 1974), correspondant à la tolérance de chaque espèce à différents paramètres environnementaux ont été considérés. Dans cette étude, il a été choisi de se concentrer sur trois indices, issus du référentiel baseflor (Julve, 2014) :

- L'humidité hédaphique (F), qui sert à mettre en exergue des phénomènes d'assèchement du sol, est un facteur déterminant pour la réussite et le développement des espèces plantées, semées et spontanées en berge de cours d'eau.
- La trophie (N), peut également nous éclairer sur des conditions de concentration excessive en azote ou en phosphore du sol remanié (Charles et Viry, 2015).
- La lumière (L), autrement dit l'ensoleillement, est également un facteur naturel jouant un rôle primordial dans le développement des espèces semées.

Ces indices nous ont permis de réaliser une estimation des trois derniers paramètres écologiques (F, N et L) sur chaque transect de relevés.

b) Tests statistiques sur les facteurs biotiques confrontés aux facteurs abiotiques

Protocole : Les conditions d'application d'une ANOVA ont été vérifiées pour chaque confrontation de variables abiotique et biotique (dépendance et normalité de distribution des variables biotiques, conditions d'homoscédasticité des échantillons). Lorsque les variables biotiques respectaient toutes ces conditions, elles ont été soumises à une ANOVA. Dans le cas contraire, un test non paramétrique de Wilcoxon a été réalisé sur les variables abiotiques « Rive » et « Position par rapport au barrage » et un test de Kruskal-Wallis a été effectué sur la variable abiotique « Secteur » (Rasch, 1993 ; Lyazrhi, 2005).

c) Analyses statistiques sur les traits biologiques confrontés aux facteurs abiotiques

Protocole : Il s'agit d'associer à chaque espèce végétale à partir du référentiel des traits d'Ellenberg, une valeur de l'indice considéré. Les indices sont ensuite calculés pour chaque transect et pondérés par la fréquence de chaque espèce sur ce transect. Une Analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour identifier certaines tendances en termes de répartition des individus (transects) en fonction des traits d'Ellenberg étudiés (Dufour et Lobry, 2013). Des tests statistiques de comparaison de moyenne sont ensuite effectués pour confirmer ou infirmer ces tendances suivant la même logique que précédemment.

Résultats

A. Étude de la réussite des plantations de ligneux

Les relevés effectués sur les ligneux concernent au total 780 boutures, 1323 plants et 3938 rameaux provenant des lits de plants et plançons.

1- Taux de mortalité des boutures, plants et lits de plants et plançons en fonction du contexte géographique

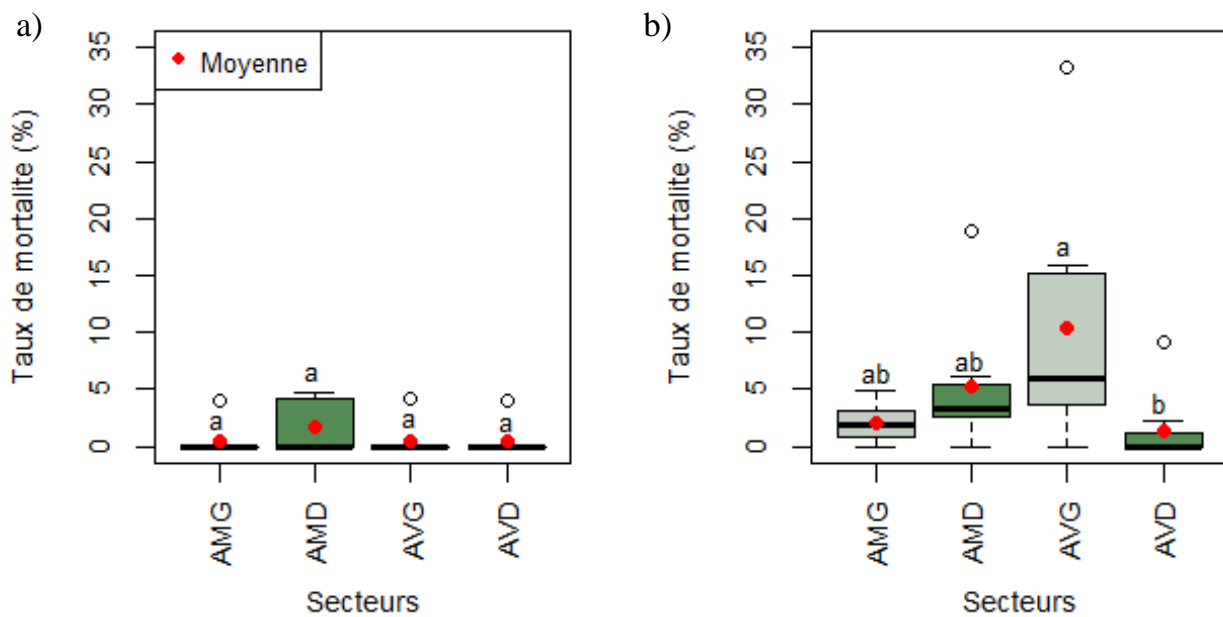


Figure n°7 : a) Taux de mortalité des boutures en fonction de leur secteur et b) Taux de mortalité des plants en fonction de leur secteur

Le taux de mortalité des boutures reste très faible (le taux maximal étant d'1,6% en amont rive droite). De plus, aucune différence significative n'est observée entre les différentes variables géographiques (Rive/Position par rapport au barrage/Secteur) (Figure n°7, a).

En ce qui concerne les plants, leur mortalité dépend du secteur sur lequel ils ont été implantés (p -valeur $Kruskal\ Wallis = 0.011$) (Cf. Figure n°7, b), et Annexe IV, A) des p -valeurs associées). On peut notamment remarquer une grande variabilité du taux de mortalité des plants en aval rive gauche (de 0 à 15%). Ce secteur présente le taux de mortalité moyen le plus élevé (10,4%). Les variables « Rive » et « Position par rapport au barrage » n'ont pas d'effet significatif sur la mortalité des plants.

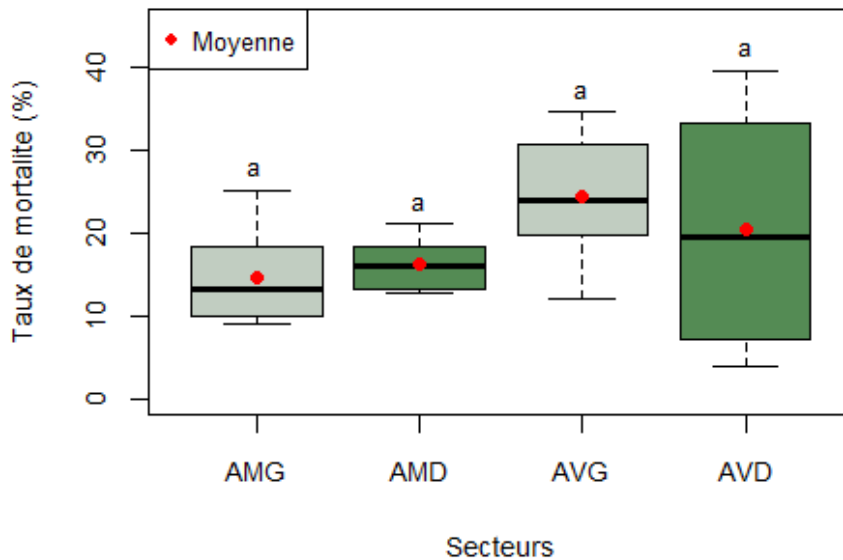


Figure n°8 : Taux de mortalité des lits de plants et plançons en fonction du secteur

Le taux de mortalité des lits de plants et plançons apparaît en moyenne plus élevé que celui des plantations précédentes (entre 15 et 24 % environ). Une différence significative de ce taux est également observable entre l'amont et l'aval du barrage (p -valeur $_{Wilcoxon} = 0.039$). En effet, le taux de mortalité des lits de plants et plançons est plus faible en amont (environ 15 %) qu'en aval (entre 20 et 25%). On peut également noter une grande variabilité du taux de mortalité en aval rive droite, allant de 5 à 40% environ.

Au contraire, les tests statistiques ont démontré que la position en rive gauche ou en rive droite des lits de plants et plançons n'influence pas leur taux de mortalité de façon significative.

2- La croissance des boutures

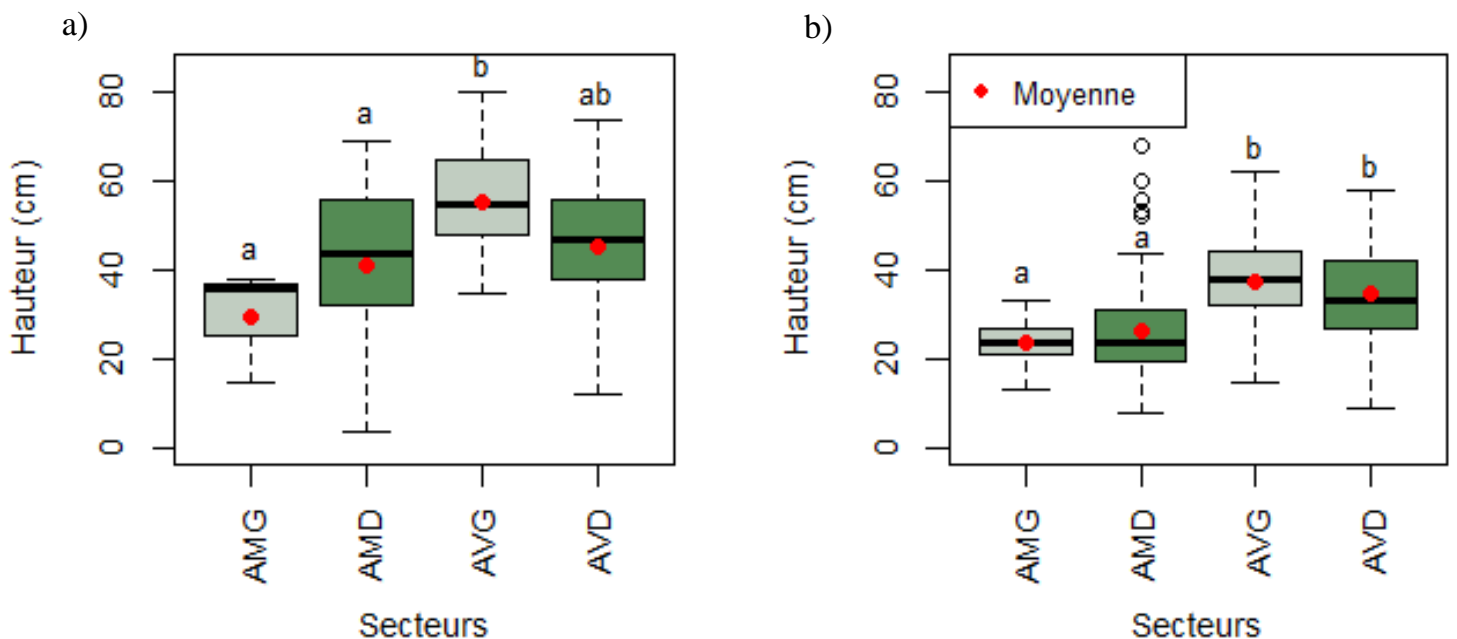


Figure n°9 : a) Hauteur des boutures (cm) de *Salix daphnoides* en fonction de leur secteur et b) Hauteur des boutures (cm) de *Salix eleagnos* en fonction de leur secteur

Sur la Figure n°9 a), nous pouvons tout d'abord noter que la hauteur de ces deux espèces dépend de manière significative (p-valeur $_{ANOVA} = 0,008$ pour *S. daphnoides* et p-valeur $_{Kruskal\ Wallis} < 2,20 \cdot 10^{-16}$ pour *S. eleagnos*) du contexte géographique de leur mise en œuvre. En amont rive gauche, les boutures de *Salix daphnoides* atteignent en moyenne 30 cm, puis 41 cm en amont rive droite. C'est en aval que l'espèce s'est le plus développée avec des hauteurs moyennes de 56 cm en rive gauche et 45 cm en rive droite. La position en rive gauche ou en rive droite de *Salix daphnoides* n'influence pas son développement de façon significative. Par contre, sa position en aval ou en amont du barrage joue un rôle significatif sur son développement (p-valeur $_{ANOVA} = 0,026$).

Salix eleagnos (Figure n°9, b)) présente une différence de développement encore plus marquée entre l'amont et l'aval du barrage, puisqu'il possède des boutures dont les hauteurs moyennes sont de 25 cm en amont et 36 cm en aval (p-valeur $_{Wilcoxon} < 2,20 \cdot 10^{-16}$). Cette espèce présente également une différence de hauteur significative entre les deux rives (30cm en rive droite et 34cm en rive gauche en moyenne (p-valeur $_{Wilcoxon} = 4,03 \cdot 10^{-4}$), contrairement à *Salix daphnoides*.

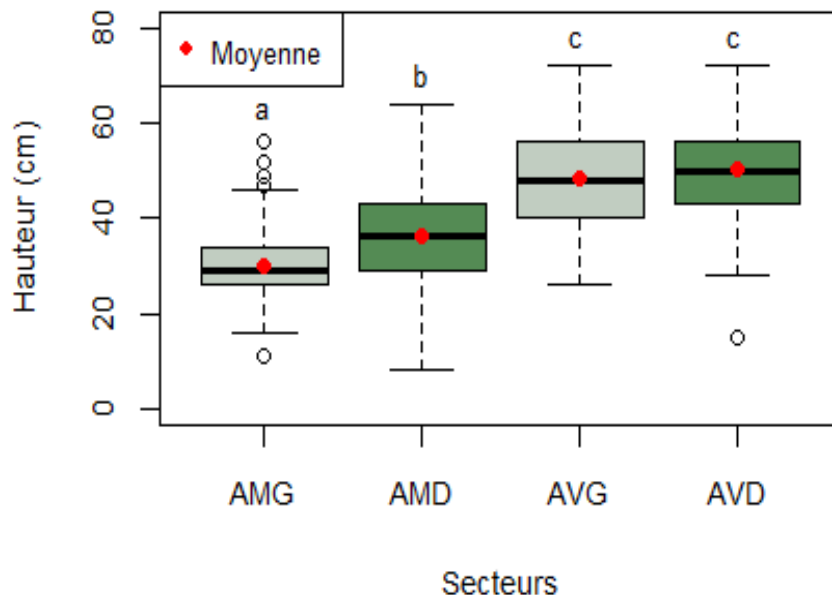


Figure n°10 : Hauteur en cm des boutures de *Salix purpurea* en fonction du secteur de mise en œuvre

Sur la Figure n°10, nous observons comme précédemment que la hauteur des boutures de *Salix purpurea* dépend de façon significative (p-valeur $_{Wilcoxon} < 2,20 \cdot 10^{-16}$) du secteur sur lequel elles se développent. En effet, ces dernières présentent des hauteurs moyennes de 30 cm en amont rive gauche, 37 cm en amont rive droite et enfin 48 et 50 cm, respectivement en aval rive gauche et rive droite, deux secteurs très proches.

Pour *Salix purpurea*, l'effet de l'emplacement du barrage est également significatif (p-valeur $_{Wilcoxon} < 2,20 \cdot 10^{-16}$). Cette espèce se développe plus rapidement en aval qu'en amont du barrage puisqu'elle gagne en moyenne 15 cm de hauteur entre ces deux modalités. Elle semble également mieux se développer en rive droite où elle gagne en moyenne 9 centimètres par rapport à la rive gauche (p-valeur $_{Wilcoxon} = 2,31 \cdot 10^{-10}$).

De manière générale, on peut finalement observer un développement plus important de *Salix daphnoides* et de *Salix purpurea* par rapport à *Salix eleagnos*, pour chaque secteur étudié.

B. Étude des herbacées

1- Evaluation de la réussite des deux types de semis

Les espèces herbacées relevées sur les transects représentent 4954 individus ayant touché l'aiguille de comptage, sur un total de 2400 points de contact effectués.

a) Recouvrement du sol par la végétation herbacée

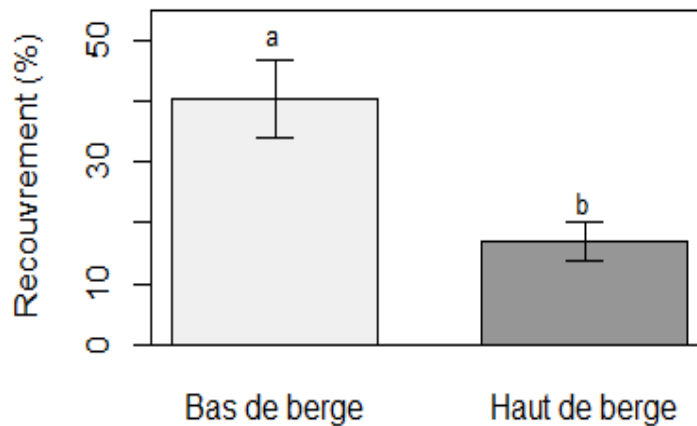


Figure n°11 : Recouvrement du sol par la végétation herbacée, en haut de berge et bas de berge (%)

Le recouvrement des berges par la végétation herbacée après semis est significativement (p -valeur $Kruskal-Wallis = 3,16 \cdot 10^{-5}$) supérieur (40%) en bas de berge, dont le semis a été mis en œuvre à une densité de 10 à 15 g/m² qu'en haut de berge (17%), semé à une densité d'environ 3 g/m².

b) Composition des semis

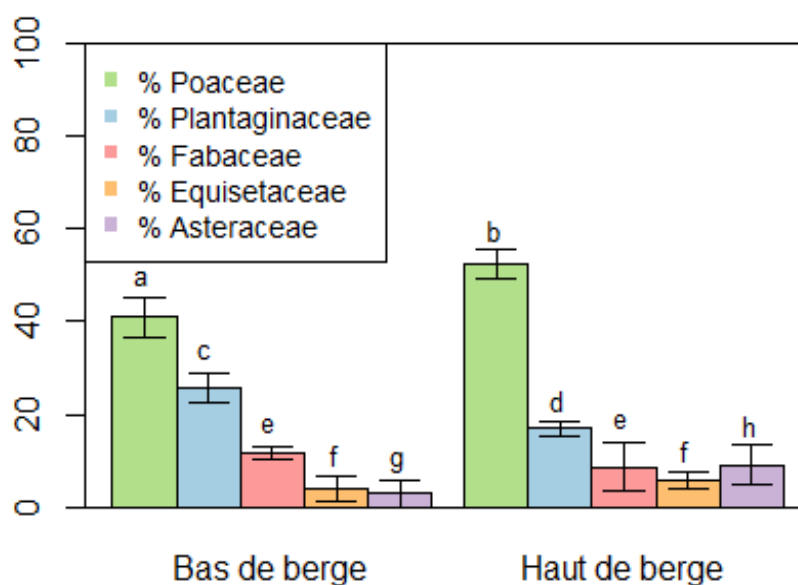


Figure n° 12 : Composition des communautés herbacées en Poaceae, Plantaginaceae, Fabaceae, Equisetaceae et Asteraceae

Sur la Figure n°12, on remarque que la composition en *Poaceae* (principalement *Dactylis glomerata*) du bas de berge est significativement inférieure à celle du haut de berge (p-valeur signifi_{Kruskal-Wallis} = $3,16 \cdot 10^{-5}$).

Les *Plantaginaceae*, représentés majoritairement par *Plantago lanceolata* sont significativement (p-valeur_{Kruskal-Wallis} = $4,77 \cdot 10^{-6}$) plus abondants en bas de berge (26%) qu'en haut de berge (17%). La composition des deux mélanges en *Fabaceae* ne varie pas de façon significative, avec 12% pour le bas de berge et 9% pour le haut. Les *Equisetaceae* ne sont pas significativement différents entre les deux milieux. Enfin, les *Asteraceae* sont significativement (p-valeur_{Kruskal-Wallis} = $2,85 \cdot 10^{-3}$) plus nombreux en haut de berge (6 et 9% respectivement) qu'en bas de berge (4 et 3% respectivement).

Les proportions en annuelles et vivaces sont respectivement de 93% et 7% pour le bas de berge et de 97% et 2% pour le haut de berge (Cf. Annexe V).

2- Evaluation du semis et de la recolonisation naturelle en fonction des facteurs abiotiques

a) Étude de l'effet des variables abiotiques sur le nombre de points de contact et la richesse spécifique

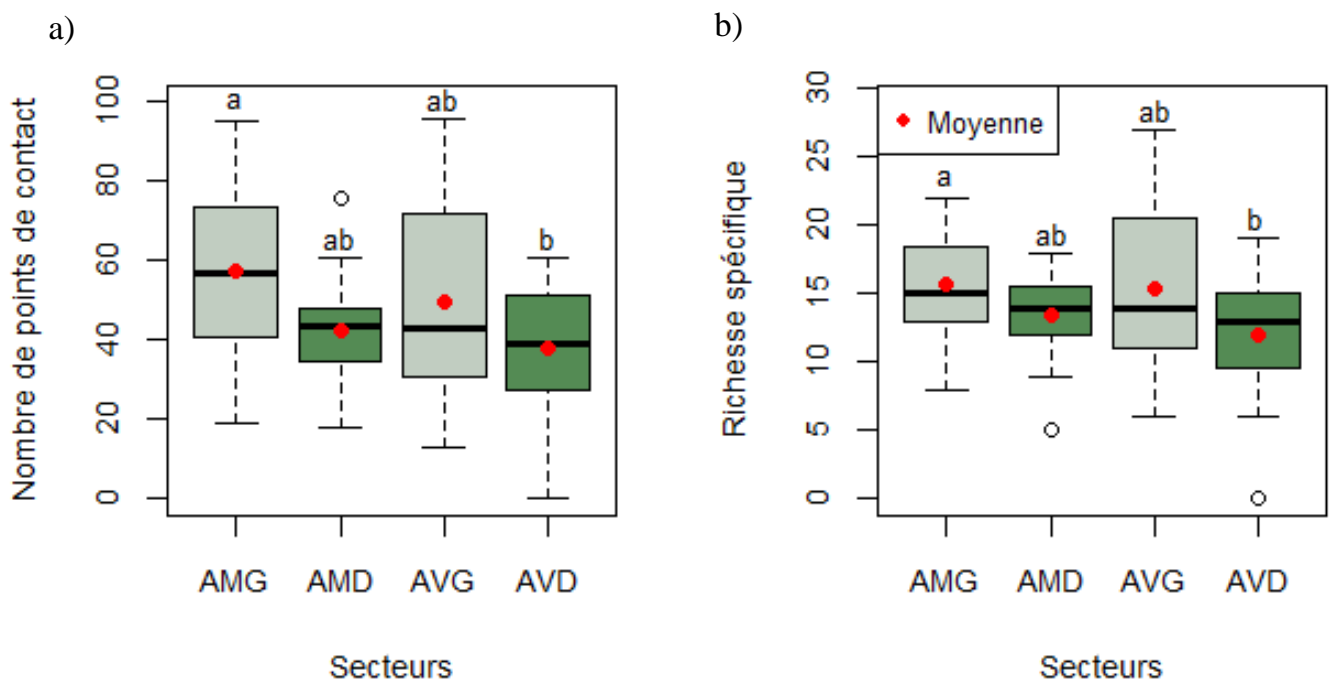


Figure n°13 : a) Nombre de points de contact des semis en fonction des différents secteurs et b) Richesse spécifique des semis en fonction des différents secteurs

Sur la Figure n°13 a), on observe tout d'abord un effet significatif de la rive sur le nombre de points de contact (p-valeur_{ANOVA} = $2,29 \cdot 10^{-3}$). En effet, on compte en moyenne 40 points de contacts par secteur en rive droite contre 53 en rive gauche. Aucune différence significative du nombre de points de contact par transect n'est observée entre l'amont et l'aval du barrage (Cf. Annexe n°IV, B)). Toutefois, l'amont semble compter légèrement plus de points de contact que l'aval (50 contre 44 en moyenne). Les secteurs amont rive gauche

et aval rive droite sont logiquement significativement différents en terme de nombre de points de contact.

Les mêmes constats sont réalisables sur la réponse de la richesse spécifique face aux différentes variables abiotiques (Figure n°13, b)). Une différence significative de cette dernière est tout d'abord observée entre les deux rives (13 en rive droite contre 16 en rive gauche en moyenne). La position des transects en amont ou en aval du barrage ne présente pas de différence significative sur la richesse spécifique de chacun, même si des tendances similaires à celle des points de contact peuvent être observées (Cf. Annexe n°IV, B)). Les secteurs amont rive gauche et aval rive droite sont une nouvelle fois significativement différents en terme de richesse spécifique.

Pour finir, on peut remarquer une importante variabilité des résultats de ces deux variables en rive gauche et particulièrement pour le nombre de points de contact mesurés.

b) Indice de renaturation

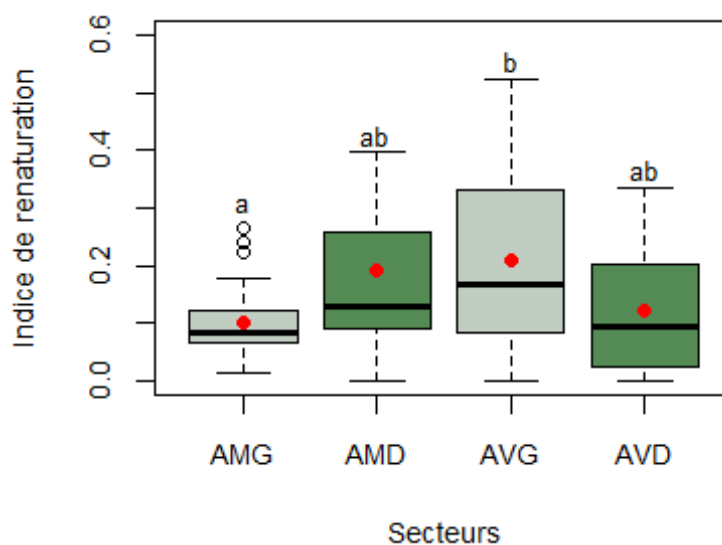


Figure n°14 : Indice de renaturation (% d'espèces spontanées) en fonction des différents secteurs

La Figure n°14 montre une variation significative de l'indice de renaturation entre les différents secteurs (p -valeur $Kruskal-Wallis = 2,27 \cdot 10^{-2}$). En effet, il est significativement (p -valeur $Kruskal-Wallis = 4,30 \cdot 10^{-2}$) supérieur en aval rive gauche par rapport à l'amont rive gauche, le secteur le moins touché par la recolonisation spontanée. Les variables abiotiques « Rive » et « Position par rapport au barrage » n'influencent pas significativement l'indice de renaturation.

Les principales espèces spontanées rencontrées sont (Cf. Annexes VI et VII):

- *Equisetum arvense*, la quatrième espèce la plus fréquente (Fréquence relative à 5%)
- *Tussilago farfara*, la huitième espèce la plus fréquente (Fréquence relative à 3%)

c) Étude des espèces végétales exotiques envahissantes

Les espèces invasives indésirables présentes sur le site d'étude sont :

- *Buddleja davidii* et *Solidago gigantea*, considérées comme Espèces Végétales Exotiques Envahissantes (EVEE) Majeures.
- *Erigeron annuus* et *Erigeron canadensis*, EVEE de la catégorie Modérée.
- *Solidago canadensis*, Espèces Végétales potentiellement Envahissantes de la catégorie Alerte (Terrin et al., 2014)

Ces cinq espèces ont été relevées sur 51 points de contact sur un total de 4954 points de contact réalisés. Cela représente 2% des relevés parmi les semis de type haut de berge (semis HB et semis mis en œuvre dans les plants) et 0,5% des relevés parmi les semis de type bas de berge (semis BB et semis mis en œuvre au sein des boutures).

Solidago gigantea reste l'EVEE majoritaire puisqu'elle représente 70% des points de contact relevés pour les EVEE.

3- Etude des traits biologiques d'Ellenberg

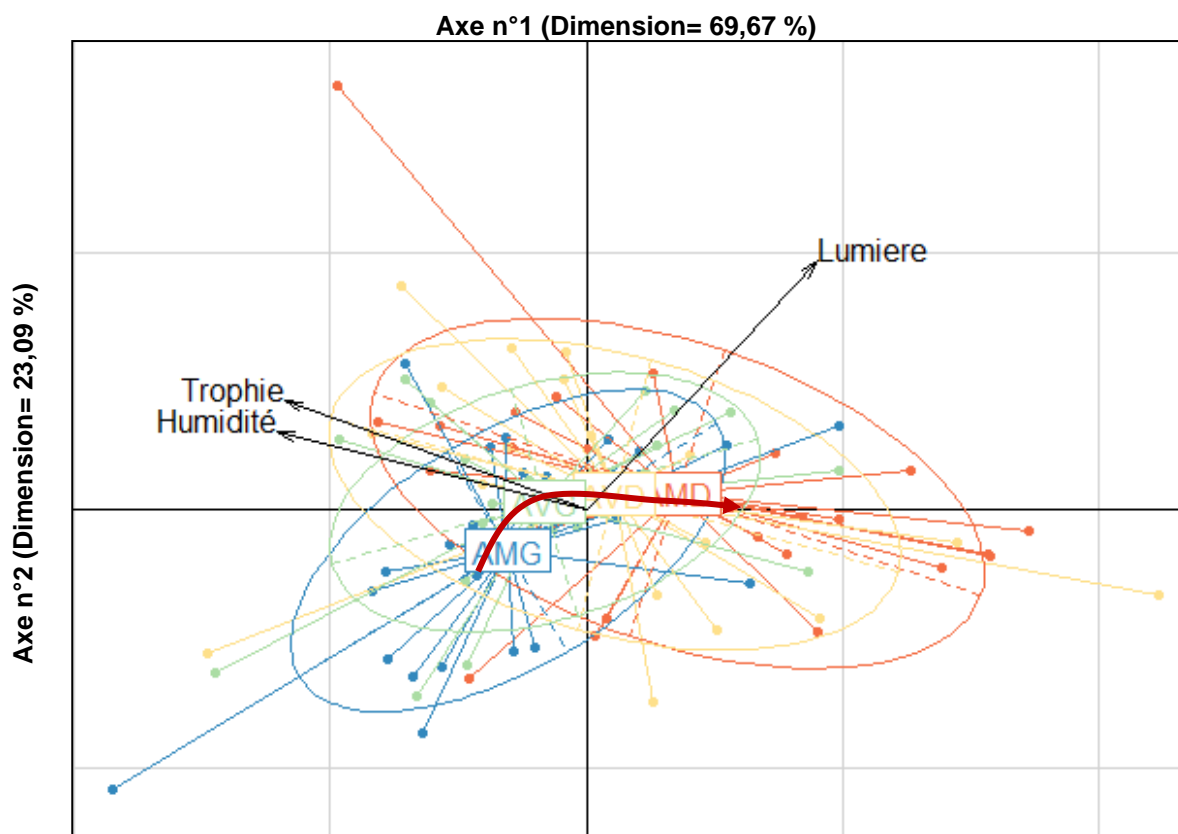


Figure n°15 : Analyse en Composantes Principales (ACP) des indices d'Ellenberg L, N et F. Projection des individus (96 transects) sur le premier plan factoriel.

L'ACP présentée en Figure n°15 est décrite par un premier axe représentant les indices d'Ellenberg de trophie (N) à 89%, d'humidité édaphique (F) à 91% et de lumière (L) à 68%. Le second axe, est fortement corrélé à l'indice de lumière (L), en le représentant à 73%.

Les espèces relevées sur le secteur amont rive gauche sont celles dont le développement nécessite le moins de lumière en comparaison des secteurs en rive droite (AMD et AVD). L'effet des différentes variables abiotiques sur les trois indices d'Ellenberg étudiés a été testé grâce à des tests de comparaison de moyenne, dont les p-valeurs sont présentées dans le Tableau n°2. Les tendances décrites par l'ACP sont confirmées en ce qui concerne l'indice de Lumière (L), qui est significativement supérieur en rive droite (AMD et AVD) par rapport à la rive gauche (AMG et AVG).

Tableau n°2 : Tableau des p-valeurs relatives aux tests de comparaison de moyenne effectués sur les indices d'Ellenberg L, N et F en fonction de différentes variables explicatives (Rive, Position par rapport au barrage, Secteur, Aménagement, Type de semis)

| | | Lumière (L) | Trophie (N) | Humidité (F) |
|--|----------------|-------------|--------------|--------------|
| Rive | ANOVA | / | / | / |
| | Wilcoxon | 0.001436** | 0.07618 | 0.003963** |
| Position par rapport au barrage | ANOVA | / | / | 0.5907 |
| | Wilcoxon | 0.7307 | 0.4655 | 0.7507 |
| Secteur | ANOVA | / | / | / |
| | Kruskal-Wallis | 0.00686** | 0.2912 | 0.01808* |
| Aménagement | ANOVA | / | / | 0.09833 |
| | Kruskal-Wallis | 0.09838 | 0.0003073*** | 0.1295 |
| Type de semis | ANOVA | / | / | 0.1325 |
| | Wilcoxon | 0.1323 | 5.198e-05*** | 0.1946 |

* : p-valeur < 0,05

** : p-valeur < 0,01

***: p-valeur < 0,001

/ : Les conditions d'application de l'ANOVA (normalité des résidus et homoscedasticité) ne sont pas respectées

En ce qui concerne le gradient d'humidité de la Figure n°15, on peut opposer la rive gauche qui est préférentiellement composée d'espèces plus hygrophiles que la rive droite. Cette tendance est confirmée par les tests de comparaison de moyennes (Cf. Tableau n°2). Les tests ont montré que l'indice de trophie (N) ne varie pas de façon significative entre les différentes variables géographiques.

La variable géographique « Position par rapport au barrage » n'influence pas de manière significative l'expression des indices d'Ellenberg étudiés.

Discussion

A. Étude de la réussite des plantations de ligneux

1- Taux de mortalité des boutures, plants et lits de plants et plançons en fonction du contexte géographique

Les taux de mortalité des boutures, plants et lits de plants et plançons apparaissent très élevés pour la première année après travaux.

En ce qui concerne les boutures, ils sont conformes ou supérieurs à ce qu'on observe généralement dans la littérature, à savoir, des taux de reprise supérieurs à 90 % pour *Salix daphnoides* et *Salix purpurea*, et de 70 % à 90 % pour *Salix eleagnos* (Bonin et al. 2013, Francis et al., 2005 ; Lavaine, 2013).

En moyenne, sur le site, nous avons relevé un taux de réussite des boutures de Saules de plus de 99%. Ces trois espèces étant dotées d'un fort pouvoir de régénération, elles pourront former rapidement un tissu racinaire dense, qui protégera les couches supérieures du sol (Bonin et al., 2013 ; White, 1992). Toutefois, ce taux de reprise est à relativiser car les boutures peuvent vivre sur leur réserve plusieurs mois après leur mise en place. De nouveaux relevés à l'automne ou en année n+2 pourront confirmer ou infirmer ces taux de reprises plus que satisfaisants.

Les taux de reprise des plants (95% en moyenne) sont élevés, et suggèrent une bonne pertinence du choix de prélever de grande quantité de plants à racines nues en milieu naturel. La plus forte variabilité du taux de réussite a été observée en aval rive gauche, allant de 85 à 100%. Les conditions de mise en œuvre peuvent expliquer cette mortalité. En effet, les plants ont été mis en place sur ce secteur lors d'une journée particulièrement froide, au cours duquel les racines nues de certains individus ont pu geler (Entreprise T. Chassagne).

Pour les lits de plants et plançons, le taux de réussite moyen est légèrement inférieur (80 % en moyenne). Les relevés concernent 3938 rameaux issus des lits de plants et plançons, ce qui nous donne une bonne estimation de la réussite de cet aménagement, dont l'évaluation est souvent laissée pour compte dans la littérature et les retours d'expérience.

En aval, le taux de mortalité des lits est significativement plus important qu'en amont du barrage. En effet, en aval, les lits de plants et plançons sont plus proches de l'eau (1 mètre en moyenne contre 6 mètres en amont pour la première rangée). La partie aval du barrage, a ainsi vu sa première rangée de lits de plants et plançons immergée pendant plus d'un mois suite à la crue printanière de 2016. Les taux de mortalité des transects réalisés sur les rangs ayant subi cette immersion prolongée sont élevés et en moyenne de plus de 30%. Initialement, l'ouvrage de génie végétal a été conçu pour un barrage achevé, donc des niveaux d'eau fixes et situés sous les lits de plants et plançons, même en période de crue annuelle.

De manière générale, la reprise sur les ligneux est satisfaisante un an après les travaux. Toutefois, les relevés ayant été effectués en juin 2016, il serait intéressant de les comparer avec des taux de reprise relevés en septembre 2016, dans le but d'en évaluer l'impact de la sécheresse. En effet, cette dernière est considérée comme l'une des principales contraintes lors de la réalisation d'ouvrages en génie végétal, comportant des jeunes plants plus sensibles que des individus matures (Pezeshki et al., 2007).

2- La croissance des boutures

De manière générale, les trois espèces de saules croissent plus vite en aval qu'en amont du barrage. En effet, les aménagements situés en amont du barrage sont les plus éloignés de l'eau. Avec le retard de construction de la galerie acheminant l'eau depuis le barrage jusqu'à la centrale hydroélectrique, les niveaux d'eau en amont ne correspondent pas à ce qui était initialement prévu, à savoir des niveaux fixes, à seulement 50 cm de la première rangée de lits de plants et plançons. La végétation mise en œuvre sur cette partie, éloignée de 6 mètres de l'eau en moyenne, est donc plus soumise à la sécheresse.

Salix daphnoides et *Salix eleagnos* se développent plus rapidement en aval rive gauche, le secteur le moins longuement exposé au soleil. En effet, *Salix daphnoides* et *Salix eleagnos* sont les espèces les moins affines à la lumière et les plus tolérantes à l'ombre (Niinemets et Valladares, 2006). De plus, *Salix eleagnos*, qui possède les hauteurs les plus faibles, est une espèce à faible vitesse de croissance (Evette et al., 2009).

Salix purpurea est une espèce plastique, très utilisée en génie végétal. Il se développe plus en rive droite (exposition Sud et Sud-Est) qu'en rive gauche. En effet, cette dernière espèce compte parmi les espèces de Saule les moins sciaphiles et les plus affines à la lumière (Niinemets et Valladares, 2006). Elle possède également une forte amplitude écologique qui lui permet de s'implanter sur tous les types de substrats, des plus pauvres aux plus riches (Bonin et al., 2013, Ellenberg, 1974).

L'impact de la sécheresse sur des boutures d'espèces rivulaires utilisées dans un ouvrage de génie végétal reste peu documenté (Lavaine, 2013). Toutefois, les auteurs s'accordent pour dire que les boutures d'espèces tolérantes ou résistantes à la sécheresse montrent un rapport de biomasse en faveur des racines (Pezeshki et al. 2007) au détriment de la production aérienne (Francis et al. 2006). En effet, *Salix eleagnos* et *Salix purpurea*, plus résistants à la sécheresse que *Salix daphnoides* (Evette et al., 2009) sont les espèces qui présentent les hauteurs de croissance les plus faibles en amont. Ce dernier résultat pourrait donc s'expliquer par une compensation de leur développement, en faveur du système racinaire.

B. Étude des herbacées

1- Evaluation de la réussite des deux types de semis

a) Recouvrement du sol par la végétation herbacée

Le mélange grainier de type bas de berge, semé à une densité de 10 à 15g/m², présente, comme attendu, un couvert végétal plus satisfaisant (40% de recouvrement) que celui de type haut de berge (17% de recouvrement), semé à 3 g/m². Ces faibles recouvrements suggèrent cependant une efficacité non optimale en termes de protection contre l'érosion de surface.

Ceci s'explique tout d'abord par une densité d'ensemencement faible. La commande initiale était de 300kg de graines et uniquement 90 kg ont pu être récoltés dans le temps imparti par le semencier Zygene. Un réensemencement est prévu à l'automne 2016, avec 200 kg de semences, mais uniquement en haut de berge. En effet, il est généralement préconisé dans les guides techniques d'épandre le semis à une densité de 5 à 20 g/m² (Zeh, 2007) voire de 25 à 30g/m² (Adam et al., 2008) lorsque l'objectif est la stabilisation des sols à court terme. De plus, cette densité est recommandée lors de l'utilisation de mélanges souvent préconçus par des semenciers et composés d'espèces dont les caractéristiques

biologiques, écologiques et les aptitudes biotechniques leur procurent une forte aptitude à la germination, la dispersion ainsi que la colonisation de nouveaux sites (Bonin et al., 2013). Dans notre cas, les semences proviennent de récoltes sur des prairies de fauches, composées de nombreuses espèces aux phénologies très différentes. Il est donc normal que les performances de ces espèces diffèrent des semences certifiées vendues comme mélange d'ensemencement de berge dans le commerce. La question de la garantie de reprise offerte par la certification « végétal local » apparaît donc primordiale à considérer.

L'ensemencement avait pour objectif de favoriser au plus tôt l'émergence d'un tapis protecteur contre les effets du ruissellement, et plus généralement, contre les érosions de surface (Adam et al., 2008). En effet, d'après Rey et al. (2004), sur des ravines marneuses jusqu'à 70% de couverture végétale, l'eau ruisselle en grande partie. Dans notre cas également, le couvert végétal insuffisant et la nature sablo-limono-argileuse des sédiments a conduit à l'apparition de nombreuses ravines notamment dans les zones à forte pente.

De plus, on a pu noter une répartition de la végétation herbacée très hétérogène, par taches (Cf. Figure n°16), notamment au sein du semis de type haut de berge ainsi qu'une levée tardive des semis de façon générale (en juin 2016). Les causes de ce couvert végétal insuffisant et tardif peuvent également être expliquées par des conditions météorologiques particulières au printemps 2016, avec des températures inférieures aux normales de saison ainsi que des gelées fréquentes fin avril (Météo France).

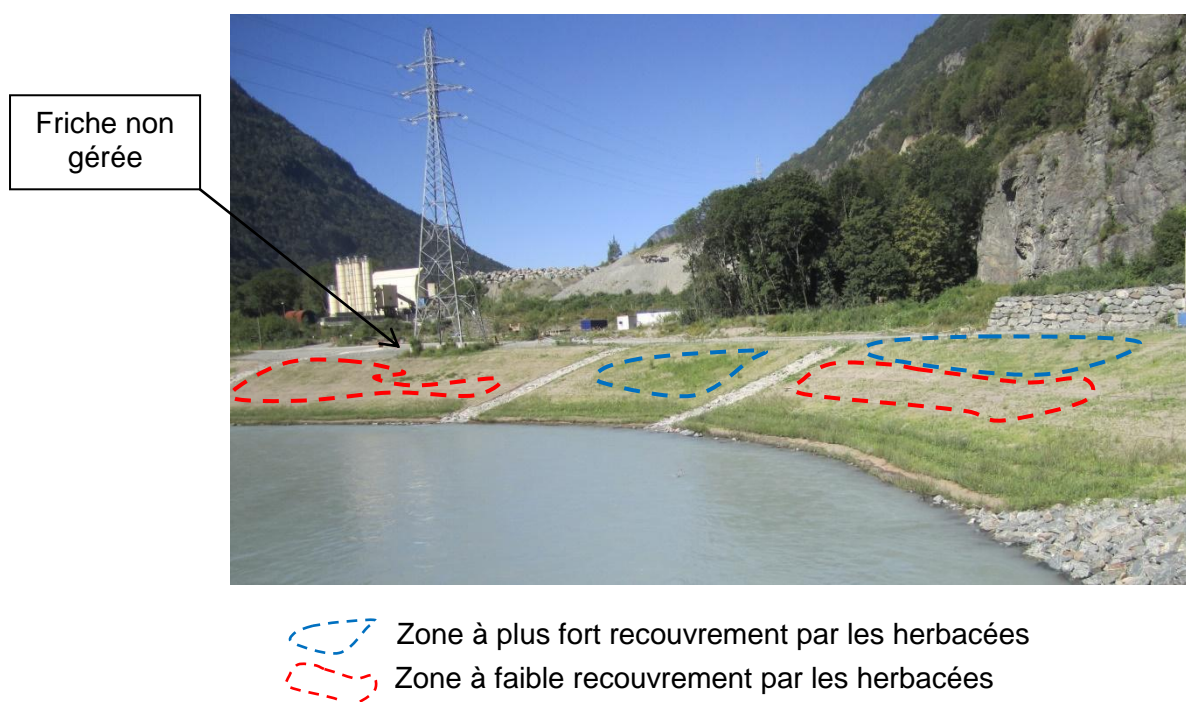


Figure n°16 : Photographie de la rive droite, en aval du barrage montrant l'hétérogénéité de développement des espèces herbacées et la présence de friches (Août 2016)

La faible fertilité du substrat pourrait de même expliquer une répartition hétérogène de la végétation et une levée tardive. En effet, des analyses de sol sur 9 échantillons en sommet de berge (aval rive gauche) ont été réalisées. Ces données ne peuvent être appliquées à tout le site mais nous donnent tout de même des indications sur la nature du

substrat remanié, qui semble relativement homogène. Le substrat relevé est de nature sablo-limono-argileuse, avec des propriétés alcalines (pH=8,5 en moyenne) et est pauvre en matière organique. Une variation de la composition en argiles/limon et sables pourrait donc expliquer ces différences de recouvrement. En effet, un sol argileux lourd et compact permet, plus difficilement le développement des racines.

Pour cela, un protocole de relevés de sol a été créé et appliqué pour étudier la variabilité de composition du substrat. Les analyses sont en cours.

Si ces dernières analyses ne démontrent aucune variation significative dans la composition du substrat, alors une variabilité dans la banque de graine du sol, liée au remaniement de différents horizons pourrait expliquer cette hétérogénéité.

b) Composition des herbacées

Pour assurer les fonctions stabilisatrices du sol, le mélange grainier aurait dû être composé à environ 80% de *Poaceae* (Huyghe, 2016). En effet, les graminées possèdent généralement un système racinaire dense et traçant et sont très souvent utilisées en majorité dans les mélanges grainiers destinés au génie végétal (Bonin et al., 2013). Pourtant, nos résultats montrent des taux de 40% en bas de berge et de 50% en haut de berge, ce qui est loin des objectifs de stabilisation fixés. Pour nuancer ces propos, la graminée majoritairement présente, *Dactylis glomerata*, est une espèce à croissance racinaire rapide et ayant une très bonne résistance à la sécheresse (Adam et al., 2008).

La seconde famille la plus présente dans les relevés est celle des *Plantaginaceae*, représentée principalement par *Plantago lanceolata*. Cette dernière espèce possède un système racinaire vigoureux et pivotant, permettant de renforcer les maillages souterrains créés par les graminées.

Les objectifs sur la composition du semis en *Fabaceae* sont remplis. En effet, cette dernière famille représente 10% du semis exprimé contre 8 à 10 % attendu (G. Huyghe, communication personnelle). Elle permet de renforcer les capacités techniques de protection, puisqu'elle présente une excellente complémentarité au niveau de l'utilisation des espaces aériens par les tiges externes et souterrains par différents types d'enracinement. Il en résulte une meilleure couverture du sol et un pouvoir stabilisateur généralement plus performant. Grâce à leur capacité à fixer l'azote atmosphérique par l'intermédiaire de leurs nodosités, les légumineuses disposent, en outre, d'une plus grande autonomie relative à l'approvisionnement en éléments nutritifs. Cela peut s'avérer utile dans les remblais hétérogènes, parfois plutôt pauvres en matières organique notamment, ce qui est notre cas. Les semis comportant une part de légumineuses présentent, enfin, une meilleure tolérance face à des épisodes de sécheresse (Adam et al., 2008).

Ces trois dernières familles, qui représentent 75 à 80% du mélange sont principalement composées d'espèces vivaces et participent ainsi à l'objectif pérenne de stabilisation de berge. Les espèces annuelles absentes l'hiver ne sont pas recherchées pour la stabilisation des talus.

2- Evaluation du semis et de la recolonisation naturelle en fonction des facteurs abiotiques

a) Étude de l'effet des variables abiotiques sur le nombre de points de contact et la richesse spécifique

Comme pour les espèces ligneuses, le développement des espèces herbacées a été conditionné par les caractéristiques abiotiques des différents secteurs étudiés (AMG, AMD, AVG et AVD). En effet, la rive gauche est la plus dense et la plus riche en espèces, c'est également la rive la moins exposée au soleil. Différemment des espèces ligneuses, le développement des espèces herbacées semble être majoritairement conditionné par l'ensoleillement. La disponibilité en eau, marquée par le gradient amont/aval du barrage ne s'avère pas influencer les herbacées. En effet, les conditions particulièrement humides du printemps 2016 (Météo France) ont sans doute conduit à ce que l'humidité ne soit pas un facteur limitant de la germination.

b) Indice de renaturation

Cet indice reste faible pour la première année de relevés. En moyenne, seulement 15% des espèces relevées sont issues de la recolonisation naturelle. Les principales espèces spontanées rencontrées (*Tussilago farfara* et *Equisetum arvense*) sont des espèces rudérales et pionnières (Julve, 2014). Elles possèdent une forte aptitude à la multiplication végétative (Landolt et Bäumler, 2010) et proviennent certainement de la banque de propagules du sol remanié. C'est la présence importante de ces deux espèces et surtout celle d'*Equisetum arvense*, qui explique un indice de naturation significativement élevé en aval rive gauche (Cf. Annexe V). Les conditions humides et plus ombragées de ce secteur ne semblent pas être en faveur d'un fort développement de cette espèce, plutôt mésoxérophile à mésohydrophile (Flora gallica, 2014 ; Ellenberg, 1974). Son expression relève donc plutôt d'une plus forte accumulation de propagules de cette espèce dans le sol de ce secteur.

L'étude générale des traits de dispersion (Landolt et Bäumler, 2010) des espèces spontanées nous montre que ces dernières se dispersent majoritairement par voie végétative (80% des espèces spontanées). Uniquement 20% se disperse principalement par anémochorie. La recolonisation naturelle s'est donc essentiellement faite à partir de la banque de propagules déjà présente dans le sol. La recolonisation par hydrochorie reste en marge, pour l'année n+1 après travaux.

c) Étude des espèces végétales exotiques envahissantes

Les EVEC restent très peu présentes cette année sur le site (fréquence relative <2%). La principale cause de la colonisation de *Solidago gigantea*, l'EVEC majoritaire dans les relevés (fréquence relative à 1,1), est la présence de friches non gérées, à proximité des sommets de berge (Cf. Figure n°16) dans lesquelles l'espèce était déjà établie. En effet, une fois installée, la plante se propage de manière végétative par l'intermédiaire de rhizomes souterrains (Hartnett et Bazzaz, 1985).

Quelques pieds de *Buddleja davidii* ont été observés sur les enrochements situés en amont du barrage. En effet, cette partie est constituée d'enrochements de 6 mètres de hauteur (contre 1 mètre en aval) et est soumise à des mises en eau ponctuelles mais fréquentes, qui ralentissent la vitesse d'écoulement de l'eau, favorisant ainsi la colonisation par les propagules hydrochores. Comme il l'a déjà été discuté, les enrochements bruts

s'avèrent être des zones préférentielles de développement des espèces invasives comme le buddleia (*Buddleja davidii*) (Evette et al., 2015) qui se disperse également par anémochorie (Landolt et Bäumler, 2010).

3- Etude des traits biologiques d'Ellenberg

L'analyse descriptive effectuée sur les indices d'Ellenberg d'humidité (F) et de lumière (L) confirme les résultats précédents, concernant l'ensoleillement des différents secteurs étudiés. En effet, l'ensoleillement plus long en rive droite qu'en rive gauche influence le développement de la végétation herbacée, comme celui de la végétation ligneuse. Ce facteur abiotique, inhérent à l'exposition du site, apparaît donc être un des éléments explicatifs des variations de développement de la végétation.

De la même façon, les espèces herbacées les plus hygrophiles se retrouvent logiquement majoritaires en rive gauche, le secteur le moins exposé au soleil. Les espèces ligneuses suivent également cette logique. En effet, *Salix purpurea*, l'espèce ligneuse étudiée la moins tolérante à l'humidité (Niinemets et Valladares, 2006) possède des hauteurs significativement supérieures en rive droite. C'est le cas contraire pour *Salix eleagnos*, plus résistante à l'humidité (Niinemets et Valladares, 2006).

Toutefois, aucun gradient significatif n'a été montré en ce qui concerne le développement préférentiel d'espèces herbacées hygrophiles en aval du barrage qu'en amont. La distance à l'eau n'influence pas l'expression des espèces herbacées plus ou moins hygrophiles. En effet, ces dernières ont un besoin ainsi qu'un accès différent à l'eau.

L'indice de trophie ne varie pas significativement au sein des quatre secteurs. Il reste assez faible (5,5 en moyenne) sur l'ensemble du site. Ce qui confirme la composition pauvre du sol en matière organique.

Conclusion

De manière générale, les taux de reprise des boutures, plants et lits de plants et plançons très élevés pour la première année après travaux, suggèrent une évaluation satisfaisante de l'ensemble des plantations de ligneux. Le choix délibéré d'utiliser des espèces sauvages, semble avoir été judicieux et confère une bonne diversité des essences locales (31 espèces ligneuses recensées).

Le bilan demeure moins satisfaisant pour les espèces herbacées, dont la densité de semis est initialement insuffisante. En effet, le recouvrement pauvre du sol permet difficilement aux herbacées de remplir leur fonction de stabilisation du sol de la berge et de ce fait, accentue les risques d'érosion. De plus, la composition du semis exprimé ne rentre pas tout à fait dans les objectifs fixés au départ. Toutefois, un nouvel ensemencement aura lieu en automne 2016, pour palier à ce manque, avec un nouveau mélange.

Nous pouvons également confirmer notre hypothèse de départ concernant l'existence d'une variabilité des caractéristiques abiotiques du site, susceptibles d'influencer le développement de la végétation. En effet, les différents secteurs ne sont pas exposés aux mêmes conditions d'ensoleillement et d'humidité, facteurs qui conditionnent fortement le développement de la végétation.

Un renouvellement de l'application de ce protocole semble être indispensable pour compléter l'évaluation de cet ouvrage de génie végétal. En effet, les excellents taux de reprise des espèces ligneuses restent à relativiser pour les années suivantes, après plusieurs saisons de sécheresse. De plus, lorsque ces espèces seront installées et que leur système racinaire sera suffisamment développé, une fonction de stabilisation de berge pourra réellement leur être attribuée. Un nouveau suivi sur les espèces herbacées permettra également de corriger la densité et la composition en 2017. Il permettra aussi de confirmer ou d'atténuer les résultats sur les effets des facteurs abiotiques sur le développement et la répartition des espèces. En effet, lorsque le barrage hydroélectrique sera mis en fonction, les hauteurs d'eau en amont seront modifiées. D'ici là, le renouvellement du suivi nous permettra de comparer le développement des espèces ligneuses sur les deux modalités amont et aval.

Un renouvellement régulier du suivi mais pas systématiquement annuel (années n+2, n+3, n+5, n+8...) pourra également nous informer sur la vitesse de recolonisation des espèces spontanées, et la disparition progressive des espèces semées. A partir de ce principe, une étude sur la dynamique de succession de la végétation pourrait être menée en analysant les facteurs biotiques d'assemblages et d'interactions en fonction des caractéristiques des différentes espèces.

Bibliographie

- Adam, P., Debiais, N., Gerber, F. and Lachat, B. 2008. Le génie végétal, Un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques. Paris, Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables. La Documentation française.
- Archaimbault, V., Rosebery, J., et Morin, S. 2010. Traits biologiques et écologiques, intérêt et perspectives pour la bio-indication des pollutions toxiques. *Sciences Eaux & Territoires*, Vol. 1, p. 46–51.
- Bonin, L., Evette, A., Frossard, P. A., Prunier, P., Roman, D., et Valé, N. 2013. Génie végétal en rivière de montagne, Connaissances et retours d'expériences sur l'utilisation d'espèces et de techniques végétales : végétalisation de berges et ouvrage bois. Grenoble.
- Breton, V., Forestier O., Guindon O., et Evette A. Octobre 2014. Ecological Restoration Under Pressure from Invasive Animal Species: Use of Salicaceae Cuttings in a River Bank Overrun by Coypu. *River Research and Applications*. Vol. 30(8), p.1002-12.
- Cavaillé, P., Dommanget, F., Daumergue, N., Loucougaray, G., Spiegelberger, T. Tabacchi, E. et Evette, A. 2013. Biodiversity assessment following a naturalness gradient of riverbank protection structures in French prealps rivers. *Ecological Engineering*. Vol. 53(0), p.23-30.
- 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 ». Thèse, Université Joseph Fourier.
- Cavaillé, P., Ducasse, L., Breton, V., Dommanget, F., Tabacchi, E. et Evette, A. Mars 2015. Functional and taxonomic plant diversity for riverbank protection works: Bioengineering techniques close to natural banks and beyond hard engineering. *Journal of Environmental Management* [en ligne], Vol. 151, p. 65-75.
- Charles, M., Viry, D., 2015. État de conservation des mares temporaires méditerranéennes (UE 3170*), habitat d'intérêt communautaire, Méthode d'évaluation à l'échelle du site. Rapport d'étude. Version 1. Rapport SPN 2015-56, Service du patrimoine naturel, Muséum national d'Histoire naturelle / Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, Paris.
- Coulon, A. 2009. Génie et Ingénierie, vrais ou faux jumeaux ? *La lettre d'ADELI*, Vol. 76.
- Critofoli, S. et Mahy, G. Mars 2010. Restauration écologique : contexte, contraintes et indicateurs de suivi. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*. Vol. 14, no 1, p. 203-211.
- Daget, P. et Poissonnet, J. 1971. Une méthode d'analyse phytosociologique des prairies. *Ann. Agron.*, Vol. 22(1), p. 5-41.
- Dufour, A. B., & Lobry, J. R. 2013. Initiation à l'analyse en composantes principales. Consulté à l'adresse <http://pbil.univ-lyon1.fr/JTHome/Stage2009/part2/P2chap1.pdf>
- Ellenberg, H., 1974 - Zeigerwerte der Gefässpflanzen Mitteleuropas. *Scripta Geobot.*, Vol. 9, p. 97.
- Evette, A., Breton, V., Forestier, O., Lavaine, C., Lemoine, G. 2009. Les saules utilisés en génie végétal. Rapport scientifique IRSTEA, DGPR – Action 8.

Evette, A. et Cavaillé, P. Avril 2011. Aménager les berges : vive le végétal. Espaces naturels, Vol. 34, p. 37-38.

Evette, André, P. Cavaillé, F. Baz, Pierre-André Frossard, et Pierre Raymond. 2015. Quelles techniques pour végétaliser des enrochements de berges de cours d'eau?. Sciences Eaux et Territoires: la Revue du IRSTEA, Vol. 19, p. 7.

Evette, A., Borgniet, L., et Dommaget, F., 2016. Méthodes de suivi et d'évaluation des mesures compensatoires et de réduction d'impact du projet Romanche-Gavet. Rapport 2016. Irstea.

Fisher, S. 1990. Recovery processes in lotic ecosystems: limits of successional theory. Environmental Management, Vol. 14, p. 725-736.

Francis, R. A., Gurnell, A. M., Petts, G. E., Edwards, P. J. 2005. Survival and growth responses of *Populus nigra*, *Salix eleagnos* and *Alnus incana* cuttings to varying levels of hydric stress. Forest Ecology Management. Vol. 210 (1-3), p. 291-301.

Francis, R. A., Gurnell, A. M., Petts, G. E., Edwards, P. J. 2006. Riparian tree establishment on gravel bars: interactions between plant growth strategy and the physical environment. Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management, p. 361-380.

Goodall, D. W. 1952. Some considerations in the use of point quadrats for the analysis of vegetation. Australian Journal of Biological Sciences 5, Vol. 5(1), p.1-41.

González, E., Sher, A. A., Tabacchi, E., Masip, A. et Poulin, M. Août 2015. Restoration of riparian vegetation: A global review of implementation and evaluation approaches in the international, peer-reviewed literature. Journal of Environmental Management [en ligne], Vol. 158, p. 85-94.

Goodson, J. M., Gurnell, A.M., Angold, P.G., et Morrissey, I.P. Septembre 2001. Riparian seed banks: structure, process and implications for riparian management. Progress in Physical Geography, Vol. 25, no 3, p. 301-325.

Grime, J. P., Hodgson, J. G., et Hunt, R. 2014. Comparative Plant Ecology: A Functional Approach to Common British Species. Springer.

Hartnett, D.C., Bazzaz, F.A. 1985. The integration of neighborhood effects by clonal genets in *Solidago canadensis*. Journal of Ecology. Vol. 73, p. 415-427.

Harris, R.R., Kocher, S.D., Gerstein, J.M. et Olson, C. 2005. Monitoring the effectiveness of riparian vegetation restoration. University of California, Center for Forestry, Berkeley, CA.

Huc, S. 2016. Suivi de la végétation après travaux sur deux sites d'EDF (Rochebrune et Espinasse, 05). Conservatoire Botanique National Alpin.

Huyghe, G. Juin 2016, Belley (01). Journées techniques d'information et d'échanges. ARRA, Association Rivière Rhône Alpes.

Isère Patrimoine. Les centrales hydroélectriques de la vallée de la Romanche [en ligne]. Direction de la Culture et du patrimoine Service du patrimoine culturel. Date de mise à jour si disponible. [Consulté le 20/07/2016]. Disponible à l'adresse : <http://www.isere-patrimoine.fr/2288-les-centrales-de-la-romanche-en-question.htm>

- Jackson, L., Lopoukhine, N., et Hillyard, D. Juin 1995. Ecological Restoration: A Definition and Comments. *Restoration Ecology*, Vol. 3, n° 2, p. 71-75.
- Jansson, R., Zinko, U., Merritt David, M., et Nilsson, C. Décembre 2005. Hydrochory increases riparian plant species richness: a comparison between a free-flowing and a regulated river. *Journal of Ecology* [en ligne]., Vol. 93, n° 6, p. 1094-1103.
- Julve, P. 2014. Baseflor : Index botanique, écologique et chorologique de la flore de France - Baseveg : Répertoire synonymique des groupements végétaux de France. <http://perso.wanadoo.fr/philippe.julve/catminat.htm> et <http://www.tela-botanica.org/>
- Karum, 2011. Dossier CNPN de demande de destruction d'espèces protégées, EDF – Projet chute de Gavet.
- Keddy, P.A. 1992. Assembly and response rules : Two goals for predictive community ecology. *Journal of Vegetation Science*. Vol. 3, p. 157-163.
- Labonne, S., Rey, F., Girel, J. et Evette, A., 2007. Historique du génie biologique appliquée au cours d'eau. *Ingénieries Eau, Agriculture, Territoires*. ed. QUAE (Versailles), Vol. 52, p. 37-48.
- Lachat, B. 1999. Quelques souvenirs historiques et perspectives d'avenir du génie biologique en Suisse romande et en francophonie. *Génie biologique.*, Vol.99, n°4, p. 7-14.
- Landolt, E. et Bäumler, B. 2010. Flora indicativa : ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen = ecological indicator values and biological attributes of the Flora of Switzerland and the Alps. Conservatoire et Jardin botaniques de la ville de Genève, Genève, 376 pp.
- Laugier, R. Février 2012. De la restauration écologique au génie écologique, Synthèse documentaire. Centre de Ressources Documentaires Aménagement Logement Nature (CRDALN).
- Lavaine, C. Evette, A. et Piégay, H. 2009. Génie végétal en milieu alpin. Evaluation des capacités de bouturage et de la résistance à la sécheresse de *Myricaria germanica*. Rapport scientifique Irstea.
- Lavaine, C. 2013. Evaluation des capacités biotechniques de boutures de *Salicaceae* et *Tamaricaceae* sur un gradient de sécheresse. Géographie. Ecole normale supérieure de Lyon – ENS LYON.
- Lavorel, S., et Garnier, E. Octobre 2002. Predicting Changes in Community Composition and Ecosystem Functioning from Plant Traits: Revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology* Vol. 16, n°5, p. 545-56.
- Lyazrhi, F. 2005. Une introduction au langage R. Consulté le 14 juin 2016. http://www.biostat.envt.fr/spip/IMG/pdf/Une_introduction_au_langage_R.pdf.
- Niinemets, A. et Valladares, F. 2006. Tolerance to shade, drought, and water-logging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. *Ecological Monographs*. Vol. 76, p.521-547.
- Pezeshki, S. Reza, Shuwen Li, F. Douglas Shields Jr., et Lili T. Martin. Janvier 2007. Factors governing survival of black willow (*Salix nigra*) cuttings in a streambank restoration project. *Ecological Engineering*. Vol. 29, no 1, p. 56-65.

Quantum Gis Developement Team, 2012. Quantum Géographic Information System Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

R Development Core Team. 2005. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL: <http://www.R-project.org>.

Rasch, G. 1993. Probabilistic models for some intelligence and attainment tests. ERIC. <http://eric.ed.gov/?id=ED419814>.

Rey, F., Ballais, J-L., Marre, A. et Rovéra, G. Août 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Geoscience*. Vol. 336, n° 11, p. 991-998.

Rey F., décembre 2012. Génie végétal, Génie écologique, Le savoir-faire des experts du végétal et du paysage. Colloque Val'Hor.

Richardson, D.M., Holmes, P.M., Esler, K.J., Galatowitsch, S.M., Stromberg, J.C., Kirkman, S.P., Pyšek, P. et Hobbs, R. J. Janvier 2007. Riparian vegetation: degradation, alien plant invasions, and restoration prospects. *Diversity and Distributions*. Vol. 13, no 1, p. 126-139.

Ruiz-Jaen, M.C. et Mitchell Aide, T. 2005. Restoration Success: How Is It Being Measured? *Restoration Ecology*. Septembre 2005, Vol. 13, n°3, p. 569-577.

SERI (Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group), 2004. The SER International Primer on Ecological Restoration. Society for Ecological Restoration International, Tucson, Arizona. [Consulté le 10 janvier 2016]. Disponible à l'adresse : <http://www.ser.org>.

Southwood, T. R. E. « Habitat, the templet for ecological strategies? » *The Journal of Animal Ecology*, 1977, p. 337–365.

Surell A. 1841. Etude sur les torrents des Hautes-Alpes, Tome 1. Paris, Dunod.

Temperton, V. M., Hobbs, R. J., Nuttle, T., & Halle, S. 2013. *Assembly Rules and Restoration Ecology: Bridging the Gap Between Theory and Practice*. Island Press.

Terrin, E., Diadema, K. et Fort, N. Octobre 2014. Stratégie régionale relative aux espèces végétales exotiques envahissantes en Provence-Alpes-Côte d'Azur et son plan d'actions. Conservatoire Botanique National Alpin, Conservatoire Botanique National Méditerranéen de Porquerolles.

Verniers, G. 1995. Aménagement écologique des berges de cours d'eau. Techniques de stabilisation. Groupe interuniversitaire de Recherche en Écologie Appliquée : Namur, p.79.

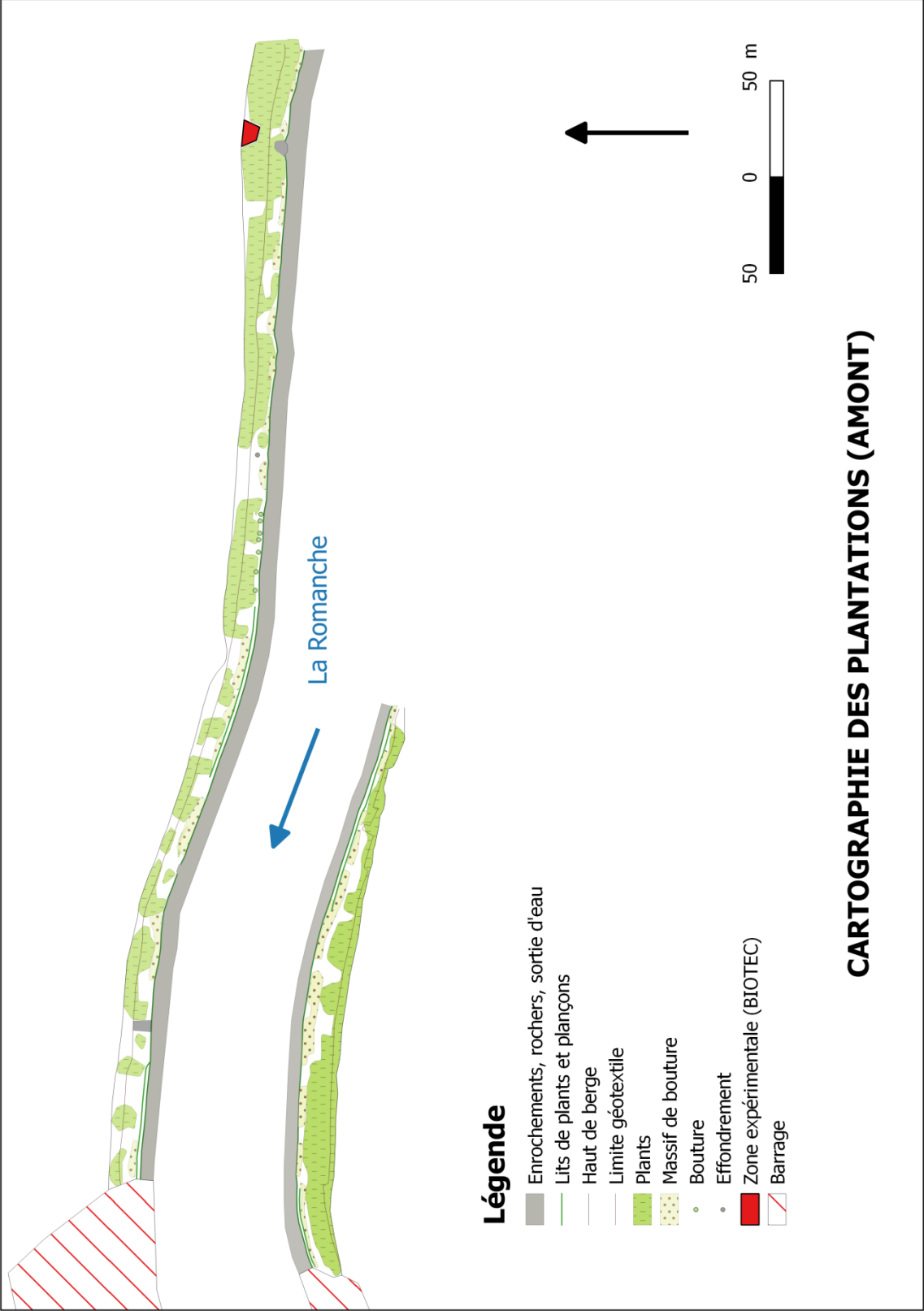
Violle, C., Navas, M. L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I. et Garnier, E. 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos*. Vol. 116 (5), p.882-892.

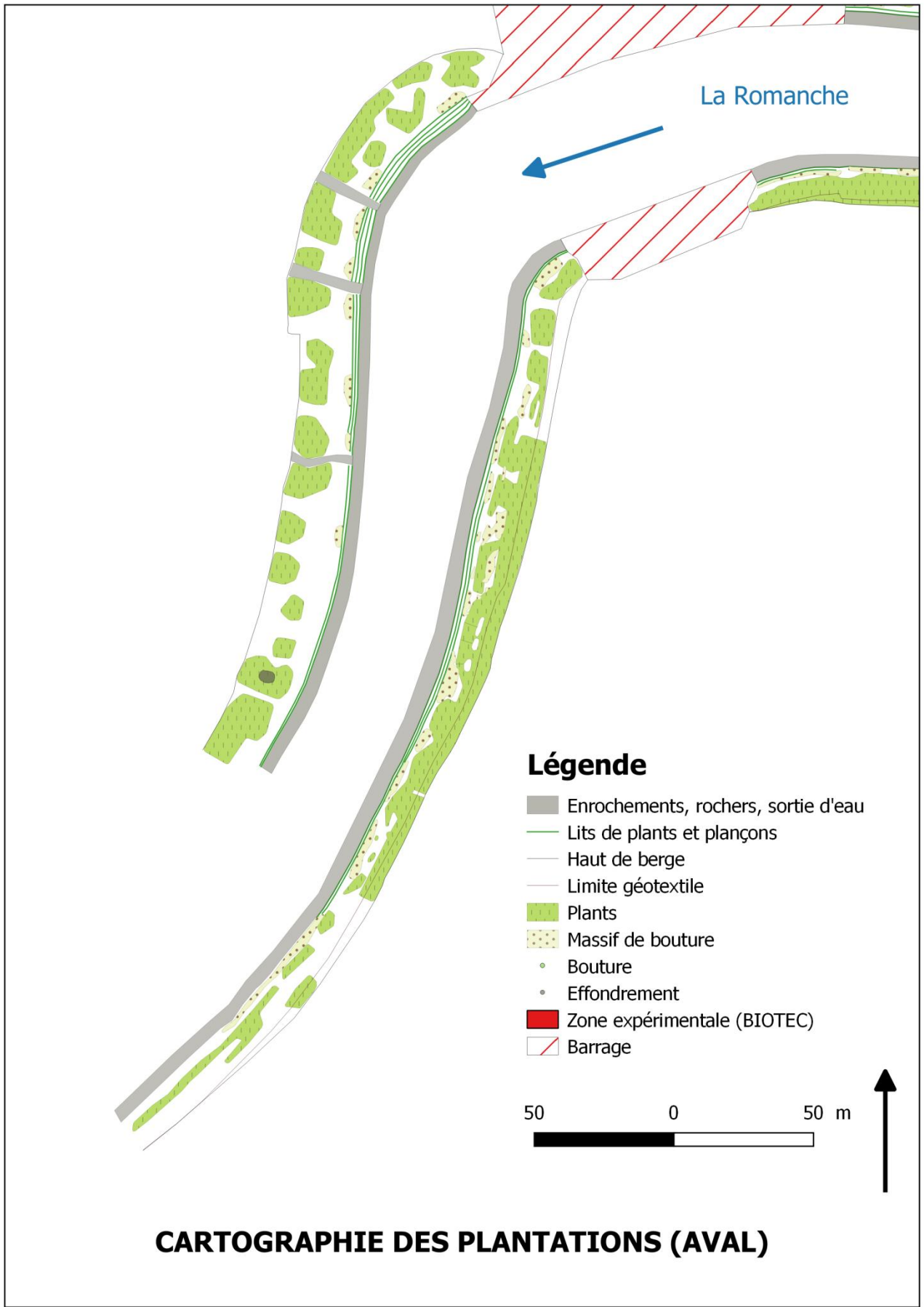
White, J. E. J. 1992. "Ornamental uses of willow in Britain." *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. Section B. Biological Sciences* 98: 183-192.

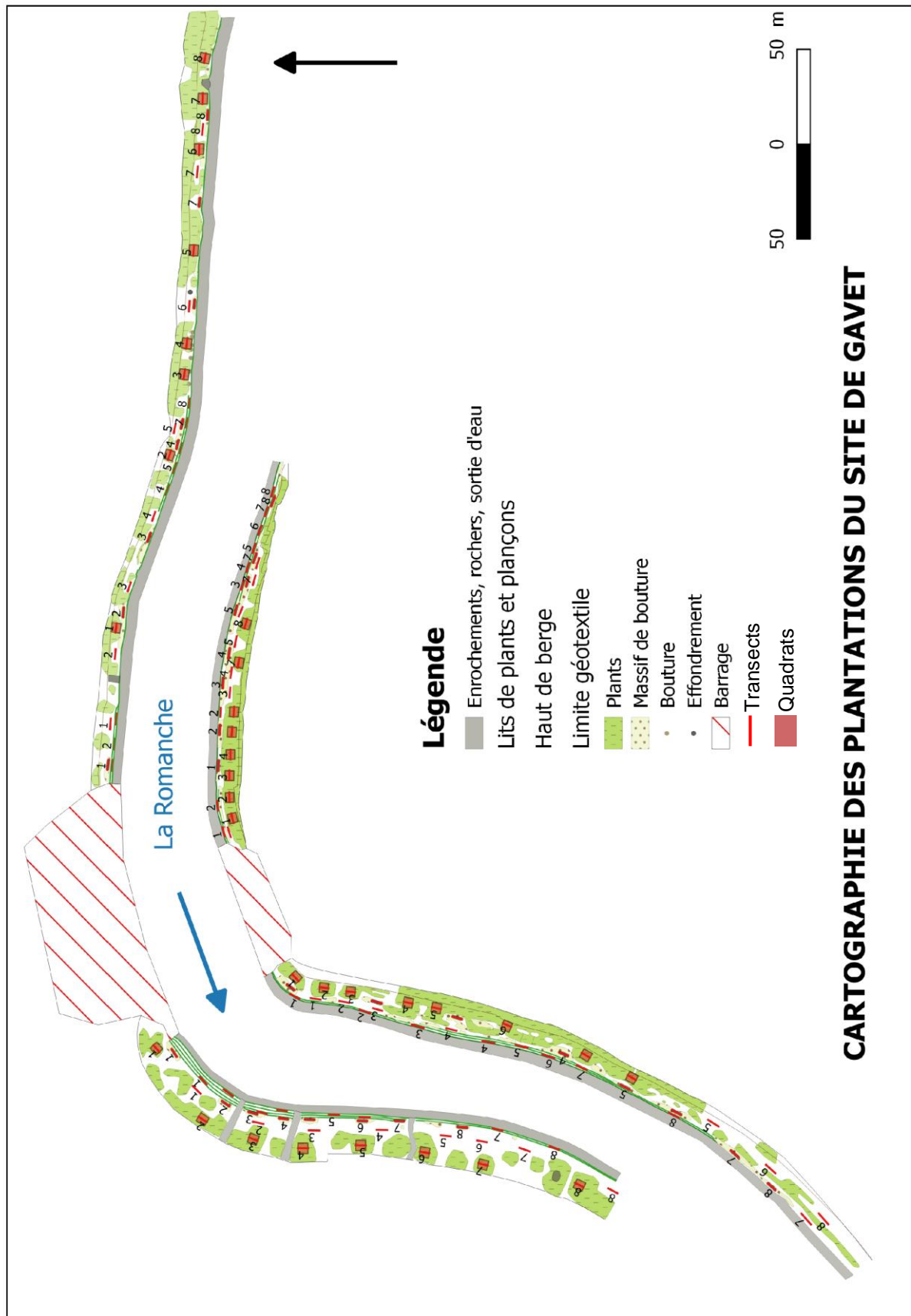
Young, T. P., Chase, J. M. et Huddleston, R. T. 2001. Succession and assembly as conceptual bases in community ecology and ecological restoration. *Ecological Restoration*. Vol. 19, p.5-19.

Zeh, H. 2007. Génie biologique, manuel de construction. Zurich, Société suisse du génie biologique et Fédération Européenne pour le génie biologique.

Annexe I : Cartographie des plantations (an amont et en aval du barrage)







Annexe III : Liste des transects de relevés réalisés sur les herbacées. Les numéros de l'identifiant correspondent aux numéros inscrits sur la cartographie (Annexe II)

| Identifiant | Secteur | Position barrage | Rive | Aménagement |
|-------------|---------|------------------|--------|-------------|
| AMDBB1 | AMD | AMONT | droite | semis BB |
| AMDBB3 | AMD | AMONT | droite | semis BB |
| AMDBB5 | AMD | AMONT | droite | semis BB |
| AMDBB6 | AMD | AMONT | droite | semis BB |
| AMDBB7 | AMD | AMONT | droite | semis BB |
| AMDBB8 | AMD | AMONT | droite | semis BB |
| AMGBB1 | AMG | AMONT | gauche | semis BB |
| AMGBB2 | AMG | AMONT | gauche | semis BB |
| AMGBB4 | AMG | AMONT | gauche | semis BB |
| AMGBB6 | AMG | AMONT | gauche | semis BB |
| AMGBB7 | AMG | AMONT | gauche | semis BB |
| AMGBB8 | AMG | AMONT | gauche | semis BB |
| AVDBB1 | AVD | AVAL | droite | semis BB |
| AVDBB2 | AVD | AVAL | droite | semis BB |
| AVDBB3 | AVD | AVAL | droite | semis BB |
| AVDBB5 | AVD | AVAL | droite | semis BB |
| AVDBB6 | AVD | AVAL | droite | semis BB |
| AVDBB7 | AVD | AVAL | droite | semis BB |
| AVGBB1 | AVG | AVAL | gauche | semis BB |
| AVGBB2 | AVG | AVAL | gauche | semis BB |
| AVGBB3 | AVG | AVAL | gauche | semis BB |
| AVGBB4 | AVG | AVAL | gauche | semis BB |
| AVGBB7 | AVG | AVAL | gauche | semis BB |
| AVGBB8 | AVG | AVAL | gauche | semis BB |
| AMDHB1 | AMD | AMONT | droite | semis HB |
| AMDHB2 | AMD | AMONT | droite | semis HB |
| AMDHB3 | AMD | AMONT | droite | semis HB |
| AMDHB5 | AMD | AMONT | droite | semis HB |
| AMDHB6 | AMD | AMONT | droite | semis HB |
| AMDHB7 | AMD | AMONT | droite | semis HB |
| AMGHB1 | AMG | AMONT | gauche | semis HB |
| AMGHB2 | AMG | AMONT | gauche | semis HB |
| AMGHB4 | AMG | AMONT | gauche | semis HB |
| AMGHB5 | AMG | AMONT | gauche | semis HB |
| AMGHB6 | AMG | AMONT | gauche | semis HB |
| AMGHB8 | AMG | AMONT | gauche | semis HB |
| AVDHB1 | AVD | AVAL | droite | semis HB |
| AVDHB2 | AVD | AVAL | droite | semis HB |
| AVDHB3 | AVD | AVAL | droite | semis HB |
| AVDHB5 | AVD | AVAL | droite | semis HB |
| AVDHB7 | AVD | AVAL | droite | semis HB |
| AVDHB8 | AVD | AVAL | droite | semis HB |
| AVGHB1 | AVG | AVAL | gauche | semis HB |
| AVGHB3 | AVG | AVAL | gauche | semis HB |
| AVGHB4 | AVG | AVAL | gauche | semis HB |
| AVGHB5 | AVG | AVAL | gauche | semis HB |
| AVGHB6 | AVG | AVAL | gauche | semis HB |
| AVGHB8 | AVG | AVAL | gauche | semis HB |
| AMDBT1 | AMD | AMONT | droite | semis bout |
| AMDBT2 | AMD | AMONT | droite | semis bout |
| AMDBT3 | AMD | AMONT | droite | semis bout |
| AMDBT5 | AMD | AMONT | droite | semis bout |

| | | | | |
|--------|-----|-------|--------|------------|
| AMDBT6 | AMD | AMONT | droite | semis bout |
| AMDBT7 | AMD | AMONT | droite | semis bout |
| AMGBT1 | AMG | AMONT | gauche | semis bout |
| AMGBT2 | AMG | AMONT | gauche | semis bout |
| AMGBT3 | AMG | AMONT | gauche | semis bout |
| AMGBT4 | AMG | AMONT | gauche | semis bout |
| AMGBT7 | AMG | AMONT | gauche | semis bout |
| AMGBT8 | AMG | AMONT | gauche | semis bout |
| AVDBT1 | AVD | AVAL | droite | semis bout |
| AVDBT2 | AVD | AVAL | droite | semis bout |
| AVDBT3 | AVD | AVAL | droite | semis bout |
| AVDBT5 | AVD | AVAL | droite | semis bout |
| AVDBT6 | AVD | AVAL | droite | semis bout |
| AVDBT8 | AVD | AVAL | droite | semis bout |
| AVGBT1 | AVG | AVAL | gauche | semis bout |
| AVGBT2 | AVG | AVAL | gauche | semis bout |
| AVGBT3 | AVG | AVAL | gauche | semis bout |
| AVGBT4 | AVG | AVAL | gauche | semis bout |
| AVGBT6 | AVG | AVAL | gauche | semis bout |
| AVGBT7 | AVG | AVAL | gauche | semis bout |
| AMDPT1 | AMD | AMONT | droite | Plants |
| AMDPT2 | AMD | AMONT | droite | Plants |
| AMDPT4 | AMD | AMONT | droite | Plants |
| AMDPT5 | AMD | AMONT | droite | Plants |
| AMDPT7 | AMD | AMONT | droite | Plants |
| AMDPT8 | AMD | AMONT | droite | Plants |
| AMGPT1 | AMG | AMONT | gauche | Plants |
| AMGPT3 | AMG | AMONT | gauche | Plants |
| AMGPT4 | AMG | AMONT | gauche | Plants |
| AMGPT6 | AMG | AMONT | gauche | Plants |
| AMGPT7 | AMG | AMONT | gauche | Plants |
| AMGPT8 | AMG | AMONT | gauche | Plants |
| AVDPT1 | AVD | AVAL | droite | Plants |
| AVDPT2 | AVD | AVAL | droite | Plants |
| AVDPT3 | AVD | AVAL | droite | Plants |
| AVDPT4 | AVD | AVAL | droite | Plants |
| AVDPT6 | AVD | AVAL | droite | Plants |
| AVDPT8 | AVD | AVAL | droite | Plants |
| AVGPT1 | AVG | AVAL | gauche | Plants |
| AVGPT2 | AVG | AVAL | gauche | Plants |
| AVGPT4 | AVG | AVAL | gauche | Plants |
| AVGPT6 | AVG | AVAL | gauche | Plants |
| AVGPT7 | AVG | AVAL | gauche | Plants |
| AVGPT8 | AVG | AVAL | gauche | Plants |

Annexe IV : Tableaux des p-valeurs associées aux tests statistiques réalisés

A) Espèces ligneuses

➤ Taux de mortalité des aménagements (espèces ligneuses) :

- Résultats des tests de comparaison de moyennes :

| Variable | Tests effectués | Variables à expliquer | | |
|------------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------|--|
| | | Taux de mortalité des boutures | Taux de mortalité des plants | Taux de mortalité des lits de plants et plançons |
| Rive | ANOVA | / | / | 0.5891 |
| | Wilcoxon | 0.3759 | 0.2133 | 0.752 |
| Position barrage | ANOVA | / | / | / |
| | Wilcoxon | 0.3759 | 1 | 0.03874* |
| Secteur | ANOVA | / | / | / |
| | Kruskal-Wallis | 0.447 | 0.01184* | 0.109 |

- Résultats des tests post-hoc réalisés sur la variable « Secteur » :

| Secteur | Kruskal Nemenyi | Taux de mortalité des plants | | | |
|---------|-----------------|------------------------------|-------|-------|--------------|
| | | AMD | AMG | AVD | |
| | | AMG | 0.593 | - | - |
| | | AVD | 0.143 | 0.816 | - |
| | | AVG | 0.816 | 0.143 | <u>0.014</u> |

➤ Hauteur des boutures :

- Résultats des tests de comparaison de moyennes :

| | | Hauteur de <i>Salix daphnoides</i> | Hauteur de <i>Salix eleagnos</i> | Hauteur de <i>Salix purpurea</i> |
|------------------|----------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Rive | ANOVA | 0.09256 | / | / |
| | Wilcoxon | 0.128 | 0.0004034*** | 2.309e-10*** |
| Position barrage | ANOVA | 0.02527* | / | / |
| | Wilcoxon | 0.0585 | < 2.2e-16*** | < 2.2e-16*** |
| Secteur | ANOVA | 0.007959** | / | / |
| | Kruskal-Wallis | 0.01612* | < 2.2e-16*** | < 2.2e-16*** |

- Résultats des tests post-hoc réalisés sur la variable « Secteur » :

| | | Hauteur de <i>Salix daphnoides</i> | | | |
|---------|---------------------|------------------------------------|--------|--------|-------|
| Secteur | ANOVA Bonferroni | | AMD | AMG | AVD |
| | | AMG | 1.000 | - | - |
| | | AVD | 1.000 | 0.417 | - |
| | | AVG | 0.023* | 0.036* | 0.126 |

| | | Hauteur de <i>Salix eleagnos</i> | | | Hauteur de <i>Salix purpurea</i> | | | | |
|---------|--------------------|----------------------------------|------------|------------|----------------------------------|-----|------------|------------|---------|
| Secteur | Kruskal Nemenyi | | AMD | AMG | AVD | | AMD | AMG | AVD |
| | | AMG | 0.61 | - | - | AMG | 0.00016*** | - | - |
| | | AVD | 1.3e-06*** | 4.7e-06*** | - | AVD | 8.1e-08*** | 3.9e-14*** | - |
| | | AVG | 3.9e-13*** | 6.7e-10*** | 0.34 | AVG | 3.4e-05*** | 3.5e-14*** | 0.90431 |

B) Espèces herbacées

- Nombre de points de contact, richesse spécifique et indice de naturalité :

- Résultats des tests de comparaison de moyennes :

| | | Nombre de points de contact | Richesse spécifique | Indice de naturalité |
|------------------|----------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|
| Rive | ANOVA | 0.002287** | / | / |
| | Wilcoxon | 0.01422* | 0.01244* | 0,789 |
| Position barrage | ANOVA | / | / | / |
| | Wilcoxon | 0.1358 | 0.1785 | 0,846 |
| Secteur | ANOVA | / | / | / |
| | Kruskal-Wallis | 0.03577* | 0.04416* | 0.02267 |
| Aménagement | ANOVA | / | / | / |
| | Kruskal-Wallis | 0.004563** | 0,03353 | Non testé |

- Résultats des tests post-hoc réalisés sur la variable « Secteur » :

| | | Nombre de points de contact | | | Richesse spécifique | | | | |
|---------|--------------------|-----------------------------|-------|--------|---------------------|-----|-------|--------|-------|
| Secteur | Kruskal Nemenyi | | AMD | AMG | AVD | | AMD | AMG | AVD |
| | | AMG | 0.147 | - | - | AMG | 0.320 | - | - |
| | | AVD | 0.907 | 0.027* | - | AVD | 0.745 | 0.034* | - |
| | | AVG | 0.905 | 0.474 | 0.529 | AVG | 0.848 | 0.808 | 0.263 |

| Secteur | Kruskal Nemenyi | Indice de naturalité | | | |
|---------|--------------------|----------------------|-------|-------|-------|
| | | AMD | AMG | AVD | |
| | | AMG | 0.139 | - | - |
| | | AVD | 0.359 | 0.962 | - |
| | | AVG | 0.964 | 0.043 | 0.151 |

C) Étude des traits

➤ Indices d'Ellenberg de lumière (L), de trophie (N) et d'humidité (F) :

- Résultats des tests de comparaison de moyennes :

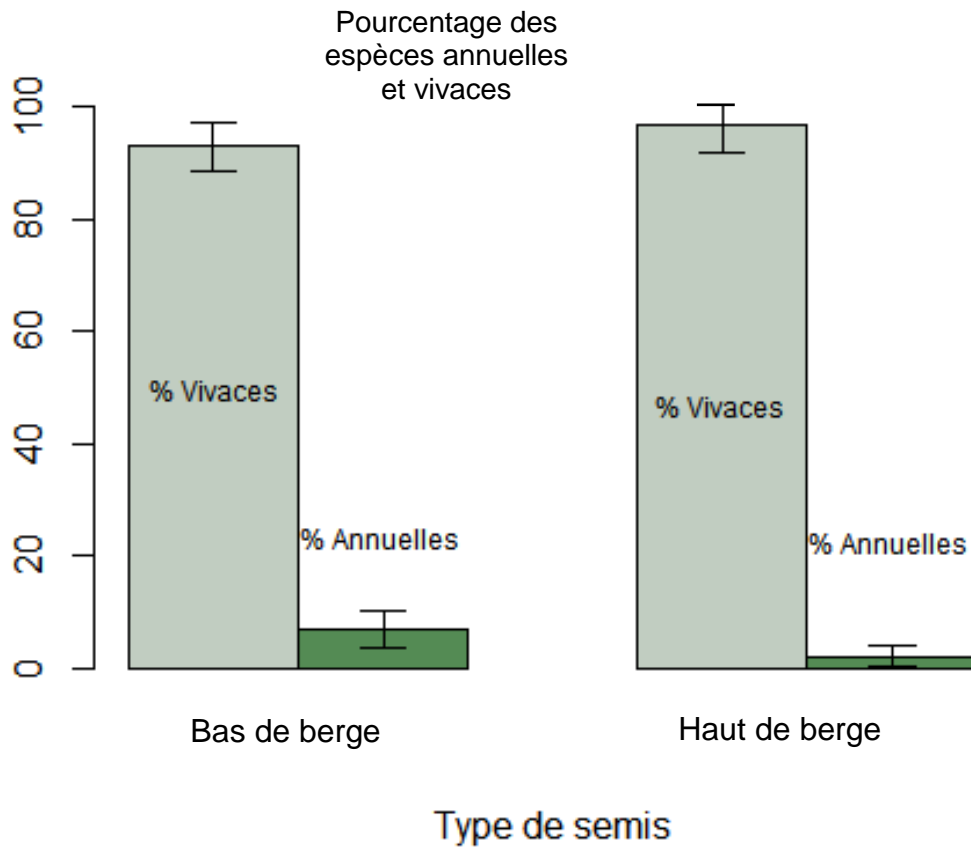
| | | Lumière (L) | Trophie (N) | Humidité (F) |
|------------------|----------------|-------------|--------------|--------------|
| Rive | ANOVA | / | / | / |
| | Wilcoxon | 0.001436** | 0.07618 | 0.003963** |
| Position barrage | ANOVA | / | / | 0.5907 |
| | Wilcoxon | 0.7307 | 0.4655 | 0.7507 |
| Secteur | ANOVA | / | / | / |
| | Kruskal-Wallis | 0.00686** | 0.2912 | 0.01808* |
| Aménagement | ANOVA | / | / | 0.09833 |
| | Kruskal-Wallis | 0.09838 | 0.0003073*** | 0.1295 |

- Résultats des tests post-hoc réalisés sur la variable « Secteur » :

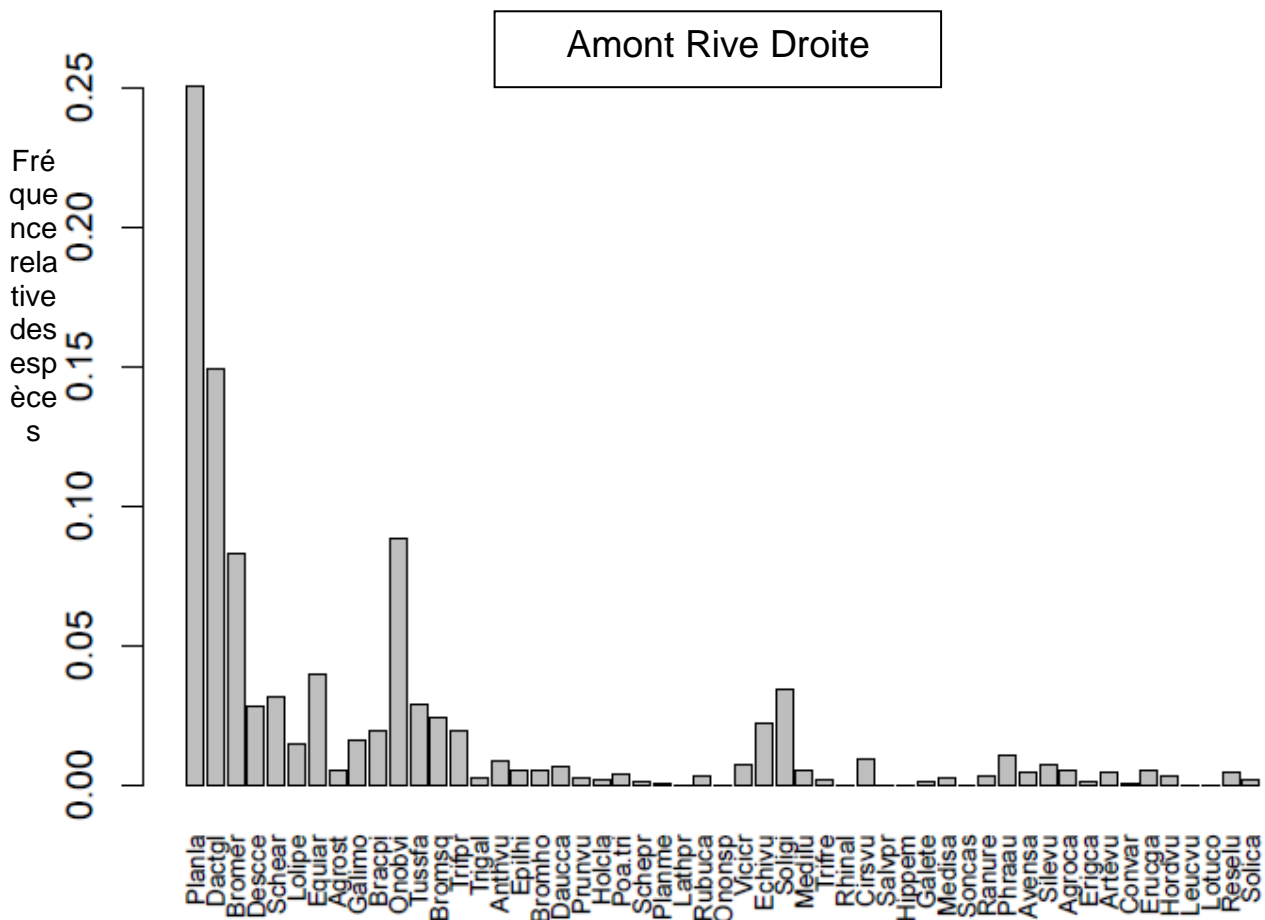
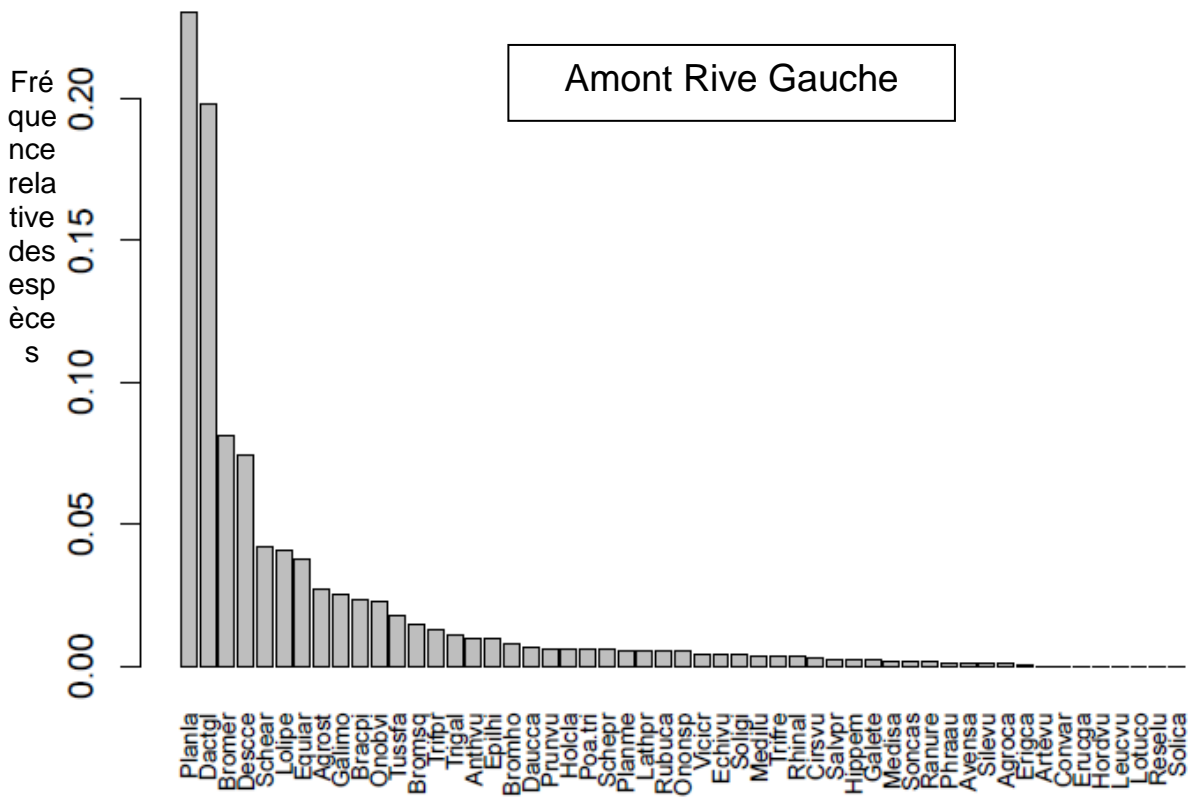
| Secteur | Kruskal Nemenyi | Lumière (L) | | | Humidité (F) | | | | |
|---------|--------------------|-------------|----------|--------|--------------|-----|--------|-------|-------|
| | | AMD | AMG | AVD | AMD | AMG | AVD | | |
| | | AMG | 0.0067** | - | - | AMG | 0.017* | - | - |
| | | AVD | 0.8905 | 0.0628 | - | AVD | 0.671 | 0.277 | - |
| | | AVG | 0.1919 | 0.6212 | 0.5889 | AVG | 0.111 | 0.906 | 0.686 |

| Aménagement | Kruskal Nemenyi | Trophie (N) | | | |
|-------------|--------------------|-------------|-----------|-------------|----------|
| | | plants | semis BB | semis bout. | |
| | | semis BB | 0.1207 | - | - |
| | | semis bout. | 0.0011 ** | 0.4278 | - |
| | | semis HB | 0.9960 | 0.1929 | 0.0024** |

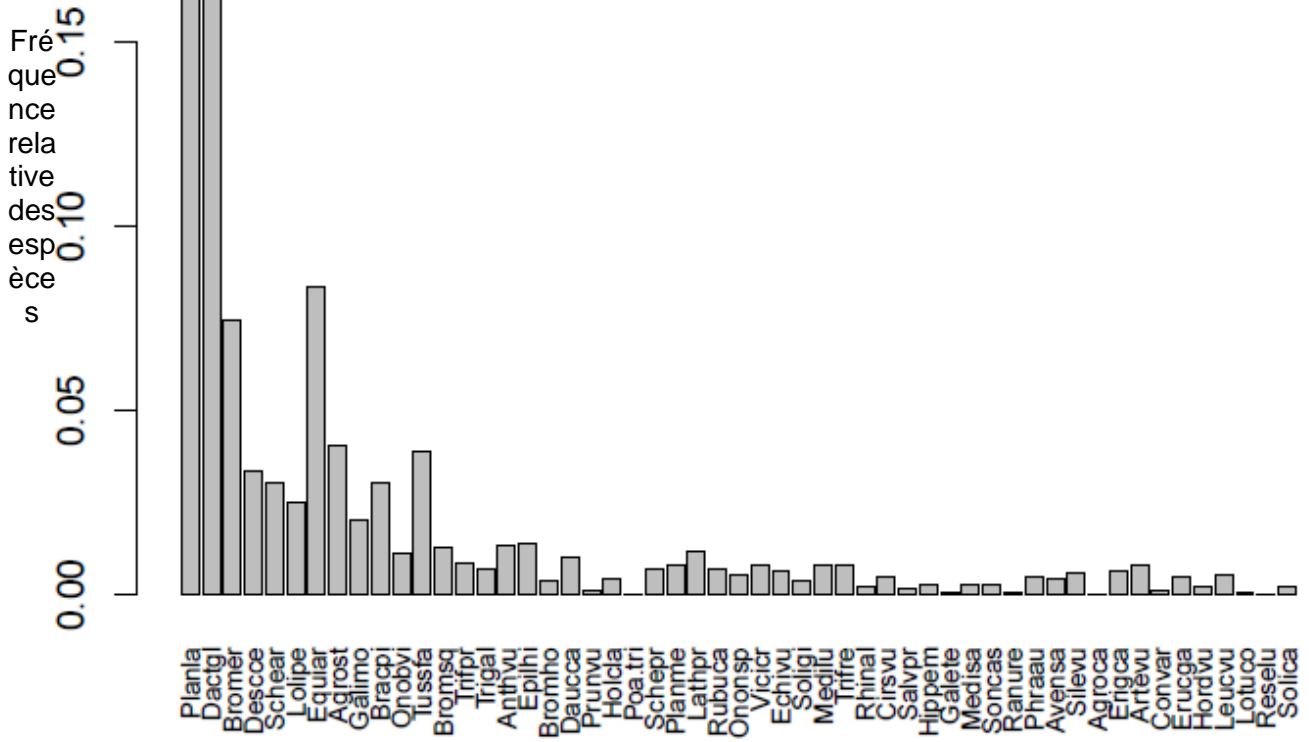
Annexe V : Proportion des semis en espèces annuelles et vivaces



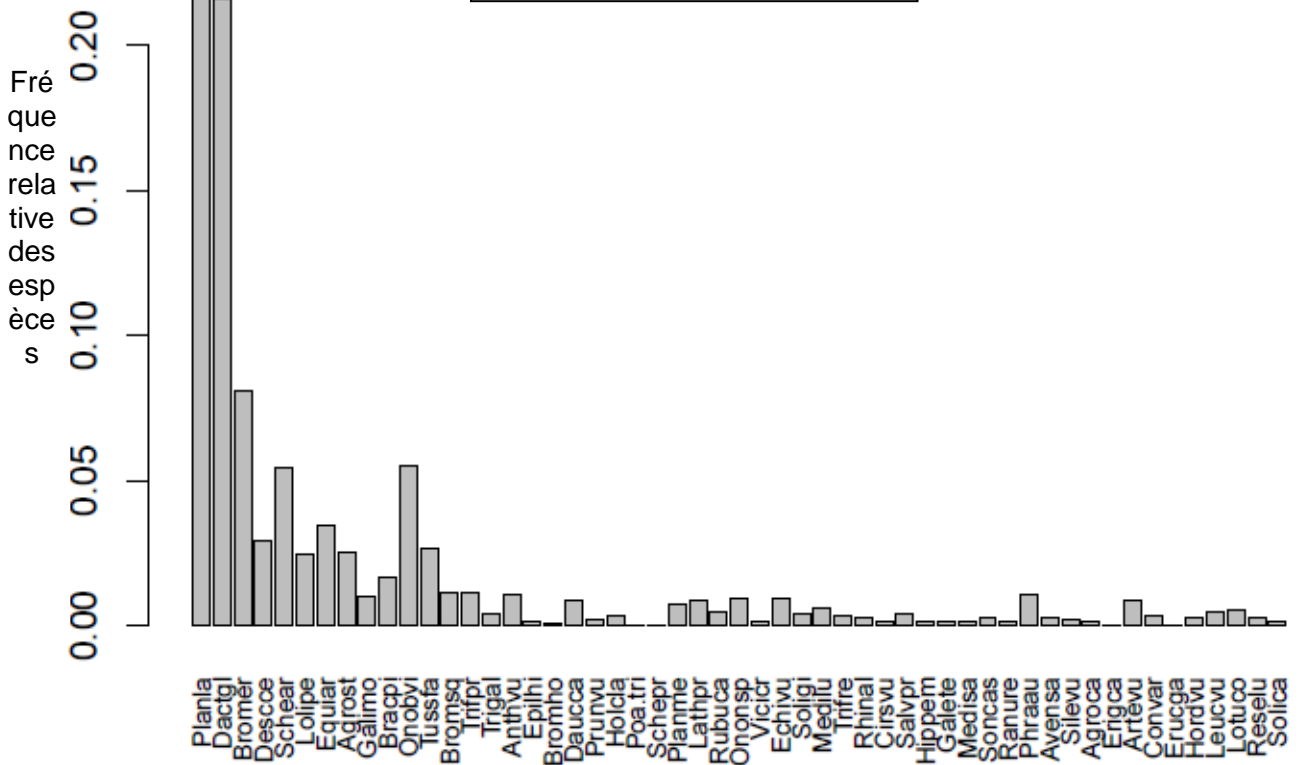
Annexe VI : Fréquence relative des espèces par secteur (Uniquement les espèces dont la fréquence relative est > à 0,01). Cf. Annexe VII pour la correspondance des noms des espèces



Aval Rive Gauche




Aval Rive Droite



Annexe VII : Espèces relevées sur les transects

| Code | Nom de l'espèce | Origine |
|--------|------------------------------|----------|
| Acerps | <i>Acer pseudo platanus</i> | Planté |
| Achimi | <i>Achillea millefolium</i> | Semé |
| Agroca | <i>Agrostis capillaris</i> | Semé |
| Agrost | <i>Agrostis stolonifera</i> | Semé |
| Aloppr | <i>Alopecurus pratensis</i> | Semé |
| Anthvu | <i>Anthyllis vulneraria</i> | Semé |
| Artevu | <i>Artemisia vulgaris</i> | Spontané |
| Astrda | <i>Astragalus danicus</i> | Semé |
| Avensa | <i>Avena sativa</i> | Spontané |
| Bracpi | <i>Brachypodium pinnatum</i> | Semé |
| Bromer | <i>Bromopsis erecta</i> | Semé |
| Bromho | <i>Bromus hordeaceus</i> | Semé |
| Bromsq | <i>Bromus squarrosus</i> | Semé |
| Buddda | <i>Buddleja davidii</i> | Spontané |
| Carehi | <i>Carex hirta</i> | Spontané |
| Caresp | <i>Carex sp.</i> | Spontané |
| Centsc | <i>Centaurea scabiosa</i> | Semé |
| Chaemi | <i>Chaenorrhinum minus</i> | Spontané |
| Chenal | <i>Chenopodium album</i> | Spontané |
| Cirsvu | <i>Cirsium vulgare</i> | Spontané |
| Convar | <i>Convolvulus arvensis</i> | Spontané |
| Cornsa | <i>Cornus sanguinea</i> | Planté |
| Cratsp | <i>Crataegus sp</i> | Planté |
| Dactgl | <i>Dactylis glomerata</i> | Semé |
| Daucca | <i>Daucus carota</i> | Semé |
| Descce | <i>Deschampsia cespitosa</i> | Semé |
| Echivu | <i>Echium vulgare</i> | Semé |
| Epilhi | <i>Epilobium hirsutum</i> | Semé |
| Equiar | <i>Equisetum arvense</i> | Spontané |
| Erigan | <i>Erigeron annuus</i> | Spontané |
| Erigca | <i>Erigeron canadensis</i> | Spontané |
| Erucga | <i>Erucastrum gallicum</i> | Spontané |
| Euonla | <i>Euonymus latifolius</i> | Planté |
| Eupaca | <i>Eupatorium cannabinum</i> | Semé |
| Fraxex | <i>Fraxinus excelsior</i> | Planté |
| Galete | <i>Galeopsis tetrahit</i> | Spontané |
| Galimo | <i>Galium mollugo</i> | Semé |
| Hippem | <i>Hippocrepis emerus</i> | Planté |
| Holcla | <i>Holcus lanatus</i> | Semé |
| Hordvu | <i>Hordeum vulgare</i> | Spontané |
| Humlu | <i>Humulus lupulus</i> | Spontané |
| Hypepe | <i>Hypericum perforatum</i> | Spontané |
| Juncar | <i>Juncus articulatus</i> | Spontané |
| Lactse | <i>Lactuca serriola</i> | Spontané |
| Lathpr | <i>Lathyrus pratensis</i> | Semé |
| Leucvu | <i>Leucanthemum vulgare</i> | Semé |
| Liguvu | <i>Ligustrum vulgare</i> | Planté |
| Linuca | <i>Linum catharticum</i> | Semé |
| Lolipe | <i>Lolium perenne</i> | Semé |
| Lonixy | <i>Lonicera xylosteum</i> | Planté |
| Lotuco | <i>Lotus corniculatus</i> | Semé |
| Lysiar | <i>Lysimachia arvensis</i> | Spontané |

| | | |
|---------|----------------------------------|----------|
| Malvmo | <i>Malva moschata</i> | Semé |
| Medilu | <i>Medicago lupulina</i> | Semé |
| Medisa | <i>Medicago sativa</i> | Spontané |
| Mentlo | <i>Mentha longifolia</i> | Spontané |
| Myosoy | <i>Myosoyis sylvatica</i> | Spontané |
| Onobvi | <i>Onobrychis viciifolia</i> | Semé |
| Ononsp | <i>Ononis spinosa</i> | Semé |
| Paparh | <i>Papaver rhoeas</i> | Spontané |
| Phraau | <i>Phragmites australis</i> | Spontané |
| Planla | <i>Plantago lanceolata</i> | Semé |
| Planme | <i>Plantago media</i> | Semé |
| Poacsp | <i>Poaceae sp.</i> | Spontané |
| Poa tri | <i>Poa trivialis</i> | Semé |
| Polyav | <i>Polygonum aviculare</i> | Spontané |
| Polyma | <i>Polygonum maculosa</i> | Spontané |
| Potere | <i>Potentilla reptans</i> | Spontané |
| Potesa | <i>Poterium sanguisorba</i> | Spontané |
| Prunvu | <i>Prunella vulgaris</i> | Semé |
| Ilexaq | <i>Ilex aquifolium</i> | Planté |
| Ranure | <i>Ranunculus repens</i> | Spontané |
| Reselu | <i>Reseda luteola</i> | Spontané |
| Rhinal | <i>Rhinanthus alectorolophus</i> | Semé |
| Rubuca | <i>Rubus caesius</i> | Spontané |
| Rumesp | <i>Rumex sp.</i> | Spontané |
| Salida | <i>Salix daphnoides</i> | Planté |
| Saliel | <i>Salix eleagnos</i> | Planté |
| Salimy | <i>Salix myrsinifolia</i> | Planté |
| Salipu | <i>Salix purpurea</i> | Planté |
| Salvpr | <i>Salvia pratensis</i> | Semé |
| Schear | <i>Schedonorus arundinaceus</i> | Semé |
| Schepr | <i>Schedonorus pratensis</i> | Semé |
| Silevu | <i>Silene vulgaris</i> | Semé |
| Solica | <i>Solidago canadensis</i> | Spontané |
| Soligi | <i>Solidago gigantea</i> | Spontané |
| Soncas | <i>Sonchus asper</i> | Spontané |
| Tarasp | <i>Taraxacum sp.</i> | Spontané |
| Trifar | <i>Trifolium arvense</i> | Spontané |
| Trifpr | <i>Trifolium pratense</i> | Semé |
| Trifre | <i>Trifolium repens</i> | Semé |
| Trigal | <i>Trigonella alba</i> | Spontané |
| Tussfa | <i>Tussilago farfara</i> | Spontané |
| Vicicr | <i>Vicia cracca</i> | Spontané |
| Violar | <i>Viola arvensis</i> | Spontané |
| Vulpsp | <i>Vulpia sp.</i> | Spontané |

| | |
|---|--|
|  | Diplôme : Ingénieur en Horticulture Spécialité : Génie de l'Environnement Spécialisation / option : Préservation et Aménagement des Milieux – Écologie Quantitative Enseignant référent : Ivan Bernez |
| Auteur(s) : Camille Delage Date de naissance* : 23/05/1992 | Organisme d'accueil : IRSTEA Adresse : 2 rue de la Papeterie, Saint Martin d'Hères, 38402. |
| Nb pages : 56 Annexe(s) : 7 | Maître de stage : André Evette |
| Année de soutenance : 2015-2016 | |
| Titre français : Evaluation de la réussite d'un ouvrage de protection de berge par des techniques de génie végétal et analyse des facteurs abiotiques conditionnant le développement de la végétation | |
| Titre anglais : Evaluating the success of a bank protection work realised by plant engineering techniques and analyse of abiotic factors affecting vegetation development | |
| Résumé : Suite à la construction d'un barrage hydroélectrique et dans le cadre de mesures compensatoires, un réaménagement des berges de la Romanche faisant appel aux techniques de génie végétal a été entrepris sur le site de Gavet (38). L'objectif de cette étude est d'évaluer l'efficacité des techniques de restauration écologique mises en œuvre sur le site (plantation et ensemencement), mais également d'analyser les facteurs abiotiques du milieu, pouvant influencer le développement de la végétation mise en place et issue de la recolonisation spontanée. Pour répondre à ces deux objectifs, des relevés sur les espèces ligneuses (taux de reprise et hauteur des boutures) ainsi que sur les espèces herbacées (relevés sur des transects par points contact) ont été effectués. En ce qui concerne le premier objectif d'évaluation des aménagements de génie végétal, les plantations de ligneux (boutures, plants, lits de plants et plançons) ont été une réussite puisqu'elles présentent un taux de reprise générale de plus de 90% un an après travaux. Le bilan sur les herbacées est plus mitigé, avec un recouvrement du sol (28%) par ces dernières et une composition du mélange grainier utilisé (manque de <i>Poaceae</i>) suggérant une stabilisation du sol insuffisante. Nous avons par la suite montré qu'un gradient d'humidité et de lumière au sein du site d'étude, influence le développement de la végétation ligneuse et herbacée mise en œuvre et celle issue de la recolonisation naturelle. | |
| Abstract : Following the construction of a hydroelectric dam, a redevelopment of Romanche banks using bioengineering techniques was carried out on Gavet site (France). The purpose of this study is to assess the effectiveness of the techniques employed (planting and seedling) and to analyse environment abiotic factors, that are likely to influence the development of planted or seeded vegetation and also this of vegetation coming from spontaneous recolonisation. To answer to these goals, surveys on woody vegetation (recovery rates and cuttings height) and also on herbaceous vegetation (point quadrat method on line transects) have been established. As regards the first purpose of evaluating bioengineering success, plantings of woody species (cuttings, young plants, layering plants) was successful as they present a general recovery rate at more than 90%, one year after works. The results are more mitigated for the herbaceous species because of a recovering rate of soil surface (28%) and a composition of the seed mix (lack of <i>Poaceae</i>) which suggest a soil stabilization insufficient. Therefore, we showed that a light and humidity gradient in the study area, influences the development of planted and seeded vegetation and also this of vegetation coming from natural recolonisation. | |
| Mots-clés : Restauration de berge, génie végétal, succès de restauration, indicateurs de réussite, taux de reprise, facteurs biotiques et abiotiques, stabilisation de berge | |
| Key Words: Riverbank restoration, bioengineering, restoration success, indicators of success, recovery rates, abiotic and biotic factors, bank stabilization | |

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires