



**HAL**  
open science

# La végétalisation des milieux transformés par les projets d'aménagement Organisation des acteurs, évolution des pratiques et écologie des communautés végétales

Anaël Mayeur

## ► To cite this version:

Anaël Mayeur. La végétalisation des milieux transformés par les projets d'aménagement Organisation des acteurs, évolution des pratiques et écologie des communautés végétales. Biodiversité et Ecologie. Université Paris-Saclay, 2024. Français. NNT : 2024UPASB054 . tel-04880457

**HAL Id: tel-04880457**

**<https://pastel.hal.science/tel-04880457v1>**

Submitted on 10 Jan 2025

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

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

# La végétalisation des milieux transformés par les projets d'aménagement

Organisation des acteurs, évolution des pratiques  
et écologie des communautés végétales

*The revegetation of environments transformed by development projects  
Organisation of stakeholders, evolution of practices and ecology of plant communities*

## Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n°581 : agriculture, alimentation,  
biologie, environnement, santé (ABIES)  
Spécialité de doctorat : Ecologie  
Graduate School : Biosphera. Référent : AgroParisTech

Thèse préparée dans l'UMR **Ecologie, Systématique et Evolution** (Université Paris-Saclay, CNRS, AgroParisTech), sous la direction de **Bruno COLAS**, Professeur

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 13 novembre 2024, par

**Anaël MAYEUR**

## Composition du Jury

Membres du jury avec voix délibérative

<b>Nathalie FRASCARIA</b> Professeure, AgroParisTech (Université Paris Saclay)	Présidente
<b>Nathalie MACHON</b> Professeure, MNHN	Rapporteur & Examinatrice
<b>Armin BISCHOFF</b> Professeur, Avignon Université	Rapporteur & Examinateur
<b>Thierry TATONI</b> Professeur, Université d'Aix-Marseille	Examinateur
<b>Stéphanie HUC</b> Chargée de mission (Docteure), Conservatoire Botanique National Alpin	Examinatrice

**Titre :** La végétalisation des milieux transformés par les projets d'aménagement – Organisation des acteurs, évolution des pratiques et écologie des communautés végétales

**Mots clés :** Végétalisation – Aménagement – Biodiversité – Erosion – Semences locales – Espèces exotiques envahissantes

**Résumé :** La place du végétal au sein des grands projets d'aménagement a évolué avec le temps. Au-delà de sa fonction paysagère et technique, la végétalisation intéresse de plus en plus pour sa contribution à l'atténuation des impacts des projets sur la biodiversité. Ces réflexions ont conduit à la création d'une filière de production de semences sauvages et locales, dont la marque Végétal local est, en France, le fer de lance.

La problématique centrale de cette thèse concerne la végétalisation des espaces remaniés par les aménagements, et en particulier les talus d'autoroute. Nous étudions les pratiques passées et actuelles, les freins à leur intégration à des actions en faveur de la biodiversité, et les pistes d'amélioration. La première partie de la thèse est basée sur l'analyse de données qualitatives issues d'entretiens semi-directifs auprès de prescripteurs, des aménageurs, des producteurs de semences et des représentants de la marque Végétal local. Par une approche historique, nous montrons que les attentes autour de la végétalisation au sein des grands projets d'aménagement ont évolué au cours du temps. La nécessité d'intégration paysagère des ouvrages et de protection des sols par la réduction des processus d'érosion ont persisté jusqu'à aujourd'hui, mais de nouvelles demandes relatives à la biodiversité sont venues s'ajouter aux attentes de végétalisation. Toutefois, l'évolution des pratiques de végétalisation est lente, d'une part du fait d'un manque de compétences en écologie chez les prescripteurs et les aménageurs autoroutiers, mais aussi en raison des contraintes budgétaires et logistiques inhérentes aux projets. La marque Végétal local contribue à la constitution d'une filière de production de semences sauvages et locales *a priori* favorables à la biodiversité, et propose des outils pour une meilleure intégration des enjeux de biodiversité aux projets d'aménagement. Néanmoins, l'absence de certains critères de qualité des semences, leur coût plus élevé, et la relative difficulté d'approvisionnement, représentent un frein à l'utilisation plus répandue des semences sauvages et locales par les acteurs de

l'aménagement, contraints par les aspects techniques et budgétaires des chantiers.

A travers plusieurs dispositifs expérimentaux *ex situ* en serre et *in situ* sur talus autoroutiers, nous évaluons dans une seconde partie la capacité de différents mélanges de végétalisation, variant par leur niveau de richesse et par leur origine (cultivar vs. sauvage et local), à répondre aux impératifs techniques tout en contribuant à la diversité floristique des milieux, et en évitant l'établissement d'espèces exotiques envahissantes. Nous montrons que les mélanges de semences d'écotypes sauvages et locaux produisent plus de racines que les cultivars, avec de potentiels effets bénéfiques pour la protection des sols contre l'érosion. Nous confirmons également l'efficacité de semer dès la fin des opérations de terrassement pour limiter la germination des espèces exotiques envahissantes sur sol nu. Sur les talus, les mélanges de végétalisation riches et locaux, bien que contenant une proportion moindre de graminées et semés à des doses deux fois plus faibles, assurent un recouvrement et une densité de végétation équivalente aux mélanges standards spécifiquement sélectionnés pour cette fonction. Une grande part de la diversité floristique observée *in situ* émane d'une végétation spontanée, mais le semis de mélanges contenant un grand nombre d'espèces contribue à augmenter significativement la richesse locale observée.

Au vu de nos résultats, nous incitons les porteurs de projets et les praticiens à adopter plus largement l'utilisation de semences sauvages et locales, qui constitue l'application d'une certaine forme de principe de précaution, en maximisant les chances de conservation des aspects fonctionnels de la flore introduite et en minimisant les risques de maladaptation des communautés semées ou d'introduction de génotypes non locaux ou d'espèces exotiques potentiellement impactants. Cela ne pourra se réaliser sans une poursuite de la croissance de la filière de production de ces semences, ni sans l'évolution des pratiques des aménageurs vers le respect de la chaîne de valeur nécessaire à leur bonne utilisation.

**Title :** The revegetation of environments transformed by development projects – Organisation of stakeholders, evolution of practices and ecology of plant communities

**Keywords :** Revegetation – Land-planning – Biodiversity – Erosion – Local seeds – Invasive alien species

**Abstract :** The role of vegetation in large-scale development projects has evolved over time. Beyond its landscape and technical functions, revegetation is increasingly valued for mitigating biodiversity impacts. This led to the creation of a wild and local seed production sector, spearheaded, in France, by the Végétal local brand.

The central issue of this thesis addresses the revegetation of areas transformed by development projects, specifically highway embankments. It examines historical and current practices, barriers and potential improvements that would allow them to better integrate into actions to promote biodiversity. The first part of this thesis is based on the analysis of qualitative data from semi-structured interviews with key stakeholders (prescribers, developers, seed producers, and Végétal local representatives). A historical approach reveals that expectations surrounding revegetation in major development projects have evolved over time. While the goals of landscape integration and soil protection through erosion control has persisted, new demands relative to biodiversity have been added the revegetation imperatives. However, the evolution of practices to address these demands is slow, partly due to a lack of ecological expertise among motorway project practitioners, but also due to budgetary and logistical constraints. The Végétal local brand supports the development of a production chain for wild and local seeds that favours biodiversity, offering tools to better integrate these considerations into development projects. However, the absence of certain seed quality criteria, their higher cost, and the relative difficulty of sourcing them remain barriers to the wider use of wild and local seeds by stakeholders, who are constrained by the technical and budgetary aspects of development projects.

In the second part, through a number of experiments, both *ex situ* in greenhouse conditions, and *in situ* on road embankments, we evaluate the ability of different revegetation mixtures, varying in richness and origin (cultivar vs. wild and local), to meet technical needs while contributing to floral diversity. Our findings show that wild and local seed mixtures produce more roots than cultivars, potentially offering beneficial effects for soil protection against erosion. We also confirm the effectiveness of seeding immediately after earthwork operations to limit the germination of invasive exotic species seeds on bare soil. On embankments, rich and local revegetation mixtures – although containing a lower proportion of grasses and sown at half the rate – provide vegetation cover and density comparable to standard mixtures selected for this function. Although much of the observed floristic diversity comes from spontaneous vegetation, sowing species-rich mixtures significantly increases local diversity.

Based on our findings, we encourage project developers and practitioners to adopt the use of wild and local seeds more widely. This constitutes the application of a certain form of precautionary principle, maximizing the conservation of functional aspects of introduced flora and minimizing the risk of maladaptation of the seeded communities, or the introduction of potentially harmful non-local genotypes or alien species. Achieving this will require continued growth in the wild and local seed production sector and a shift in developer practices to respect the necessary value chain for proper seed use.





Illustration 1 : « *La cicatrice des paysages* » – Contournement Ouest de Strasbourg, kilomètre n°9 – Crédits : Gaëtan Soerensen

## REMERCIEMENTS

Merci Bruno, pour ta confiance dans le montage et la réalisation de ce projet. Merci pour ta bienveillance et ton accompagnement tout au long de la thèse. Merci pour les opportunités professionnelles que tu m'as offertes, depuis mon arrivée au laboratoire ESE en tant qu'ingénieur d'études jusqu'à la poursuite de ma carrière comme enseignant-chercheur à AgroParisTech. Je n'aurais pas pu rêver meilleur encadrant, et j'espère pouvoir continuer longtemps notre collaboration.

Merci Maxime Trocmé, ainsi que l'ensemble du « Lab Vinci ParisTech », pour le financement de ce travail de thèse, la mise en relation avec les personnels opérationnels de Vinci, et pour les opportunités d'intervention auprès des praticiens intéressés par mes travaux. Merci également aux autres personnes d'EquoVivo et de Vinci Autoroutes, en particulier Lionel d'Allard et Arnaud Guillemin, pour votre implication à différentes phases de ce projet.

Merci Pierre Grasset, pour ton aide dans la mise en place des sites expérimentaux, leur gestion et les riches échanges sur les problématiques abordées dans le cadre de ce travail. Merci aussi pour ta participation à mon jury de soutenance de thèse.

Merci Florence pour ton investissement et ta patience dans les réflexions et le traitement statistique de mes données. Ton aide m'a été essentielle.

Merci Armelle, pour m'avoir initié à l'économie des organisations, pour avoir accepté de collaborer dans le cadre de ce travail et pour le co-encadrement de John. Merci aussi pour ta participation à mon comité de suivi. J'espère que nous aurons l'occasion de poursuivre et valoriser notre travail conjoint.

Merci Augustin, stagiaire d'exception, pour les longues heures passées à compter les plantes sous la chaleur écrasante des serres et des talus. Merci pour ton investissement, ta bonne humeur et ton soutien inconditionnel sur le terrain.

Merci John pour ton travail acharné dans le cadre de la réalisation des entretiens, bravo pour ta capacité d'adaptation et la vitesse à laquelle tu t'es approprié ce sujet de stage.

Merci Gaëtan pour ton intérêt et ton investissement dans ce travail. Je suis heureux de pouvoir partager ton art ([www.gaetanoerensen.com](http://www.gaetanoerensen.com)) et les nombreux clichés qui viennent enrichir ce manuscrit. Au plaisir de renouveler notre collaboration lors de projets futurs.

Merci Blanche pour ta participation à mon travail et ton précieux soutien au cours des derniers mois de la thèse. Merci pour ta patience et le partage de tes nombreuses ressources sur R. J'ai hâte de pouvoir valoriser le fruit de notre collaboration et de poursuivre nos échanges entre futurs collègues à l'Agro.

Merci Sandra, de tout cœur, pour ta participation dès les prémices de ce projet, lors des premières tentatives de montage pour lui donner naissance, et dans l'exploration des problématiques ayant contribué à la formulation des questions centrales cette recherche. Merci

aussi d'avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi, et enfin pour les nombreuses relectures éclairées de ma production.

Merci Isabelle, pour ta participation à mon comité de suivi, et en particulier pour tes conseils sur le positionnement de mon travail et la formulation de mes propos.

Merci beaucoup Nathalie, pour tout le temps investi lors des réflexions préliminaires de ce travail, pour le partage inconditionnel de ton réseau, tes ressources et tes conseils. Merci la gentillesse que tu communique chaque jour autour de toi à l'ensemble des membres du laboratoire. Merci pour ta confiance et les opportunités que tu m'as offertes.

Merci Lucie Heitz ([nungesser-semences.fr](http://nungesser-semences.fr)), pour ton aide dans la conception des mélanges de semences, pour les heures accordées à la visite de vos installations, aux visites de terrain et pour l'intérêt que tu portes à mon travail.

Merci Virginie, Alain et Amandine des serres d'Orsay pour votre dévouement à la survie des plantes, ainsi que pour tous les moments de convivialité partagés, qu'ils aient eu lieu autour d'un barbecue ou près d'un tas de terreau.

Merci à tous les autres membres du laboratoire ESE, et en particulier les « non-perm » et les membres de l'équipe TESS, qui m'ont accueilli à bras ouvert et ont largement contribué à l'enrichissement de ma culture scientifique.

Merci à mes amis les plus chers, dont je tairai le nom pour ne froisser personne, mais qui, j'en suis sûr, se reconnaîtront. Vous êtes comme une seconde famille pour moi qui n'ai pas eu la chance d'avoir de frères et sœurs. Pour certains, le temps et la distance m'ont éloigné de votre présence, mais je garde toujours une place pour vous dans mon cœur.

Enfin, merci infiniment à ma famille :

Merci Maman et Papa – Nathalie et Gérard – d'avoir toujours été là pour moi, et pour avoir contribué à faire de moi ce que je suis aujourd'hui ; j'ai toujours plaisir à vous retrouver. Merci à mes grands-parents, présents ou déjà partis – Robert, Françoise, Marcel et Angèle – et à tous mes proches.

Aline, il m'est difficile de trouver les mots pour te témoigner toute ma gratitude. Merci pour ton soutien infaillible depuis notre rencontre, pour ton amour et pour le bonheur immense que nous partageons. Merci d'avoir toujours été là pour moi et pour notre fille pendant mes absences sur le terrain. Tu es infiniment précieuse à mes yeux, et j'espère de tout cœur que nous continuerons à avancer ensemble sur ce chemin pendant de nombreuses années encore.

Merci Ayla, ma fille, que je vois grandir un peu plus chaque jour depuis maintenant trois ans. Merci de partager avec moi tes joies et tes peines, qui enrichissent ma vie et m'aident à grandir à mon tour. Merci pour ta tendresse et tes sourires, qui illuminent mon existence à chaque instant.

# SOMMAIRE

<b>Remerciements</b>	<b>5</b>
<b>Tables des figures</b>	<b>9</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>15</b>
Biodiversité : Définitions, Concepts et Etat des lieux	15
L'aménagement du territoire et ses impacts : focalisation sur les infrastructures linéaires de transport routier	17
Les moyens d'action pour la conservation et la restauration de la biodiversité en contextes d'aménagement	18
Bref historique de la place du végétal dans les projets d'urbanisme et d'aménagement	20
La végétalisation des talus et autres terres mises à nu : propriétés et usages des semences	21
Responsabilité des acteurs de l'aménagement, faisabilité et marge d'évolution des pratiques	23
Questions et articulation du travail de thèse	24
<b>PARTIE 1 : Acteurs, filières et pratiques de végétalisation : histoire et organisation</b>	<b>27</b>
<b>Chapitre 1. Grand projets d'infrastructures, environnement et biodiversité : l'exemple de Vinci et comparaison avec d'autres acteurs</b>	<b>29</b>
1.1 Présentation des acteurs considérés	30
1.2 Stratégies et prise en compte de l'environnement et de la biodiversité par les aménageurs	32
1.2.1 Facteurs externes d'évolution des connaissances et compétences en environnement	32
1.2.2 Facteurs d'évolution interne	37
1.3 Mobilisation de la compétence en écologie au sein des grands projets d'aménagement	43
1.3.1 Internalisation de la compétence en écologie	43
1.3.2 Choix organisationnels dans le cadre des projets	45
1.3.3 Réflexion sur une meilleure intégration des savoirs écologiques	47
<b>Chapitre 2. Végétalisation herbacée et projets d'aménagement : historique, enjeux et perspectives</b>	<b>53</b>
2.1 Présentation des acteurs considérés	54
2.2 Fonctionnement général et evolution des pratiques de végétalisation	57
2.2.1 Parcours de végétalisation type	57
2.2.2 Evolution historique des attentes, fonctions et pratiques de végétalisation au sein des projets d'aménagement	61
2.2.3 Mélanges de végétalisation : modalités d'usage, de composition et de mise en œuvre	78
2.3 Enjeux et perspectives sur l'évolution des modalités de végétalisation	89
2.3.1 Enjeux autour de l'évolution des pratiques de végétalisation	89
2.3.2 Enjeux autour de la filière de production de semences sauvages et locales	98
Discussion conclusive : Réflexion engagée sur une évolution des pratiques et des mentalités	105

<b>PARTIE 2 : Evaluation expérimentale des modalités de végétalisation</b>	<b>111</b>
<b>Chapitre 3. La végétalisation comme réponse aux enjeux techniques dans le cadre des grands projets d'aménagement</b>	<b>113</b>
Introduction of Chapter 3	114
3.1 Assessing seed mixtures for roadside revegetation under controlled conditions: richness and origin as predictors for erosion control	119
3.1.1 Problematics	119
3.1.2 Methods	119
3.1.3 Results	124
3.1.4 Discussion	129
3.1.5 Conclusions	132
3.2 Assessing seed mixtures for roadside revegetation on road banks: richness and origin as predictors for erosion control	139
3.2.1 Problematics	139
3.2.2 Methods	139
3.2.3 Results	141
3.2.4 Discussion	145
3.2.5 Conclusions	149
<b>Chapitre 4. La végétalisation comme réponse aux enjeux de biodiversité</b>	<b>153</b>
4.1 Short-term effects of sowing low- to high-diversity seed mixtures to promote plant diversity on roadside embankments	155
4.1.1 Introduction	155
4.1.2 Methods	157
4.1.3 Results	159
4.1.4 Discussion	163
4.1.5 Conclusions	167
4.2 Recruitment and competitive abilities of different revegetation mixtures in the presence of the invasive alien species <i>Solidago canadensis</i>	181
4.2.1 Introduction	181
4.2.2 Methods	184
4.2.3 Results	187
4.2.4 Discussion	188
<b>DISCUSSION GENERALE</b>	<b>195</b>
La végétalisation des emprises autoroutières : entre pratiques historiques et impératifs technico-économiques	195
Végétaliser pour la biodiversité en contexte anthropisé	196
Perspectives d'évolution des pratiques de végétalisation au sein des grands projets d'infrastructures linéaires	201
<b>Références</b>	<b>205</b>

## TABLES DES FIGURES

### Illustrations:

Illustration 1 : « La cicatrice des paysages » – Contournement Ouest de Strasbourg, kilomètre n°9 – Crédits : Gaëtan Soerensen _____	4
Illustration 2 : Zone compensatoire – Contournement Ouest de Strasbourg – Crédits : Anaël Mayeur _____	28
Illustration 3 : Parcelles expérimentales – Contournement Ouest de Strasbourg – Crédits : Gaëtan Soerensen _____	52
Illustration 4 : Machines de collecte de semences en milieu naturel, de séparation de la matière et de tri – Entreprise Semence Nature _____	88
Illustration 5 : Equipements et procédés pour la production de semences – Nungesser semences – Crédits : Anaël Mayeur _____	100
Illustration 6 : Fauche des parcelles expérimentales – Contournement Ouest de Strasbourg – Crédits : Anaël Mayeur _____	112
Illustration 7 : Dispositif expérimental ex situ, bacs de culture et comptage des plantes – Crédits : haut et bas : Gaëtan Soerensen ; centre : Anaël Mayeur _____	118
Illustration 8 : Etapes du protocole d'évaluation de la biomasse racinaire – Crédits : Anaël Mayeur _____	123
Illustration 9 : Parcelles expérimentales sur talus – Contournement Ouest de Strasbourg, kilomètre n°3 – Crédits : Gaëtan Soerensen _____	138
Illustration 10 : <i>Cyanus segetum</i> – Crédits : Anaël Mayeur _____	152
Illustration 11 : Echantillons visuels des cortèges floristiques semés – Crédits : Anaël Mayeur _____	154
Illustration 12 : Comparaison visuelle entre les fleurs d'un ecotype sauvage et un cultivar de <i>Cyanus segetum</i> – Credits : Anaël Mayeur _____	166
Illustration 13 : <i>Solidago canadensis</i> en bordure de parcelles expérimentales – Crédits : Gaëtan Soerensen _____	180
Illustration 14 : Mise en place de l'expérimentation sur les espèces exotiques envahissantes – Crédits : Gaëtan Soerensen _____	186
Illustration 15 : Talus végétalisé, Contournement Ouest de Strasbourg, kilomètre 3 – Crédits: Anaël Mayeur _____	194
Illustration 16 : Comparaison visuelle entre les fleurs de cultivars et d'écotypes sauvages et locaux – Crédits : Anaël Mayeur _____	200
Illustration 17 : Anaël Mayeur – Observation d'un individu de <i>Cyanus segetum</i> – Crédits : Gaëtan Soerensen _____	203
Illustration 18 : Anaël Mayeur – « Après la pluie... » – Crédits : Gaëtan Soerensen _____	226

### Tableaux:

Tableau 1 : Fonctions, structures d'appartenance et formation des aménageurs interrogés _____	43
Table 2: Composition of the six revegetation mixtures: taxa variations and percentages of seed content. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. _____	120
Table 3 : Total number of forbs species inventoried on experimental plots for each a) exposure, b) mixture composition and c) location. _____	159

### Encadrés:

Encadré 1 : Synthèse des principales causes directes de la perte de biodiversité _____	15
Encadré 2 : Exemples d'actions de conservation des espèces mises en place dans le cadre des projets d'aménagement du territoire. _____	18
Encadré 3 : Présentation des représentants des bureaux d'études prescripteurs interrogés. _____	54



Encadré 4 : Présentation des représentants des producteurs de semences interrogés _____	54
Encadré 5 : Présentation des représentants de la marque Végétal local interrogés _____	56
Encadré 6 : Illustration des approches de végétalisation par plusieurs acteurs. _____	82

## Figures:

Figure 1: Organigramme des structures du groupe Vinci concernées par notre étude. Les phylactères représentent les personnes interrogées et sont placées sous leur(s) structure(s) d'appartenance. _____	30
Figure 2: Frise chronologique des marqueurs internes (en haut de la ligne de temps) et externes (en bas de la ligne de temps) de l'évolution de la politique de Vinci sur les questions relatives à l'environnement et la biodiversité. _____	36
Figure 3 : Schéma simplifié des acteurs impliqués dans le projet du Contournement Ouest de Strasbourg. En bleu : les entités détenues et/ou gérées en majorité par Vinci. En vert : les entités non détenues ou gérées par Vinci et intervenant dans le domaine de compétences environnemental. En gris : l'Etat. En blanc : le rôle ou les activités de chaque entité dans le cadre du projet du COS. _____	49
Figure 4 : Carte des 11 régions d'origine et des unités naturelles (découpages numérotés au sein des régions d'origine colorées) du territoire français métropolitain de la marque Végétal local. Réalisation : CBNPMP, AH, Mars 2023. Outil : Admin Express IGN©. [Végétal local, 2023a] _____	73
Figure 5: Evolution of the estimated cover (%) in time for all six mixtures following a two parameters Weibull growth model during the establishment phase. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins. _____	124
Figure 6: Vegetation cover of local and non-local versions of all three compositions at the times of measurement. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between origins: ns (non-significant), ** ( $P \leq 0.01$ ), **** ( $P \leq 0.0001$ ). _____	125
Figure 7: Total density of plant individuals per square meter at day 68-69. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between compositions and origins: ns (non-significant), ** ( $P \leq 0.01$ ), **** ( $P \leq 0.0001$ ). _____	125
Figure 8: Density of (a) grass, (b) legume and (c) non-legume forbs individuals per square meter per origin in all three compositions. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between origins: ns (non-significant), * ( $P \leq 0.05$ ), ** ( $P \leq 0.01$ ), *** ( $P \leq 0.001$ ), **** ( $P \leq 0.0001$ ). _____	127
Figure 9: Mass of dry roots (grams) per cubic meter in the topsoil. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between origins: ns (non-significant), ** ( $P \leq 0.01$ ). _____	128
Figure 10: Mean vegetation cover per plot (a) at the times of measurement regardless of treatment, and (b) at each site regardless of the time of measurement. Across sites, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test, $p < 0.05$ ). _____	141
Figure 11: Mean vegetation cover per plot (a) per mixture composition for each year of measurements, (b) per origin regardless of time and composition, and (c) of local and non-local versions of the three compositions for each year of measurements. Across sites, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test, $p < 0.05$ ). S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between origins: ns (non-significant), . (on the verge of significance, $0.1 \leq P \leq 0.05$ ), * ( $P \leq 0.05$ ), ** ( $P \leq 0.01$ ). _____	142



Figure 12: Density of individuals per plot (a) per site regardless of time, and (b) per composition on months 7, 18 and 23 after the experimental sowing. Across sites and across compositions, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test, $p < 0.05$ ).	143
Figure 13: Relative proportion of the density of individuals in time (a) by type of plant and (b) by most probable provenance.	144
Figure 14: Boxplot of mean species richness of forbs per plot on each a) site and for each b) composition of seeded mixture. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Within each plot, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test, $p < 0.05$ ). c) Relative mean forbs richness per plot by most probable source.	160
Figure 15: Boxplot of mean Shannon index value on forbs per plot on each a) site and for each b) composition of seeded mixture. Boxplot of mean Pielou (evenness) index value on forbs per plot on each c) site and for each d) composition of seeded mixture. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Within each plot, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test, $p < 0.05$ ).	162
Figure 16: Density of <i>Solidago</i> individuals in time, in the pots where they were first seeded (in red), and in the pots first seeded with the revegetation mixtures (in green).	187
Figure 17: Mean density of a) <i>S.c.</i> individuals and b) revegetation mixtures individuals at days 126 and 178. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Across time and treatments, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test, $p < 0.05$ ).	188

## **Annexes:**

Annexe 1 : Guide d'entretien simplifié – Prescripteurs	107
Annexe 2 : Guide d'entretien simplifié – Aménageurs	108
Annexe 3 : Guide d'entretien simplifié – Représentants de Végétal local	109
Annexe 4 : Guide d'entretien simplifié – Producteurs de semences	110
Appendix 5: Table of origins and varieties of non-local seeds	133
Appendix 6: Detail of the differences in seed number per growing pot (a) regardless of the species group among compositions, (b) per species group among compositions and (c) per species group between origins; (d) Weight of Thousand Seeds (WTS) in grams per species group between origins.	134
Appendix 7: Results of the comparisons among compositions and origins for the estimations of times to reach target cover thresholds (20%, 50% and 80%). The test is significant when 0 is not included in the $[q_{inf} : q_{sup}]$ interval.	135
Appendix 8: Vegetation cover of the three compositions at the times of measurement. Symbols above indicate the level of significance for Tuckey comparisons between among compositions: ns (non-significant), * ( $P \leq 0.05$ ), ** ( $P \leq 0.01$ ).	136
Appendix 9: Density of (a) grass, (b) legume and (c) non-legume forbs individuals per square meter in all three compositions. Symbols above indicate the level of significance for Tuckey comparisons among compositions: ns (non-significant), * ( $P \leq 0.05$ ), ** ( $P \leq 0.01$ ), *** ( $P \leq 0.001$ ), **** ( $P \leq 0.0001$ ).	137
Appendix 10 : Schematic of the experimental set-up.	150
Appendix 11: Climate data for the duration of the experiment from month 0 (sowing) to 23. Source : ["Climatologie de l'année 2023 à Strasbourg-Entzheim - Infoclimat," 2024].	150
Appendix 12 : Total number of forbs species inventoried on experimental plots for each site	168
Appendix 13: outputs for the richness model: all forb species per plot.	169
Appendix 14: outputs for the Shannon index model: all forb species per plot.	170
Appendix 15: outputs for the Pielou index model: all forb species per plot.	171
Appendix 16: a) Anova table for the total richness per plot (all forbs' species). Table of contrasts among b) compositions, c) mixtures (composition x origin), d) locations and e) sites (location x exposures) for all forbs species. Values are the difference in forbs species richness values between intersecting columns and	

lines. The level of significance of pairwise Tukey's tests are marked: ns (non-significant), * ( $p \leq 0.05$ ), ** ( $p \leq 0.01$ ), *** ( $p \leq 0.001$ ).	172
Appendix 17: a) Anova table for the Shannon index values per plot (all forbs' species). Table of contrasts among b) compositions, c) mixtures (composition x origin), d) locations and e) sites (location x exposures) for all forbs species. Values are the difference in Shannon index values between intersecting columns and lines. The level of significance of pairwise Tukey's tests are marked: ns (non-significant), * ( $p \leq 0.05$ ), ** ( $p \leq 0.01$ ), *** ( $p \leq 0.001$ ).	173
Appendix 18: a) Anova table for the Pielou index values per plot (all forbs' species). Table of contrasts among b) compositions, c) mixtures (composition x origin), d) locations and e) sites (location x exposures) for all forbs species. Values are the difference in Pielou index values between intersecting columns and lines. The level of significance of pairwise Tukey's tests are marked: ns (non-significant), * ( $p \leq 0.05$ ), ** ( $p \leq 0.01$ ), *** ( $p \leq 0.001$ ).	174
Appendix 19: Boxplot of mean species richness of forbs included in Table 2 per plot on each a) site and for each b) composition of seeded mixture. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Within each plot, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test, $p < 0.05$ ). c) Anova table for the richness of species included in Table 2. Table of contrasts among d) compositions, e) mixtures (composition x origin) and c) sites (location x exposures) for the species included in Table 2. Values are the difference in mean richness between intersecting columns and lines. The level of significance of pairwise Tukey's tests are marked: ns (non-significant), * ( $p \leq 0.05$ ), ** ( $p \leq 0.01$ ), *** ( $p \leq 0.001$ ).	175
Appendix 20: Boxplot of mean species richness of forbs excluded from Table 2 per plot on each a) site and for each b) composition of seeded mixture. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Within each plot, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test, $p < 0.05$ ). c) Anova table for the richness of species excluded from Table 2. Table of contrasts among d) mixtures (composition x origin) and e) sites (location x exposures) for the species excluded from Table 2. Values are the difference in mean richness between intersecting columns and lines. The level of significance of pairwise Tukey's tests are marked: ns (non-significant), * ( $p \leq 0.05$ ), ** ( $p \leq 0.01$ ), *** ( $p \leq 0.001$ ).	176
Appendix 21: List of species seeded at least once among the experimental plots, their frequency of observation (/time interval /composition /repetition) and their most probable source (Twice = Experiment + Practitioners).	177
Appendix 22 : List of species observed at least once in the experimental plots and their frequency of observation (/time interval /mixture /repetition).	178
Appendix 23: outputs for the S.c. density model comparing the seeding order, including Kolmogorov-Smirnov, nonparametric dispersion and outlier tests (from left to right).	191
Appendix 24: outputs for the S.c. density model, including Kolmogorov-Smirnov, nonparametric dispersion and outlier tests (from left to right).	191
Appendix 25: outputs for the revegetation mixtures' individuals density model, including Kolmogorov-Smirnov, nonparametric dispersion and outlier tests (from left to right).	192
Appendix 26: outputs for the maximum height model, including Kolmogorov-Smirnov, nonparametric dispersion and outlier tests (from left to right).	192
Appendix 27: Contrast tables based on Tuckey tests of a) the density of S.c. and b) the density of individuals from revegetation mixtures.	193
Appendix 28: Mean cover at days 26, 33, 40 and 48 for the pots of different seeding orders. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between deeding order: ns (non-significant), *** ( $P \leq 0.001$ ).	193

## LISTE DES ABREVIATIONS

**AFAC-Agroforesteries** : l'Association Française des Arbres Champêtres et agroforesteries

**AFB** : Agence Française pour la Biodiversité

**AI-GEco** : Les Acteurs de l'ingénierie et du Génie Écologiques

**AMO** : Assistant à Maître d'Ouvrage

**Arcour** : Autoroute ARtenay-COURtenay

**Arcos** : Autoroute de Contournement Ouest de Strasbourg

**ASF** : Autoroutes du sud de la France

**BE** : Bureau d'Etudes

**BTP** : Bâtiment et Travaux Publics

**BEV** : Bureau d'Etudes en charge de la Végétalisation

**CBN** : Conservatoire Botanique National

-PMP : Pyrénées-Midi-Pyrénées

-BP : Bassin Parisien

-A : Alpin

-MC : Massif-Central

-SA : Sud Atlantique

**CCTP** : Cahier des Clauses Techniques Particulières

**CEMAGREF** : Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts

**Cerema** : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

**CNR** : Compagnie Nationale du Rhône

**Cofiroute** : Compagnie financière et industrielle des autoroutes

**COFIL** : Comité de Pilotage

**COS** : Contournement Ouest de Strasbourg

**DCE** : Dossier de Consultation des Entreprises

**DTI** : Direction Technique de l'Infrastructure

**EDF** : Electricité De France

**EEE** : Espèce Exotique Envahissante (IAS en anglais)

**ERC** : séquence Eviter Réduire, Compenser

**Escota** : Société des autoroutes Esterel, Côte d'Azur, Provence, Alpes

**GNIS** : Groupement National Interprofessionnel des Semences et plants (actuel SEMAE)

**IAS** : Invasive Alien Species (*EEE en français*)

**INRA** : Institut National de la Recherche Agronomique

**LCPC** : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

**LGV** : Ligne à Grande Vitesse

**LPO** : Ligue pour la Protection des Oiseaux

**MOA** : Maître d'Ouvrage

**MOE** : Maître d'Œuvre

**OFB** : Office Français de la Biodiversité

**ONB** : Observatoire National de la Biodiversité

**ONF** : Office National des Forêts

**PMG** : Poids des Mille Grains

**REVER** : Réseau d'Échanges et de Valorisation en Écologie de la Restauration

**SEMAE** : interprofession des semences et plants (ex GNIS)

**SETRA** : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

**SNCF** : Société Nationale des Chemins de fer Français

**SNEEP** : Syndicat National des Entreprises d'Engazonnement par Projection

**TVB** : Trame Verte et Bleue

**UNEP** : Union Nationale des Entreprises du Paysage

**UPGE** : Union Professionnelle du Génie Ecologique

**VCT** : Vinci Construction Terrassement

**VL** : Végétal local

**VNF** : Voies Navigables de France



# INTRODUCTION GENERALE

## BIODIVERSITE : DEFINITIONS, CONCEPTS ET ETAT DES LIEUX

La biodiversité, ou diversité biologique, sous sa définition la plus communément admise, émanant de la Convention sur la diversité biologique de 1992, désigne la « variabilité des organismes vivants », en y incluant la diversité intraspécifique, interspécifique, et celle des écosystèmes [Nations Unies, 1992]. A chaque niveau d'organisation, la qualification de la biodiversité passe également par l'étude des interactions entre les éléments qui la composent [Noss, 1990]. Il est aujourd'hui admis par la communauté scientifique que la biodiversité connaît actuellement un effondrement s'apparentant aux cinq grands épisodes d'extinction de masse identifiés au cours des derniers 540 millions d'années [Barnosky et al., 2011; Ceballos et al., 2015; Jablonski, 1994; Raup and Sepkoski, 1982]. Ces épisodes ont abouti à une perte de plus de 75% du nombre d'espèces estimées, et se distinguent des processus d'extinction continuellement à l'œuvre au sein de la biosphère et plus ou moins naturellement compensés par la spéciation [Barnosky et al., 2011]. L'extinction des espèces [Ceballos et al., 2015; IUCN, 2024] et des populations [Hughes et al., 1997] actuellement constatée se démarque des précédentes en cela qu'elle est largement imputable aux activités humaines [IPBES, 2019]. Ces dernières ont en effet altéré la diversité et la stabilité des écosystèmes terrestres, modifiant leurs caractéristiques fonctionnelles en réduisant leur résistance aux invasions biologiques et leur capacité de résilience aux variations environnementales [Barnosky et al., 2012; Kramer et al., 2019; Loreau, 2010; McCann, 2000]. Les principales causes actuelles de la perte de biodiversité sont synthétisées au sein de l'Encadré 1.

### Encadré 1 : Synthèse des principales causes directes de la perte de biodiversité

Les principales causes directes de la perte accélérée de biodiversité sont (i) le changement d'usage des sols, c'est-à-dire la destruction directe des habitats par une transformation des milieux naturels en zones urbaines ou agricoles, le changement des modes de gestion des écosystèmes (e.g. l'intensification des pratiques agricoles ou de l'exploitation forestière) et la fragmentation des habitats ; (ii) le changement climatique accéléré par les activités humaines et impactant notamment la distribution des espèces, leur phénologie, la dynamique des populations, la structure des communautés et les fonctions écosystémiques ; (iii) la pollution des sols, de l'air et de l'eau, résultats notamment du rejet dans l'environnement de polluants issus de l'industrie, de l'agriculture, des activités minières ; (iv) la surexploitation des ressources naturelles pour répondre aux besoins grandissants en énergie et en matériaux du fait de la croissance démographique et de l'évolution des modes de consommation ; (v) les espèces exotiques envahissantes (EEE). (voir : [IPBES, 2019; IPCC, 2023; Maxwell et al., 2016; McNeely et al., 2001; Newbold et al., 2015])

Brook et al. [2008] ont montré que les conséquences de ces changements et le rythme auquel s'opère la perte de biodiversité pourraient être largement sous-estimés du fait des synergies existantes entre les menaces et leurs conséquences en cascade. La totalité des

écosystèmes est touchée par ces changements. Un grand nombre d'études se concentre sur le déclin des espèces animales [Ceballos et al., 2015], et en particulier des mammifères [Martín-López et al., 2011], et l'évaluation de l'impact des activités humaines sur la végétation à différentes échelles tend à être sous-représentée [Balding and Williams, 2016; Holderegger and Di Giulio, 2010]. La cécité botanique, décrite par Balding et Williams [2016] comme la tendance des humains à ne pas remarquer ni apprécier les plantes dans l'environnement, conduit à des efforts de conservation largement tournés vers la faune au détriment de la flore. Joppa et al. [2011] soulignent par ailleurs les difficultés rencontrées pour estimer le nombre total d'espèces végétales existantes, ainsi que celui des espèces déjà répertoriées à ce jour. L'IUCN [2024] estime toutefois que 45% des espèces de plantes à fleur connues à ce jour menacent de s'éteindre au cours des cent prochaines années.

La composition et la diversité génétique des populations détermine leur potentiel d'adaptation à un environnement changeant [Crespi, 2000; Falk and Holsinger, 1991; Ferrière et al., 2004; Hartl and Clark, 1997]. Le changement climatique [IPCC, 2023] engendre une modification des conditions climatiques locales favorables aux espèces, et modifie la fréquence et l'intensité des événements climatiques extrêmes. Pour éviter le déclin des populations face à ces perturbations, la plasticité phénotypique permet dans une certaine mesure de contenir les effets de la maladaptation à des conditions nouvelles en attendant une réponse évolutive [Anderson et al., 2012]. Quand les conditions environnementales changent, une population suffisamment diversifiée génétiquement peut évoluer en s'adaptant à ces nouvelles conditions, processus que certains auteurs qualifient de « sauvetage évolutif » [Carlson et al., 2014; Kremer et al., 2012]. Quand le changement environnemental est trop rapide ou que la diversité génétique au sein de la population est trop faible, ce sauvetage évolutif a moins de chances de se produire. L'autre solution pour répondre à ces changements et réduire les risques d'extinction est le déplacement de l'aire de répartition des populations par dispersion des individus vers des conditions climatiquement plus favorables [Freeman et al., 2018; Román-Palacios and Wiens, 2020]. Cependant la fragmentation des habitats ou certaines propriétés des espèces, comme un cycle de vie long ou une nature immobile, peuvent limiter la capacité de dispersion des individus ou des diaspores avant extinction [HilleRisLambers et al., 2013; Leimu et al., 2010].

Le maintien et la résilience d'un écosystème [Holling, 1973] dépendent du réseau d'interactions s'opérant entre ses composantes, et particulièrement entre les espèces la constituant. On peut parler de fonction écologique pour décrire les processus et interactions simples impliquant une ou plusieurs espèces (*e.g.* au sein d'un réseau trophique), ou encore pour qualifier le rôle d'une espèce comme composante de l'écosystème dont elle fait partie et qui contribue à définir l'état et la trajectoire de cet écosystème dans le temps [Jax, 2005]. Des liens ont été établis entre certaines caractéristiques des espèces, leurs traits fonctionnels, et les processus régissant le fonctionnement des écosystèmes [De Bello et al., 2010; Diaz et al., 2004; Grime, 1977]. La diversité de ces traits au sein d'un écosystème, aussi appelée diversité fonctionnelle, semble être un facteur déterminant dans le maintien des processus écologiques régissant son fonctionnement [Cadotte et al., 2011]. Leur identification recèle une importance majeure dans les efforts menés par les humains pour comprendre, conserver et tenter de restaurer la biodiversité. Afin d'attirer l'attention des décideurs politiques et des grands acteurs

économiques sur l'importance de préserver la biodiversité et promouvoir l'usage durable des écosystèmes, la notion de service écosystémique, ou service écologique, a émergé [Millennium Ecosystem Assessment, 2005]. Ces services se décomposent en quatre catégories : approvisionnement (e.g. la production de nourriture, de bois, de ressources génétiques), régulation (e.g. maintien de la stabilité climatique, régulation des ravageurs, préservation de la qualité de l'air et de l'eau, maintien des sols contre l'érosion), culturels (e.g. enrichissement spirituel, sentiment de bien-être et d'accomplissement, expériences esthétiques) et de support (e.g. maintien des cycles naturels de l'eau ou des processus de production primaire comme la photosynthèse). Bien que cette approche soit critiquable par sa vision anthropocentrée de la nature, on peut lui reconnaître le mérite de constituer un outil de compréhension et d'appropriation de concepts écologiques par les acteurs politiques et économiques, et de permettre la mobilisation d'efforts et de moyens conséquents pour la préservation et la restauration des écosystèmes.

## **L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET SES IMPACTS : FOCALISATION SUR LES INFRASTRUCTURES LINEAIRES DE TRANSPORT ROUTIER**

Dans le cadre de ce travail nous nous intéressons tout particulièrement aux impacts liés à l'aménagement des territoires, et en particulier la construction et la gestion des infrastructures linéaires de transport terrestres. L'aménagement peut se définir comme « *l'action volontaire d'un groupe social pour organiser, voire transformer l'espace dans le but d'engendrer des effets positifs sur la société* », incluant notamment l'organisation et le développement d'un territoire donné et la création des équipements associés [Desjardins and Généau de Lamarlière, 2016]. Au sens large, il peut simplement désigner « *l'organisation d'un espace afin de l'adapter aux évolutions de sa géographie économique et humaine* » [Dumont, 2020]. L'aménagement du territoire en France a connu des évolutions dans sa définition, sa mise en œuvre et surtout ses acteurs. Il désignait initialement les actions menées par l'Etat pour l'aménagement de son territoire national, puis, avec la décentralisation des pouvoirs initiée au début des années 1980, la responsabilité de ces actions a été redistribuée aux acteurs infranationaux (régions, départements, collectivités locales), bien qu'un cadre législatif, financier et politique persiste à l'échelle nationale [Desjardins and Généau de Lamarlière, 2016]. En France, le réseau routier s'étendait en 2021 sur 1 105 094 kilomètres de linéaires, incluant 11 664 kilomètres d'autoroutes [Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2023a]. Aujourd'hui, ce sont 4 443 kilomètres dont la concession a été accordée au seul groupe Vinci et ses sociétés [Vinci Autoroutes, 2024]. On estime que chaque kilomètre de linéaire autoroutier inclut environ huit à dix hectares de dépendances vertes dont 4 hectares de talus [Coumoul and Mineau, 2002]. Le réseau Vinci représenterait ainsi à lui-seul 18'000 hectares de talus à gérer.

L'aménagement du territoire contribue de façon considérable à l'accélération du rythme de l'érosion de la biodiversité, par la destruction directe ou la fragmentation des habitats, à travers notamment l'étalement urbain et le développement des infrastructures de transports. A l'échelle globale, parmi les 8688 espèces identifiées comme menacées ou quasi-menacées, 35% le sont à cause du développement urbain, incluant les logements, le tourisme et l'industrie, et 8% à cause des réseaux de transports routiers et ferroviaires [IUCN, 2024; Maxwell et al.,



2016]. Les impacts de la route commencent lors de la phase de construction, qui nécessite d'importants travaux de terrassement, avec d'abord un décapage des sols pour récupérer la « terre végétale » (*i.e.* terme désignant les horizons supérieurs du sol riches en matière organique) qui sera stockée en vue de sa réutilisation, puis un mouvement des terres et des roches sous-jacentes aux moyens d'engins et d'explosifs, souvent réutilisées comme matériau de remblai pour supporter la future route [Coumoul and Mineau, 2002]. Ces opérations laissent ainsi une topographie du paysage modifiée, formée de déblais (*i.e.* les reliefs creusés) et de remblais (*i.e.* les dépressions comblées) et leurs talus respectifs. La terre végétale initialement étreppée est étalée sur ces talus pour servir de support à la végétation. La zone impactée par un projet de construction ne se limite pas à la route et ses talus, mais s'étale généralement au-delà, par la création plus ou moins planifiée des voies de circulation des engins, les zones de stockage temporaire des sols, l'accueil des infrastructures humaines provisoires, ou la mise en place de toutes les structures annexes à la route (*e.g.* zones de compensation écologique, bassins d'orage...). La route, faite d'asphalte et recouvrant les réseaux sous-jacents, artificialise et imperméabilise les sols. Une fois construite et en fonctionnement, elle continue d'impacter les milieux environnants, notamment par l'émission dans l'air de particules polluantes des véhicules, l'écoulement non maîtrisé de polluants dans les sols, le bruit inhérent au trafic, les collisions avec la faune, l'usage de pesticides et la gestion de la végétation sur ses abords [Forman et al., 2003]. Outre les impacts directs sur les milieux environnants, la présence d'une route ou d'une voie ferrée impacte également les paysages, en y apposant une cicatrice visible à même de dégrader la qualité de vie des riverains et l'attractivité esthétique d'un site [Coumoul and Mineau, 2002; Crosaz, 2002; Forman et al., 2003].

## **LES MOYENS D'ACTION POUR LA CONSERVATION ET LA RESTAURATION DE LA BIODIVERSITE EN CONTEXTES D'AMENAGEMENT**

Pour limiter les impacts négatifs des aménagements, des actions de conservation, incluant la mise en place d'aires protégées, des efforts de gestion raisonnée des ressources, les translocations d'espèces, la limitation de l'expansion d'espèces exotiques envahissantes, la restauration écologique *etc.*, montrent des résultats positifs permettant d'éviter l'extinction locale de certaines espèces [Díaz et al., 2019; IPBES, 2019; Tilman et al., 2017]. Nous citons quelques exemples de ces actions dans l'Encadré 2.

Encadré 2 : Exemples d'actions de conservation des espèces mises en place dans le cadre des projets d'aménagement du territoire.

Ces actions de conservation des espèces à l'échelle locale peuvent être mise en place dans le cadre des projets d'aménagement, et émanent d'obligations réglementaires dans le cadre de l'application de la séquence Eviter-Réduire-Compenser (ERC ; [Légifrance, 2024]) ou d'initiatives volontaires : (i) les translocations d'individus peuvent permettre de renforcer des populations existantes par l'augmentation des effectifs ou de la diversité génétique en leur sein [Carlson et al., 2014], ou encore assister la migration de génotypes en anticipation des changements dans l'aire d'optimum écologique des espèces [Aitken and Whitlock, 2013], aussi appelée migration assistée [Commander et al., 2018; IUCN/SSC, 2013] ; (ii) la création de nouveaux habitats pour favoriser l'installation ou le retour d'espèces à intérêt

patrimonial déclaré ou dont le statut de conservation est menacé, et visant de manière plus générale l'absence de perte nette de biodiversité [Légifrance, 2016; Ten Kate et al., 2018]; (iii) la restauration de milieux dégradés lors de la construction d'une infrastructure nouvelle ou lors de l'exploitation de milieux ou infrastructures existantes; (iv) la réalisation d'opération de lutte contre la dispersion des espèces exotiques envahissantes, en tentant de prévenir leur introduction ou en gérant voire détruisant les populations existantes; (v) la construction d'infrastructures (*i.e.* passages à faune) visant à préserver ou restaurer le réseau de continuité écologique permettant d'assurer le flux de gènes et d'individus chez les populations animales et végétales, aussi appelé Trame Verte et Bleue (TVB; [Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2023b; Seiler et al., 2019]).

Ces efforts de conservation se concentrent généralement sur la faune [Forman et al., 2003; Holderegger and Di Giulio, 2010; Seiler et al., 2019] ou sur la flore patrimoniale et protégée [Diallo et al., 2023; Julien et al., 2022]. La flore commune, ordinaire, est souvent oubliée, mise de côté, au profit d'espèces plus rares, emblématiques [Barbé and Frascaria-Lacoste, 2021; Devictor and Godet, 2010], ou implantée en milieux naturels plus préservés [Mehdi et al., 2012]. Pourtant, elle représente une grande part de l'abondance floristique, et renferme la majorité de la richesse spécifique dans les milieux perturbés ou implantés en contexte hautement anthropisé (*e.g.* milieux urbains, périurbains, agricoles; [CBNA, n.d.; Muratet et al., 2007]). Certaines espèces, communément retrouvées sur les friches, les périphéries urbaines, les grandes cultures ou les déprises agricoles, sont souvent porteuses d'une image négative et qualifiées de « mauvaises herbes » car perçues comme gênantes pour les activités humaines [Coumoul and Mineau, 2002]. L'orientation des outils et politiques de conservation ne permet pas d'œuvrer en faveur de toute la biodiversité, y compris les espèces communes, et des composantes abiotiques et culturelles de l'environnement (*e.g.* sol, air, paysages) [Jalkanen et al., 2020]. Les délaissés autoroutiers (*i.e.* les terrains cédés aux sociétés d'autoroute) dont les talus font partie intéressent globalement encore peu les aménageurs et les scientifiques dans le cadre de l'intégration des enjeux de biodiversité aux projets d'aménagement [Coumoul and Mineau, 2002; Mehdi et al., 2012]. Bien que leur valeur conservatoire pour la reconstitution d'habitats ou de corridors écologiques soit très dépendante du contexte d'implantation, les bordures des infrastructures linéaires de transport sont susceptibles d'accueillir un large panel d'espèces indigènes [Jeusset et al., 2016; Mell et al., 2024; Tikka et al., 2000]. Notamment, il a été montré que les emprises routières pouvaient constituer des habitats favorables à des espèces de prairies semi-naturelles ou messicoles en déclin [Hovd and Skogen, 2005; Kiehl and Pfadenhauer, 2007; Rydgren et al., 2010]. Cependant, ces milieux sont sensibles à l'érosion et constituent des corridors privilégiés pour la dispersion d'espèces exotiques envahissantes, rendant nécessaire l'établissement rapide d'un couvert végétal [Bochet et al., 2009; Crosaz, 2002; Fattet et al., 2011; Gelbard and Belnap, 2003; Soper, 2019].

## **BREF HISTORIQUE DE LA PLACE DU VEGETAL DANS LES PROJETS D'URBANISME ET D'AMENAGEMENT**

Dans le cadre de ce travail, nous considérerons la végétalisation comme l'établissement d'espèces végétales sur sols nus par l'action volontaire de l'humain ou par une recolonisation naturelle. La végétalisation peut être réalisée par l'humain au moyen de semences ou de plants d'espèces herbacées ou ligneuses (*i.e.* arbres et arbustes). Dans le cadre de ce travail de recherche, c'est la végétalisation volontaire de sols remaniés aux moyens de semences herbacées qui nous intéresse particulièrement.

Si l'on remonte aux XIXe et XXe siècle, la place du végétal s'inscrit dans deux grandes idéologies urbanistiques : l'urbanisme progressiste favorisant les valeurs d'hygiène, visant à contenir l'expansion de la ville par l'établissement d'éléments de verdure, et l'urbanisme culturaliste visant à recréer les formes et structures des paysages du passé [Choay, 1970; Merlin and Choay, 2009]. Alors, l'usage du végétal était pleinement tourné vers les parcs et jardins, qui constituaient surtout des décors urbains aux fonctions sociales et de loisir [Mehdi et al., 2012]. Le manque de connaissances écologiques ne permettait pas d'intégrer les espaces verts (terme encore absent à l'époque) à la conception urbanistique. Une place plus importante a commencé à être accordée aux espaces plantés en ville avec la loi du 14 mars 1919 et l'obligation de mise en place d'un Projet d'Aménagement, d'Embellissement et d'Extension (PAEE) pour les villes [Merlin and Choay, 2009]. Le terme d'« espace vert » ne fait son apparition qu'en 1961 avec un décret portant sur le règlement national d'urbanisme [Mehdi et al., 2012]. En 1976 a été établi un plan général d'organisation intitulé « la Trame verte de la région parisienne », instaurant une vraie politique de planification des espaces verts en annexant un « espace vert d'accompagnement » à chaque ensemble construit [Reygrobelle, 2007]. Dans les années 1970 et 1980, les espaces verts ont servi de plus en plus à améliorer la qualité de vie des citoyens, mais aussi à constituer des éléments d'attractivité pour les villes et les infrastructures [Mehdi et al., 2012]. Enfin, avec le sommet de Rio en 1992, la fin du XXe siècle a été marquée par la lutte contre l'érosion de la biodiversité et l'intégration de la notion de fonctionnement des écosystèmes aux planifications urbanistiques. En 1995 en France, l'ensemble des aménageurs s'est vu contraint de consacrer au moins 1% de son budget aux aménagement paysagers au sein et aux alentours des projets, conduisant aux premières intégrations d'aménagements végétalisés à visée écologique (*e.g.* corridors écologiques) [Cormier et al., 2010]. Les pratiques de végétalisation au sein des projets d'aménagement en France se fondent historiquement quasi-exclusivement sur des approches paysagistes. L'intégration des savoirs écologiques aux techniques d'ingénierie (*i.e.* ingénierie écologique ou génie écologique) est relativement récente [Mitsch, 1998], et n'est pas encore appliquée de manière systématique à l'ensemble des pratiques en aménagement du territoire.

## LA VEGETALISATION DES TALUS ET AUTRES TERRES MISES A NU : PROPRIETES ET USAGES DES SEMENCES

La végétalisation fait aujourd'hui l'objet de nombreuses études et donne lieu à de nombreuses applications. Avec l'intégration de savoirs issus de l'écologie scientifique, elle constitue un élément central d'opérations de restauration écologique visant à ramener un écosystème un état ou fonctionnement de référence [Gann et al., 2019; Vaughn et al., 2010]. Dans le cadre de la construction d'une route par exemple, pour laquelle les écosystèmes existants ont été irréversiblement détruits, l'ambition d'une restauration écologique est exclue. Toutefois, la végétalisation peut s'intégrer à des actions faisant partie du « continuum restaurateur » tel que défini par la *Society for Ecological Restoration* (SER), dans un objectif de réduction des impacts, de remédiation voire de réhabilitation [Gann et al., 2019; Martin et al., 2005]. Dans le cadre des grands aménagements, elle peut servir une multitude d'objectifs. La végétalisation s'intègre à la séquence ERC pour la restauration ou à la création d'habitats en marge de l'emprise des infrastructures, ou pour la création de bassin de récupération et d'épuration des eaux d'écoulement. Elle sert des objectifs techniques comme le maintien des talus par l'atténuation des processus d'érosion hydrique des sols à nu [Andrés and Jorba, 2000; Bochet et al., 2009; Bochet and Garcia-Fayos, 2004; Nicolau, 2002; Tormo et al., 2007]. Enfin, elle peut servir l'esthétique et l'intégration paysagère des infrastructures [Akbar et al., 2003; Bretzel et al., 2016; Crosaz, 2002]. Pour que les opérations de végétalisation aboutissent à l'établissement rapide et pérenne d'un couvert, on peut imaginer qu'il est nécessaire de sélectionner consciencieusement le cortège d'espèces à implanter, voire les génotypes des semences, et de prendre en considération l'évolution de l'environnement local.

Le choix des cortèges d'espèces végétales est généralement adapté au contexte d'implantation [Soper, 2019] et aux objectifs poursuivis par les actions de végétalisation, comme l'établissement rapide d'un couvert végétal, la constitution de communautés diversifiées à des fins conservatoires, de pérennité de l'ouvrage ou encore d'esthétique [Crosaz, 2002; Dinger, 1997, 1995; Henry et al., 2011]. Ce choix est toutefois conditionné dans une certaine mesure par des contraintes extérieures relatives au budget et aux efforts de gestion que les aménageurs sont prêts à accorder [Crosaz, 2002]. L'usage d'espèces indigènes (*i.e.* naturellement présentes au sein d'une région donnée) pour la végétalisation des abords routiers a fait l'objet de nombreuses recherches et expérimentations pratiques à partir des années 1970, notamment aux Etats-Unis. Leur utilisation en contexte d'aménagement s'est depuis généralisée car elle permet (i) une réduction des risques d'envahissement liés à l'introduction d'espèces exogènes [Tinsley et al., 2006], (ii) une meilleure résistance aux invasions [Federal Highway Administration, 2011] et une meilleure compétitivité face aux espèces exotiques déjà présentes [Corbin and D'Antonio, 2004], (iii) une réduction des coûts de gestion sur le long-terme [Federal Highway Administration, 2007a], (iv) de meilleurs vitesses et taux de recouvrement [Bochet et al., 2010; Pinaya et al., 2000], notamment en conditions climatiques contraignantes, et enfin (v) une meilleure insertion paysagère, permettant dans une certaine mesure d'effacer la cicatrice des infrastructures [Coumoul and Mineau, 2002; Crosaz, 2002; Renard, 2014].

Au-delà du critère d'indigénat, une attention particulière est portée aux caractéristiques génétiques du matériel végétal utilisé à des fins de conservation de la biodiversité depuis les années 1990-2000, et l'usage de végétaux « locaux » est largement promu par les acteurs de la restauration écologique [Dupré la Tour et al., 2020]. Comme décrit en détail par Dupré la Tour et al. [2020], le terme « local » reste cependant très vague et sujet à des usages multiples. Dans le cadre de cette recherche, nous ne considérerons jamais ce terme comme un synonyme d'« indigène » ou « autochtone », comme c'est le cas pour certains acteurs. La notion de local exclut généralement les cultivars (*i.e.* les végétaux ayant subi un processus de sélection artificielle), comme c'est souvent le cas des semences commercialisées à large échelle par les grands fournisseurs de l'industrie semencière. Ces cultivars peuvent être sélectionnés pour leurs caractéristiques morphologiques dans une recherche d'esthétisme pour un usage horticole par exemple, au détriment parfois de leur fonctions pollinifères et nectarifères servant la faune associée [Corbet et al., 2001; Mouret et al., 2022]. Nous emploierons donc le terme de local pour qualifier les semences dont le semis a été fait à une distance suffisamment faible de la zone d'origine du matériel végétal. L'emploi du terme local, ou régional, sous-entend aussi le plus souvent que le matériel végétal a été collecté au sein de milieux naturels ou semi-naturels n'ayant pas subi d'apport de géotypes extérieurs par semis ou plantation depuis une période donnée. Certains parlent alors de végétaux sauvages d'écotypes locaux [Malaval et al., 2010]. En France comme dans d'autres pays comme l'Autriche, l'Allemagne, la Suisse ou la Norvège, des outils de traçabilité (*e.g.* labels, marques) existent pour permettre d'assurer la traçabilité du matériel végétal en vue de son usage et/ou sa commercialisation. Ils s'appuient sur des régions d'origine définies sur la base d'un compromis. D'une part, ces régions d'origine doivent être suffisamment homogènes sur des critères géologiques, floristiques, pédologiques, bioclimatiques et économiques, pour assurer une bonne adaptation des végétaux semés sur leurs sites d'implantation. D'autre part, les régions d'origine doivent être suffisamment grandes pour permettre la formation d'un marché pérenne [Erickson and Halford, 2020; Huc et al., 2022; Vander Mijnsbrugge et al., 2010]. Dans le cadre de cette recherche, nous nous intéresserons particulièrement à la marque Végétal local, qui définit les régions d'origine en France. Ces outils de traçabilité permettent une généralisation de l'usage des semences sauvages et locales dans des contextes de restauration et d'aménagement, auprès d'acteurs autrement dépourvus des connaissances nécessaires à leur collecte et leur bonne utilisation. L'utilisation de semences non locales peut conduire à une maladaptation des populations, résultant du fait que les géotypes semés sont adaptés à des conditions environnementales qui diffèrent trop de celles rencontrées sur les sites d'implantation [Bucharova et al., 2017], ou qu'ils se croisent avec des géotypes locaux, résultant en une descendance dont les géotypes recombinés ont une mauvaise valeur sélective (*i.e.* dépression hybride) [Keller et al., 2000; Montalvo and Ellstrand, 2001; Sackville Hamilton, 2001]. L'introduction de géotypes non locaux peut également représenter un risque d'invasion cryptique, *i.e.* l'invasion d'une population locale par un géotype supérieur [Saltonstall, 2002]. Enfin, l'usage de semences non locales peut induire des écarts de phénologie entre les populations semées et les populations conspécifiques locales, corrélés avec la distance géographique et climatique d'origine, résultant par exemple en un décalage entre la période d'activité des insectes pollinisateurs et la floraison, ce qui peut engendrer des conséquences négatives sur la démographie des deux populations, végétale et pollinisatrice [Bucharova et al., 2017]. Parallèlement à l'attention portée à l'origine des

semences, la maximisation de leur diversité génétique – en effectuant des collectes de semences d'origine au sein de plusieurs populations naturelles et sur plusieurs années – est recommandée afin d'augmenter les chances d'adaptation des populations semées aux conditions environnementales naturellement fluctuantes, et changeantes du fait des effets du changement climatique [Breed et al., 2013; Broadhurst et al., 2008; Havens et al., 2015].

## **RESPONSABILITE DES ACTEURS DE L'AMENAGEMENT, FAISABILITE ET MARGE D'EVOLUTION DES PRATIQUES**

Les entreprises sont tenues de mettre en œuvre des actions de préservation et de restauration de la biodiversité, aux moyens de dispositions légales (espèces protégées, séquence ERC ; [Légifrance, 2024]) ou par le biais de la commande formulée par les commanditaires dans le cadre des projets, mais sont également encouragées à engager des initiatives volontaires en ce sens. La France, à travers notamment sa feuille de route pour l'Agenda 2030, définit la préservation de la biodiversité comme un axe prioritaire d'action dans différents secteurs d'activité, incluant notamment la mobilité et les transports. Pour y arriver, cet axe encourage les acteurs à adopter de « *nouveaux modèles durables de consommation, de production et d'approvisionnement économes en ressources naturelles, sobres en carbone et circulaires* » [Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2019]. Les actions vertueuses engagées par les entreprises peuvent être valorisées dans le cadre des indicateurs de performance extra-financière. Toutefois, les entreprises de l'aménagement et de la gestion des territoires ne sont pas toutes égales face à l'intégration des enjeux écologiques, notamment lorsque l'on traite spécifiquement des questions de biodiversité [EDF, 2022; Vinci, 2023]. Dans le cadre des projets d'aménagement, les décisions relatives aux caractéristiques de ces actions, leurs modalités d'exécution et les budgets associés, relèvent à la fois d'enjeux techniques et de choix politiques, notamment dans le cadre du pilotage par la maîtrise d'ouvrage [Idt, 2009]. Malgré la nécessité toujours plus prégnante d'intégrer les enjeux de biodiversité aux projets, les actions en ce sens sont encore souvent perçues comme des contraintes [Tourjansky-Cabart and Galtier, 2006]. Ainsi, les actions sortant du cadre de la contrainte réglementaire, comme c'est le cas des opérations de végétalisation hors des zones à enjeux écologiques reconnus, sont encore trop souvent mal intégrées aux projets, et ne bénéficient pas de la mobilisation de savoirs écologiques servant l'évolution des pratiques. Même lorsque c'est le cas, et que les acteurs décident par exemple d'intégrer l'usage de mélanges de végétalisation riches et locaux, ils peuvent se heurter à des barrières économiques ou de disponibilité du matériel [Bochet et al., 2010; Erickson and Halford, 2020].

## QUESTIONS ET ARTICULATION DU TRAVAIL DE THESE

L'idée de ce travail de recherche a été initié sur la base de discussions et entretiens exploratoires avec des scientifiques, des acteurs de la filière des végétaux sauvages et locaux en France, et des acteurs d'entreprises de l'aménagement, gestionnaires ou constructeurs de projets autoroutiers et de restauration écologique. Il poursuit donc une double finalité opérationnelle et scientifique. **Notre question centrale porte sur l'identification des pratiques historiques et actuelles de végétalisation, ainsi que sur l'évaluation des freins et des pistes d'amélioration permettant leur intégration à des actions en faveur de la biodiversité.** Notre objet d'étude est donc la végétalisation, en tant que pratique impliquant des acteurs professionnels aux attentes, aux organisations et aux techniques multiples, et en tant que sujet scientifique permettant de poser des questions écologiques. Bien que des mentions et des points de comparaisons soient faits avec d'autres types de projets d'aménagement, cette étude se concentre majoritairement sur les infrastructures autoroutières. Toutefois, les approches réflexives et les résultats obtenus ont vocation à s'appliquer à un spectre plus large de projets. Ainsi, nous pensons que les acteurs de tout projet impliquant un remaniement des sols et une végétalisation de terres mises à nu, quel que soit son contexte d'implantation et sa finalité, pourront trouver un intérêt aux réflexions et découvertes faites dans le cadre de cette recherche.

Pour mener à bien notre démarche, la mobilisation de savoirs et de méthodes issues de plusieurs disciplines semblait incontournable. Ainsi, ce travail s'articulera autour de deux parties majeures : une première partie centrée sur les acteurs de la végétalisation et l'évolution de leurs pratiques à travers une synthèse de données qualitatives tirées d'entretiens semi-directifs, et une seconde partie centrée sur l'étude de l'expression de différents mélanges de végétalisation par une approche purement expérimentale en écologie. Dans cette deuxième partie, nous espérons que l'approche expérimentale que nous avons choisie apportera des résultats directement utiles d'un point de vue opérationnel.

### *Partie 1*

Comme nous avons pu le voir en introduction, la place du végétal dans les projets d'aménagement a évolué avec le temps, et avec elle les pratiques de végétalisation. Pour comprendre les mécanismes à l'origine de ces évolutions, nous chercherons dans un premier temps à identifier les moteurs sous-jacents à l'intégration croissante des questions de biodiversité aux grands projets d'aménagement. Prendre en compte la biodiversité implique d'en comprendre les mécanismes et les enjeux, ce qui n'est pas une évidence pour des acteurs issus de domaines d'activités historiquement extérieurs à ces préoccupations. Nous tenterons donc, dans un premier chapitre, d'identifier les choix organisationnels des acteurs de l'aménagement – concepteurs, constructeurs et gestionnaires d'infrastructures – leur permettant de mobiliser les connaissances et compétences écologiques aujourd'hui devenues incontournables pour la bonne réalisation des projets. Ces questions, centrées sur les aménageurs et leur appropriation des savoirs écologiques, feront l'objet du premier chapitre de la thèse.



Dans un second chapitre, nous resserrerons notre intérêt sur l'objet de cette étude : la végétalisation. Nous nous attellerons d'abord à détailler l'ensemble de la chaîne décisionnelle permettant d'aboutir à l'action de végétaliser *in situ*, en présentant les acteurs impliqués à chaque étape du processus – incluant la conception, la mise en œuvre et la gestion des surfaces végétalisées. Comme précédemment évoqué, les projets d'aménagements doivent répondre à un ensemble d'enjeux et de contraintes ayant évolué avec le temps. Nous dresserons donc un historique de l'évolution des attentes et pratiques des aménageurs vis-à-vis des modalités de végétalisation, puis présenterons l'ensemble des critères actuels, adaptés aux contextes et enjeux propres à chaque projet. La nécessité croissante de prise en compte de la biodiversité dans la conception des projets, y compris dans le cadre des opérations de végétalisation, a conduit à une demande grandissante en semences sauvages et locales, et un engouement de la part des porteurs de projet pour cette nouvelle filière française de production, dont la marque Végétal local constitue le fer de lance. Nous tenterons d'identifier les conséquences de cette demande sur les producteurs et les gestionnaires de la filière, ainsi que les contraintes et les pressions pesant sur les prescripteurs et les aménageurs en matière économiques et sur l'évolution des pratiques.

## Partie 2

Comme évoqué précédemment, le choix des végétaux doit s'adapter aux enjeux et contraintes multiples de chaque projet – limitations budgétaires, ambition environnementale, impératifs techniques et réglementaires, adéquation avec les conditions de site *etc.* La poursuite d'objectifs de végétalisation multiples, comme l'établissement d'un couvert rapide couplé à la création de communautés riches reflétant la flore indigène des milieux environnants, peut conduire à des difficultés dans le choix des végétaux [Crosaz, 2002]. Dans cette seconde partie, nous tenterons d'évaluer aux moyens de plusieurs dispositifs expérimentaux *in* et *ex situ* la capacité des différents mélanges de végétalisation, variant par leur richesse spécifique et leur origine géographique (local vs non local au sens de Végétal local), à répondre à ces objectifs multiples. Le troisième chapitre de cette thèse sera ainsi consacré à évaluer le potentiel de différents mélanges de végétalisation pour enrayer les mécanismes d'érosion, qui constitue un impératif technique majeur des constructeurs et gestionnaires, particulièrement lorsqu'il s'agit de stabiliser des sols en pente – *e.g.* talus autoroutiers, pistes de ski. Le quatrième et dernier chapitre sera consacré aux questions de biodiversité. Dans un premier temps, nous évaluerons *in situ* le potentiel de contribution des mêmes mélanges testés précédemment à la diversité des cortèges floristiques sur talus autoroutiers. Enfin, nous évaluerons le potentiel compétitif de ces mélanges face à une espèce exotique envahissante, afin d'envisager des méthodes de lutte non-mécanique contre son expansion en milieu vulnérable.



# **PARTIE 1 : ACTEURS, FILIERES ET PRATIQUES**

## **DE VEGETALISATION : HISTOIRE ET ORGANISATION**

Dans cette première partie, nous chercherons à comprendre l'évolution des pratiques de végétalisation dans le cadre des grands projets d'aménagement, et plus particulièrement les grandes infrastructures linéaires de transport. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur la synthèse et l'analyse de données qualitatives issues d'entretiens semi-directifs [Pin, 2023] menés auprès de quatre groupes d'acteurs : (i) des entreprises de l'aménagement et de la gestion de grandes infrastructures, (ii) des prescripteurs impliqués dans la réalisation des projets, (iii) des producteurs de semences herbacées et (iv) des membres représentants ou gestionnaires de la marque Végétal local. La définition des approches thématiques et la conception des questionnaires ont fait l'objet d'une collaboration scientifique avec Armelle Mazé, chercheuse en économie à l'INRAe. Ensemble, nous avons encadré un stagiaire de seconde année de Master en économie écologique de l'Université de Toulouse, John Barckley Gabriel, qui a réalisé l'ensemble des entretiens auprès des acteurs. Les guides d'entretien conçus par nous trois et nécessaires à la réalisation de cette enquête sont propres à chaque groupe d'acteurs, et sont à retrouver en Annexes 1 à 4.

Au sein du premier chapitre, nous chercherons d'abord à identifier le niveau de prise en compte de l'environnement au sein des projets d'aménagement et les moteurs de son évolution. Nous décrirons ensuite les stratégies de mobilisation de la compétence en écologie adoptées par les aménageurs afin de faire évoluer leurs pratiques en environnement et sur la biodiversité au sein des projets. L'exploration de ces thématiques témoigne d'une approche d'économie organisationnelle, basée notamment sur les travaux de Ronald Coase et Olivier Williamson sur la théorie des coûts de transaction. Cette littérature a inspiré nos travaux, mais nous ne procéderons toutefois pas à une analyse formelle des résultats d'enquête au regard de ces théories. Pour ce chapitre, l'entreprise Vinci constituera notre principal cas d'étude. L'entreprise a contribué à la réalisation de ce projet de recherche, par la mise à disposition de terrains expérimentaux sur le projet du Contournement Ouest de Strasbourg (COS), et la mobilisation de personnels pour la réalisation et le suivi de cette étude. Afin de mettre en perspective les résultats obtenus, nous nous sommes également intéressés à EDF, une autre entreprise de l'aménagement et de la gestion de grandes infrastructures.

Au sein du second chapitre nous décrirons l'évolution des pratiques de végétalisation dans le cadre de l'aménagement du territoire, à travers une approche historique permettant de croiser les regards des différents acteurs interrogés. Nous exposerons ensuite l'ensemble des critères, attentes, et modalités actuelles à considérer pour la réalisation d'opérations de végétalisation au moyen de semences herbacées. Dans ce cadre, nous décrirons le développement de la filière de production de végétaux favorables à la biodiversité incarnée par la marque Végétal local. Enfin, nous explorerons les enjeux et perspectives d'évolution de cette filière et des pratiques de végétalisation au sein des grands projets d'aménagement.



Illustration 2 : Zone compensatoire – Contournement Ouest de Strasbourg – Crédits : Anaël Mayeur

**Chapitre 1. GRAND PROJETS D'INFRASTRUCTURES,  
ENVIRONNEMENT ET BIODIVERSITE : L'EXEMPLE DE  
VINCI ET COMPARAISON AVEC D'AUTRES ACTEURS**

## 1.1 PRESENTATION DES ACTEURS CONSIDERES

### *Le groupe Vinci : structure globale et rôle des interrogés*

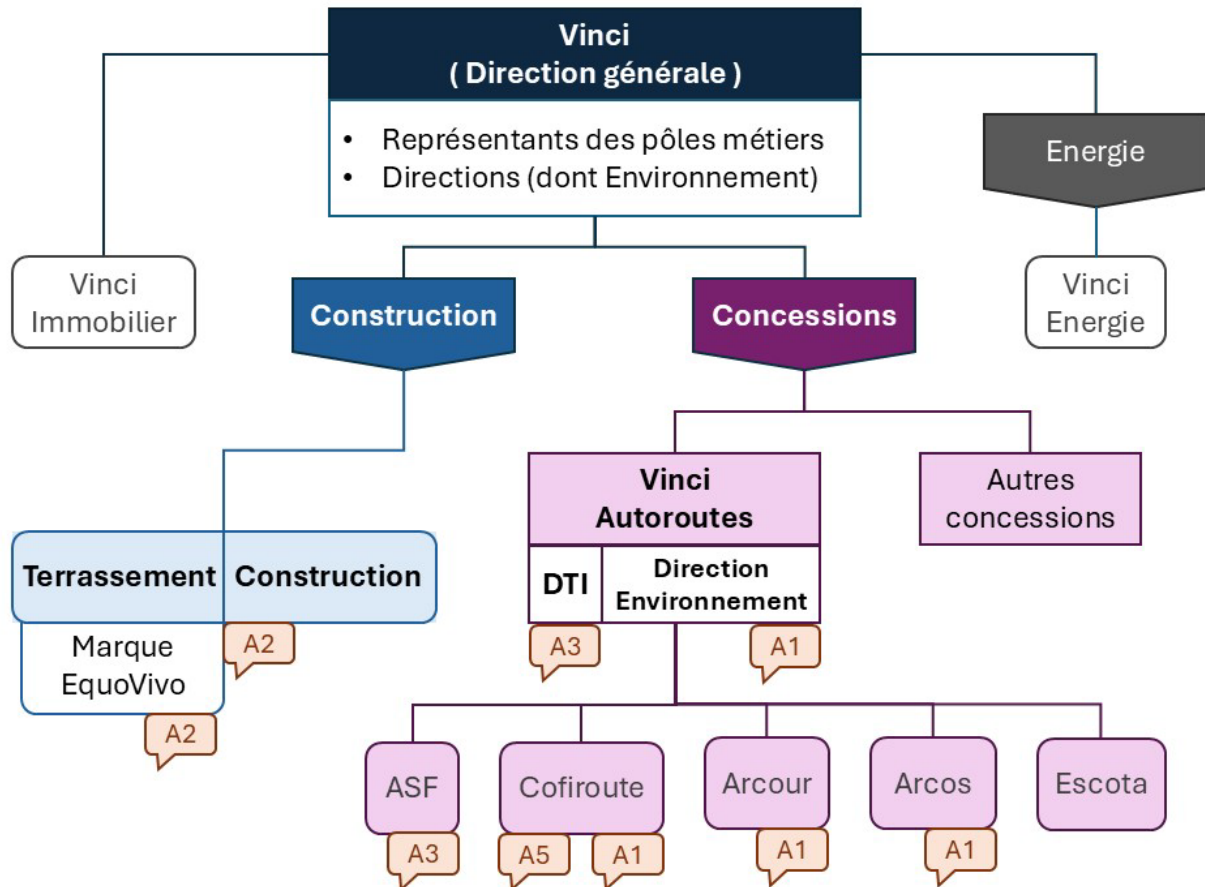


Figure 1: Organigramme des structures du groupe Vinci concernées par notre étude. Les phylactères représentent les personnes interrogées et sont placées sous leur(s) structure(s) d’appartenance.

Nous nous intéresserons à deux des branches majeures du groupe Vinci (voir Figure 1 pour l’organisation simplifiée du groupe et le positionnement des acteurs interrogés). La branche Concessions est dédiée au fonctionnement et au maintien des infrastructures dans le temps, comprenant les aéroports, chemins de fer, stades et autoroutes sur le territoire national et à l’étranger. Nous nous intéressons particulièrement à Vinci Autoroutes, comprenant cinq entreprises de concession autoroutière : ASF, COFIROUTE, ESCOTA, ARCOUR et ARCOS. Cette dernière assure la concession du tracé autoroutier de l’A355 sur lequel est implanté un des dispositifs expérimentaux de notre étude (voir chapitres 3 et 4). La branche Construction inclut les filiales de construction et de terrassement, et détient la marque EquoVivo, qui réalise notamment des opérations de génie écologique dans le cadre de chantiers de restauration écologique. Cette branche comprend des entreprises intervenant dans les opérations de construction de nouveaux ouvrages, réseaux et infrastructures.

***Autres acteurs considérés***

Les entreprises du groupe Vinci constituent notre cas d’étude principal, mais nous nous intéresserons également aux membres et projets d’autres structures afin d’avoir une vision d’ensemble des différents types de projets et des structures impliquées dans l’aménagement du territoire et réalisant des opérations de végétalisation. C’est notamment le cas d’Electricité De France (EDF), et plus particulièrement de sa branche hydraulique, en charge de la conception, construction, exploitation et maintenance d’aménagements hydroélectriques. Des mentions seront faites de projets menés par d’autres grandes entreprises ou établissements publics nationaux comme Voies Navigables de France (VNF) ou la Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF), ainsi que par diverses collectivités (e.g. Conseils départementaux, municipalités) et par de plus petites entreprises assurant des aménagements ou de la gestion d’espaces sur le territoire (e.g. gestionnaires de domaines skiables).



## **1.2 STRATEGIES ET PRISE EN COMPTE DE L’ENVIRONNEMENT ET DE LA BIODIVERSITE PAR LES AMENAGEURS**

*« (...) quand j’ai commencé en 91, on ne parlait pratiquement pas d’environnement, il n’y avait pas grand-chose. (...) autant la partie environnement et biodiversité étaient les parents pauvres des chantiers il y a 30 ans, autant aujourd’hui c’est presque devenu la partie majoritaire » [A2, 2023 dans le cadre de son activité au sein d’un bureau d’études intervenant dans l’aménagement d’infrastructures linéaires]*

Plusieurs acteurs interrogés évoquent leur entrée au sein du groupe Vinci ou de structures partenaires dans les années 80’ – 90’. A cette époque, il n’existait pas de politique d’entreprise relative à l’environnement. Les actions en faveur de l’environnement et la biodiversité n’étaient pas valorisées, et très hétérogènes en fonction des équipes et des projets. Aucun dispositif de capitalisation de retours d’expérience n’était en place. Le groupe Vinci dispose aujourd’hui d’une politique générale relative à l’environnement et la biodiversité. Celle-ci donne les grandes orientations du groupe avec des engagements clairs qui servent à aligner le groupe avec la dynamique globale des entreprises et fournissent des arguments pour gagner la confiance des investisseurs et des porteurs de projet [A2, 2023; A5, 2023]. Certains grands marqueurs et facteurs de cette évolution sont à retrouver en Figure 2.

### **1.2.1 Facteurs externes d’évolution des connaissances et compétences en environnement**

#### **1.2.1.1 Contraintes réglementaires**

Comme toutes les entreprises de l’aménagement et de la gestion de territoires, Vinci a été soumise aux contraintes grandissantes issues de l’évolution de la réglementation en matière d’environnement. L’implication de la France à un niveau international, depuis la Convention sur la Diversité Biologique en 1992 en passant par les Accords de Nagoya en 2010, a contribué à définir un nouveau cap vis-à-vis des engagements en faveur de la biodiversité. A l’échelle nationale, la loi relative à la protection de la nature de 1976 et la loi sur la protection et la mise en valeur des paysages de 1993 ont cédé la place en 2016 à la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages [Légifrance, 2016; Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2017]. Cette loi a notamment conduit à la création de l’Agence Française pour la Biodiversité (AFB), actuel Office Français de la Biodiversité (OFB), au renforcement du Code de l’Environnement, à la définition de l’objectif « zéro perte nette de biodiversité », à l’instauration du principe « pollueur payeur » dans la loi, ainsi qu’à des exigences supplémentaires quant à l’application de la séquence Eviter Réduire, Compenser (ERC) [Ministère de l’Europe et des Affaires étrangères, 2020]. L’évolution de la réglementation a induit des contraintes supplémentaires fortes pour les aménageurs, les poussant à une meilleure prise en compte des aspects environnementaux lors de l’établissement de leurs projets. Ces grands projets ont un impact significatif sur les milieux qu’ils traversent, et ne sont autorisés que du fait de leur statut reconnu d’utilité publique.

On observe que Vinci ou EDF tentent de s’aligner sur les ambitions de l’Etat sur plusieurs aspects du volet environnemental, avec la mise en place d’actions à des échéances définies. Le

Plan Ecophyto lancé en 2018 par la France [Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2022] suite aux obligations fixées par la directive européenne 2009/128/CE, ainsi que l' « objectif zéro phyto » porté à l'échelle des communes ont certainement eu un rôle dans les engagements pris par Vinci Autoroutes concernant la réduction de l'usage de produits phytosanitaires et l'amplification de la gestion différenciée de ses espaces verts. De même la Stratégie nationale biodiversité portée par l'Etat depuis 2004 et reconduite deux fois avec un horizon actuel pour 2030, s'est traduite par la Stratégie 2030 (cf 1.2.2.1) de Vinci et déclinée au sein de ses filiales.

D'autres dispositifs normatifs, législatifs ou réglementaires pèsent sur les entreprises, mais aussi les associations et collectivités, parmi lesquels on peut citer : les normes ISO 14000, la Loi sur l'Eau et la protection de Milieux Aquatiques particulièrement prégnante chez EDF, le Code de l'Environnement [Légifrance, 2024] et son chapitre sur la préservation et la surveillance du patrimoine biologique, les obligations de débroussaillage pour prévenir les départs de feu, les arrêtés préfectoraux ou demandes des chambres d'agriculture pour la gestion des espèces nuisibles aux cultures – comme le chardon (*Cirsium arvense*) sur le Contournement Ouest de Strasbourg (COS), les obligations réglementaires ou demandes particulières liées aux projets concernant la gestion des espèces exotiques envahissantes (EEE). Pour faire face à cet empilement de contraintes, les entreprises doivent mettre en place des services et équipes dédiés (cf 1.2.2.2). Dans ce contexte, les opérations et modalités de végétalisation sont relativement exemptes d'obligations hors des zones compensatoires, et plutôt régies par des demandes spécifiques de la part des porteurs de projets.

### **1.2.1.2 Demandes et pressions extérieures : image des aménageurs et acceptabilité des projets**

Au-delà des contraintes réglementaires, il existe une pression certaine de la part de la société civile pesant sur les entreprises chargées des grands aménagements. Cette pression peut venir d'associations de protection de la nature ou de citoyens, s'exprimant lors de la phase de consultation pour dénoncer la non-conformité du dossier ou simplement leur désaccord face à la réalisation des projets. Cette exigence, qui peut engendrer un processus de mise en conformité des projets ou non, est en tous cas un moteur d'évolution des entreprises sur le volet environnemental.

*« On entend bien qu'il y a également des demandes extérieures et notamment de la part de nos opposants, des associations... » « On essaye vraiment d'être exemplaire sur tout ce qu'on peut nous demander, notamment ces fameuses mesures d'évitement, de réduction et de compensation. On met tous les moyens possibles là-dessus, on met le paquet. Ça n'empêche que l'autoroute est quand même construite et qu'elle détruit des milieux. Évidemment, il faut savoir ce qu'on veut, il y a une déclaration d'utilité publique qui est là. Donc à ce titre-là on est autorisé à construire quand même » [A3, 2023]*

La diffusion de ces avis contradictoires par les médias ou certaines personnalités peuvent, au-delà de perturber le déroulé des travaux, nuire à l'image d'une entreprise. Le projet du COS par exemple, a reçu de nombreux avis défavorables rendus par le Conseil National pour la Protection de la Nature (CNP), et une saisie du Tribunal administratif de Strasbourg par Alsace

Nature, branche locale de France Nature Environnement (FNE), pour causes d'irrégularités au sein de l'étude d'impact et des dossiers de demande de dérogation à l'interdiction de destruction d'espèces protégées. Ce projet a finalement été validé en 2023 du point de vue de la conformité du dossier, notamment suite aux actions complémentaires proposées la société Arcos et en raison de l'« intérêt public majeur » avéré du projet [Tribunal administratif de Strasbourg, 2023]. En 2024, l'association « GCO Non Merci » de lutte contre le projet du COS a fêté ses 20 ans et continue à organiser des manifestations contre sa construction, relayées par les médias. Cet exemple démontre l'enjeu existant pour les entreprises en matière d'image, et justifie les efforts réalisés par les entreprises pour améliorer l'acceptabilité des projets par le public.

*« Je pense qu'on a un enjeu d'image en toute honnêteté, surtout sur l'autoroute, (...) puisque l'autoroute, c'est un grand ruban noir avec des gens qui utilisent du diesel et de la pollution dans tous les sens, donc effectivement, ça c'est (...) l'impact sur le changement du climat. » [A5, 2023]*

Les aménageurs ont donc un intérêt particulier à communiquer et valoriser leurs actions en faveur de la biodiversité pour tenter de changer l'opinion publique à leur égard. Cela passe par de l'affichage dans le cadre des projets, mais également en dehors de ces derniers, sur les aires de repos voyageurs, sur les réseaux sociaux, afin de faire connaître leurs métiers et favoriser l'acceptabilité des projets par les riverains et élus des régions environnantes.

*« Moi j'ai fait énormément de petites vidéos sur les réseaux sociaux (...) par exemple sur les passages à faune. (...) Et sur ces sujets-là on essaye de faire un peu de pédagogie autour de notre métier qui est méconnu, pour montrer tous les efforts que l'on fait parce qu'on se fait souvent (critiquer) ; vous comprenez bien, Vinci Autoroutes qui parle de biodiversité, on n'est pas crédible aux yeux du grand public, on est les grands méchants loups, on casse tout, on ne répare rien. C'est compliqué, ça, ce n'est pas vrai » [A3, 2023]*

Lors de la conception et la mise en œuvre des projets d'aménagement, les aménageurs sont incités ou sollicités par des riverains, des élus locaux, associations naturalistes, organismes de gestion du patrimoine naturel ou acteurs du monde scientifique pour la mise en place d'actions ponctuelles favorables à la biodiversité ou de dispositifs expérimentaux.

*« (On reçoit aussi) des sollicitations extérieures des partenaires, des bureaux d'études ou des associations qui viennent nous voir et qui, (...) sur un objet en commun nous disent : 'on a un terrain, vous avez une infrastructure, on aimerait bien tester quelque chose, on aimerait bien aller sur cet engagement-là, est-ce que vous seriez intéressés ? Est-ce qu'on pourrait faire ensemble ?' Donc à ce moment-là c'est bien une co-construction d'un engagement ou d'une innovation que l'on fait en partenariat avec quelqu'un pour essayer de faire quelque chose de nouveau allant dans le sens de la biodiversité. »*

Cette co-construction a le potentiel de mobiliser des moyens et des sites pour la réalisation de ces actions, qui n'auraient peut-être pas été réalisables sans la participation de toutes les parties, mais également d'impliquer les aménageurs dans des démarches éloignées de leur préoccupations et pratiques habituelles. En cela, elles constituent une ouverture à des

réflexions nouvelles sur l’environnement et un moteur pour une potentielle intégration d’actions futures au sein des chantiers.

### **1.2.1.3 Evolution des mentalités**

La prise de conscience environnementale est en rapide évolution à l’échelle mondiale, avec une préoccupation majeure des personnes pour les changements climatiques et leurs effets, ayant pour conséquences des changements d’habitudes de vie et de consommation [notre-environnement, 2024a]. On observe toutefois un retard dans la prise de conscience des sujets liés à la biodiversité, expliqué par la déconnexion physique des personnes et de la nature, mais également un manque de connaissances sur leur dépendance à cette nature [Kerle et al., 2021]. Toutefois, il existe une mobilisation grandissante des personnes en ligne, dans les médias grand-public ainsi que sous la forme de manifestations citoyennes autour de ces sujets [Kerle et al., 2021]. En France, l’Observatoire National de la Biodiversité (ONB) a mis à disposition du public depuis 2013 des informations relatives à l’évolution de la biodiversité sur le territoire national, aux pressions qui demeurent croissantes sur cette dernière ainsi qu’aux réponses organisationnelles et sociétales apportées [notre-environnement, 2024b]. La prise en compte de la biodiversité apparaît progressive et en 2021, l’ONB montrait que 29% des français considéraient la disparition d’espèces animales ou végétales comme le second facteur de dégradation environnementale le plus préoccupant après le dérèglement climatique [ONB, 2022].

*« On a aussi un contexte qui est de la prise de conscience individuelle et personnelle. Avant on mettait des arbres pour mettre des arbres, maintenant on fait des actions de renaturation. Avant ils étaient tout contents d’avoir déversé des litres de phyto et aujourd’hui ils ne le font plus chez eux, et considèrent que l’entreprise ne peut plus le faire non plus. Voilà ce qui a changé, il y a la prise de conscience individuelle qui a été rattrapée par une vraie politique de l’entreprise en environnement. » [A5, 2023]*

Les acteurs interrogés nous ont fait part à l’échelle individuelle mais également de l’entreprise d’une nécessaire prise en considération de l’environnement et de la biodiversité s’accompagnant d’un besoin d’évolution des pratiques et des manières de travailler. Aussi, certains réalisent que cette nécessité s’inscrit dans un processus continu d’évolution, d’adaptation et d’innovation : les avancées de la science, la prise de conscience du public et les exigences des institutions sont amenées à progresser [A1, 2023]. D’autres considèrent que les exigences actuelles sont d’ores et déjà très fortes, rendant compliquée la mise en œuvre de nouveaux aménagements, et que l’évolution de l’intégration de nouvelles contraintes environnementales commence à ralentir. Néanmoins, il nous semble évident qu’une montée en compétences interne est nécessaire afin d’intégrer ces enjeux grandissants, mais aussi que les entreprises soient force de proposition afin d’anticiper les besoins à venir.

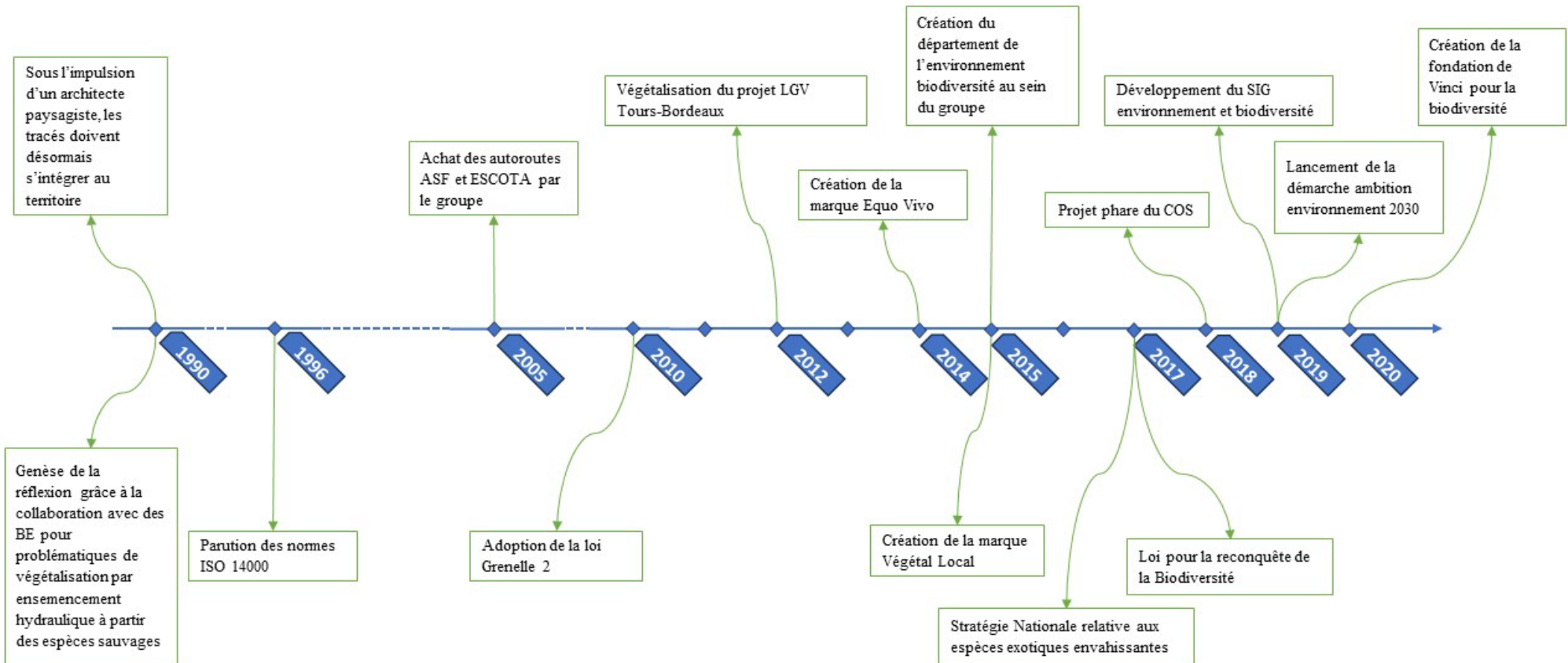


Figure 2: Frise chronologique des marqueurs internes (en haut de la ligne de temps) et externes (en bas de la ligne de temps) de l'évolution de la politique de Vinci sur les questions relatives à l'environnement et la biodiversité.

## 1.2.2 Facteurs d'évolution interne

### 1.2.2.1 *Stratégie environnement et biodiversité*

Vinci a instauré en 2019 une stratégie à l'échelle du groupe intitulée « Ambition Environnement 2030 », comprenant les volets suivants : (1) Agir pour le climat, (2) Optimiser les ressources et (3) Préserver les milieux naturels [Vinci, 2024]. A l'échelle de Vinci Autoroutes, les volets sont affichés comme suit : (1) La lutte contre le changement climatique, notamment par la réduction des émissions de gaz à effet de serre (2) L'économie circulaire et (3) Les milieux naturels. Il est nécessaire de s'intéresser plus précisément aux résultats marquants affichés par l'entreprise afin de distinguer les actions concrètes qui sont mise en œuvre.

Concernant les milieux naturels, Vinci Autoroutes affiche comme grand objectif la « renaturation du domaine autoroutier » ou encore la « préservation des milieux naturels », à travers plusieurs actions comme la réduction de la consommation en eau des équipements, la « gestion écologiquement responsable » des espaces verts à travers la réduction drastique de l'usage de produits phytosanitaires (-95% de 2009 à 2021), ou encore la mise en place de programmes de plantations d'arbres, appelés « régénérations », en collaboration avec des acteurs tels que l'Office National des Forêts (ONF). Dans sa communication, le groupe souligne la part grandissante des moyens financier « investis » pour l'environnement au sein de ses projets autoroutiers, avec notamment une part record de 25% sur le budget total de l'A355 (=COS, budget total estimé à près de 500 millions d'euros) [Vinci, 2021]. Pour la réalisation des opérations en lien avec la restauration de milieux et la mise en place des zones compensatoires, Vinci s'appuie sur des compétences internes dans le domaine de la restauration écologique, mais aussi et surtout sur l'expertise naturaliste et en écologie de partenaires scientifiques et associatifs.

En aparté, il ressort de nos entretiens et des communications de Vinci en ligne que les objectifs et les actions spécifiquement centrées sur la préservation ou la restauration d'éléments de nature sont très faune-centrés. Vinci Autoroutes notamment se positionne comme pionnière et leader dans l'innovation et la mise en place de passages à faune (« écoponts », « écoducs », « chiroduc »), avec une valorisation particulière de la collaboration établie avec l'OFB, les Fédérations de chasse ou encore la LPO pour le suivi de l'efficacité et le partage de données de faune. Les seules réalisations liées au végétal concernent la gestion de parcelles boisées en collaboration avec l'ONF ou la prolongation de haies sur les délaissés autoroutiers. Cela reflète parfaitement le concept de « cécité botanique » expliqué en partie par un biais de perception des personnes à l'égard des plantes en raison notamment de facteurs éducationnels et culturels. Balding and Williams [2016] ont montré qu'une meilleure connaissance des espèces conduit à réduire ce biais de perception de la végétation comme un ensemble homogène et statique, et peut amener à augmenter la considération et les efforts de conservation pour les espèces végétales, y compris herbacées.

De son côté EDF déroule également des objectifs environnementaux à diverses échéances. Certains objectifs recoupent ceux de Vinci comme la réduction de l'empreinte carbone des entreprises, mais les engagements et actions en faveur de la biodiversité semblent plus divers et précisément définis. EDF fait partie des Entreprises Engagées pour la Nature, initiative portée par l'OFB, en affichant notamment des engagements relatifs à la « réduction

de la contribution aux facteurs de pressions IPBES » ou le « renforcement et partage des connaissances scientifiques ». La déclinaison de ses engagements pour la biodiversité au sein de son Document d'enregistrement universel [EDF, 2022] est bien plus vaste que celle présentée par Vinci [Vinci, 2023]. Une large section est consacrée aux « performances extra-financières », dont les actions environnementales font partie. Ses engagements volontaires sont déclinés en plusieurs axes et actions spécifiques dans le cadre de l'initiative « act4nature », comme la sensibilisation de son personnel à la biodiversité (axe « Transformer nos processus, notre organisation, nos compétences »), poursuivre le programme de recherche sur la réduction des impacts sur la biodiversité des ouvrages de production (axe « Développer la connaissance et la partager »), doter 100% des sites de production de plans de gestion de la végétation (axe « Eviter et réduire les pressions et impacts sur la biodiversité »), ou encore plus spécifiquement contribuer à l'efficacité des restaurations et végétalisations en utilisant des végétaux d'origine locale (axe « Préserver, restaurer, régénérer ») [EDF, 2023]. Ce dernier point est particulièrement intéressant dans le cadre de notre étude et témoigne de connaissances et approches plus poussées chez certaines entreprises comme EDF sur les enjeux de biodiversité.

Par cette comparaison, nous ne cherchons pas à mettre en opposition, mais plutôt à comprendre les facteurs et niveaux d'intégration des enjeux de biodiversité au sein des groupes, en fonction de leur culture d'entreprise, leurs implantations territoriales et domaines d'activité. Par exemple, un facteur explicatif de la prégnance de ces enjeux chez EDF est l'implantation d'environ 80% de ses infrastructures en zones naturelles protégées. On imagine alors que la nécessité de montée en compétence sur ces enjeux, et de recherche d'une image d'excellence dans ces domaines ont poussé l'entreprise à faire apparaître la biodiversité comme un enjeu de premier plan au sein de sa stratégie. Cette stratégie s'illustre par les éléments abordés plus tard sur l'internalisation des compétences en écologie et les choix réalisés dans le cadre des opérations de végétalisation.

### **1.2.2.2 Organisation interne et circulation de l'information**

#### ***Le cas de Vinci***

La direction générale du groupe dicte l'orientation des stratégies globales du groupe Vinci en matière d'environnement. Son PDG a signé en 2020 les lignes directrices environnementales visant à donner le cadre général de référence du groupe en matière d'environnement [Vinci, 2020]. L'environnement est aujourd'hui représenté au sein même du comité exécutif du groupe, offrant l'opportunité de négocier avec les décideurs afin d'orienter les actions et l'organisation de l'entreprise pour une meilleure prise en compte de la biodiversité. Cette structuration se reflète au sein des différentes entités sous-jacentes du groupe. Vinci Autoroutes par exemple, faisant partie de la branche concessionnaire, dispose elle-même d'une direction de l'environnement, donnant les lignes directrices en la matière aux différentes filiales : ASF, Cofiroute, Escota, Arcour et Arcos. Au sein de chacune de ces sociétés sont présents des référents environnement, qui pilotent l'ensemble de la mise en place des mesures dictées par les instances supérieures aux directeurs opérationnels. [A1, 2023]

La présence de directeurs et référents environnement à chaque niveau de la chaîne permet d'assurer un flux constant d'information, à la fois descendante afin d'orienter les opérateurs en fonction des décisions exécutives, mais également montante afin de faire parvenir les résultats

et retours d'expérience aux décideurs. Le rôle et le périmètre de ces référents varie en fonction de la structure et des enjeux :

*« Maintenant il y a des référents environnement qui travaillent à différents niveaux parce qu'en environnement, on peut faire beaucoup de choses. Il y a des gens qui font du 'reporting', ce qui nous est demandé de plus en plus. Il y a des gens qui sont plutôt auprès de l'exploitant pour surveiller les engagements au sein des normes ISO 14000 notamment. Il y a aussi des gens qui, comme c'est le cas pour nous, conseillent plutôt les collègues au quotidien dans la gestion des dépendances vertes sur les incendies, sur les plantes invasives, sur les chenilles processionnaires... Voilà donc ça c'est mon collègue (...) qui s'en occupe plus particulièrement, qui lui est vraiment dédié au conseil, à l'assistance auprès de l'exploitant. Et moi je suis plus sur les questions liées aux projets, et notamment la sécurisation réglementaire des projets, (...) prise en compte de la Loi sur l'eau, des espèces protégées, du débroussaillage... » [A3, 2023]*

Il existe donc des postes de référents environnement pour beaucoup de filiales de Vinci, y compris les autoroutes, l'énergie, le bâtiment, les stades et les aéroports. Les échanges entre les référents des différents secteurs d'activité sont limités [A1, 2023], ce que l'on peut notamment expliquer par des enjeux réglementaires, techniques et territoriaux différents entre types d'infrastructures variés. Si les connaissances et les techniques ne sont pas mobilisables entre domaines d'activité, on comprend le manque d'intérêt à échanger sur ces sujets. La taille du groupe et les nombreuses ramifications existantes en son sein diluent certainement l'information, et compliquent le partage des retours d'expérience sur l'ensemble des actions menées. La part de l'environnement au sein de l'activité des personnels varie, et n'est qu'une surcouche venue s'ajouter, récemment de surcroît, aux autres responsabilités propres à chaque poste. Ce relatif éloignement peut avoir un impact sur le partage des connaissances, y compris celles liées à la végétalisation, dont les principes et savoirs fondamentaux sont pourtant transposables dans une certaine mesure entre différents types de projets et d'implantations.

Des structures existent toutefois afin d'assurer le pilotage, la mise en commun et la circulation des connaissances entre différentes entités d'échelons inférieurs. Au niveau de Vinci Autoroutes, il existe une Direction Technique de l'Infrastructure (DTI), rendant des avis en tant qu'experte de l'environnement sur l'ensemble des entreprises concessionnaires [A3, 2023]. Son rôle est notamment de coordonner les actions de terrain pour la gestion des « dépendances vertes », mais également d'assurer un lien entre les entités dont elle a la charge et l'extérieur, s'inscrivant ainsi dans la démarche de norme ISO 14001. Pour exemple, le pôle « expertise et biodiversité » de la DTI assure des liens bidirectionnels avec le Centre de ressources Trame Verte et Bleue, afin d'actualiser la connaissance des équipes en interne, mais aussi de partager des données et retours d'expérience sur l'effectivité des passages à faune.

Il existe un groupe d'échange transversal visant à faire circuler les connaissances sur les enjeux et actions en lien avec la biodiversité : la coordination biodiversité. La participation des agents est basée sur le volontariat, bien qu'elle puisse être poussée par les directions. Il apparaît que les opérateurs des concessions sont moins enclins à participer que ceux de la construction [A3, 2023]. Cela s'explique par la latitude réduite des concessionnaires gestionnaires de sites en termes budgétaires, ainsi que par l'aspect routinier et de leurs activités, inspirées par des



pratiques existantes et souvent plus concentrées sur le maintien des infrastructures et la sécurité des usagers. Les constructeurs au contraire, interviennent dans des projets s'adaptant constamment à de nouvelles exigences des commanditaires et à l'évolution de la réglementation. Ainsi, une part importante et grandissante des efforts est allouée aux aspects de biodiversité et, malgré des limites budgétaires, une certaine part de liberté plus importante est laissée aux propositions volontaires de la part des personnes ou structures motrices [A2, 2023; A3, 2023].

### ***Le cas d'EDF***

Nous disposons d'informations moins détaillées concernant EDF, mais nos entretiens nous ont permis de comprendre que l'application de la politique relative à l'environnement s'intègre de manière plus globale dans la stratégie de Responsabilité sociale des entreprises (RSE). En association avec des structures externes (cabinets de conseil, associations, ONG...), les membres du comité exécutif ainsi que les managers des principales filiales du groupes contribuent à définir l'orientation des actions en environnement et les indicateurs extra-financiers associés permettant de suivre l'évolution des engagements [EDF, 2022]. De là, un réseau de référents techniques et des fonctions centrales des différents métiers relaye l'information sur l'implémentation de la politique environnementale à l'ensemble des services concernés. En parallèle, un réseau de référents biodiversité au sein des pôles d'ingénierie se rassemble plusieurs fois par an afin de faire un bilan des initiatives et retours d'expériences sur cette thématique, de manière plus centrée sur les aspects techniques. On observe que la mise en commun de manière transversale des connaissances sur la biodiversité se fait de manière plus large entre les différents métiers qu'au sein de Vinci. Enfin, au sein de la filiale hydroélectricité plus particulièrement, un réseau permet de regrouper tous les référents régionaux en charge de la biodiversité afin d'échanger. Les référents à ce niveau s'occupent notamment du suivi des dossiers afin de s'assurer de la conformité réglementaire et de l'implémentation des actions volontaires dans le cadre des projets d'aménagements en cours, mais également sur les travaux et la gestion d'installations existantes [A4, 2023]. On constate donc que l'entreprise nomme des référents en environnement couvrant des thématiques très larges comme chez Vinci, mais aussi des référents spécialement dédiés aux problématiques de biodiversité. Cela implique d'avoir des profils particulièrement qualifiés sur cette thématique comme montré en 1.3.1.

### ***1.2.2.3 Développement d'outils***

De nombreuses connaissances sont nécessaires à la mise en œuvre d'opérations de conservation ou de restauration de la nature. Outre la montée en compétence des personnes intégrées aux services, les entreprises doivent développer des outils capables de rendre possible ou faciliter la mise en œuvre et le suivi des opérations à visée environnementale sur le terrain. La création en interne à Vinci d'un système d'information géographique (SIG) permet de conduire les opérations menées sur le terrain, en indiquant par exemple les zones devant faire l'objet d'une attention ou de pratiques particulières. Par exemple, dans des zones présentant un enjeu écologique (e.g. zones de nidification, présence de milieux ou d'espèces sensibles), les personnels ou prestataires peuvent se référer à la cartographie afin de réaliser des fauches manuelles localisées. Cet outil sert également pour le signalement de nouvelles

espèces protégées ou pour les changements de zonage dans les zones à gérer différemment. [A5, 2023]

#### **1.2.2.4 Initiatives, structures et personnes motrices**

L'évolution de la prise de conscience des enjeux environnementaux et de biodiversité et la mise en place d'actions qui leurs sont favorables dépendent également dans une certaine mesure des convictions portées par les personnes internes aux entreprises. L'impact qu'ont ces personnes dépend de leur niveau de responsabilité et leur place dans la hiérarchie de l'entreprise, mais également de leur capacité à échanger avec les décideurs, à convaincre du bien-fondé de leur démarche et à faire remonter les résultats des actions mises en œuvre. Il existe évidemment des freins à ces initiatives, notamment lorsqu'elles engendrent des coûts supplémentaires que les entreprises ne souhaitent pas supporter, ou qu'elles impliquent des contraintes techniques difficiles à mettre en œuvre, ou encore qu'elles mobilisent des compétences non maîtrisées par les maîtres d'œuvre et/ou les prestataires.

Parfois, ces initiatives émanent de personnes occupant des postes à responsabilité poussant leurs équipes à dépasser les seuls engagements contractuels et réglementaires. Pour exemple, un ancien directeur de Vinci Construction Terrassement (VCT) exigeait la mise en place d'actions volontaires sur l'ensemble des chantiers sur lesquels ses équipes étaient amenées à intervenir.

*« Et cette notion d'action volontaire je trouvais que c'était extrêmement important parce que ça permettait à quelqu'un qui arrive sur un chantier de se poser la question : qu'est-ce que je peux faire pour améliorer encore mon chantier afin qu'il soit plus vertueux ? » [A2, 2023]*

Bien que fragile, on voit ici l'importance de cette demande, qui crée la réflexion pour aller vers une meilleure prise en compte de l'environnement, et pousse à la remise en question des pratiques de routine des métiers. Plusieurs exemples simples de ces actions sont illustrés par la citation suivante :

*« (Dans le cadre d'un projet en) Haute-Savoie, il y avait l'utilisation de matériel réutilisable plutôt d'utiliser du plastique : des ganivelles ;  
On a travaillé sur la réduction des zones de décapage, parce qu'on était sur des prairies d'alpage qui étaient très riches, et donc moins on décapait, et moins on avait à refaire de la prairie qu'on n'aurait pas réussi à rétablir comme elle était ;  
(...) c'était éventuellement modifier quelques entrées en terre pour préserver un ou deux arbres ;  
Le fait de limiter le saccage, ça n'a pas un surcoût. Le fait d'utiliser des ganivelles à la place de matières plastiques, c'est un surcoût au début mais après tu peux le réutiliser sur plusieurs chantiers donc ça s'amortit. Le fait de préserver un ou deux arbres, quand t'en as que 15 ou 20, c'est déjà beaucoup. Alors des fois ce n'est pas grand-chose, mais ce sont toutes ces actions mises bout à bout qui font que ton chantier va être encore plus vertueux » [A2, 2023]*

Cependant, lorsque cette volonté est portée par une seule personne, et non intégrée de façon systémique au sein de chaque service, il y a toujours un risque que l'expérience et la dynamique créées soient perdues avec le roulement des personnels sur chaque poste.

Parfois, ce moteur d'évolution des pratiques émane de personnels placés à des échelons inférieurs de la hiérarchie, et qui, par leurs actions et le faire-valoir de leurs idées auprès d'une direction, peuvent instaurer des pratiques innovantes au sein d'une entreprise.

*« Au tout début il n'y avait pas de direction de l'environnement quand je suis arrivé, mes deux collègues et moi-même, on était trois avec notre bâton de pèlerin qui allions voir les autres collègues, et on se battait parce qu'on avait des convictions, et la direction était plutôt satisfaite. Donc, elle nous suivait. Mais, je ne peux pas parler à proprement dit d'une stratégie d'entreprise comme on connaît aujourd'hui. » [A3, 2023]*

Souvent dans ces cas-là, la culture entrepreneuriale semble jouer un rôle déterminant afin de créer un terreau propice à ces prises d'initiatives, mais ne se suffit pas à elle-même. Il faut que les personnes aient la capacité de valoriser correctement les actions réalisées auprès de la direction afin de libérer des moyens pour faire perdurer cette dynamique :

*« (...) chez ASF, il y avait une forme de culture déjà bien imprégnée au sein de notre société. Bon, je dirais qu'aujourd'hui, c'est le cas de toutes les sociétés, en tout cas du groupe Vinci. »*

*« Moi personnellement, j'ai des convictions. Je ne pensais pas atterrir dans une société concessionnaire d'autoroute, et je suis entré pour faire avancer les choses. Je n'avais pas forcément le profil, mais finalement quand j'ai découvert les moyens, s'ils étaient utilisés intelligemment, bah c'était colossal. Voilà à nous de savoir les présenter correctement pour avoir l'aval de nos dirigeants et de les mettre en action. Voilà et ensuite de les valoriser. Moi j'ai toujours défendu l'action concrète, c'est la meilleure arme contre le greenwashing. » [A3, 2023]*

La société ASF a été achetée par le groupe Vinci en 2005, et la culture d'intégration de l'environnement et de la biodiversité au sein des pratiques a souvent été citée comme exemple par les interrogés d'autres filiales. C'est notamment au sein du réseau géré par cette concession que plusieurs réflexions sur l'amélioration des pratiques de végétalisation des abords autoroutiers, avec l'intégration de critères esthétiques pour faciliter l'acceptabilité des infrastructures, ou encore la composition de cortèges floristiques inspirés des milieux environnants ont été initiées. Elle a impulsé dans une certaine mesure l'évolution des pratiques au sein des autres concessions, et pour la mise en place de nouveaux projets, bien cette évolution se soit parfois heurtée aux limitations des contraintes logistiques ou budgétaires, émanant de choix stratégiques globaux plaçant la biodiversité au second plan.

## 1.3 MOBILISATION DE LA COMPÉTENCE EN ÉCOLOGIE AU SEIN DES GRANDS PROJETS D’AMÉNAGEMENT

### 1.3.1 Internalisation de la compétence en écologie

Tableau 1 : Fonctions, structures d’appartenance et formation des aménageurs interrogés

Id	Formation	Fonction	Société - Service
A1	Ingénieur en environnement	Responsable environnement	Vinci Autoroutes - Direction de l’environnement
A2	Forestier	Responsable technique	Vinci Construction - Vinci Construction Terrassement - Equo Vivo
A3	Ingénieur- Agronome Ecologue	Responsable du Domaine Nature, Paysage et dépendances Vertes	Vinci Autoroutes - Direction Technique de l’Infrastructure à ASF
A4	Ecologue	Ingénieur Environnement- Référent Biodiversité	EDF - Service Environnement et Société - Centre d’ingénierie dédié à l’hydroélectricité
A5	Ingénieur en Physique Fondamentale	Directeur Régional	Vinci Autoroutes - Cofiroute

#### 1.3.1.1 La compétence en écologie au sein de Vinci

Selon certains interrogés, la présence d’une stratégie politique en environnement, l’existence de postes dédiés et la présence de chargés de mission EquoVivo sur le territoire national sont des marqueurs suffisants pour témoigner de l’engagement du groupe en matière d’environnement et de biodiversité [A2, 2023]. Les personnes responsables de la bonne application des mesures environnementales sur les sites et projets d’infrastructures linéaires de Vinci traitent également d’autres sujets liés à la qualité ou à la prévention des risques. Pour ces entreprises mobilisant des effectifs très importants sur le terrain (plus de 6000 personnes sur le COS), ces sujets sont et seront toujours présents, voire prédominants [A2, 2023]. Ainsi, les profils porteurs de ces responsabilités ne peuvent être uniquement centrés sur l’écologie, et disposent d’une vision plus globale, mais par conséquent moins pointue sur des enjeux spécifiques de biodiversité.

*« Alors on n’a pas de personnes écologues en tant que travailleurs, par contre on a des personnes qui sont intéressées par cette discipline, (...) alors pas qu’écologique, parce que quand je pense ‘environnement’ (...) on a aussi tout ce qui est hydrologie, qualité de l’air, acoustique... donc on a des personnes qui sont plutôt avec des envies de travailler sur ce sujet-là et qui vont se spécialiser dans ces domaines. Après on travaille aussi beaucoup avec des partenaires extérieurs qui sont justement là pour pallier ce que l’on n’a pas comme compétences en interne ; donc nous, on a plutôt le rôle de piloter toutes ces missions, et quand on ne sait pas faire, parce que l’écologie et l’environnement ce sont quand même des choses qui peuvent être très pointues, on va chercher des compétences à l’extérieur pour nous aider. [A1, 2023]*

En s'intéressant au profil des référents en environnement parmi les personnes interrogées au sein de Vinci (Tableau 1), nous pouvons constater qu'aucun n'a de formation entièrement centrée sur l'écologie. Trois d'entre elles sont issues des métiers de la nature au sens large, dont un ingénieur en environnement, centré sur l'aménagement du territoire et la gestion des risques naturels et technologiques (A1), un forestier disposant d'expérience dans le domaine horticole (A2), ainsi qu'un ingénieur agronome avec une spécialisation en écologie (A3). La dernière personne interrogée dispose d'une formation d'ingénieur en physique fondamentale (A5).

L'absence de profil purement écologue ne veut pas dire qu'aucune connaissance sur la biodiversité ou le végétal n'est portée par ces personnes, mais il transparaît que la vision adoptée sur des sujets spécifiques comme la végétalisation de la strate herbacée est traitée par une approche plus techno-centrée qu'écologique. La valeur accordée à cette végétation est technique et paysagère, porteuse d'un intérêt utilitariste ou esthétique pour l'« utilisateur ». La valeur intrinsèque des espèces ou leur fonction au sein des écosystèmes est souvent déconsidérée. Cela a une incidence sur le choix ou « non-choix » des espèces herbacées, les modalités d'achat et le choix des filières d'approvisionnement, comme nous le verrons au Chapitre 2. L'absence de connaissances spécifiques, soit par manque de formation, d'intérêt, ou par priorisation d'autres enjeux (coût, disponibilité du matériel, facilité de gestion...), entraîne des conséquences sur la nature des végétaux implantés au sein des projets et la manière dont ils sont gérés.

### **1.3.1.2 La compétence en écologie au sein d'EDF**

Chez EDF, bien que nous ne disposions pas d'un échantillon représentatif, il semble que des profils d'écologues soient intégrés au sein des services de l'entreprise, et A4, titulaire d'un Master en écologie ainsi que de 10 ans d'expérience en bureau d'études en écologie en est un exemple (Tableau 1). La simple dénomination du poste de référent biodiversité marque une plus grande finesse de prise en compte de ces enjeux. Cette internalisation de profils écologues peut s'expliquer par la nature de certaines activités de l'entreprise, très liées aux milieux naturels et notamment à la ressource en eau, à travers la construction et l'exploitation d'ouvrages hydroélectriques. Un facteur majeur selon nous provient de l'implantation de ces ouvrages hydroélectriques, situés à 80% au cœur ou à proximité de parcs naturels et souvent en zones classées Natura 2000 [EDF, 2024]. Cette proximité avec des zones naturelles sensibles ou porteuses d'un intérêt patrimonial particulier a certainement poussé l'entreprise à disposer de personnels qualifiés afin d'évaluer les impacts des projets sur la biodiversité, proposer des solutions de remédiation, échanger avec les prestataires pour s'assurer de la bonne mise en œuvre des demandes spécifiques sur les enjeux de biodiversité, et établir des partenariats longs avec les partenaires extérieurs (associations, ONG...) afin de s'engager sur des actions en faveur de la nature [A4, 2023].

*« Sur le terrain, EDF signe régulièrement des conventions de partenariat avec les différents acteurs de la biodiversité issus du monde institutionnel et de la société civile : parcs naturels, Ligue de Protection des Oiseaux (LPO), Office National des Forêts (ONF), mais aussi milieux scientifiques et associations locales. » [EDF, 2024]*

### 1.3.2 Choix organisationnels dans le cadre des projets

#### 1.3.2.1 Différentes organisations pour différents types de projets

La dévolution des marchés publics peut se faire par différents processus, et nous en distinguerons deux ici. Dans le cadre des marchés classiques, le maître d'ouvrage (MOA, aussi appelé client ou client final) est le commanditaire et possède les fonds pour la réalisation du projet. Il est aussi généralement le possesseur du lieu d'implantation du projet et a la charge de sa gestion après livraison. Il fait appel au maître d'œuvre (MOE), et/ou un assistant à maître d'ouvrage (AMO) pour la rédaction du projet et son chiffrage. Le MOA peut ensuite décider de valider ou non le projet du MOE. Si le projet est refusé, le bureau d'études (BE), assurant le rôle de MOE doit revoir son projet avant de le resoumettre. Si le projet est validé, le MOE passe à la phase de consultation afin de déterminer les entreprises prestataires en charge de la réalisation des différentes opérations de travaux ou de fourniture de matériel. Le choix des prestataires est basé en partie sur des critères techniques ou de responsabilité sociale et environnementale, mais est resté souvent arrêté sur l'offre tarifaire la plus basse. Le BE passe alors à la phase de maîtrise d'œuvre travaux, qui consiste à organiser et suivre les opérations auprès des entreprises tout au long de la durée des travaux. [BE1, 2023]

L'autre type de marché de travaux intéressant notre étude est celui généralement adopté dans le cadre des projets de construction de grandes infrastructures, dont les projets autoroutiers par exemple : le marché de conception-réalisation (sous-catégorie des marchés globaux) [Légifrance, 2019]. Dans le cadre de ce marché, un pouvoir adjudicateur, généralement l'Etat ou la collectivité agissant comme acheteur/client final, va confier à un groupement d'opérateurs économiques les missions de réalisation des études et de construction des travaux [Légifrance, 2018], puis va pouvoir mettre à disposition cette infrastructure et/ou en déléguer l'exploitation et la gestion. Dans le cadre seul des ouvrages d'infrastructures, l'acheteur peut confier l'ensemble de ces missions à un unique opérateur économique (société SOCOS dans le cadre du COS comme exemplifié en 1.3.2.2). Ce type de marché ne peut être conclu « *que si des motifs d'ordre technique ou un engagement contractuel portant sur l'amélioration de l'efficacité énergétique (...) rendent nécessaire l'association de l'entrepreneur aux études de l'ouvrage* » [Légifrance, 2018]. Ce type de marché comporte plusieurs avantages, dont (1) la réduction des délais de réalisation par la réduction du nombre d'interlocuteurs et de procédures, (2) une meilleure anticipation budgétaire aux vues de l'estimation initiale par le MOA et la réalité du montant des travaux, mais également (3) la mise en place de solutions techniques plus intéressantes par une collaboration entre concepteur et entrepreneurs, qui permet de mieux intégrer les solutions innovantes sur le marché [Le Moniteur, 2010].

Si l'on fait le rapprochement avec le sujet de notre étude, la mise en commun des compétences sur les volets environnementaux des architectes, paysagistes, bureaux d'études en environnement, entreprises de travaux publics, fournisseurs (e.g. de semences), peut déboucher sur l'intégration de démarches innovantes aux projets. Le groupement permet une mise en commun des compétences. Si l'on prend l'exemple de la végétalisation, les concepteurs impliqués sur le volet environnemental sont généralement des cabinets d'architecture et de paysage ne disposant pas forcément des compétences écologiques

nécessaires à l'adéquation fonctionnelle entre les espèces et les milieux traversés ou nouvellement créés. Dans ce cas, la présence au sein du groupement d'acteurs disposant d'expérience sur les questions écologiques comme la conception d'opérations de végétalisation en collaboration avec des experts de la semence, peut apporter des propositions dès la phase de conception. Cela permet d'estimer le budget et les modalités nécessaires à leur implémentation : composition des mélanges, techniques de semis, anticipation des commandes et des modes de gestion à prévoir afin de faire perdurer les aménagements dans le temps...

La coordination des efforts afin que les bonnes pratiques environnementales définies dans le cadre de la conception du projet soient partagées et harmonisées entre toutes les parties prenantes, avec une possibilité d'adaptation « au fil de l'eau » en cas d'imprévu (budgétaires, environnementaux, délais, disponibilité du matériel...) est essentielle sur ce type de grands projets. Ces derniers s'étalent en effet généralement sur plusieurs années, et la temporalité de la mise en œuvre peut varier au fil du temps. Concernant les opérations de végétalisation, il est généralement préférable de les réaliser au plus tôt après le remaniement des sols, afin de contenir les processus d'érosion pouvant mettre en péril l'intégrité des infrastructures, mais aussi d'éviter l'établissement d'espèces exotiques envahissantes pouvant engendrer des coûts pour leur gestion ou leur éradication [A1, 2023; A2, 2023; A3, 2023; A4, 2023]. Cependant, la planification exacte de fin des opérations de terrassement peut être perturbée par des événements climatiques exceptionnels, la découverte de non-conformités au sein des dossiers réglementaires, d'accidents durant les travaux, la découverte de sites archéologiques ou encore d'espèces protégées forçant de nouvelles procédures ou demandes, voire la mise en pause du chantier pour une durée variable. Dans ces cas-là, la période optimale de semi doit être reportée, et les membres du groupement peuvent se concerter afin de revoir ou d'adapter leurs préconisations pour déboucher sur le succès des opérations.

### **1.3.2.2 L'organisation des acteurs sur le projet du COS**

Un schéma simplifié des principaux acteurs impliqués dans le processus de marché public du COS est proposé en Figure 3. Au total, plus de 6000 personnes issues de 300 entreprises sont intervenues sur l'ensemble du projet, depuis la commande par l'État jusqu'à l'exploitation, en passant par la conception, les différentes concertations avec les acteurs locaux et la construction. Nous nous intéressons présentement aux grandes parties prenantes de ce processus, en commençant par l'État, qui est à l'origine de la commande et qui concède à ARCOS l'ensemble de la concession, à SOCOS la conception-réalisation, et à Vinci Autoroutes l'exploitation, la gestion et le maintien de l'ouvrage. Au sein du groupement concepteur-constructeur, deux entités majeures ont la charge de la construction de l'ensemble de l'infrastructure, incluant le terrassement, l'infrastructure autoroutière, les ouvrages (ponts, passages à faune), les réseaux etc. L'ensemble des sociétés et groupements cités précédemment sont détenus et/ou gérés en majorité ou en totalité par le groupe Vinci. Cela n'inclut en revanche pas nécessairement les prestataires et fournisseurs auxquels ils font appel pour la réalisation des divers travaux et l'approvisionnement en matériels et matériaux.

Le bureau d'études Ingérop avait la charge de l'ingénierie autoroutière, environnementale, géotechnique et hydraulique, la conception des ouvrages d'art et des

équipements de la route, des dossiers réglementaires et de la supervision des travaux. Il a fait appel au bureau d'études OGE pour les études sur les continuités écologiques et Airele pour des conseils en environnement. SOCOS a également sollicité EGIS pour la conception de l'aménagement paysager.

L'observation du groupement révèle donc que la grande majorité des compétences liées aux activités de construction et d'exploitation des infrastructures linéaires ont été internalisées par Vinci, et que le groupe est à la tête d'entreprises couvrant la quasi-totalité des corps de métiers requis dans ce cadre-là. En revanche, la réalisation des études couvrant le domaine environnemental au sens large, incluant l'évaluation de l'état initial, la conception et l'aménagement paysager ou la conception d'ouvrages spécifiquement dédiés au rétablissement des connectivités écologiques, sont externalisés auprès d'entreprises spécialisées dans ces domaines.

### **1.3.3 Réflexion sur une meilleure intégration des savoirs écologiques**

#### **1.3.3.1 Du choix d'internaliser la compétence en écologie**

Notre étude démontre que Vinci fait le choix d'externaliser la compétence écologique et paysagère plutôt que d'intégrer des profils qualifiés au sein de ses équipes. Cela s'explique par plusieurs facteurs liés aux propriétés des connaissances et compétences en écologie, ainsi que de la fréquence des activités de Vinci impliquant leur mobilisation.

Il ressort que la compétence en écologie est très spécifique, à la fois car elle requiert des connaissances qui sortent complètement du spectre de celles des métiers de l'ingénierie de la construction, du terrassement, de l'énergie, qui sont les cœurs d'activité du groupe Vinci [A1, 2023; A3, 2023; A5, 2023], mais aussi car elle est très liée aux territoires d'implantation. Vinci réalise des projets dans la France entière ainsi qu'à l'international, et il est confronté à des contextes écologiques très divers. Les connaissances faunistiques et floristiques sont en partie inféodées aux territoires, et l'intégration de profils d'écologues au sein des équipes ne garantirait pas un niveau de spécificité suffisant pour la réalisation complète d'études naturalistes au sein de contextes éloignés. Il apparaît que l'intégration au sein des équipes et la formation de profils écologues serait trop coûteuse d'un point de vue organisationnel pour représenter un vrai avantage par rapport à la contractualisation de prestataires externes. De même, l'appel à des prestataires externes disposant d'une implantation territoriale permet d'accéder à leur réseau de fournisseurs locaux, qui peut s'avérer déterminant en cas d'exigences spécifiques concernant l'emploi de semences sauvages et locales par exemple. Le maillage national des producteurs de ce type de semence n'est pas encore complet, comme nous le verront au Chapitre 2, et accéder aux informations concernant leur capacité à fournir le matériel requis et les délais associés requiert un effort de démarche active.

Aussi, l'activité des filiales de construction de Vinci est dictée par la fréquence d'apparition de nouvelles demandes de projets par l'Etat ou les collectivités publiques. Cette activité est donc irrégulière dans le temps, et la mobilisation de compétences en écologie suit la fluctuation temporelle des projets. En dehors de ces périodes, le suivi de la biodiversité se limite à la vérification du maintien des zones compensatoires ou à des remontées d'information ponctuelles sur l'efficacité des passages à faune, qui peuvent être assurés par des profils plus



généralistes ou via l'intervention de partenaires associatifs. Les structures concentrant les métiers d'ingénierie peuvent au contraire remobiliser leurs effectifs dans le cadre de la gestion des infrastructures, le suivi de la sécurité, les opérations de réparation et d'entretien des ouvrages et réseaux. La mobilisation de la connaissance en écologie est de surcroît actuellement relativement courte à l'échelle des projets, et prend surtout place lors de l'établissement de l'état initial dans le cadre des études d'impact, puis pour la réalisation des préconisations de gestion, lorsqu'un plan de gestion existe et qu'il intègre une approche écologique.

Certaines structures internes au groupe comme ASF disposent de quelques compétences en écologie, du fait des actions historiques de certains de ses personnels, et de l'expérience acquise durant de nombreuses années d'exploitation et de gestion du patrimoine naturel associé aux réseaux routiers. Les activités de la marque EquoVivo, propriété de Vinci Construction Terrassement, sont spécifiquement centrées sur la restauration écologique, et intègrent des écologues qui sont beaucoup sollicités dans le cadre de la rédaction des dossiers réglementaires. La visée écologique des projets de génie et de restauration écologique et leur implantation au sein de contextes plus sensibles, justifient l'internalisation de ces profils. On remarque que les équipes de cette marque prennent part à des réseaux spécialisés comme l'Union professionnelle du génie écologique (UPGE) ou le Réseau d'échanges et de valorisation en écologie de la restauration (REVER) afin de renforcer leur montée en compétence sur ces domaines via une mise à jour des connaissances et un partage des retours d'expériences. De même, on rappelle la forte intégration d'écologues au sein de la branche hydroélectricité d'EDF, qui s'explique par l'implantation majoritaire des ouvrages en zones naturelles sensibles : le suivi de la qualité des eaux, la présence d'espèces protégées, la proximité avec des milieux sensibles, la nécessité de veille et de gestion des espèces exotiques envahissantes (EEE) augmentent grandement la fréquence de mobilisation de ces compétences écologiques dans le cadre de leur activité. Mais elle reflète également une ambition environnementale forte du groupe.

On note la volonté de certains acteurs au sein de Vinci d'une plus grande intégration d'écologues au sein de leurs équipes. Cette montée en compétence permettrait d'un côté d'augmenter la capacité d'échange avec les experts du domaine lors de la conception des projets, ainsi que la capacité à vérifier les prestations fournies par les entreprises contractuelles dans le cadre des travaux [A3, 2023]. Nous verrons dans le Chapitre 2 qu'il existe parfois des malversations de la part de ces prestataires, leur permettant d'augmenter leur marge en utilisation des produits (e.g. semences) non conformes à la demande initiale, ou à des doses inférieures [P3, 2023]. Sans connaissances spécifiques des produits, techniques ou filières d'approvisionnement employés pour la végétalisation, il est impossible pour un « non-averti » de détecter ces anomalies.

*« Je défends pour qu'on internalise ces compétences (...). On se repose sur le coût des bureaux de 'consulting' (i.e. bureaux d'études). Et ça, il y en a quatre, cinq, ou six en France. Tout le monde passe par leur main, par leurs idées. Donc voilà, on se trouve tous à un moment donné avec les mêmes stratégies, ce qui est, je pense un peu dommageable. Ça serait bien de pouvoir sortir justement du lot. » [A3, 2023]*

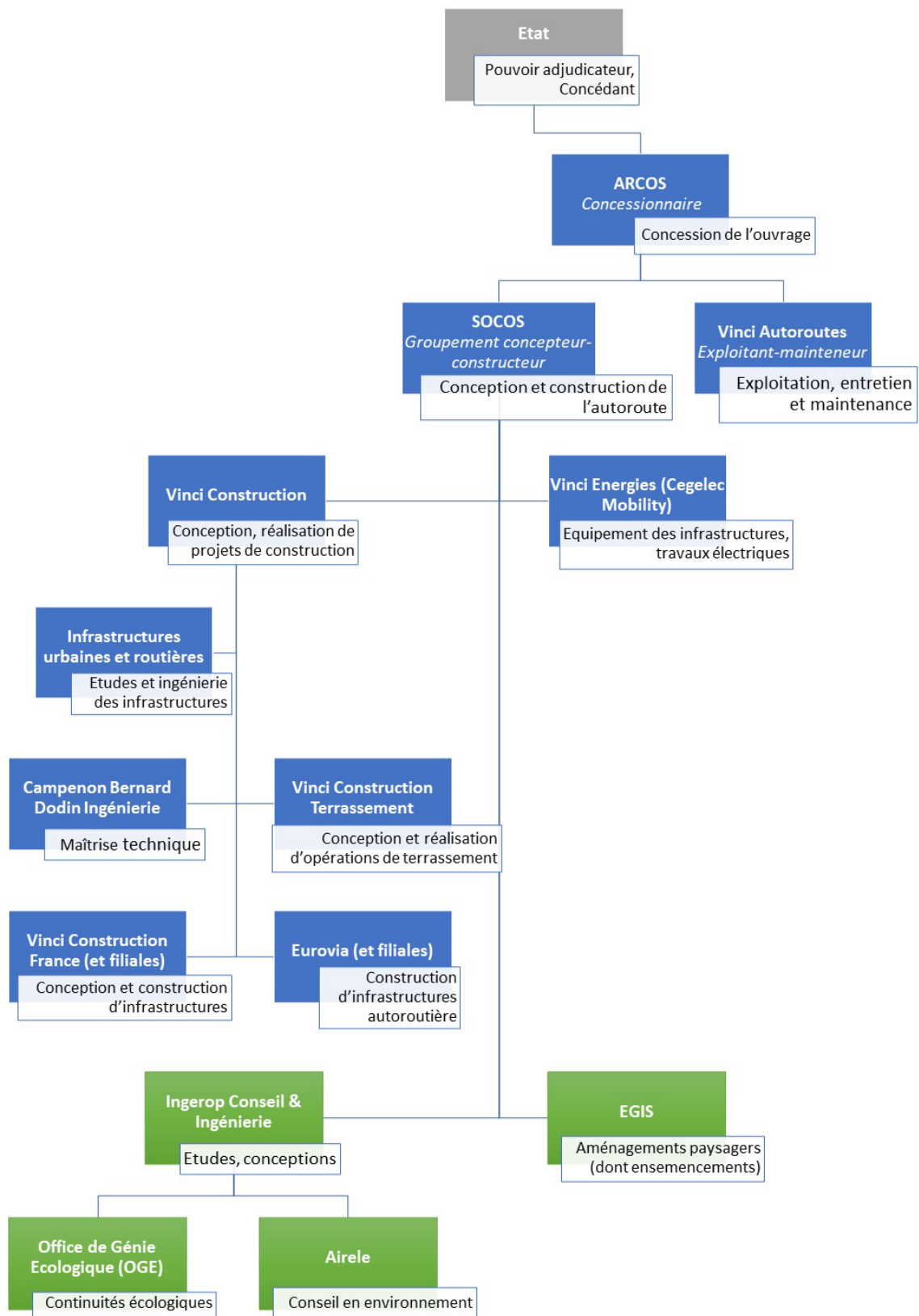


Figure 3 : Schéma simplifié des acteurs impliqués dans le projet du Contournement Ouest de Strasbourg. En bleu : les entités détenues et/ou gérées en majorité par Vinci. En vert : les entités non détenues ou gérées par Vinci et intervenant dans le domaine de compétences environnemental. En gris : l’Etat. En blanc : le rôle ou les activités de chaque entité dans le cadre du projet du COS.

Comme le montre cette citation, l'internalisation des compétences sur la biodiversité pourrait aussi permettre de s'extraire d'une certaine forme d'uniformité des études en environnement par un nombre très restreint de bureaux d'études capables de répondre aux marchés des grands projets d'infrastructures. L'accès à ces marchés est en effet très limité pour les plus petites structures, malgré des compétences spécifiques plus abouties, qui n'est pas facilité par le processus des marchés en conception-réalisation. La disponibilité de profils écologues en interne favoriserait certainement l'émergence d'initiatives volontaires, permettant aux projets d'aller au-delà du « minimum requis » et s'adaptant plus facilement à l'évolution rapide des réflexions et pratiques en écologie.

### **1.3.3.2 Initiatives relatives à la biodiversité au sein des grandes infrastructures**

Les initiatives volontaires pour des actions favorables à la biodiversité sont conditionnées par les décisions de la direction opérationnelle [A5, 2023]. Les directions opérationnelles sensibles aux enjeux de biodiversité peuvent approuver voire encourager la mise en place d'actions ponctuelles, ou l'évolution des pratiques au sein des chantiers, dans la mesure où la faisabilité et les coûts associés n'entravent par la temporalité et les budgets alloués aux projets. Sans une volonté affirmée, pouvant être héritée de l'historique des entreprises et de leurs personnels (comme ASF par exemple), elles seront freinées par la perception des surplus budgétaires et logistiques nécessaires à leur mise en place. Comme nous le verrons par la suite, les actions peuvent être valorisées du point de vue communicationnel, mais ne représentent pas une vraie plus-value pour l'obtention de marchés ou de contrats de concession.

Les concessionnaires s'inspirent beaucoup des actions de gestion du patrimoine naturel déjà en place sur les autres infrastructures lors de la rédaction de leurs propositions. Ainsi, côté concession, l'évolution des actions en matière de gestion de la flore est lente, et s'adapte aux besoins, comme l'arrivée de nouvelles espèces ou populations d'EEE, les demandes de gestion d'espèces gênantes pour les agriculteurs environnants (e.g. *Cirsium arvense*), l'évolution globale des pratiques de gestion comme la diminution des actions de fauche ou la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires. [A1, 2023]

Du point de vue des sociétés de construction, on pourrait penser que les propositions volontaires d'actions en faveur de la biodiversité, comme l'usage de végétaux sauvages et locaux, pourraient représenter un différentiel pour l'obtention de marchés lors de la réponse aux appels à projets. Cependant, aux dires des acteurs, il semblerait que ce ne soit pas le cas :

*« Le fait de vouloir aller au-delà (en matière d'environnement) n'apporte pas une plus-value à ton offre. C'est à dire que pour le moment ce qui compte est quand même la partie financière. A partir du moment où tu as répondu à toutes les questions, que tu coches toutes les cases comme le respect de la réglementation et de ce qui était imposé pour la construction, ton offre va être recevable. Si tu en fait plus, ce n'est pas forcément ça qui fera basculer ton offre d'un côté ou de l'autre malheureusement. » [A2, 2023]*

On parle bien ici des projets de construction de grandes infrastructures linéaires dont le dimensionnement et les enjeux sont très importants et la lourdeur administrative,

réglementaire et opérationnelle imposée à la maîtrise d'œuvre laisse souvent peu de place aux propositions volontaristes. Dans ce cadre-là, les entreprises sont en effet soumises à de fortes contraintes réglementaires, ainsi qu'une exigence d'excellence en termes de respect des normes de sécurité pour les futurs utilisateurs, d'autant plus lorsque c'est l'Etat qui est commanditaire. Ainsi, les services fournis sont souvent conditionnés par la demande du commanditaire et/ou du maître d'ouvrage. Un levier d'évolution possible pour la mise en place d'actions en faveur de la biodiversité, et plus spécifiquement les modalités de végétalisation et de gestion de espaces végétalisés, serait la mise en place d'exigences supplémentaires sur ces aspects, ou la valorisation de propositions volontaires et innovantes dans le cadre de l'obtention des marchés.

### ***1.3.3.3 Méconnaissance des enjeux spécifiques des grands aménageurs sur la végétalisation – réflexion conclusive***

On remarque que l'obtention d'un couvert végétal herbacé n'est quasiment jamais citée en elle-même comme finalité. Les opérations de végétalisation au moyen d'herbacées sont uniquement citées dans le cadre de la mise en place d'ouvrages spécifiques ou de mesures compensatoires. La finalité est alors la reconstitution d'habitats fonctionnels pour leur capacité à héberger, permettre le déplacement ou la nidification de la petite et grande faune [Laury and Valet, 2017]. C'est le cas pour le projet du COS, qui est pourtant vanté comme un exemple d'innovation dans la réflexion apportée à la végétalisation herbacée. En effet, cinq mélanges ont été conçus pour différents types de milieux ou de finalités, dont les milieux humides ou le déplacement du grand hamster. Ces mélanges sont toutefois limités, par leur nombre au vu des milieux traversés, mais surtout dans leur composition en espèces. Les choix liés aux modalités de végétalisation s'adaptent souvent aux enjeux spécifiques du projet, à son ampleur et la faisabilité des opérations comme discuté au Chapitre 2.

Malgré une demande grandissante de critères relatifs à la composition des mélanges herbacés pour favoriser le retour de biodiversité après la mise en place de projets d'aménagement, la réalité fait souvent face à la méconnaissance des acteurs sur les enjeux sous-jacents, les modalités techniques de mise en action et les interlocuteurs appropriés auprès de qui chercher conseil. Ces lacunes des porteurs de projet ou des maîtres d'œuvre aboutissent à la formulation de demandes et de préconisations inadéquates, et témoignent d'un manque de connaissance des filières d'approvisionnement et de modes de consommations ancrés dans les pratiques actuelles qui ne permettent pas aux producteurs de répondre convenablement aux demandes. Dans le Chapitre 2, nous explorerons l'historique de l'évolution de cette demande en végétaux herbacés, ainsi que les freins et perspectives à l'intégration de critères à la fois techniques et de biodiversité aux pratiques de végétalisation dans le cadre de divers types de projets d'aménagement.



Illustration 3 : Parcelles expérimentales – Contournement Ouest de Strasbourg – Crédits : Gaëtan Soerensen

## **Chapitre 2. VEGETALISATION HERBACEE ET PROJETS D'AMENAGEMENT : HISTORIQUE, ENJEUX ET PERSPECTIVES**



## 2.1 PRESENTATION DES ACTEURS CONSIDERES

Au fil de ce chapitre, nous constaterons des niveaux de connaissance différents sur les questions abordées, ainsi que des narratifs contrastés sur l'évolution des pratiques de végétalisation et la genèse des nouvelles tendances dans ce domaine. Ces différences s'expliquent en partie par la formation initiale des acteurs, constituant un pilier central des valeurs et logiques de pensées appliquées aux pratiques professionnelles ultérieures, ainsi que le domaine au sein duquel ces personnes évoluent : monde de la conservation, de l'aménagement, du paysage, de la restauration écologique... Les connaissances et positions adoptées évoluent au gré des activités, du parcours professionnel et de la culture acquis par les personnes et structures au fil du temps. C'est pourquoi il nous semble important de présenter les différents acteurs interrogés, leur parcours, leur structure d'affiliation et leurs activités majeures. Ces éléments permettront une meilleure compréhension des positions adoptées qui sont présentées dans la suite de ce chapitre. Vous pourrez retrouver leur description au sein des Encadrés 3, 4 et 5.

Encadré 3 : Présentation des représentants des bureaux d'études prescripteurs interrogés.

BE1 est docteur en écologie, et sa thèse a porté sur les stratégies démographiques des espèces poussant sur les espaces dégradés. Il a ensuite intégré un BE se concentrant sur les problématiques de végétalisation des grandes infrastructures linéaires par ensemencement hydraulique, en y intégrant notamment des espèces sauvages. Il travaille maintenant depuis 35 ans dans ce domaine et traite de la plantation et du semis d'espèces herbacées et ligneuses. L'activité de sa structure a été majoritairement dédiée à la collaboration avec ASF, avec la charge des opérations de végétalisation pour leurs grands travaux autoroutiers (A20, A89, A9) en région méditerranéenne. [BE1, 2023]

BE2 est titulaire d'un diplôme d'ingénieur du paysage délivré par une grande école d'agronomie. Après 5 ans d'expérience au sein d'une entreprise de réalisation d'aménagements paysagers, il a fondé son bureau d'études en ingénierie du paysage, spécialisé sur la végétalisation mais traitant également sur des éléments minéraux. Luciole est intervenu sur diverses infrastructures linéaires : A86, tunnel de Saint-Cloud, A19, LGV Tours-Bordeaux. Le bureau d'études propose des services de MOE, de MOA, d'expertise et d'étude-conception-réalisation.

Encadré 4 : Présentation des représentants des producteurs de semences interrogés

P1, détenteur d'un Bac+4 en écologie, est un ancien agent d'un conservatoire botanique national (CBN) qui possédait une bonne connaissance des enjeux de conservation et de restauration de la nature, ainsi qu'une familiarité avec la marque VL et ses démarches avant même son activité de semencier initiée en 2016 et montée en puissance en 2020. La création de son entreprise semencière a été en partie motivée par la création de la marque

Végétal local et la recherche de producteurs adhérents, jusque-là absents au sein de sa région d'origine. Il a animé notamment le plan régional d'action sur les espèces messicoles, pour lequel il a eu l'occasion de réaliser de nombreux tests de multiplication d'espèces herbacées auprès d'agriculteurs. De ce fait, il était porteur de connaissances sur la recherche, la collecte, et les modalités de multiplication des semences sauvages. Il disposait également d'un réseau de clients potentiels parmi les prescripteurs, et d'une connaissance de l'évolution de la demande en VL de la part des MOA. L'activité de l'entreprise inclut la vente de semences sauvages et locales produites après leur collecte en milieu naturel (en mélanges avec d'autres semences conventionnelles en cas de difficultés réglementaires ou de disponibilité). L'entreprise assure aussi des services de conseil et d'accompagnement auprès des MOA et MOE pour la mise en place ou la gestion de la végétation au sein de projets d'engazonnement d'infrastructures linéaires, d'aménagements paysagers ou de génie et de restauration écologique. La clientèle majoritaire de la structure pour l'achat de semences est constituée par les collectivités territoriales, mais ces dernières sollicitent encore peu pour de l'accompagnement. Les fédérations de chasse, les entreprises du bâtiment et travaux publics (BTP) ou les grands aménageurs d'infrastructures linéaires comme la SNCF complètent le panel de la clientèle. Les sollicitations pour la prestation de services émanent généralement des BE prescripteurs, pas tant pour la définition des besoins que pour l'adaptation des palettes végétales à utiliser [P1, 2023].

P2 travaille au sein d'une entreprise de production semencière classique s'étant progressivement tournée vers la production de semences sauvages et locales au cours des 30 dernières années. Elle s'est spécialisée dans la fourniture de semences à destination des opérations de revégétalisation des zones dégradées, notamment les pistes de ski ou les talus autoroutiers, en zones alpine et méditerranéenne. Les clients finaux majeurs sont donc les domaines skiables, les sociétés d'autoroutes, les gestionnaires d'espaces et d'infrastructures telles que EDF ou la SNCF, et quelques collectivités. La plus grande part des semences produites sont sauvages et locales, et une partie dispose de la marque VL au moment de la vente, excepté pour quelques espèces comme le « sainfoin de pays », une variété plus locale de cette espèce largement cultivée en agriculture [P2, 2023].

P3 travaille au sein d'une entreprise commercialisant des semences classiques depuis 50 ans pour des usages agronomiques, d'engazonnement, paysagers et de végétalisation. Depuis environ 30 ans, son activité s'est étendue aux espèces horticoles ou sauvages, puis plus récemment aux semences sauvages et locales. La grande majorité des clients de P3 sont des entreprises du paysage, et l'entreprise a été sollicitée récemment par de grosses coopératives nationales afin d'obtenir des fleurs sauvages en vue de l'amélioration de leurs mélanges. L'entreprise est intégrée à un réseau de revendeurs en France, et la fourniture des semences se fait fréquemment par l'intermédiaire de commerciaux, sans contact direct avec le client final. La grande majorité des mélanges vendus par la structure sont des mélanges à façon, c'est à dire que les espèces et les proportions sont fixées par le prescripteur, et le producteur se charge uniquement de la fabrication du mélange en tant que tel. Il arrive que l'entreprise réponde conjointement à des appels d'offres dans le cadre d'une maîtrise d'œuvre, ou accompagne ponctuellement des MOA pour du conseil sans toutefois de facturation pour la fourniture de services comme ça peut être le cas d'autres semenciers [P3, 2023].



Encadré 5 : Présentation des représentants de la marque Végétal local interrogés

VL1 est ingénieure agronome de formation et a travaillé en tant que chargée de mission restauration écologique et conservation au CBN Pyrénées-Midi-Pyrénées (CBNPMP). Elle est aujourd'hui animatrice nationale de la marque Végétal local. [VL1, 2023]

VL2 dispose d'un équivalent-Master en écologie, et est aujourd'hui responsable du pôle Conservation Espèces Habitats au CBN Bassin Parisien (CBNBP), organisme rattaché au Muséum National d'Histoire Naturelle et à l'OFB. Il assure entre autres la conservation des espèces en banques de semences *ex situ* et *in situ*. Il est référent régional VL sur les trois régions d'origine : BP-Nord, BP-Sud et Nord-Est. Il est membre du comité de pilotage (COFIL) et du comité scientifique de la marque depuis son émergence. [VL2, 2023]

VL3 est titulaire d'une Licence professionnelle en gestion agricole des espaces naturels ruraux, et est aujourd'hui Chargée de mission ressources végétales sauvages et conservation *in* et *ex-situ* et Correspondante locale VL au CBN Massif-Central (CBNMC) [VL3, 2023].

VL4 dispose d'un Master en gestion conservatoire et restauration des écosystèmes. Elle travaille au sein du CBN Sud-Atlantique (CBNSA) comme Chargée de mission végétalisation écologique et conservation et Correspondante Végétal local zone Sud-Ouest [VL4, 2023].

## **2.2 FONCTIONNEMENT GENERAL ET EVOLUTION DES PRATIQUES DE VEGETALISATION**

### **2.2.1 Parcours de végétalisation type**

Dans cette section, nous ferons un rapide rappel sur les étapes et l'organisation des acteurs dans le cadre des projets d'aménagement (*cf.* 1.3.2.1), en nous focalisant plus particulièrement sur le rôle d'accompagnement et de conseil des prescripteurs, représentés le plus souvent par les bureaux d'études, mais parfois également par les producteurs de semences eux-mêmes. Nous ne ferons pas systématiquement la distinction entre les projets dits classiques et ceux en conception-réalisation, et nous nous concentrerons plutôt sur la chaîne de commande depuis le donneur d'ordres jusqu'aux fournisseurs et opérateurs finaux.

#### **2.2.1.1 Fonctionnement général**

Les projets d'aménagement du territoire impliquant des actions de végétalisation naissent d'une commande initiale formulée par un commanditaire, le plus souvent un acheteur public (*e.g.* Etat, collectivité territoriale...) assurant le rôle de Maître d'ouvrage (MOA), bien que cette fonction puisse être déléguée sous certaines conditions [Légifrance, 2019]. Afin de constituer le dossier de consultation des entreprises (DCE), le MOA doit rédiger un cahier des clauses techniques particulières (CCTP). Ce dernier est un document contractuel au sein duquel sont détaillés les besoins sur les réalisations attendues, les modalités d'exécution des travaux et prestations, ainsi que toutes spécifications techniques précises (respect de normes, qualité des matériaux, pratiques vertueuses...) relatives aux besoins et objectifs prédéfinis par le MOA. Une fois le DCE constitué, le MOA lance la consultation des entreprises afin de définir la ou les structures qui assureront la conception du projet et sa mise en œuvre. [A1, 2023; BE1, 2023]

Les grandes lignes du projet ainsi que la définition de son enveloppe budgétaire globale sont généralement fixées par le MOA. Il peut indiquer ses attentes en termes d'exemplarité écologique, avec un niveau de détail plus ou moins grand sur le respect de normes environnementales, la mise en place de pratiques vertueuses par les prestataires ou l'emploi de certains matériaux ou techniques spécifiques. Ainsi, concernant la végétalisation des sites, il peut par exemple spécifier la nature et le nombre d'espèces végétales à semer et planter, les modalités de l'implantation du mélange comme l'usage d'intrants, les caractéristiques des semences en matière de traçabilité ou d'origine ou encore les modalités de gestion à appliquer à posteriori. Toutefois, les MOA ne disposent souvent pas des connaissances nécessaires à la définition de ces modalités dans la formulation des attentes du projet, et préfèrent généralement déléguer ce travail à un bureau d'études (BE) spécialisé en maîtrise d'œuvre (MOE). Ainsi, sur la base du CCTP, le MOE est missionné afin de rédiger les termes du projet, détaillant l'ensemble des opérations débouchant sur la livraison de l'ouvrage. Le MOE est généralement un BE d'architecture et/ou de paysage, qui peut choisir de se mettre en association avec un BE écologue pour traiter de questions spécifiques à la biodiversité. Notons tout de même que la définition précise des prestataires et des modalités de mise en œuvre comme les techniques ou le choix des fournitures peut ne pas être mentionné au sein du projet, et traité lors des phases ultérieures de mise en œuvre. C'est notamment le cas des modalités de végétalisation, traité historiquement en fin de chantier une fois les opérations de

terrassment clôturées [BE2, 2023]. Une fois constitué, le projet est soumis au MOA, qui le valide s'il l'estime conforme aux attentes initiales, ou peut exiger sa révision par le MOE dans le cas contraire [BE1, 2023]. Une fois validé, il n'existe normalement plus de possibilité de sortir des dispositions prévues [A1, 2023].

Le MOE passe alors à une phase de consultation afin de mettre en concurrence les entreprises qui seront impliquées dans la réalisation des travaux : entreprises de travaux publics, fournisseurs... Le choix de ces prestataires est normalement arrêté sur l'offre tarifaire la plus basse, sous réserve que l'offre proposée réponde aux critères du projet [BE1, 2023], ce qui peut conduire à des résultats médiocres [A4, 2023] voire inciter à des malversations comme nous le verrons par la suite (2.3.1.3). La mise en concurrence des entreprises prestataires est normalement ouverte à tous, mais il existe des préférences de la part des MOE pour certaines entreprises prestataires. Les MOE qui peuvent alors moduler leur appel d'offres afin de restreindre le champ des répondants à un panel restreint d'acteurs connus.

*« On fait toujours par appel d'offre mais après sur des panels de clients restreints, c'est-à-dire ce sont des praticiens dont on connaît l'expérience et la façon dont ils travaillent. Et du coup on fait une mise en concurrence qu'on peut baser sur d'autres critères. » [A4, 2023]*

Cela permet notamment d'avoir un certain niveau de garantie sur la qualité des services et le respect des exigences, en plus de favoriser la communication et la marge de négociation possible due à la relation de confiance existant entre les parties prenantes du marché.

*« (...) il y a des praticiens qui ne savent pas faire. (...) si vous travaillez avec ces gens-là, il y a toutes les chances que, même si vous aviez des exigences très importantes au début, ça soit au final ce que le praticien a la capacité de faire qui va vous être vendu ou proposé. Donc vous aurez une grosse dérive entre votre expression de besoin initial et puis la réalité de ce qui aura été fait. » [A4, 2023]*

Par exemple, la taille restreinte du marché de la semence conduit à la possibilité pour la MOE de concevoir des appels d'offre conduisant à travailler de manière récurrente avec les mêmes acteurs de confiance : *« il connaît bien le milieu de l'autoroutier, il sait ce que c'est qu'une entreprise à MOA, à MOE, il connaît le microcosme, ça aide énormément » [A3, 2023].*

Une fois les entreprises sélectionnées, commence alors la phase de maîtrise d'œuvre travaux, c'est à dire le suivi des opérations en phase chantier afin de s'assurer de la conformité des opérations avec la demande du MOA: conformité des mélanges de semences, bonne exécution des opérations [BE1, 2023]. Si les modalités de la végétalisation, c'est-à-dire la nature des fournitures et les techniques de mise en œuvre, n'ont pas été clairement établies dans le cadre du CCTP ou du projet, ou qu'un bureau d'étude spécialisé n'a pas été sollicité sur cette question, leur implémentation reste à la discrétion des prestataires : choix et achat des fournitures, utilisation et dosage des intrants, dosage des semences [A1, 2023]... Dans le cadre des grands projets s'étalant sur plusieurs années, il arrive que les prestataires de mise en œuvre de la végétalisation changent au cours du temps, et que la maîtrise des modalités échappe en partie à la MOE : les zones à végétaliser étant libérées petit à petit au gré de l'avancement des opérations de terrassement, la disponibilité des semences et la période

optimale de semis ne peuvent être assurées sans une planification méthodique préalable [BE2, 2023]. La végétalisation est historiquement considérée à la fin du projet, mais il apparaît nécessaire d'intégrer cette question dès la phase de planification globale de l'opération par la MOE, au même titre que le terrassement, afin d'en maîtriser les modalités d'exécution [BE2, 2023].

### **2.2.1.2 Conseil et accompagnement des acteurs sur les opérations de végétalisation**

#### ***Les bureaux d'études chargés de la végétalisation***

Le rôle de prescripteur est généralement assumé par les BE en charge de la MOE. Le BE peut alors réaliser lui-même les préconisations liées aux opérations de végétalisation, ou bien solliciter/s'associer à un BE spécialisé sur la question. Le BE alors chargé de la réalisation des opérations de végétalisation (BEV) peut être sollicité dès la phase de conception et travailler conjointement aux autres BE de la MOE en charge de la supervision des autres aspects du projet, ce qui est l'idéal pour anticiper contraintes et disponibilité des semences. Dans ce cas, le BEV peut aller sur site pour prendre connaissance de la nature des terrains, des conditions de site et des travaux projetés, lui permettant d'affiner ses préconisations en matière de préparation du sol, de choix des espèces ou des techniques de semis par exemple [BE1, 2023]. Toutefois, dans la plupart des cas, le BEV peut être amené à intervenir alors que les travaux de terrassement sont encore en cours voire terminés, auquel cas le MOA et/ou le MOE du projet informent au mieux le BEV des conditions initiales du site [BE1, 2023]. Cela rend plus difficile le travail d'expertise visant à déterminer le type de milieu, les conditions de sol et les communautés végétales présentes avant-projet. Or, ces éléments peuvent s'avérer importants si des objectifs de restauration de certaines zones, c'est-à-dire un retour assisté à un écosystème de référence, sont mentionnés au sein du CCTP ou du projet.

Dès sa sollicitation, le BEV construit son projet en indiquant les fournitures (mélanges de semences) et les fournitures complémentaires (fertilisants, fixateurs de graines), ainsi que les modalités d'exécution des travaux (technique d'ensemencement et de préparation du sol, période et nombre de campagnes d'ensemencement). Le dossier ainsi constitué représente encore une fois l'obligation de résultat de l'entreprise auprès du MOA. Ce dossier contenant l'ensemble des modalités et la tarification prévisionnelle part ensuite en consultation auprès des prestataires potentiels qui retournent leur offre. La meilleure offre est sélectionnée, soumise au MOA qui passe alors commande et débouche sur l'exécution des travaux [BE1, 2023]. Cette étape s'applique de manière distincte et souvent différée par rapport à la procédure initiale de sélection des prestataires décrite en 2.2.1.1. Comme évoqué précédemment, les prescripteurs spécialisés sur les questions de végétalisation sont encore trop souvent sollicités en fin de projet au lieu d'être intégrés dès la phase de conception [BE2, 2023]. Il arrive que les entreprises d'espaces verts, généralement retenues pour la préparation des sols et les semis, ne soient compétentes que sur un des aspects de la végétalisation, et doivent sous-traiter une partie des services à d'autres entreprises (taille, plantation, semis...), ce qui peut avoir des conséquences sur la maîtrise de la qualité d'exécution et le respect d'application de la chaîne de valeurs du MOA [P2, 2023].

### ***Fournisseurs de semences et fournisseurs de conseils en ensemencement***

Outre les BE, les producteurs de semences ont souvent un rôle à jouer dans le conseil et l'accompagnement des MOA et des MOE dans le cadre des projets. Différents canaux d'achat existent pour l'approvisionnement en semences. Un moyen historique classique est le passage par des sociétés d'engazonnement, travaillant elles-mêmes avec un réseau de fournisseurs conventionnels de mélanges de semences à gazon ou à visée paysagère. Ces entreprises de dimension souvent internationale sont éloignées des enjeux et considérations écologiques, et fournissent des semences standardisées largement utilisées pour le « verdissement » des terres dans différents cas d'application. Un second moyen est le passage par un intermédiaire commercial, doté d'une connaissance des fournisseurs semenciers conventionnels, mais aussi parfois de réseaux plus locaux de fourniture. Ces commerciaux collectent les exigences formulées au sein des projets et réalisent la commande en fonction. Là encore, ils n'assurent aucun rôle de conseil et ne disposent pas de vraie expertise écologique ou technique sur le végétal. Le dernier moyen est de faire appel à des semenciers locaux, dédiés en partie ou complètement à la production de semences différenciantes sur le plan technique ou écologique, pouvant aller jusqu'à des semences d'espèces indigènes, sauvages, adaptées aux conditions locales d'implantation. En France, les bénéficiaires de la marque Végétal local, décrite au 2.2.2.3, en sont les plus représentatifs, bien que d'autres semenciers produisant des végétaux locaux issues de collectes en milieux naturels et n'adhérant pas à la marque existent [BE1, 2023].

Ces semenciers sont implantés au sein des territoires et disposent généralement d'une longue expérience dans la fourniture de semences. Ils accumulent de nombreux retours d'expérience sur la réussite des opérations de végétalisation au vu du choix des modalités de mise en place, des espèces ou encore des modes de gestion. Ils possèdent également souvent des connaissances en écologie leur permettant une meilleure appréciation de l'adéquation entre les espèces et le site d'accueil, et des dynamiques d'évolution des communautés après implantation. Ces connaissances sont parfois sollicitées par les MOE dans le cadre de la rédaction des projets, voire par les MOA pour l'établissement des CCTP. On note cependant que le temps accordé par les producteurs à l'adaptation de la palette de semences à utiliser dans le cadre d'un projet, ou des conseils sur la préparation des sols n'est souvent pas rémunéré. De plus, ce temps de préparation de l'offre n'accorde aucune garantie que le demandeur fera appel à eux pour l'achat des semences *in fine*.

De ce fait, certains producteurs proposent également des services d'expertise et de conseil comme le ferait un BE, soit dans le cadre d'une assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO), soit en appui aux bureaux d'études chargés des projets (MOE). Ils peuvent ainsi être impliqués dès la phase de conception des chantiers pour la formulation de préconisations sur la composition des mélanges, le mode de semi et les opérations de gestion, mais aussi sur le terrassement (*e.g.* la création de microreliefs) ou encore la gestion de l'eau en fonction des compétences portées par les structures [P2, 2023]. Toutefois, la prise de contact directe avec les producteurs n'est pas encore ancrée dans les pratiques des prescripteurs conventionnels, et leur sollicitation est généralement réalisée peu avant la clôture de l'appel d'offre. Cela ne laisse pas la possibilité d'un accompagnement approfondi, alors qu'un minimum de temps

passé sur le terrain et en présence des parties prenantes du chantiers est nécessaire à un accompagnement sérieux sur la végétalisation [P1, 2023]. Si les échanges entre producteurs et prescripteurs/porteurs de projets permettent une montée en compétence de ces derniers (cf 2.3.1.1) et une meilleure intégration des opérations de végétalisation aux projets d'aménagement [P3, 2023], ils restent encore trop rares. Du fait des habitudes de fonctionnement et de la prise en charge quasi-systématique au sein des grands projets des questions de végétalisation par des BE paysagistes, les appels aux producteurs se limitent souvent à une sollicitation de dernière minute afin de confirmer une palette végétale sans requérir leur implication dans la définition des besoins du projets [P1, 2023]. Cela induit une mauvaise anticipation des besoins et des commandes passées auprès des fournisseurs (cf 2.3.1.2)

### **2.2.2 Evolution historique des attentes, fonctions et pratiques de végétalisation au sein des projets d'aménagement**

Dans cette section, nous tenterons de comprendre comment la fonction et les réflexions sur la végétalisation ont évolué au cours du temps, en se concentrant particulièrement sur les grandes infrastructures linéaires de transport. Nous étudierons en particulier les autoroutes mais également les voies ferrées, avec une mise en perspective avec d'autres types de projets implantés au sein de milieux plus préservés comme des ouvrages hydroélectriques, et des projets à finalité de restauration écologique. Nous établirons des liens mais présenterons aussi les oppositions existantes entre les positions d'acteurs issus de domaines d'études et professionnels divers afin de dresser un tableau représentatif des logiques appliquées aux actions de végétalisation. Nous nous concentrerons majoritairement sur la période allant des années 1950 à nos jours, avec un intérêt plus particulier sur les changements opérés à partir des années 1990. Le focus principal sera accordé aux applications françaises, mais nous offrirons régulièrement des perspectives internationales car l'évolution des réflexions sur le sujet a été menée de manière plus ou moins concomitante dans plusieurs pays. Bien que ce travail se concentre sur les mélanges herbacés de végétalisation, des mentions seront faites à propos des plantations et de la gestion des espèces ligneuses, en partie car certains acteurs sont encore très peu informés sur les herbacées, mais aussi car la logique est la même quant à l'intégration de pratiques plus écologiques.

#### **2.2.2.1 Pratiques et attentes historiques ordinaires : 1970 - 2020**

Le véritable essor du développement du réseau autoroutier en France a eu lieu à partir des années 1970, aux balbutiements de l'intégration des préoccupations écologiques au sein de la politique globale et de la population. Aux Etats-Unis, le réseau autoroutier était alors déjà bien développé, et les considérations écologiques dans la planification du réseau étaient alors inexistantes [Federal Highway Administration, 2007b]. La France comptait environ 1000 kilomètres d'autoroute en 1968, et 4700 kilomètres un peu plus d'une décennie plus tard en 1980 [Berthonnet, 2009]. Aujourd'hui, la France en compte plus de 12'000 kilomètres. La construction de routes, mais également de voies ferrées ou tout autre ouvrage d'aménagement implique des remaniements des sols via des opérations de terrassement.

Au cours des années 1970 et 1980 en France, les choix réalisés sur les modalités de végétalisation se cantonnaient le plus souvent à une logique opérationnelle, avec la prise en compte de considérations d'abord techniques et économiques. A l'époque, les prescripteurs interrogés nous rapportent qu'il n'existait pas de considérations pour ce que l'on appelle aujourd'hui la « biodiversité », ni pour les « espèces exotiques envahissantes ». Les BE avaient alors pour mission de répondre aux attentes des MOA sur la rapidité d'établissement d'un couvert végétal à bas coût, la logique étant alors décrite comme suit : « *on balance des graines sur le terrain, n'importe quoi, ça va faire du vert, et on se casse* » [BE1, 2023]. En ce sens, la grande majorité des végétaux utilisés étaient des mélanges d'engazonnement classiques, composé de ray-grass anglais et autres cultivars couramment retrouvés en d'autres contextes comme les golfs, les terrains de sport ou autres jardins particuliers [A3, 2023]. Ces mélanges étaient et restent peu chers et disponibles en grande quantité auprès de fournisseurs conventionnels dans des délais restreints [Tinsley et al., 2006].

A cette époque, la technique d'hydroseeding, ou ensemencement hydraulique, s'est rapidement développée pour des usages en montagne et dans le milieu autoroutier principalement, pour sa facilité d'exécution en milieux difficilement accessibles et son coût restreint. Cette technique consiste en une projection sous pression d'un mélange de graines, d'eau, d'engrais, de fibres servant à retenir l'eau et de fixateurs (« mulsh ») sur les zones à végétaliser. Née dans les années 50 aux Etats-Unis, elle permet l'implantation d'une strate herbacée sur de large surface quel que soit la portance des sols [Lignier and Rosset, 2012]. L'utilisation de mélanges de semences simples, constitués de cultivars prévus pour germer en conditions favorables sur le plan de l'accès à l'eau et aux nutriments, est très économique et parfaitement adaptée à ce mode d'ensemencement.

*« (...) qui dit terrassement, mouvement des terres, dit risques d'érosion. Donc je pense que l'histoire de la végétalisation a commencé par là : limiter le risque d'érosion. Et puis aussi, limiter l'impact visuel, tout simplement. À l'époque, on parlait d'intégration paysagère, c'est-à-dire que ce bulldozer qui a tout cassé, on veut vite en supprimer la blessure. Et donc on met de l'herbe, qui pousse vert le plus rapidement possible pour cacher la misère » [A3, 2023]*

La protection des sols, autrement dit la réduction des processus d'érosion superficielle, est du point de vue de l'aménageur l'enjeu prioritaire de la végétalisation dans la construction des infrastructures linéaires de transport car elle contribue à la sécurisation des ouvrages de circulation [A2, 2023; A3, 2023; BE2, 2023; Crosaz, 2002; Forman et al., 2003]. En effet, l'érosion superficielle peut non seulement lessiver le peu de terre végétale propice au développement d'une végétation qui est étalée sur les talus nouvellement construits, mais aussi conduire à des processus d'érosion plus sévères mettant en péril l'intégrité structurale des talus (ces processus d'érosion sont décrits plus en détail au Chapitre 3). L'importance du couvert végétal dans la réduction de l'érosion a été démontrée dans plusieurs contextes (*e.g.* talus de montagnes, hauts-plateaux pâturés, berges de rivières, talus autoroutiers, champs cultivés) et sur plusieurs continents (*e.g.* Allemagne, Espagne, Etats-Unis, Chine, Belgique, Brésil) [Bochet et al., 2009, 2002; Huc et al., 2022; Li et al., 1992b, 1992a; Morgan, 2005; Reubens et al., 2007; Simon and Collison, 2001; Wischmeier, 1975; Wischmeier and Smith, 1978].

Pour garantir le ralentissement des processus d'érosion dans le temps, il est nécessaire que le couvert végétal initialement mis en place par le semis persiste plusieurs années, avant que d'autres espèces issues de l'expression de la banque de graines et de dispersion naturelle, ou encore les espèces ligneuses plantées ou spontanées, s'établissent de façon plus pérenne [Crosaz, 2002]. Comme nous le verrons par la suite, ce maintien du couvert dans le temps dépend de plusieurs paramètres, dont celui de la diversité des espèces implantées ainsi que de la capacité du milieu environnant à favoriser un processus de succession. L'emploi de semences d'engazonnement a rapidement montré ses limites en ce sens, montrant un manque de maintien du couvert dans le temps, et menant souvent à ce qui est qualifié d'« échec technique » des opérations de végétalisation :

*« On semait des mélanges à gazon parce qu'on voulait refaire des gazons sur les talus autoroutiers (...) ce qui d'un point de vue écologique n'est pas une bonne chose puisque souvent ces mélanges n'étaient pas du tout adaptés. Alors ça donnait l'illusion les premiers mois, s'il y avait un peu de flotte, avec le ray-grass notamment, de verdier rapidement. Et puis dans le temps, on s'apercevait que ça ne tenait pas la route. » [A3, 2023]*

Outre la volonté de limiter les coûts et protéger les sols, les aménageurs ont commencé à introduire au cours des années 1980 – 1990 des critères d'exigences esthétiques, afin de favoriser l'intégration paysagère des projets et ainsi favoriser leur acceptabilité par les riverains des territoires traversés par ces ouvrages. On note que cette recherche d'esthétique est arrivée en décalage, comme nombres d'autres initiatives liées à l'évolution des pratiques de végétalisation, avec un retard d'au moins une décennie par rapport aux Etats-Unis [Harper-Lore and Wilson, 2000]. Les aménagements linéaires sont régulièrement décrits comme des cicatrices dans les paysages, et atténuer leur présence apparaît comme un devoir vis-à-vis des habitants alentour [A1, 2023; BE1, 2023]. La volonté d'effacement de cette cicatrice a fait évoluer le fait de « faire du vert », vers le choix de cortèges d'espèces horticoles produisant des fleurs visibles, à la manière d'un jardin ornamental, comme on a pu le voir sur certains projets autoroutiers du sud de la France [Coumoul and Mineau, 2002]. Par opposition, d'autres acteurs cherchaient plutôt à introduire des espèces indigènes et à favoriser le retour d'une flore locale afin de mieux intégrer l'ouvrage aux paysages environnants [A2, 2023; A4, 2023].

Du point de vue des gestionnaires d'espaces, c'est-à-dire les maîtres d'ouvrages et concessionnaires responsables du maintien, du suivi et de l'exploitation des ouvrages, le critère prédominant dans le choix des végétaux était, et est encore aujourd'hui la nécessité d'une gestion facilitée [A1, 2023; A5, 2023]. La gestion des abords autoroutiers émane d'une nécessité de sécurisation des abords de la voie à travers le maintien de la visibilité pour les usagers [Federal Highway Administration, 2007b; Forman et al., 2003]. La demande des gestionnaires auprès des aménageurs était alors de sélectionner des espèces à croissance lente, dont la taille maximale reste contenue afin de ne pas avoir à multiplier les opérations de fauche dans l'année. Ces critères se retrouvent d'ailleurs pour les espèces ligneuses, avec des végétaux ne se développant pas trop latéralement afin de ne pas avoir de tailles trop régulières à effectuer aux abords des voies. Il faut bien voir que les emprises de domaines autoroutiers, tout comme les talus de montagne par exemple, présentent des conditions d'accès difficiles rendant les opérations de gestion coûteuses : terrain présentant de fortes pentes et



nécessitant la mobilisation de machineries spécifiques, zones uniquement accessibles par la coupure de voies de circulation, très grandes surfaces à gérer [Crosaz, 2002].

Les années 1990 – 2000 ont vu l'arrivée de considérations nouvelles dans la conception des opérations de végétalisation et la gestion des zones végétalisées. Tout d'abord, nombre d'acteurs parmi les prescripteurs et les aménageurs ont cherché des solutions afin de réduire les risques d'échecs techniques. Un travail commun émanant d'initiatives volontaires ou soutenues par des programmes de recherche ont émergé afin de faire évoluer les cortèges d'espèces semées dans un but de pérennisation des couverts végétaux [A1, 2023; BE1, 2023] (cf. 2.2.2.2). La volonté persistante de réduire les coûts tout en établissant une végétation plus pérenne a conduit à une réduction des doses de semis, d'engrais, à un laisser-faire à la fois sur les zones à ensemercer et une réduction considérable des efforts de gestion [A2, 2023]. Dernièrement, la prise de conscience des effets présents et futurs liés aux changements climatiques ont fait naître une recherche d'espèces plus résistantes aux épisodes de forte chaleur, et capables d'un bon enracinement, tant pour les ligneux que pour les herbacées [BE2, 2023].

Cette période a été également marquée par une émergence de la considération des aspects environnementaux au sein des projets, notamment par la volonté de réduction de l'usage de produits phytosanitaires et de limitation de la gestion, impliquant une adaptation des mélanges semés [A3, 2023] :

*« (...) il y a eu une prise de conscience. Il fallait qu'on limite nos impacts et qu'on favorise la réapparition d'habitats un peu spécifiques. On est passé d'une position très technique — stabilisation des talus — à une réflexion où on s'est dit : 'il faut arrêter de faire du mono spécifique, il faut qu'on adapte nos objectifs' » [A2, 2023]*

L'idée d'une végétalisation plus réfléchie s'est propagée, avec un travail plus poussé sur les mélanges et les techniques, l'utilisation de semences indigènes voire sauvages, afin de réaliser une "aide à la restauration végétale", aux moyens notamment de « mélanges starter » (cf. 2.2.3.2) ou la sélection d'espèces structurantes des milieux détruits et à reconstituer en vue d'initier une succession végétale [A4, 2023; BE1, 2023].

*« On plante de moins en moins. Par contre le semis a bien progressé ; alors il n'a pas forcément progressé en quantité, mais surtout en qualité. C'est-à-dire que l'on sème des choses complexes par rapport à ce qu'on pouvait semer dans les années 70 ou 80.*

*(On cherche des) mélanges de semis plus adaptés, et on essaye plutôt d'installer des dynamiques végétales, pour laisser finalement la dynamique naturelle se mettre en place plutôt que de vouloir créer de toutes pièces » [A3, 2023]*

On observe cependant que, dans ces années 1990-2000 l'intégration de critères environnementaux ne s'appliquait pas encore aux concessionnaires des réseaux autoroutiers. Les réflexions autour de la constitution des mélanges étant cantonnées au champ des projets, l'évolution des pratiques chez les gestionnaires de sites autoroutiers restait encore très limitée. En 2004, la seule source de documentation citée par un des gestionnaires autoroutiers interrogés était un guide technique d'entretien de la végétation, indiquant par exemple la

nécessité de fauchage ou d'usage de produits phytosanitaires sur une bande de deux mètres autour des clôtures, ou encore des préconisations visant à améliorer l'aspect visuel global des zones entourant l'ouvrage :

*« Il y avait des zones floues, je me souviens avoir abattu des arbres juste parce que je trouvais que cela faisait plus beau ; et il n'y avait aucune considération pour la biodiversité il y a une vingtaine d'années, ni de notion d'impact environnemental. Il avait des gens qui commençaient à dire que ce serait bien que l'on gère un peu mieux notre patrimoine pour bien l'entretenir, mais ils étaient peu entendus. » [A5, 2023]*

A partir des années 2010, la notion de biodiversité était déjà bien intégrée par l'ensemble de la société, et la logique d'une poursuite systématique d'esthétisme a évolué vers : *« comment (...) rendre notre aménagement plus écologique ; et là où il y a peu ou pas d'enjeux écologiques, (...) comment le rendre esthétique ? »* [A1, 2023]. Il semble alors qu'un changement de paradigme se soit opéré du point de vue des aménageurs dans une certaine mesure. Les enjeux techniques n'en demeurent pas moins présents jusqu'à aujourd'hui, mais une partie des efforts de montée en compétence se sont alors redirigés vers les aspects environnementaux sous la pression de la demande des porteurs de projets, des réglementations et de la société. Par ailleurs, une question aujourd'hui plus que jamais prégnante a pris de l'importance à cette époque : la gestion des espèces exotiques envahissantes [A1, 2023; A4, 2023]. Les MOE devaient alors s'engager sur cette question, en menant des opérations d'éradication, mais également en mettant en place des solutions visant à limiter leur introduction et leur dispersion. Cela passait par une meilleure prise en compte de la traçabilité des végétaux importés, un recouvrement rapide des zones terrassées vulnérables, ainsi qu'une gestion adaptée des emprises vertes.

Aux dires des acteurs, les attentes de la part des porteurs de projets se sont étoffées et accélérées sur le plan de la biodiversité, imposant une montée en compétence des prescripteurs sur les questions de végétalisation [A4, 2023]. Les demandes ne sont toutefois pas toujours bien formulées, ou encore trop peu pertinentes vis-à-vis de la disponibilité actuelle de certaines semences sur le marché. L'évaluation des besoins en fonction du contexte et des objectifs, l'accompagnement des demandeurs et la mise en place de pratiques innovantes (e.g. impliquant l'usage de semences sauvages et locales) nécessitent un réel savoir-faire écologique qu'encore trop peu maîtrisent chez les prescripteurs et les MOE [A4, 2023] (cf 2.3.1.1). Des évolutions notoires ont toutefois été observées au cours des 15 dernières années chez les acteurs intéressés et impliqués dans la démarche d'évolution des pratiques de végétalisation, permettant d'aller des principes d'écologie théorique à une écologie opérationnelle. Certains acteurs procèdent en effet désormais à la vérification de la faisabilité au moment d'établir le CCTP, la capacité des prestataires à mettre en œuvre les préconisations, la disponibilité des espèces auprès des fournisseurs ainsi que de l'origine des espèces. Cela conduit à la capitalisation sur les retours d'expérience, et la professionnalisation de la filière de la restauration avec l'appui de réseaux et associations (AI-GEco, UPGE, REVER), la création de nouveaux outils (marque VL)... [A4, 2023]

« Le plus important c'est de dire : il faut arrêter de vouloir faire du vert et simplement faire du vert. Je pense qu'il faut plutôt réfléchir à ce qu'on met en place pour le milieu, pour l'intérêt du milieu, essayer de recréer un milieu vivant, en capacité de cicatriser. » [A3, 2023]

### **2.2.2.2 Emergence de réflexions sur la nature et l'origine des espèces semées**

#### **2.2.2.2.1 Diversité des espèces et indigénat**

Nous avons présenté l'évolution des attentes et pratiques courantes liées à la végétalisation au sein des projets d'aménagement linéaires ainsi que dans d'autres contextes. Nous aborderons maintenant l'évolution des réflexions et des initiatives de la part des acteurs au cours du temps afin de répondre aux enjeux techniques et écologiques liées à ces attentes.

Afin dans un premier temps de limiter les risques d'échec technique des opérations de végétalisation, c'est-à-dire l'absence d'établissement ou de maintien dans le temps d'un couvert végétal, les acteurs de l'aménagement autoroutier ont commencé à engager des réflexions sur la nature des cortèges d'espèces utilisés. Dans les années 1980, il n'existait pas encore de filière de production de semences d'espèces indigènes pour un usage à large échelle, et les seules semences disponibles en grande quantité étaient des espèces sélectionnées pour l'agriculture, pour les terrains de sport, pour l'horticulture ou des semences d'origine exogène [A1, 2023; A2, 2023]. Des initiatives informelles naissent alors, comme l'association entre un industriel de la semence horticole et un engazonneur pour le développement de mélanges paysagers, visant à intégrer certaines espèces indigènes comme la flouve odorante (*Anthoxantum odoratum*) ou la coronille (*Coronilla varia*) afin de développer des solutions de fixation des sols plus pérennes [A2, 2023]. Il faut bien voir que certaines zones à végétaliser présentent des conditions peu favorables à l'installation de la flore, comme des talus de montagne, ou des pentes de déblais au long des infrastructures linéaires. La flore spontanée ne peut alors compenser une expression médiocre des mélanges semés, renforcée par un manque de maîtrise sur les périodes de semis en raison de la temporalité segmentée de réalisation des projets, et l'usage de semences non adaptées. C'est ce qui a conduit les aménageurs à rechercher des cortèges de végétaux plus diversifiés et adaptés aux conditions des sites d'accueil, dont la traçabilité est garantie et présentant de bons taux de germination [Crosaz, 2002].

A partir de la fin des années 90, le regroupement d'acteurs autour de ces questions a permis une montée en compétence de la profession. On peut citer par exemple le Syndicat National des Entreprises d'Engazonnement par Projection (SNEEP), aujourd'hui intégré à l'Union Nationale des Entreprises du Paysage (UNEP), ayant permis l'établissement d'une charte de qualité autour des pratiques de végétalisation afin de réduire l'érosion et mieux intégrer l'environnement en leur sein [Lignier and Rosset, 2012]. En Suisse, des documents guide équivalents sont édités dès le début des années 70. Aussi, poussé par la volonté d'une meilleure intégration des aménagements paysagers au sein de leur projets, de nombreux projets de recherche ont émergé, portés notamment par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) ou le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). Côté ferroviaire, on peut citer un programme de recherche et développement lancé en 1996 sur la ligne à grande vitesse « TGV Méditerranée », en collaboration avec le Centre d'Étude du

Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts (CEMAGREF), l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et un BE. Il visait à tester l'intérêt de nombreux cultivars habituellement utilisés pour un usage fourrager ou d'engazonnement dans un contexte de végétalisation, juger de l'utilité des semences sauvages disponibles à l'époque pour cet usage, établir un lien entre critère de qualité et succès des opérations, ajuster les dosages d'espèces au sein des mélanges et enfin établir une méthode de suivi à large échelle des zones végétalisées [Crosaz, 2002].

Côté ligneux, à la suite du Grenelle de l'environnement, la politique en matière de végétalisation s'est orientée vers une préférence donnée à l'utilisation prioritaire de ligneux indigènes sur les territoires. Ainsi, certains bureaux d'études travaillant pour les grands aménageurs se sont conformés progressivement à cette orientation, bien que des ligneux horticoles aient continué à être implantés sur des projets en contexte urbain et péri-urbain [BE2, 2023]. Sur le projet de l'A19 par exemple (2006-2008), des attentes gravitaient autour de la notion de "transparence écologique" de l'ouvrage. Ainsi, la palette végétale ligneuse était centrée sur des espèces indigènes, sans toutefois encore de considération pour leur provenance géographique. Pour certaines espèces comme le frêne ou l'érable champêtre disposant d'une aire de répartition très large, les graines étaient sourcées en Pologne ou au Portugal notamment [BE2, 2023]. Comme souligné par BE2, la notion d'origine géographique des semences était, et est encore aujourd'hui trop souvent absente au sein des formations d'enseignement supérieur d'agronomie et de paysage.

L'utilisation d'espèces indigènes pour différents usages, y compris la restauration écologique, la réhabilitation de sites endommagés, la phytoremédiation de sols pollués, la revégétalisation de sols remaniés (...) est un sujet de recherche et d'expérimentation depuis le milieu des années 1990 sur la quasi-totalité des continents [Bugg et al., 1997; Corbin and D'Antonio, 2004; Guevara et al., 2005; Hagen, 2002a, 2002b; Harper-Lore, 1996; Helmisaari et al., 2007; Kangas et al., 2009; Loch et al., 1996; Pinaya et al., 2000; Scherer-Widmer, 2001; Singh et al., 2005; Thomson et al., 2009; Wang et al., 2008], ayant connu un pic dans les années 2000 - 2010 et qui continue à être exploré activement de nos jours [De Vitis et al., 2017; Kramer et al., 2019; Neby et al., 2022]. Ces recherches sont orientées vers différentes finalités, comme la recherche de plantes (1) mieux adaptées aux conditions de sites et présentant un taux de germination et de survie plus important, (2) plus compétitives face aux espèces exotiques envahissantes ou encore (3) écologiquement représentatives de la flore des milieux environnants. La *Federal Highway Administration* aux Etats-Unis a publié plusieurs documents dans les années 2000, souvent cités et pris en exemple à l'international, dédiés à l'utilisation de plantes natives sur les emprises routières, militant pour une adaptation des exigences de la part des MOA, une montée en compétence pour la collecte de semences en nature, une gestion adaptée et un suivi de la réussite des efforts de végétalisation [Federal Highway Administration, 2011, 2007a, 2007b]. Aux dires de certains acteurs, la nécessité grandissante d'intégration des ouvrages à des dispositifs tels que la Trame Verte et Bleue (TVB) a conduit à l'utilisation quasi-exclusive de végétaux indigènes (ligneux et herbacés), même dans le cadre des projets d'infrastructures linéaires, pourtant souvent en retard sur l'évolution des pratiques de végétalisation [A1, 2023].

Aujourd'hui, avec le besoin grandissant des efforts de sauvegarde et de restauration de la biodiversité à différents niveaux d'organisation – écosystémique, spécifique et génétique –, les praticiens intègrent de plus en plus de réflexions sur la traçabilité génétique et géographique des végétaux utilisés en revégétalisation. L'utilisation de végétaux non seulement indigènes, locaux au sens biogéographique, mais également issus de collectes au sein de milieux préservés d'actions anthropiques intensives se développent en France et à l'international.

*2.2.2.2 Végétaux sauvages d'origine locale : convergence d'initiatives et de narratifs, genèse des pratiques et de la marque Végétal local*

La professionnalisation des métiers de la collecte et de la production de semences locales ayant conduit à la création de la marque Végétal local, ainsi que la formalisation de l'usage de végétaux sauvages et locaux sont le résultat d'une accumulation d'initiatives et de pratiques ayant cours depuis plusieurs décennies. Les narratifs de l'évolution des pratiques par différents groupes d'acteurs issus de domaines d'activités distincts sont complémentaires, et ils permettent de comprendre l'historique ayant conduit à l'état actuel des choses. Malgré quelques mentions de la filière ligneuse, nous nous concentrerons, à l'image de l'ensemble de ce travail, sur les semences herbacées.

**Point de vue des acteurs de l'aménagement linéaire de transport**

Du côté des bureaux d'études intervenant au sein des grands projets d'aménagement, BE1 nous explique que l'idée d'élargir la palette des végétaux herbacés accessibles pour une utilisation sur les chantiers d'infrastructures linéaires est née dès la fin des années 1980. A travers des travaux de recherche effectués conjointement avec le SETRA (actuel Cerema), une liste d'espèces adaptées à la revégétalisation en zone méditerranéenne a été établie, comprenant initialement 80 espèces, puis réduite à 15 une fois pris en compte les critères de disponibilité de la ressource *in situ* et les difficultés de mise en production. A sa connaissance, aucune filière de production de végétaux sauvages n'existait en France, et son BE a engagé des travaux de collecte de semences « mères » en milieu naturels, puis passé des contrats avec des agriculteurs de la région pour leur mise en culture afin de les multiplier.

*« Ce que je vous explique, c'est finalement (...) l'ancêtre, et qui n'était pas du tout formalisé, de Végétal local, (...) une marque et (...) toute une démarche. C'étaient les premiers pas de cette démarche-là, fin 80s, début 90s, voilà, des choses que les gens de Végétal local ignorent peut-être. » [BE1, 2023]*

Selon lui, les bureaux d'études ont donc largement contribué à la naissance de cette démarche, bien que cela n'ait pas été référencé car n'ayant pas fait l'objet d'un travail de recherche fondamentale débouchant sur des publications. Cette contribution est notamment passée par l'animation au début des années 2000 d'un groupe de travail qui donnera plus tard naissance à Plante & Cité, organisme national d'études et d'expérimentations, acteur central dans la création de la marque Végétal local. Au sein de ce groupe de travail étaient présents les services de l'Etat, les MOA, les BE et les pépiniéristes, tous d'accord sur le principe de création d'une marque, mais soucieux du manque de demande sur le marché de l'époque [BE1, 2023].

BE2, plus spécialisé sur la question des ligneux, livre des informations sur le projet de ligne à grande vitesse (LGV) Tours-Bordeaux, comme une étape marquante de la structuration de la filière de végétaux sauvages d'écotypes locaux. Le projet a été initié en 2012 et livré en 2017, et l'Etat, à l'origine de la commande, avait posé des exigences quant à l'utilisation exclusive de végétaux sauvages et locaux. Aux dires de A2, l'Etat a même indiqué préférer une absence de semis herbacés plutôt qu'une végétalisation réalisée avec des mélanges commerciaux. Face au manque de disponibilité en semences, et considérant les risques d'érosion et d'envahissement des sols remaniés, la décision a finalement été prise de réaliser un ensemencement avec des mélanges conventionnels [A2, 2023]. Pour ce qui est des ligneux en revanche, la formulation anticipée des exigences par l'Etat et la coordination entre les entreprises en charge des aménagements paysager et les pépiniéristes ont permis la collecte et la production de plants sauvages et locaux pour l'ensemble des besoins du projet. Cette initiative a engendré un surcoût d'environ un million d'euros, et n'aurait pas été retenue sur la simple initiative du MOA sans la contrainte posée par les services de l'Etat (DREAL). Cette démarche a toutefois eu des retombées positives, avec la formation d'un exemple d'utilisation de plants sauvages et locaux à grande échelle. Elle a incité les porteurs de projets à intégrer des exigences supplémentaires liées à la nature des végétaux utilisés en leur sein, qui se sont retrouvées au sein de projets ultérieurs comme l'élargissement de l'A10 ou la construction du COS. BE2, constatant la bien meilleure reprise des végétaux en comparaison à celle relevée sur d'autres projets comme l'A19, réalise depuis 2017 des collectes de graines en région Centre où la filière était jusqu'alors quasi-inexistante [BE2, 2023].

#### ***Point de vue des acteurs de la recherche et de la restauration des milieux de montagne***

Pour les acteurs de la recherche et de la restauration des milieux de montagne, la question de l'usage de végétaux sauvages et locaux s'est posée au début des années 90 dans le cadre de la restauration de milieux de montagnes affectés notamment par les terrassements récurrents et les usages récréatifs liés à la pratique du ski dans les Alpes. Des projets de recherche et d'expérimentation sont nés, impliquant le CEMAGREF, le CBNA, la CNR et des producteurs semenciers, pour l'emploi de mélanges comprenant des semences sauvages et locales à des fins de « reverdissement » des pistes de ski [Dinger, 1995]. Toutefois, le contexte à cette époque était à l'ouverture des marchés mondiaux de la semence, et l'argument économique semble avoir pesé négativement sur le développement de la démarche malgré les avantages techniques proposés.

La problématique spécifique de restauration de milieux de montagne implantés en cœur de Parc National au sein du massif pyrénéen a fait ressurgir la question, et conduit le CBNPMP à explorer l'idée de la création d'une filière de production de semences sauvages et locales. La production à petite échelle, dans un marché de niche et nécessitant des efforts de collecte et de production élevés induisent un coût élevé de la semence. Néanmoins, les expérimentations menées à la fin des années 1990 concluent à la possibilité de réduire drastiquement les doses de semis appliquées pour l'obtention de résultats similaires aux semis conventionnels, ce qui réduit les coûts et contribue grandement à l'acceptabilité de ce type de production [Malaval et al., 2015]. Des études prospectives de marché sont menées à partir de

1998 et l'idée de formation d'une filière se concrétise en 2000. En 2010, la marque Pyrégraine de nèou est créée. Face à ce succès, une initiative est relancée dans les Alpes, avec la formation du programme Alp'Grain en 2011 pour le développement d'une filière de production de semences sauvages et locales en réponse aux demandes pour la végétalisation des prairies d'altitude, suivi en 2016 par le programme Sem' les Alpes. Les principales parties prenantes de ces programmes sont alors l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA, anciennement CEMAGREF) et le CBNA.

### ***Point de vue des producteurs et autres acteurs de la marque Végétal local***

Les producteurs nous offrent une vision de l'évolution du marché de la semence et de la demande au cours du temps. P3 a lancé son activité de semencier en 1973, avec la distribution de mélanges d'engazonnements. Son offre s'est enrichie par la suite avec des herbacées à fleurs horticoles pour la réalisation d'aménagements paysagers. Jusqu'aux années 2000, la demande ne comprenait pas de considérations environnementales, et les critères étaient centrés sur le prix à l'achat et la rapidité d'établissement et de croissance du couvert végétal. L'intégration grandissante de critères environnementaux au sein des projets, et la création par exemple de plus en plus de prairies fleuries au sein des collectivités, ont représenté une opportunité pour les producteurs de diversifier leur palette végétale. Le constat d'échec technique de ces opérations, en raison d'une mauvaise expression des cortèges floraux ou d'un mauvais établissement du couvert végétal, a motivé la production de semences sauvages [P2, 2023; P3, 2023]. Le constat plus récent de l'impact des effets du changement climatique sur la mortalité des plantes issues de semences commerciales, notamment en zone méditerranéenne et en zones montagnardes, ont accéléré l'évolution des pratiques de végétalisation et la considération de l'usage de végétaux sauvages et locaux, plus adaptés aux conditions locales et à leur évolution, comme une solution possible [P2, 2023].

En Europe, les gros producteurs de semences sont des entreprises du secteur industriel, souvent multinationales, avec les hollandais et danois en tête de liste, dont le commerce est basé sur la sélection variétale des semences. Ces produits ne sont pas du tout appropriés pour la réalisation de travaux à visée environnementale, car ne présentant pas les caractéristiques fonctionnelles retrouvées chez les écotypes sauvages. De plus la démarche de commercialisation est à l'opposé de celle de Végétal local : c'est une logique de brevet, impliquant une notion de propriété sur un élément de nature qui a été sélectionné pour des critères précis. Les végétaux marquée VL, au contraire, n'appartiennent à personne sinon à "l'environnement", et sont employés comme moyen pour restaurer la faune et la flore [P3, 2023]. Cette notion de valeur se retrouve dans le discours d'autres producteurs bénéficiaires de la marque et des acteurs interrogés issus des domaines de la conservation de la nature, et a constitué une des bases philosophiques de création de la marque et un moteur de la démarche d'évolution des pratiques de végétalisation.

### ***Convergence des acteurs et création de la marque Végétal local***

La convergence des idées présentes autour de la création d'une filière de végétaux sauvages et locaux a mené à la formation de groupes de travail et de réflexions entre le réseau des CBN, l'Association française des arbres champêtres et Agroforesteries (AFAC-

Agroforesteries) et Plante & Cité. Le projet de construction de la ligne LGV Tours-Bordeaux pour la SNCF (précédemment décrit) impliquant l'utilisation de plus de 700'000 plants ligneux, et celui de restauration des berges de la Romanche mené par EDF pour lequel 300 kilogrammes de semences sauvages et locales ont été utilisées, ont contribué à donner confiance à l'ensemble du secteur concernant la présence d'une demande et la faisabilité des initiatives. Enfin, la réponse conjointe du CBNPMP, de Plante & Cité et de l'AFAC-Agroforesteries à un appel à projet émanant du Ministère de l'Ecologie dans le cadre de la Stratégie Nationale pour la Biodiversité a conduit en 2015 à la création de la marque collective Végétal local. Végétal local a été lancée à un moment opportun au regard de la prise en considération des enjeux écologiques et de l'importance de la biodiversité. Les aménageurs et gestionnaires ne pensent plus seulement à "faire du vert", mais témoignent d'un réel intérêt et d'un réel effort pour faire évoluer leurs pratiques de végétalisation. La marque a ainsi contribué à accélérer cette prise de conscience en proposant des alternatives applicables aux pratiques conventionnelles en place dans le monde de l'aménagement [VL1, 2023].

*« (...) aujourd'hui y a aussi une prise de conscience (...) donc on se rend compte que la biodiversité ce n'est pas juste mettre un nombre d'espèces, c'est mettre aussi les bonnes espèces avec leur bonne diversité génétique. (...) je dirais qu'on n'a pas forcément réinventé les choses avec Végétal local, mais on est arrivé dans un contexte, et on a boosté le contexte de volonté de restaurer la nature, restaurer la biodiversité » [VL1, 2023]*

### **2.2.2.3 Végétal local : une marque pour la biodiversité**

#### **2.2.2.3.1 Principes fondateurs, mise en œuvre et critères d'exigence**

Telle qu'elle se définit, la marque Végétal local est « un outil de traçabilité des végétaux sauvages et locaux » [Végétal local, 2019]. Elle encadre les pratiques de ses bénéficiaires relatives à la collecte, la multiplication et la distribution d'une liste d'espèces végétales attributaires au sein de régions d'origines [Végétal local, 2022]. Elle base ses principes et leur mise en application sur deux documents fondateurs : Le Règlement d'usage et le Référentiel technique. Le règlement d'usage encadre l'ensemble des modalités de candidature, d'attribution et d'usage de la marque par les bénéficiaires, ainsi que les contrôles et sanctions applicables pour tous mésusages de la marque ou non-respect de son référentiel technique. Le référentiel technique détaille quant à lui l'ensemble des règles obligatoires et/ou recommandées relatives à la collecte des végétaux en milieu naturel, à leur production et à la traçabilité exigée.

Les trois objectifs majeurs de la marque sont (1) la fourniture de garanties sur l'origine des végétaux pour l'utilisateur, (2) la fourniture de lots de végétaux génétiquement diversifiés et adaptés aux conditions locales d'implantation, et enfin (3) le développement de filières de production locales et non délocalisables. Pour cela, la marque se base sur un découpage territorial en 23 Régions d'origine, dont 11 en France métropolitaine et 12 autres pour les territoires ultra-marins. Les végétaux attributaires sont collectés, produits et réimplantés au sein de la même région d'origine. Les finalités écologiques sont le maintien ou la restauration des fonctionnalités écologiques du milieu d'implantation, la conservation du potentiel adaptatif des végétaux (notamment face aux effets du changement climatique), la



conservation des interactions avec la faune et la flore locales, et enfin la favorisation d'une résilience globale des écosystèmes [Végétal local, 2019]. Il est important de noter que la marque ne s'inscrit pas dans une démarche de qualité, au sens conventionnel des métiers de la semence, par l'affichage de taux de germination ou de vitesses de croissance. Cela peut être problématique aux yeux de certains utilisateurs habitués à la fourniture de semences par les voies du marché conventionnel (cf 2.3.1.2.3).

Les régions d'origine de la marque ont notamment été définies sur la base d'ensembles géologiques, floristiques, pédologiques et bioclimatiques du territoire français. Toutefois, au moment de la construction de la marque, une négociation a été nécessaire avec les producteurs déjà en activité sur le territoire et susceptibles de se constituer bénéficiaires afin de préciser les contours de ces régions d'origine [VL1, 2023]. Les inquiétudes majeures étaient d'une part que la taille des unités géographiques soit trop restreinte pour permettre une demande suffisante en leur sein, et d'autre part que la charge de travail liée à la collecte et la production soit trop importante pour permettre une activité économiquement viable pour les producteurs [BE1, 2023]. Pour ces raisons, la prévision initiale de constitution de 40 régions sur le territoire métropolitain a finalement été réduite à 11, établissant ainsi un compromis entre les critères écologiques et de marché [VL1, 2023]. La délimitation de ces régions est jusqu'à aujourd'hui soumise à contestations, que ce soit du fait d'arguments économiques ou écologiques. Afin de permettre la formulation de demandes plus spécifiques en relation avec la provenance des végétaux, certaines régions d'origine sont découpées en unités naturelles.

Si des compromis ont été faits sur la délimitation des régions d'origine, les modalités initialement prévues par le référentiel technique ont été largement conservées, car elles sont garantes des exigences relatives aux propriétés des végétaux *in fine*, et de la crédibilité de la marque auprès des clients [VL1, 2023]. Ce référentiel édicte des règles générales visant à conserver la diversité génétique et phénotypique du matériel végétal par une limitation autant que possible des mécanismes de sélection par l'Homme lors des processus de collecte et de production, en conservant par exemple les individus présentant des caractéristiques morphologiques ou phénotypiques particulières ou non-recherchées. Pour toutes collectes de matériel végétal attributaire, l'identification des sites sources et de leurs caractéristiques doit être réalisée. Les sites ne doivent pas être soumis à une interdiction réglementaire de collecte et les autorisations du propriétaire ou gestionnaire doivent être obtenues au besoin. Aussi, la collecte doit s'effectuer au sein d'habitats naturels, semi-naturels ou agricoles en fonction des espèces concernées, qui soient anciens et préservés de toute activité de plantation ou de semis — depuis 1970 pour les ligneux et 1990 pour les herbacées. Concernant la collecte de semences d'espèces herbacées plus spécifiquement, le référentiel impose une taille minimum des populations pouvant faire l'objet de collectes ( $\geq 200$  individus), un nombre minimum d'individus sur lesquels collecter les semences ( $\geq 50$  individus), un pourcentage de prélèvement annuel maximum des semences produites par individus ou par population ( $\leq 25\%$ ), ainsi qu'un nombre maximum d'années consécutives de collecte sur une même localité ( $\leq 3$  années). D'autres préconisations sont formulées afin de garantir l'indigénat et la diversité génétique des semences, comme la multiplication des sites de collectes présentant des conditions écologiques similaires pour chaque lot au sein d'une même région d'origine, ou encore l'évitement autant que possible de collectes réalisées au sein de zones ayant subi

des opérations de végétalisation par le passé. A noter que la collecte de semences herbacées peut se faire en mélange d'espèces par broyage notamment. La constitution de mélanges de lots de plusieurs espèces est possible à condition que les semences soient toutes issues d'une même région d'origine, et de préférence issues d'un même type d'habitat naturel. [Végétal local, 2023a]

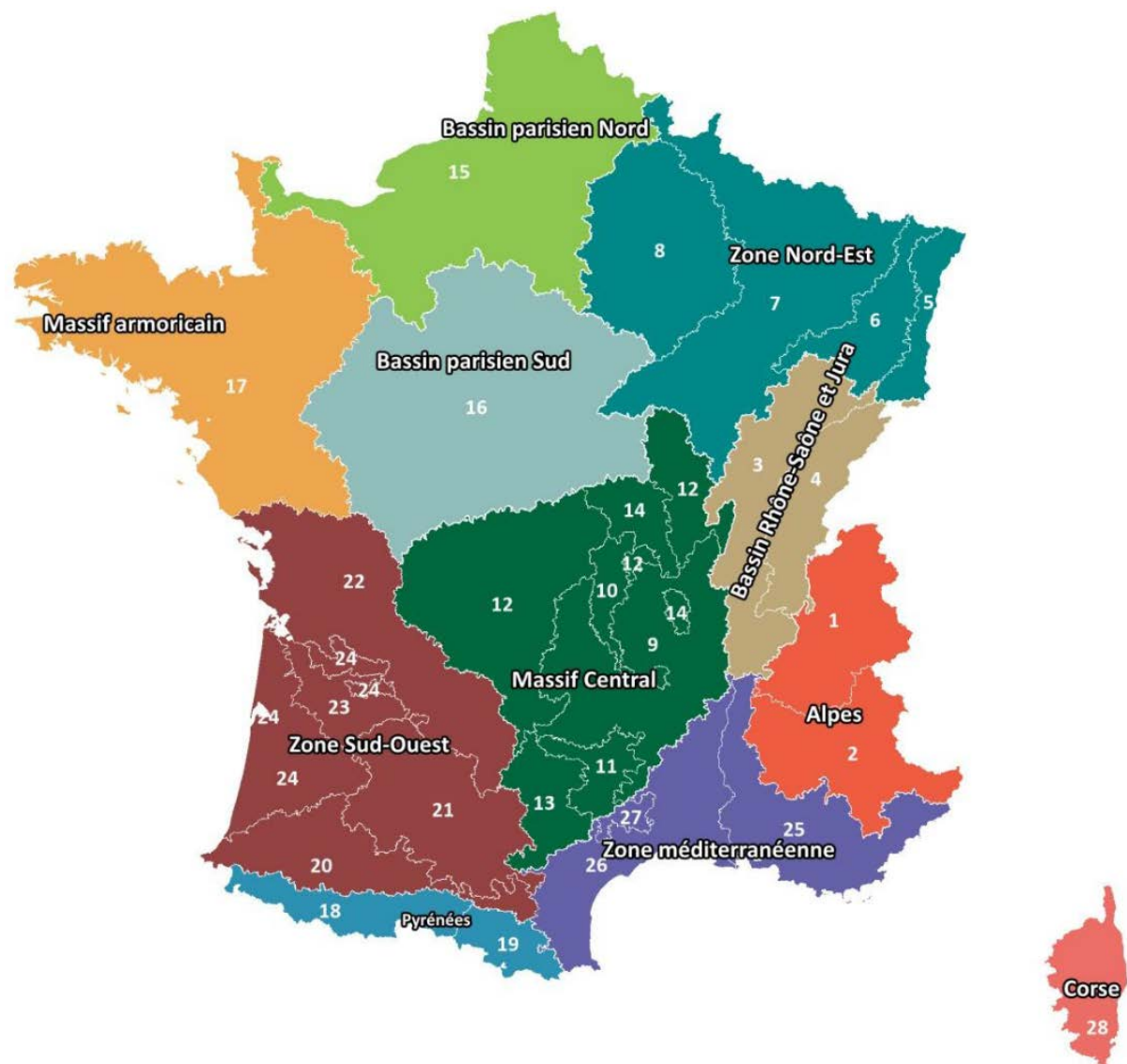


Figure 4 : Carte des 11 régions d'origine et des unités naturelles (découpages numérotés au sein des régions d'origine colorées) du territoire français métropolitain de la marque Végétal local. Réalisation : CBNPMP, AH, Mars 2023. Outil : Admin Express IGN©. [Végétal local, 2023a]

Concernant la production de plants ou la multiplication de semences herbacées, elles doivent de manière générale prendre place au sein de la région d'origine dont les semences sont issues. La multiplication des semences herbacées est limitée à un maximum de 5 générations, sur la base d'un minimum de 50 individus à chaque génération de multiplication afin de garantir la diversité génétique des lots. Afin d'éviter l'introduction au sein des lots de semences d'espèces non-désirées, une vérification visuelle est obligatoire avant chaque

utilisation. D'autres règles relatives à la distanciation entre les parcelles de multiplication et au mélange entre lots et générations de multiplication sont prévues par le référentiel. [Végétal local, 2023a]

Un système pluriannuel d'audit est mis en place, visant à vérifier auprès des collecteurs et producteurs le respect des règles d'usage de la marque ainsi que de l'ensemble des pratiques listées au sein du référentiel technique. Par soucis de transparence et d'équité, cet audit est réalisé par une entité externe, choisie sur appel d'offre. Le titulaire actuel du marché de ces audits est l'interprofession des semences et plants (SEMAE), acteur central de référence dans la réglementation et la régulation du commerce des plants et semences en France [Végétal local, 2019].

#### 2.2.2.3.2 *Gouvernance et organisation*

La marque Végétal local, aujourd'hui propriété de l'OFB, dispose d'un comité de gestion se réunissant deux fois par an afin d'évaluer les candidatures des aspirants bénéficiaires ainsi que pour échanger et débattre d'orientations stratégiques. Ce comité de gestion est composé des membres fondateurs historiques et de l'OFB, et de quatre collègues des autres parties prenantes : les producteurs de végétaux, les utilisateurs, les prescripteurs et enfin les instituts techniques et ministères [Millet et al., 2023].

La marque dispose de correspondants régionaux, pour la plupart membres des différents CBN et du réseau de l'Afac-Agroforesteries, qui se partagent les régions d'origine de la marque. Ces correspondant locaux sont des référents territoriaux de la marque, qui accompagnent les candidats et les bénéficiaires et sont en contact également avec les utilisateurs potentiels de végétaux sauvages et locaux. Côté demande, ils peuvent accompagner les prescripteurs dans leurs recommandations en relisant par exemple les listes d'espèces, fournir un appui aux porteurs de projets, paysagistes, collectivités ou services de l'Etat. Concernant l'offre, ils accompagnent les producteurs dans leur candidature au bénéfice de la marque et dans l'ouverture de leurs gammes de végétaux. Les correspondants locaux des CBN, en tant qu'experts de la flore, ils donnent également un avis sur les espèces pouvant devenir attributaires de la marque pour leur territoire. [VL4, 2023]

Dans le cadre des feuilles de route pour la mise en place des filières de collecte et de production au sein de chaque région, des actions spécifiques liées à la recherche et l'expérimentation sont fléchées. Ces dernières s'intègrent au temps de travail des correspondants locaux et sont en relation étroite avec les compétences des CBN et de l'Afac-Agroforesteries. Par exemple, du fait de la forte présence de ses agents sur le terrain, de la connaissance et des travaux de collecte et de conservation des espèces sauvages d'intérêt, les CBN peuvent orienter les producteurs vers des sites de collecte en milieu naturel, fournir des amorces afin de mener des expérimentations, et aider à la conception des itinéraires techniques pouvant conduire à la mise en production. Certaines espèces peuvent en effet s'avérer difficiles à collecter dans leur milieu naturel, du fait notamment d'une fenêtre de fructification restreinte, du détachement rapide des graines de leur support, de la faible taille des graines, d'une pluriannualité... [VL4, 2023]

### 2.2.2.3.3 *Différentiels apportés par la marque aux acteurs*

La marque peut représenter un différentiel à la fois pour les producteurs qui en sont bénéficiaires, mais également pour les prescripteurs et utilisateurs dans le cadre de la mise en place des projets d'aménagement.

#### ***Point de vue des producteurs semenciers d'herbacées***

Le principal différentiel du point de vue des producteurs est communicationnel. VL fournit un gage de "sérieux" aux producteurs, permettant d'attirer la clientèle et un positionnement des entreprises sur des projets à visée ou enjeux écologiques. Certains producteurs témoignent d'un intérêt croissant des grandes entreprises et des collectivités pour leurs produits et pratiques, exprimant la volonté de visiter les installations et connaître les outils de production [P3, 2023]. La marque représente une très bonne vitrine en raison de sa réputation et de la force de communication des adhérents tels que EDF ou la CNR, et des instances du comité de gestion (Plante & Cité, CBN, Afac-Agroforesteries, OFB). La marque est aujourd'hui connue de la plupart des BE et des grands donneurs d'ordre [P2, 2023].

Le fait d'être bénéficiaire de la marque VL permet également de répondre à des marchés spécifiques [VL1, 2023] car des exigences relatives à l'utilisation de VL sont de plus en plus souvent énoncées au sein des CCTP, malgré les ambiguïtés pouvant exister dans la formulation des prescripteurs et les différences avec ce qui est effectivement mis en place en fin de projet (cf 2.3.1.3) [P1, 2023].

Plusieurs producteurs rapportent avoir débuté la production de végétaux sauvages et locaux bien avant la création de VL, avec parfois l'idée de créer une marque propre disposant de son cahier des charges. Toutefois, cette mise en place est coûteuse et difficile à porter financièrement pour de petites structures [P2, 2023], et peu valorisable s'il s'agit d'une marque portée par un seul producteur. La mise à disposition d'un système d'audit externe et de moyens communicationnels « clef en main », ainsi que l'intégration à un réseau ont permis une valorisation des initiatives préexistantes et une différenciation des PME sur le marché très compétitif de la semence herbacée [P2, 2023; P3, 2023]. Enfin, la marque exerce une pression pour l'évolution des réglementations liées à la production et la commercialisation des semences à déclaration obligatoire (cf 2.3.2.1), et accompagne les producteurs dans les procédures de demandes auprès des instances régulatrices [VL3, 2023].

#### ***Point de vue des prescripteurs et entreprises de l'aménagement***

L'intérêt communicationnel est globalement partagé par les acteurs de l'aménagement, à des fins de valorisation du projet notamment [A2, 2023]. En réponse aux pressions sociétales et aux exigences grandissantes en matière d'environnement, l'usage et la communication autour de la marque peut permettre de montrer que le projet ou l'entreprise adoptent un certain niveau d'engagement en ce sens, ou un respect de la chaîne de valeur si le projet comporte une dimension écologique [VL2, 2023, 2023; VL4, 2023].

La question d'un éventuel différentiel apporté par la marque pour l'obtention de marchés publics semble partagée et dépendante de la finalité des projets. Du côté des infrastructures linéaires, et en l'absence de demandes spécifiques relatives à la traçabilité des

végétaux, l'aspect différenciant semble fortement contraint par les limites financières initialement fixées par le MOA et budgétisées par le MOE. De ce fait, pour certains, cet aspect n'est même pas pertinent à considérer [A2, 2023].

*« C'est sûr que quand on répond à un appel d'offre en disant 'je vais utiliser du Végétal local', ça peut être différenciant par rapport à quelqu'un qui ne le fait pas (...), après il faut voir au niveau du coût quoi. Dans le marché public, il y a un règlement de consultation qui dit : le prix c'est tant et la valeur technique c'est tant en pourcentage" [BE2, 2023]*

A l'opposé, certains acteurs plus impliqués dans le cadre de projets de renaturation ou de restauration écologiques semblent reconnaître le caractère différenciant, voire incontournable de VL dans l'obtention des marchés :

*« (...) nous, dans nos cahiers des charges, on fait référence au label Végétal local. S'il y a le label, c'est bien, sinon, on veut que les exigences du cahier des charges du label soit respecté. Parce qu'en fait nous, on travaillait déjà comme ça avant la sortie (de la marque), on avait déjà des exigences... » [A4, 2023]*

#### **2.2.2.4 Etat des lieux de la filière herbacée de semences indigènes**

##### **A l'international**

(Le concept de semences sauvages et locales n'est pas toujours défini en ces termes lorsqu'il s'agit de filières et d'initiatives internationales, et nous présenterons plutôt dans un premier temps la situation relative aux semences indigènes, concept pour l'instant plus fédérateur aux contours mieux définis et plus consensuels.)

Des initiatives internationales se sont emparées de la question des semences indigènes à but de restauration écologique des habitats dégradés. C'est le cas du Native Seed Network, ou de la Society for Ecological Restoration (SER), qui a créé un réseau (International network for seed-based restoration) rassemblant des professionnels, scientifiques, aménageurs, industriels, associations et politiques autour de cet enjeu. L'« International Standards for the Practice of Ecological Restoration » est un document cadre sur les pratiques de restauration écologique [McDonald et al., 2016], qui comme d'autres, déconseille l'usage de mélanges contenant des espèces exogènes ou des semences dépourvues de traçabilité pour ces usages, mais nous n'avons pas connaissance de propositions de moyens d'action concrets permettant de répondre à ce besoin. En Europe, la Stratégie pour la Biodiversité avait fixé un objectif de restauration de 15% des écosystèmes dégradés pour l'année 2020, impliquant un besoin à large échelle de semences répondant à ces standards, nécessitant une coordination entre acteurs jusque-là absente des politiques publiques [Merritt and Dixon, 2011]. Certaines initiatives internationales existent pour une structuration des filières de production, comme l'European Native Seed Producers Association, née du programme The NAtive Seed Science, TEchnology and Conservation Initial Training Network financé par l'UE. D'autres initiatives de plus petite échelle ont également été identifiées, comme l'UK Native Seed Hub (Royaume-Uni) ou encore le programme Regional Seed Mixtures (République Tchèque, Norvège, Slovaquie).

Une étude de 2017 menée par [De Vitis et al., 2017] auprès de 21 pays européens a recensé un total de 100 structures productrices de semences herbacées indigènes. Sept de ces

pays avaient mis en place une délimitation de régions d'origine (Autriche, République Tchèque, France, Allemagne, Norvège, Suisse et Royaume-Uni). Il semblerait que certains de ces pays soient beaucoup plus avancés sur la formation de filières de production de semences sauvages et locales :

« En Autriche et en Allemagne c'est très développé, (...) ils ont 20 ans d'avance sur nous je dirais, donc ils ont développé de grosses infrastructures de collecte et de production d'espèces sauvages pour la restauration écologique, la revégétalisation, notamment pour les infrastructures et les collectivités, et pour tous les projets d'aménagement ou de de restauration écologique et de génie écologique. » [VL1, 2023]

### **En France**

Nous avons recensé 24 producteurs de semences herbacées bénéficiaires de la marque VL couvrant 10 des 11 régions d'origine métropolitaines (aucun en Corse). La répartition territoriale est cependant relativement hétérogène. Certains producteurs couvrent jusqu'à 6 régions d'origine, en réalisant eux-mêmes la collecte des semences ou en faisant appel à des prestataires, puis font là-encore eux-mêmes ou au moyen d'acteurs locaux la mise en culture avant distribution [VL3, 2023]. Les producteurs susceptibles de faire face aux plus grosses demandes sont généralement des distributeurs historiques déjà établis et issus de l'import-export de semences conventionnelles, ayant adhéré aux valeurs de la marque et cherchant à diversifier leur activité [P3, 2023; VL1, 2023]. D'autres structures sont apparues avec la naissance de la marque [VL1, 2023]. Parmi elles, certaines ne font que du plant ou de la revente directe de semences issues de collectes sans passer par une étape de multiplication, ce qui représente une capacité d'offre en volume très réduite. L'Ile-de-France par exemple, malgré une utilisation massive de semences de revégétalisation due aux nombreux projets d'aménagement, est pour l'instant quasiment dépourvue de producteurs de semences herbacées, à l'exception d'une structure s'adressant plutôt à des particuliers [VL2, 2023]. Globalement, la gestion nationale considère qu'étant donné la jeunesse de la marque, la croissance est très bonne sur les marchés de l'arbre comme de l'herbacée. La marque a même aujourd'hui du mal à faire face au nombre croissant de candidatures pour devenir bénéficiaire, surtout dans la filière ligneuse. Cette croissance en termes de nombre de producteurs et de végétaux proposés est nécessaire car la demande dépasse systématiquement l'offre [VL1, 2023].

Les acteurs de l'aménagement, prescripteurs et entreprises, considèrent généralement d'un œil très positif la démarche et le développement de la marque, mais déplorent le décalage entre le discours et son applicabilité dans les faits. La demande en semences herbacées, bien que naissante, est aujourd'hui en croissance [P2, 2023]. Cet accroissement rapide de la demande, et les obligations de plus en plus fréquentes d'utiliser des végétaux VL émanant des MOA, n'est pas encore en cohérence avec la filière de production du point de vue des aménageurs. Selon eux, l'offre n'a pas la capacité de répondre aux besoins inhérents aux grands chantiers d'aménagement autoroutiers, car tout, y compris les itinéraires de production, est à (re)construire (cf. 2.3.2.2) [A2, 2023; BE1, 2023]. Pour les ligneux, la situation

leur paraît plus favorable en raison de l'existence préalable d'une filière économique bien établie [BE1, 2023].

Depuis la création de VL, c'est la filière des ligneux qui draine le marché du sauvage et local en France, y compris celui des espèces herbacées. Cela s'explique par la présence d'un réseau d'acteurs très bien établis comme l'Afac-Agroforesterie, d'une filière de production plus développée ainsi que des techniques de collecte et de multiplication conservées et plus faciles à mettre en œuvre dans des délais plus réduits. Cette filière de l'arbre et de l'arbuste a impulsé et soutenu la filière des herbacées en propageant l'image de marque. Cela a eu pour conséquence d'instaurer la confiance auprès des clients et donc de susciter l'envie d'acheter Végétal local. Une fois la demande en place, les producteurs ont été de plus en plus sollicités par les collectivités et les aménageurs.

*« Quand même, cette marque a le mérite de transformer le marché, de transformer aussi des savoir-faire et de réinventer le métier de collecteur et de multiplicateur de graines. (...) c'était pas complètement mort, mais très peu vivant sur le marché des herbacées » [VL1, 2023]*

L'ensemble des règles imposées par VL est toutefois contraignant, et certains acteurs ne veulent pas adhérer à la marque pour cette raison. Chez ces acteurs, les activités et les règles de traçabilité qu'ils s'imposent sont plus difficilement identifiables, et le client doit donc plutôt se baser sur une relation de confiance avec le producteur. Bien que notre travail ne s'y attarde pas, pléthore d'actions de collecte et de réutilisation de semences ont cours sur le territoire, notamment de la part des acteurs de la nature et des gestionnaires de sites comme les Conservatoires d'Espaces Naturels (CEN), et ces actions contribuent également aux démarches de restauration des écosystèmes au moyen de semences sauvages et locales.

### **2.2.3 Mélanges de végétalisation : modalités d'usage, de composition et de mise en œuvre**

#### **2.2.3.1 Cadres d'utilisation des végétaux sauvages et locaux**

Aux dires des représentants de VL, la question de la pertinence de l'utilisation de végétaux attributaires de VL pour contribuer à la biodiversité, dans quelque milieu et cadre d'implantation que ce soit, a été résolue au moment de sa création. Comme montré précédemment, la marque est née de besoins scientifiques et opérationnels, plus qu'économiques. Elle a été développée durant plusieurs années par un conseil scientifique et validé par le Ministère de l'Ecologie. La formation d'une filière est venue de fait car c'est bien l'objectif d'une marque, mais l'ambition mercantile n'était pas à la genèse de sa création. Il existe aujourd'hui un fort besoin d'accumuler des retours d'expérience sur le résultat des projets et la capacité de la filière à répondre aux besoins. Les végétaux de la marque ont donc toute leur place dans divers cadres d'utilisations, et tout retour d'expérience est appréciable. [VL2, 2023]

Les principaux cadres d'application des végétaux de la marque, ligneux et herbacés confondus, sont les suivants :

- Agroécologie et agroforesterie : à compter de cette année 2024 et sur l'initiative du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire et du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, un « Pacte en faveur de la haie » est lancé. Ce dernier prévoit notamment la plantation de 50'000 kilomètres de haies d'ici 2030, avec plusieurs objectifs parmi lesquels la restauration de la biodiversité en contextes agricoles et non agricoles, ainsi que la contribution au développement de filières de production de végétaux adaptées à cet enjeu [Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023]. Concernant les herbacées, l'utilisation de semences VL pour la création de bandes fleuries en bords de parcelles cultivées contribue à la restauration de la flore messicole dont les habitats ont été fortement impactés par les changements de pratiques agricoles [Cambecèdes et al., 2012].
- Restauration écologique : le besoin lié à cet usage est à l'origine même des réflexions ayant conduit à la création de la marque. En effet, VL est centrée sur la production de matériel végétal possédant une forte diversité génétique et en capacité de ramener une certaine fonctionnalité écologique sur les sites d'implantation [VL1, 2023; VL2, 2023]. La végétalisation à l'aide de VL dans le cadre de la réhabilitation de milieux perturbés en zones périurbaines est très appropriée [VL2, 2023]. Aussi, l'utilisation de végétaux sauvages et locaux s'insère dans les objectifs, cadres d'actions et dispositifs établis par la Stratégie Nationale sur la Biodiversité 2030 [Gouvernement Français, 2023], le Fonds Vert pour l'accélération de la transition écologique dans les territoires [Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2023c] ou encore le tout récent Règlement Européen pour restaurer la nature [Parlement Européen, 2024].
- Paysage : l'aménagement paysager en milieu urbain et périurbain représente une part croissante du cadre d'utilisation des végétaux de la marque, même si l'usage dans ce contexte est plus généralement couplé avec la palette paysagère et horticole [VL4, 2023]. De nombreuses entreprises du paysage impliquées dans ces marchés auprès de collectivités notamment, commencent à être sensibilisés à la démarche et contactent les acteurs de la marque en amont afin d'évaluer les besoins et l'offre à disposition [VL2, 2023]. Un usage non anticipé au moment de la création de la marque concerne l'utilisation de godets ou de mini-mottes seuls ou en complément de semis pour l'aménagement de jardins chez les particuliers, ou pour l'aménagement paysager au sein d'espaces publics par les collectivités en milieu urbain [VL1, 2023].
- Aménagement du territoire, génie écologique : le réseau des CBN est sollicité de longue date par les aménageurs pour un accompagnement sur la végétalisation ou la gestion d'espaces comme les emprises de lignes à haute tension, de sites d'enfouissement, de gazoducs ou encore de talus autoroutiers, afin de répondre à la fois aux enjeux techniques liés à l'érosion, et aux enjeux écologiques imposés ou volontaires [VL2, 2023; VL3, 2023]. Ces usages avaient donc été anticipés au moment de la création de la marque [VL1, 2023].



L'usage de végétaux de la marque n'est généralement correctement appliqué dans un contexte de projet d'aménagement que si toute la chaîne de valeurs envisagée par la marque est respectée. Les aménageurs doivent adopter une démarche réelle d'amélioration des pratiques et de restauration de la biodiversité. Les mélanges VL doivent être associés à un ensemble de bonnes pratiques concernant la préparation des sols, la prescription adéquate des espèces, l'identification des zones à enjeu pour le rétablissement de continuités écologiques [VL1, 2023]. Les pratiques actuelles sur les chantiers d'infrastructures linéaires ne conviennent pas toujours à ces exigences, et le manque de connaissance et d'anticipation de la part des prescripteurs et MOE conduisent souvent à des résultats éloignés des demandes initialement formulées par les porteurs de projets [VL3, 2023]. Les aménageurs, bien qu'en accord avec les principes et valeurs de la démarche mettent en doute la pertinence de l'usage de tels végétaux en contexte autoroutier par exemple. Selon [A2, 2023], l'achat et l'utilisation de végétaux marqués VL peut représenter une dépense inutile sur des talus. L'absence d'une préparation adéquate des sols, sur des zones remaniées à la végétation en constante évolution et d'un plan de gestion adapté au maintien d'espèces prairiales donne un caractère potentiellement contre-productif à l'usage de ces végétaux, qui n'auront pas la possibilité de s'exprimer correctement, ternissant l'image de la marque VL auprès de l'acheteur non-averti [A2, 2023]. Selon nous, ces éléments devraient plutôt pousser à la réflexion sur l'intégration d'une chaîne de valeur pour une meilleure intégration de la biodiversité dans les démarches d'aménagement. L'aménagement doit aujourd'hui s'adapter aux exigences écologiques, et non l'inverse, malgré les défis techniques et de changement de pratiques que cela implique.

### **2.2.3.2 Critères de composition des mélanges de végétalisation et techniques de mise en œuvre**

Outre des demandes spécifiques liées à des choix politiques ou non éclairées par une connaissance technique ou écologique, de nombreux paramètres dictent la composition d'un mélange herbacé de végétalisation. Dans un premier temps, il est nécessaire de caractériser le contexte d'implantation, la finalité des objectifs poursuivis par le projet et les moyens mis à disposition pour leur mise en œuvre. Le cortège d'espèces, les techniques de semis, l'ajout ou non d'intrants seront différents s'il s'agit de la végétalisation d'un talus en vue de sa sécurisation, de la mise en place d'une zone de compensation écologique destinée à conserver ses caractéristiques sur plusieurs décennies ou d'un projet de restauration écologique visant à s'insérer au sein de la dynamique d'un milieu naturel sensible ou protégé. L'emploi d'espèces rares ou difficiles à collecter ou à multiplier impliquera nécessairement un surcoût qu'il est nécessaire d'anticiper et proportionner au niveau des enjeux du projet. [A2, 2023; A4, 2023; BE1, 2023; P1, 2023; P2, 2023; P3, 2023; VL1, 2023; VL4, 2023]

Dans un second temps, il convient d'établir un état initial du site à végétaliser en caractérisant ses composantes biotiques et abiotiques. Il faut ainsi considérer :

- Les conditions climatiques et microclimatiques de la zone d'implantation : pluviométrie, ensoleillement, températures moyennes et extrêmes, sécheresses *etc.*,
- Les caractéristiques topographiques du site : altitude, pente, orientation *etc.*,
- La nature et la qualité des sols : déblai/remblai, horizons, type et structure, teneur en composants organiques et inorganiques, présence éventuelle de polluants *etc.*,

- Le régime hydraulique,
- Les composantes biologiques du site et des habitats environnants : faune, flore, banque de graines, présence ou non d'espèces exotiques envahissantes *etc.*,
- Les éléments paysager susceptibles d'influencer l'ensemble de ces éléments : présence de cours d'eau ou de nappes favorisant l'accès à l'eau, de boisements pour la présence d'ombrage, de champs cultivés ou pâturés pouvant induire l'arrivée d'intrants *etc.*

Cette évaluation permet de s'assurer de l'adéquation entre les conditions d'accueil du site, ses possibles évolutions et les préférences écologiques du cortège d'espèces à considérer. [A2, 2023; A4, 2023; BE1, 2023; P2, 2023; VL3, 2023]

Vient ensuite l'étape de composition des mélanges en tant que telle. Deux possibilités sont à considérer concernant le type de matériel végétal : (1) l'utilisation de mélanges constitués à partir de semences pures, c'est-à-dire collectées, triées et multipliées espèce par espèce puis remélangées, ou bien (2) l'utilisation de matériel issu de brossages de prairies ou de fauches de foin vert, ou encore un mix des deux (mélange issu d'une récolte directe dans lequel on ajoute quelques espèces issues de collecte et production en espèces pures). Pour les végétaux issus de brossage ou de fauche, il faut bien prendre en compte la composition spécifique des milieux à prélever, la surface, la période et la fréquence de collecte, ainsi que les techniques spécifiques de semis à adapter en fonction du matériel (foin à étaler, mélanges contenant plus ou moins de matière inerte à nettoyer ou à semer manuellement ou mécaniquement...). Pour les mélanges réalisés à partir de semences pures, il doit être établi le nombre et l'identité des espèces, leurs caractéristiques (indigènes / exogènes, cultivars / sauvages, locales / non-locales), mais aussi leur proportion au sein du mélange. Cette dernière se traduit généralement par un ratio de poids de graines de chaque espèce par unité de poids du mélange, et doit être calculée en fonction de la proportion en nombre d'individus de chaque espèce attendue *in fine*, du poids des mille grains (PMG) de chaque espèce, ainsi que du taux de germination des graines de chaque espèce dans le cas où il serait préalablement testé. Le PMG est la masse moyenne de mille semences d'un échantillon, et peut varier en fonction de l'espèce, de l'année de production voire de l'origine — les semences ayant subi un processus de sélection à des fins de culture étant généralement plus lourdes et volumineuses que les semences sauvages [P3, 2023; VL1, 2023]. Rappelons que contrairement à l'industrie semencière conventionnelle, VL n'impose pas de critères de qualité autre que la pureté spécifique à ses végétaux attributaires, notamment vis-à-vis des taux de germination. [A2, 2023; BE1, 2023; P1, 2023; P2, 2023; P3, 2023]

Enfin, il faut définir les canaux d'approvisionnement en fonction de l'identité et des caractéristiques voulues des espèces, ainsi que les modalités de mise en œuvre. Aucun végétal exogène au territoire français ni aucun cultivar ne sont attributaires de la marque VL. Certaines semences d'espèces sauvages peuvent être trouvées auprès de fournisseurs conventionnels, mais la plupart sont soit des espèces exogènes, soit des cultivars, soit issues de collectes dans des territoires lointains, soit encore dépourvus de traçabilité. Ces éléments sont importants à comprendre et à considérer car ils contribuent à identifier le bon interlocuteur pour l'approvisionnement en semences, bien qu'encore trop souvent méconnus des demandeurs

et prescripteurs (cf 2.3.1.1). Les techniques de semis des végétaux retenus doivent s'adapter à leurs caractéristiques, et le choix des végétaux doit aussi être adapté aux techniques mobilisables en fonction des contraintes de site. Si les sites à végétaliser sont en pente, difficilement accessibles et/ou représentent de grandes surfaces, un étalage à l'hydroseeder est généralement privilégié, et les graines ainsi semées doivent être suffisamment petites pour permettre leur utilisation par cette technique. L'hydroseeding permet une adhérence des graines au substrat, et l'ajout d'eau et d'intrants facilite la germination et la croissance nécessaires à la bonne expression de certaines espèces exogènes ou de variétés sélectionnées [Lignier and Rosset, 2012]. Dans d'autres conditions, ou en l'absence d'accès à une telle technique, un semis manuel, un semis mécanique au semoir conventionnel ou un étalage de foin vert peuvent être privilégiés. Chaque méthode présente ses avantages et contraintes : un semis manuel implique généralement un ajout de matière inerte (e.g. du son) au mélange afin d'en faciliter la manipulation ; un étalage de foin vert permet de conserver l'humidité en surface du sol mais est difficilement implémentable sur de larges surfaces ; un semis sans paillage et sans tassement ne convient pas aux sols en pente car les graines peuvent être emportées par les précipitations ; le choix d'utiliser des végétaux sauvages et locaux permet généralement de réduire les doses de semis et d'éviter les besoins d'arrosage et d'ajout d'engrais [A2, 2023; A4, 2023; BE1, 2023; VL1, 2023]. Quelques éléments illustratifs des approches de végétalisation formulées par les acteurs interrogés et leurs contextes respectifs sont à retrouver dans l'Encadré 6 ci-dessous.

Encadré 6 : Illustration des approches de végétalisation par plusieurs acteurs.

**Végétalisation des talus autoroutiers – vision et approche de BE1**

Selon lui la demande des MOA s'est toujours le plus souvent résumée à établir « *du vert, habiller les talus quel que soit le type de vert* ». Le MOE en charge de trouver la ressource et la mettre en place sur le terrain peut s'approvisionner en matériel peu coûteux et accessible, composé d'un cortège d'espèces très restreint qui s'établira rapidement, mais qui risque également de disparaître au bout d'un ou deux ans, laissant au MOA un terrain à nu à gérer. BE1 adopte plutôt une approche visant à favoriser l'initiation d'une succession végétale au moyen d'espèces sauvages adaptées, qui persisteront suffisamment longtemps pour laisser les espèces spontanées et pérennes s'établir sans toutefois étouffer le milieu. Afin de formuler ses propositions, BE1 prône le fait d'aller « *demander conseil à la Nature* », c'est à dire d'aller observer la végétation évoluant au sein de sites proches aux caractéristiques similaires (vieux talus ou frontaux d'anciennes carrières de 40-50 ans) pour avoir une représentation assez fidèle des assemblages floristiques que l'on peut de manière réaliste introduire au sein du milieu. Cette liste est ensuite affinée en éliminant (1) les espèces très présentes aux alentours et susceptibles de coloniser naturellement la zone, (2) les espèces indisponibles dans le commerce, (3) les espèces non adaptées aux techniques de semis employées et (4) les espèces à établissement trop lent. Il travaille donc avec des cortèges très restreints en raison des conditions de site difficiles, mais aussi car il prend le parti de n'utiliser aucune espèce annuelle, car, selon lui, les populations que constituent ces espèces, formant une communauté précoce dans la succession végétale, sont trop éphémères. Il se

base plutôt sur ses expériences passées pour baser ses choix, tenant par exemple compte de l'échelonnement de la germination des espèces, des capacités de reproduction végétative des espèces au sein de milieux donnés etc.

#### **Végétalisation des infrastructures linéaires – critères de décision de A2**

Les grands projets traversent une multitude de milieux et de conditions pédoclimatiques. Dans ce contexte, est impossible de concevoir des mélanges pour chacune des situations rencontrées, contrairement aux projets de renaturation sur de petites surfaces pour lesquels une mosaïque de mélanges est envisageable. Il faut faire au plus simple, y compris en fonction des périodes de semis, qui sont très soumises aux contraintes de la temporalité des chantiers. Les critères relatifs aux doses de semis, à l'origine des végétaux, à leur traçabilité et leur 'qualité' sont laissées à la discrétion du semencier, avec lequel il existe néanmoins une plage de négociation en fonction du budget et des objectifs à atteindre.

#### **Végétalisation de tout type d'infrastructures – approche de A4**

Bien que soucieux de répondre aux enjeux techniques (érosion, EEE...), la démarche de A4 est systématiquement tournée vers une approche de renaturation : « *Que l'on végétalise une zone linéaire ou une surface lambda, je ne vois pas de raison de faire différemment. Pour moi c'est traité de la même façon.* » L'état initial du site doit être établi de manière rigoureuse, ainsi que l'évaluation des dynamiques végétales des milieux environnants. Cela permet d'identifier l'état de référence à atteindre, et de choisir de favoriser une recolonisation naturelle si les conditions le permettent : bon état de conservation, absence d'EEE. Le niveau d'exigence sur la composition des mélanges de végétalisation est élevé, avec un recours systématique à des mélanges contenant des espèces VL ou équivalents, et très riches en espèces. L'apport externe de terre végétale et d'intrants est exclue ou réduite au minimum. A4 a conscience que l'ensemble des espèces, allant typiquement de 20 à 70 espèces en fonction de la nature des sols, ne s'exprimera certainement pas sur les zones végétalisées. Toutefois, le choix est fait de maximiser les chances d'expression d'une certaine diversité végétale en fonction des variations géographiques et temporelles de site, en prenant le soin de toujours inclure une variété de types fonctionnels au sein des cortèges d'espèces. « *Les praticiens habituels, ils auraient mis du mulch, des colles, des enrichissements... Ils auraient fait de l'agronomie quand on fait de la biodiversité ; on cherche à faire s'exprimer des milieux naturels, à orienter des surfaces vers une évolution la plus naturelle possible, et c'est pour ça que la diversité est primordiale.* »

#### **Conception des mélanges de végétalisation pour différents usages – approche de P1**

Le travail avec les aménageurs d'infrastructures ne se différencie pas du travail avec d'autres structures, tant que les demandes ne se traduisent pas par des mélanges entièrement conventionnels et que les demandeurs sont ouverts à la négociation sur le choix des espèces. L'unique différence concerne la palette végétale à utiliser qui doit s'adapter aux conditions contraignantes de site, mais les listes de végétaux produits en VL, complétés par les éventuels approvisionnements extérieurs sont

largement suffisants. La proportion d'espèces sauvages au sein des mélanges dépend du besoin et de la finalité d'application. Pour des besoins de restauration de milieux naturels comme pour la végétalisation d'infrastructures linéaires, la proportion d'espèces locales gravite autour de 60 à 70%. Pour des besoins de végétalisation en milieu agricole visant à produire des engrais verts, la proportion est plutôt de l'ordre de 10%, car le couvert végétal est destiné à être détruit.

**Conception des mélanges de végétalisation pour l'aménagement – approche de P2**

Certaines espèces locales sont longues à pousser, et il faut trouver un équilibre entre les annuelles, bisannuelles et vivaces afin d'avoir des espèces "starter" permettant d'assurer un recouvrement rapide, qui survivent assez longtemps pour laisser les espèces à établissement lent (vivaces) de pousser, mais également qui ne colonisent pas le milieu dans la durée en empêchant le cortège d'intérêt de se développer. Ces expressions varient en fonction des sites et des années, et le producteur doit miser sur la diversité des espèces et les retours d'expérience collectés pour formuler ses préconisations. Considérant les prix plus élevés proposés par VL, une négociation est toujours nécessaire avec l'aménageur afin de justifier l'intérêt de la démarche, autant pour la biodiversité que pour le client en lui évitant les risques d'échec. Malgré ça, l'aménageur préfère souvent payer moins cher pour un mélange qui va tenir moins longtemps, témoignant d'une vision de court-terme.

**Conception des mélanges de végétalisation pour l'aménagement – approche de P3**

Il existe un paradoxe entre la volonté d'utilisation de graminées sauvages de milieux secs, résistantes mais à développement lent, pour la végétalisation des talus qui exige des recouvrements rapides. La solution proposée est de mélanger des graminées sélectionnées à vie courte comme le raygrass, à des espèces locales à développement plus lent, afin de créer un couvert rapide qui sera remplacé au bout de quelques années par les autres espèces du cortège visé.

*2.2.3.2.1 Rôle des membres de VL dans l'accompagnement des MOE et MOA*

Sans un accompagnement des prescripteurs en amont de la remise des réponses aux appels d'offres, les choix des BE pour la composition des mélanges sont parfois en décalage avec la faisabilité. Par exemple, il peut arriver qu'un BE indique un certain prix des mélanges au m<sup>2</sup> au financeur sans avoir suffisamment consulté le producteur, n'ayant pas voulu payer pour la prestation d'un service de conseil de leur part, ou s'étant basé sur des pratiques anciennes. Il arrive ainsi que les mélanges prescrits soient les mêmes que ceux choisis dans le cadre d'un engazonnement classique (90% graminées - 10% légumineuses), avec la simple mention au sein du dossier de la volonté d'utiliser du VL, sans considération pour la pertinence de la demande et des coûts associés à cette volonté. [P1, 2023]

La plupart des producteurs de semences bénéficiaires de la marque proposent pourtant, sous forme de prestations rémunérées ou à titre de simple conseil, un accompagnement des porteurs de projet ou des prescripteurs, car l'utilisation de semences locales nécessite un ajustement des pratiques conventionnelles. Pourtant les producteurs ont un certain intérêt à répondre *stricto sensu* aux demandes exprimées au sein des CCTP pour la

composition des mélanges, en ça qu'ils sont ainsi exempts de responsabilité en cas d'échec technique [P2, 2023]. Dès lors que des variantes à la demande initiale sont formulées, la responsabilité du semencier est engagée dans la réussite des opérations. Lorsque les semenciers sont désignés en tant que simples fournisseurs dans le cadre de la réponse aux appels d'offre, le contact avec le client est rarement direct et doit passer par l'intermédiaire des concepteurs et de la MOE. Dans ce cas, les producteurs préfèrent la collaboration avec les entreprises d'hydroseeding prestataires, connues pour leur expérience et la bonne prise en compte des préconisations de mise en œuvre [P1, 2023]. Si les préconisations sont faites directement au MOE concepteur, elles sont souvent mal prise en compte, débouchant sur des échecs pour lesquels les producteurs sont parfois tenus responsables en dépit de leurs préconisations initiales [P2, 2023].

#### 2.2.3.2.2 Contraintes spécifiques en lien avec l'utilisation de VL

L'utilisation de mélanges de semences VL pour la végétalisation des infrastructures nécessite une réflexion plus poussée sur les cortèges d'espèces constituant les mélanges. En effet, les semences de nombreuses espèces peuvent mettre plus de temps à s'installer et établir un couvert que les gazons conventionnels [P1, 2023; VL4, 2023]. Ainsi, afin de répondre aux attentes techniques en matière de stabilisation des sols, il est parfois préconisé d'ajouter des "espèces compagnes". Le choix peut se porter sur des annuelles comme la nielle des blés (*Agrostemma githago*), le bleuet (*Cyanus segetum*), la matricaire (*Matricaria sp.*), les anthémis (*Anthemis sp.*) qui sont toutefois coûteuses, ou d'autres annuelles issues de grandes cultures, telles que des trèfles annuels comme le trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*), le trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*), ou, la caméline (*Camelina sativa*) et le sarrasin (*Fagopyrum esculentum*) en semis de printemps. Ainsi, cela permet d'assurer une bonne couverture du sol en attendant la seconde année, à partir de laquelle les vivaces commencent à s'exprimer. Au bout de 2 ou 3 ans, les espèces de grandes cultures disparaissent et laissent la place aux cortèges finaux visés, ce qui permet une bonne atteinte des objectifs tout en réduisant le coût. Mais les aménageurs n'ont pas l'habitude d'utiliser ces espèces, ce qui nécessite un travail d'information et de sensibilisation. [P1, 2023]

L'utilisation de semences VL et de cortèges plus riches en espèces que ceux des mélanges d'engazonnement classiques implique parfois une adaptation des techniques de semis. La taille réduite des graines de certaines espèces rend en effet impossible l'utilisation de semoirs à engazonnement classique, et l'hydroseeding ou l'utilisation de semoirs à engrais sont alors préférés. Dans le cas des projets d'aménagement, où l'hydroseeding est de toutes façons la solution par défaut, cela ne représente pas de contrainte particulière. Dans le cas de semis devant être effectués à la main, les doses réduites préconisées dans le cas de mélanges 100% VL rendent nécessaire l'ajout de matière inerte (e.g. son de blé) pour une bonne manipulation et répartition au sol. [P1, 2023]

#### 2.2.3.3 Le suivi et la gestion des zones végétalisées

Le maintien d'une végétation herbacée diversifiée implique une gestion particulière, comprenant généralement des opérations de fauche tardive afin de garder le milieu ouvert tout en laissant le temps aux espèces annuelles de compléter leur cycle reproductif [A2, 2023;

VL4, 2023]. Les plantes sauvages et locales sont généralement adaptées à des conditions de milieux plus pauvres que celles issues de la filière industrielle, conditionnées pour germer et évoluer dans un sol préparé, amendé et arrosé [VL4, 2023]. Pour un bon maintien de l'expression de cette végétation dans le temps, il est généralement préconisé de réaliser un export des résidus de fauche afin de ne pas enrichir le sol [A2, 2023; VL4, 2023]. Pour un mélange conçu à partir d'espèces « starter », destinées à disparaître après les premières années, et d'espèces vivaces plus pérennes, il peut être conseillé de ne pas appliquer d'opérations de fauche, et de laisser le milieu en libre évolution [BE1, 2023].

La gestion des parcelles végétalisées doit s'adapter aux différents objectifs initiaux de végétalisation mais également aux contraintes techniques et réglementaires de la zone d'intérêt. Il faut tout d'abord considérer le fait que la végétation exprimée diffère généralement du cortège d'espèces semé. Cela s'explique par l'expression de la banque de graines du sol, la dispersion naturelle d'espèces depuis les milieux voisins ou la présence de semences d'espèces non désirées au sein des mélanges de végétalisation [P1, 2023]. Les milieux perturbés et fortement artificialisés tels que les talus autoroutiers sont caractérisés par une certaine incertitude, posant une inconnue sur les taux de germination et de croissance des semences, ainsi que la nature des espèces exprimées. Les sols peuvent être très hétérogènes au long d'un tracé autoroutier, car issus de milieux différents, stockés plus ou moins longtemps dans des conditions variables, et réétalés irrégulièrement [VL4, 2023]. La présence régulière d'espèces exotiques envahissantes ou d'autres espèces visées par des arrêtés préfectoraux contraignent généralement les gestionnaires à mettre en place des actions défavorables à l'expression de la flore indigène – fauches trop fréquentes ou en dehors des fenêtres de temps permettant la complétion des cycles de reproduction des espèces [A1, 2023; A2, 2023; A4, 2023; P1, 2023].

Sur des abords routiers, hors autoroutes, ou sur d'autres milieux gérés facilement accessibles, il est possible pour les gestionnaires de mettre en place des plans de gestion différenciée, en fauchant régulièrement les abords directs de la voirie, mais en laissant le reste de la bande enherbée se développer, ou en y appliquant une fauche tardive annuellement [P1, 2023]. Cela permet à la fois de réaliser des économies sur la mobilisation de machines et de personnel, mais également de favoriser la biodiversité. Sur les abords autoroutiers toutefois, la pente des talus, la présence de clôtures et d'un trafic intense à haute vitesse rendent difficiles l'accès à certains sites à gérer sans la mise en œuvre de lourds dispositifs de sécurité ou la mobilisation de machineries spécialisées [A1, 2023]. Considérant les surfaces en jeu, la mise en place d'actions spécifiques comme l'export des résidus est généralement écartée car jugée trop coûteuse, ou simplement en dehors du spectre des activités routinières des prestataires de gestion paysagère sur ce type d'infrastructure :

*« Quand on leur dit de ramasser ce qu'ils ont taillé, ça devient un peu compliqué. On n'a pas les matériels aujourd'hui. (...) On pense qu'effectivement, on peut aller vers des choses un peu plus compliquées, mais pas tomber dans du matériel atypique ou de l'entretien manuel. » [A5, 2023]*

Du fait de ces contraintes, la gestion des emprises autoroutières est cantonnée au minimum imposé par les obligations réglementaires ou de sécurité, ou les exigences esthétiques sur les zones fréquentées par les usagers [A1, 2023; A5, 2023]. C'est pourquoi le choix d'utiliser des

mélanges diversifiés de semences sauvages et locales est considéré par certains comme un non-sens si ces derniers exigent des mesures de gestion pour assurer la bonne expression des cortèges visés [A2, 2023].

En revanche, l'utilisation de tels mélanges se justifie sur des zones à enjeu écologique, comme des zones de compensation ou de restauration écologique, où un suivi et une gestion adéquate sont prévus dès la conception du projet [A2, 2023; A4, 2023; P3, 2023]. Les acteurs interrogés reconnaissent l'existence d'une marge d'évolution importante sur la gestion des emprises de projets d'aménagement, hors zones difficiles d'accès. Toutefois, l'établissement d'un plan de gestion est nécessaire, doit être adapté aux mélanges, et inversement, nécessitant une concertation entre les concepteurs, prescripteurs spécialisés de la question (BE et producteurs), et gestionnaires dès le début du projet [A2, 2023; P2, 2023]. La rupture de continuité entre les acteurs successifs des projets rend toutefois cette tâche difficile (*cf* 2.3.1.3.3). Dans le cadre de chantiers clef en main, le producteur ou le BEV peut proposer un plan d'accompagnement dès la phase de conception, ou des conseils pour assurer le suivi de la mise en œuvre et de la gestion *a posteriori*. Au dire des producteurs, ce type de services est de moins en moins assuré car il représente un coût notable que les clients ne sont généralement pas prêts à assumer [P2, 2023].





*Brosseuse à graines à atteler sur un tracteur*



*Trieuse à graines*



*Brosseuse « butineuse » à traction électrique pour la collecte de semences en milieux isolés ou accidentés*



*Emondeuse pour séparer la matière inerte des produits de collecte*

Illustration 4 : Machines de collecte de semences en milieu naturel, de séparation de la matière et de tri  
– Entreprise Semence Nature

## 2.3 ENJEUX ET PERSPECTIVES SUR L'ÉVOLUTION DES MODALITÉS DE VEGETALISATION

### 2.3.1 Enjeux autour de l'évolution des pratiques de végétalisation

#### 2.3.1.1 Vers une demande mieux formulée

L'évolution des pratiques de végétalisation vers une meilleure intégration de la biodiversité, même en milieux contraints, dépend d'une volonté politique, mais aussi et surtout de la montée en compétence des MOA et de MOE sur cette thématique. Les MOA, par la formulation d'exigences spécifiques au sein des CCTP, peuvent imposer ou inciter l'utilisation de mélanges plus diversifiés, ou de semences porteuses de traçabilité. Cependant, dans le cadre des grands projets d'infrastructures linéaires, les attentes des MOA ont peu évolué, et restent encore trop souvent de court-terme, se restreignant à des critères budgétaires, de disponibilité, de sécurisation des ouvrages et d'esthétique [BE2, 2023; P1, 2023; P2, 2023]. Du fait d'un manque de connaissance général en matière d'écologie, la différence en termes d'espèces et d'origine des graines n'est pas visible aux yeux de l'aménageur [BE2, 2023]. De plus, les entreprises d'aménagement et de gestion des ouvrages sont la plupart du temps différentes, et les premières ne veulent pas investir dans des végétaux dont seules les dernières tireront les bénéfices [BE2, 2023].

*« Par exemple, si vous travaillez avec quelqu'un du Conseil Régional qui s'occupe de la voirie, l'entretien des bords de route, il va être super calé sur le goudron, sur le béton... mais alors, en végétalisation, il ne connaîtra vraiment rien du tout. C'est pareil avec les gens qui s'occupent de l'aménagement des domaines skiables. Ils vont parler pente, pylônes, chemins terrassiques, volumes, mètres cubes... mais après, la végétation, ils ne connaissent vraiment rien. Ils ne savent même pas comment faire germer une graine. Ils n'ont pas les compétences en végétalisation. Donc, pour eux, il n'y a pas trop de différence entre un raygrass anglais gazon et un brome érigé sauvage. Eux, ils préfèrent même le raygrass parce que c'est vert d'un coup. » [P2, 2023]*

Pourtant, les producteurs témoignent d'une évolution graduelle des exigences formulées par les commanditaires de projets d'aménagement vis-à-vis des mélanges de végétalisation herbacés, principalement par les collectivités territoriales, mais aussi depuis très récemment par les autoroutiers avec le projet du COS [P1, 2023; VL4, 2023]. Dans le cadre de projets de réhabilitation d'anciennes décharges ou carrières, c'est souvent l'Etat ou ses services déconcentrés qui imposent un certain niveau d'exigence comme l'utilisation de végétaux marqué VL [P2, 2023]. Cette augmentation progressive de la demande en végétaux VL, bien qu'encore très loin de son potentiel aux dires des producteurs, en raison d'une méconnaissance de l'évolution de l'offre et des pratiques, est perçue positivement [P1, 2023; P2, 2023; VL1, 2023]. Toutefois, il arrive que les collectivités, généralement moins bien formées sur les questions de biodiversité, établissent des cahiers des charges aux exigences mal précisées, voire déraisonnables [VL1, 2023]. C'est le cas lorsque le commanditaire indique vouloir semer des mélanges 100% VL ne correspondant pas à ce qui est proposé au sein de la marque : des espèces n'existant pas à l'état sauvage en France ou dont la multiplication difficile ne permet pas la fourniture de semences en grande quantité ; mais aussi des mélanges choisis

pour leurs caractéristiques esthétiques plutôt que pour leur adaptation aux conditions du milieu [P2, 2023; VL1, 2023]. La résultante de ces demandes si aucune révision n'est faite par un expert peut être un prix très élevé, l'absence de disponibilité des semences ou l'échec technique des opérations. Elle émanent généralement de la simple volonté de faire bénéficier au projet de l'image de marque de VL [P2, 2023].

Bien que les MOA puissent exprimer des exigences inscrites au sein des CCTP, ce sont les bureaux d'études en charge de la conception des projets et/ou de la maîtrise d'œuvre qui jouent le plus grand rôle dans la prescription des modalités de végétalisation, et ont généralement la charge de la composition des mélanges. La montée en compétence des prescripteurs permet de faire évoluer les pratiques de végétalisation au sein des projets d'aménagement, et une meilleure intégration des enjeux de biodiversité [BE2, 2023]. Pourtant, au contraire des projets de moindre échelle ou ceux ayant une finalité écologique, les prescripteurs impliqués dans la réalisation des grands projets d'infrastructures linéaires sont rarement compétents sur les problématiques de végétalisation, et en particulier de la semence [BE1, 2023]. En effet, les bureaux d'études écologues et paysagistes sont en concurrence sur le marché de la prescription des projets d'aménagement, mais les cabinets d'architectes paysagistes remportent souvent les appels d'offres car proposant généralement moins cher, faisant moins de propositions en lien avec l'intégration des problématiques de biodiversité [A3, 2023].

Pourtant, c'est bien le travail des MOE d'être sensibles et formés à ces questions et de transmettre ce bagage aux MOA pour s'assurer que les demandes soient complètes. Il existe aujourd'hui encore un décalage fréquent entre les objectifs fixés par le prescripteur et la commande faite aux producteurs sur la composition des mélanges. Par exemple, certains BE visent la restauration de milieux prairiaux mais ne connaissent pas l'existence de VL, et demandent des mélanges constitués à 95% de graminées et 5% de légumineuses, qui n'auront pas d'intérêt fonctionnel pour la restauration de la biodiversité, avec un semis à des dosages relevant plus des pratiques d'engazonnement que de végétalisation à visée écologique [P1, 2023]. Les producteurs rectifient ainsi régulièrement les commandes passées par les clients, dont les erreurs proviennent généralement de la méconnaissance des techniques de constitution des mélanges, en lien notamment avec la notion de PMG [P3, 2023]. Outre la composition des mélanges, les producteurs VL constatent un manque d'anticipation des demandes sur ce type de matériel, dont la préparation nécessite souvent plusieurs années de travail, entre la collecte et la mise en vente pour fournir des quantités importantes (*cf.* 2.3.1.2.1) [P1, 2023; P2, 2023].

Les producteurs ont à leur disposition de nombreuses connaissances sur la composition des mélanges de végétalisation et leurs utilisations. Pourtant, certains considèrent que leur niveau d'influence sur le choix final de composition des mélanges reste très faible [P2, 2023]. Les prescripteurs les sollicitent peu en amont pour l'obtention de conseils, et les entreprises passant commande s'en tiennent généralement aux critères prédéfinis et aux contraintes budgétaires. Certaines régions ou collectivités ont développé des guides pour les prescripteurs, permettant d'aider au choix des espèces propres à chaque région, et les représentants locaux de la marque peuvent assurer un rôle d'accompagnement

après des MOA pour la rédaction des CCTP. Pourtant, au contraire des collectivités, peu de porteurs de grands projets d'infrastructures linéaires viennent solliciter les CBN pour un accompagnement sur la végétalisation [VL2, 2023]. Il semble exister au sein de ces entreprises une très grande inertie dans le changement des habitudes de consommation, contrairement à des structures plus petites disposant de plus de latitude pour expérimenter sur des chantiers de moindre enjeu [VL2, 2023]. La formulation de commandes précises et relativement figées est ancrée, quand il faudrait laisser une marge de manœuvre et la possibilité pour les producteurs de faire des contre-propositions au vu de leur expertise et de la disponibilité des semences à disposition [VL4, 2023].

La montée en compétence des entreprises des travaux d'aménagement, généralement en charge de passer les commandes en suivant les prescriptions des BE, permettrait également une plus grande garantie du respect des exigences par les fournisseurs. Lorsque la demande initiale pour des mélanges diversifiés ou marqués ne peut être respectée en raison d'un manque de connaissance ou de planification, il est difficile pour ces entreprises de porter un regard critique sur les propositions faites par de grands fournisseurs semenciers conventionnels, affirmant que les mélanges d'engazonnement conviendront parfaitement aux différentes applications visées [A4, 2023]. Outre l'aspect technique ou administratif dans la formulation des demandes, l'entente sur les objectifs de végétalisation visés et le niveau de bonne communication entre chaque maillon de la chaîne de valeur est déterminante pour le bon déroulé des opérations [BE1, 2023].

### **2.3.1.2 Freins et leviers à l'évolution des pratiques de végétalisation et à l'adoption de Végétal local**

#### *2.3.1.2.1 Déséquilibre entre offre et demande, contraintes temporelles des projets*

Aux yeux des grands aménageurs, les végétaux attributaires de la marque sont encore très difficiles à obtenir en quantité suffisante et dans des délais raisonnables pour permettre la végétalisation de larges surfaces [A2, 2023; A3, 2023; BE1, 2023; BE2, 2023]. Bien que peu de producteurs de semences herbacées bénéficiaires de VL soient effectivement en mesure de répondre à ce type de besoin, ces derniers couvrent généralement plusieurs régions d'origine et peuvent compléter l'offre VL avec des semences conventionnelles. Aux dires des gestionnaires de la marque et des propres producteurs, la question n'est pas tant centrée sur la quantité de semences demandée que les délais accordés à la fourniture du matériel [P2, 2023; VL2, 2023; VL3, 2023]. L'obtention de semences différenciantes, c'est-à-dire composées de nombreuses espèces et de surcroît issues de collectes en milieu naturel, nécessite une forte anticipation et ne permet pas de stockage sur des délais très importants. Cette anticipation concerne à la fois les besoins tout au long de la réalisation des travaux, qui, comme nous l'avons vu, est segmentée et peut s'échelonner sur plusieurs années [A2, 2023; A4, 2023], mais également le passage de commande auprès des fournisseurs. La production de semences sauvages et locales nécessite des phases de collecte, de tri et de multiplication sur un nombre de générations suffisant à l'obtention de volumes répondants à la demande, et qui s'échelonnent elles aussi sur généralement plusieurs années [P2, 2023].

Tous les BE ne savent pas gérer ces questions d'anticipation : nature et disponibilité des graines, temporalité du projet, contact des fournisseurs, gestion de la présence des terrassiers pour préparer les sols pour la végétalisation... [A4, 2023] Selon les producteurs, la difficulté de traiter avec de gros aménageurs découle de la nécessité d'avoir de grosses disponibilités en semences dans des délais rapprochés car les demandes ne sont pas anticipées [P2, 2023]. Les aménageurs sont habitués à un mode de consommation répandu de nos jours, consistant à commander en ligne des semences auprès de fournisseurs conventionnels dotés d'énormes stocks, sans phase de consultation et proposant une livraison en un temps record [VL1, 2023]. Ainsi, certains producteurs arrivent à maintenir pour certaines espèces des stocks suffisants pour répondre à des projets de taille restreinte apparaissant régulièrement sur le territoire, mais une forte incertitude persiste en raison des besoins en semences spécifiques à chaque nouveau projet [P2, 2023]. De plus, malgré des sollicitations fréquentes par les prescripteurs de ces projets pour l'obtention de conseils en amont de leur réalisation, les producteurs n'ont pas la garantie d'être les fournisseurs retenus *in fine* [P2, 2023].

Il existe un dispositif très efficace pour permettre au producteur de s'assurer de l'écoulement de ses stocks et à l'aménageur d'obtenir le matériel nécessaire aux opérations de végétalisation à temps et dans des quantités suffisantes : le contrat de culture [A4, 2023; VL1, 2023]. Dans le cadre de ce contrat, le producteur a la garantie que sa production sera écoulee, avec un engagement de sa part en termes de volumes et de délais vis-à-vis de l'acheteur, qui sera lui-même assuré de disposer du matériel désiré au gré de ses besoins. Cette solution semble *a priori* idéale pour les deux parties, et on ne peut ici témoigner d'un éventuel manque de volonté d'adopter cette pratique, mais l'argument de la contrainte administrative et surtout la difficulté des grands aménageurs à anticiper leurs besoins sont avancés comme des freins majeurs à son adoption [A4, 2023]. Outre ces contrats de culture, d'autres dispositifs partenariaux peuvent être mis en place pour garantir l'écoulement régulier des productions, et une disponibilité constante en matériel végétal pour les contractants : certains accords sont passés sur un panel d'espèces, engageant une collectivité à réaliser son approvisionnement auprès d'un ou plusieurs producteurs VL au gré de ses besoins [VL4, 2023].

### 2.3.1.2.2 Coûts

Aux dires de l'ensemble des publics interrogés, le prix d'achat des semences herbacées représente une part mineure du budget d'un projet d'aménagement, et même des opérations de végétalisation dans leur ensemble [A2, 2023; A4, 2023; BE1, 2023; P3, 2023; VL1, 2023; VL3, 2023]. L'investissement accordé par les entreprises à la végétalisation reste très inférieur à celui fait pour des actions en faveur de la faune [A4, 2023]. Dans le fonctionnement normal d'un projet, les coûts globaux de la végétalisation sont budgétés, et une enveloppe peut être allouée plus précisément par le MOA pour l'achat des semences sur les conseils ou non d'un prescripteur [BE1, 2023; P3, 2023]. La MOA a donc un rôle à jouer dans la décision d'investir pour l'usage de mélanges plus techniques ou plus favorables à la biodiversité. Le MOE porte également une grande part de cette responsabilité, par un travail de prescription auprès du décideur au vu des enjeux poursuivis, avec la mise en avant des potentiels bénéfiques techniques et écologiques liés à l'usage de mélanges différenciants. Le MOE peut aller jusqu'à

refuser la collaboration avec le MOA s'il estime que l'estimation du budget nécessaire à la réalisation des opérations de végétalisation est insuffisante, ou n'est pas adaptée aux enjeux poursuivis [BE1, 2023]. La décision finale d'augmenter la part budgétaire allouée à l'achat des semences revient au MOA et est modulée par sa volonté d'investir dans une valeur ajoutée environnementale, elle-même dépendante de son niveau de sensibilité et de connaissance de ces enjeux : c'est donc un choix engagé, constituant le premier maillon de la chaîne de valeur [A1, 2023; A4, 2023; BE1, 2023; BE2, 2023; VL1, 2023; VL2, 2023].

Le prix de vente des végétaux disposant de la marque VL est globalement plus élevé que celui des semences issues de filières conventionnelles, s'expliquant en partie par la taille restreinte des structures et donc leur moindre capacité à produire en masse et créer des stocks sans garantie d'écoulement, mais aussi par le temps nécessaire à l'établissement des itinéraires techniques de production de ces espèces. Toutefois, le prix varie beaucoup plus en fonction des espèces que de la filière. Certaines espèces sauvages présentent un itinéraire de production complexe, impliquant un important effort de collecte en milieu naturel, des étapes de tri, de production parfois mal maîtrisée et impliquant la location de terres ou la contractualisation d'agriculteurs, ainsi que des rendements parfois très faibles [P1, 2023; P2, 2023; P3, 2023]. Les aménageurs sont habitués à traiter avec des coûts fixes de la semence au mètre carré, mais c'est une erreur de mettre en concurrence le prix d'une semence locale avec celui d'une semence conventionnelle car la finalité n'est pas la même [P2, 2023; VL2, 2023].

La marque VL apparaît aux yeux de nombreux aménageurs comme onéreuse, quasiment inabordable dans le cadre des grands projets, ce qui nuit à son adoption plus massive [VL1, 2023]. Pourtant, une bonne anticipation des besoins et un travail approfondi sur la composition des mélanges en collaboration avec les producteurs permet de réduire drastiquement les coûts [A2, 2023; P1, 2023]. Par exemple, la semence de pâquerette (*Bellis perennis*) coûte entre 1500 et 2000€/kg, celle de carotte sauvage (*Daucus carota*) autour de 40€/kg, quand un mélange cameline-vesse-lentille (*Camelina sativa* – *Vicia sp* – *Lens culinaris*) peut graviter autour de 1€/kg [P1, 2023]. Les semences de pâquerette sont très petites, et leur PMG donc très faible, nécessitant peu de volume pour obtenir un grand nombre d'individus une fois semé. Le choix d'un mélange couvrant conventionnel ou sauvage à bas coût, complété par quelques espèces apportant une réelle fonctionnalité écologique, bien que dépassant le prix d'un mélange d'engazonnement, permet d'établir une balance des coûts pour l'aménageur, d'apporter une vraie plus-value environnementale, tout en assurant la réussite de ses opérations [P1, 2023]. L'utilisation de mélanges de meilleure qualité permet également de réduire grandement les doses de semis nécessaires à l'établissement d'un bon recouvrement, voire d'éviter des semis successifs à cet effet comme cela était pratiqué par le passé [P3, 2023; VL1, 2023; VL3, 2023]. L'absence de nécessité de préparation du sol, d'ajout d'engrais ou de mise en place d'une gestion intensive, la réduction des frais de transport, sont un ensemble d'éléments à prendre en considération dans l'évaluation des coûts de la végétalisation [P1, 2023; P3, 2023; VL1, 2023]. Pour des projets de plus petite échelle, ou en complément de végétalisation sur des zones à enjeu écologique, l'usage de mélanges issus de broyage, pouvant être complété par certaines espèces cibles, permet l'obtention de cortèges intéressants à prix très contenu [A2, 2023].



L'anticipation des besoins a également un impact sur la bonne prise en compte des prix d'achat de la semence au sein des projets. La végétalisation herbacée est trop souvent gérée en fin de projet, au moment où les budgets de réalisation ont souvent déjà été dépassés par la MOE, et les objectifs prévus pour la végétalisation sont généralement revus à la baisse [BE1, 2023]. Aussi, les budgets prévus pour l'achat des semences au moment de la conception du projet se basent trop souvent sur les prix de routine de l'industrie conventionnelle, malgré des objectifs affichés en matière de biodiversité. Ainsi, en fin de chantier, la réalisation que l'enveloppe prévue n'est pas suffisante pour répondre aux objectifs via l'usage de mélanges différenciants, et que les délais d'approvisionnement sont trop importants, conduit souvent à une rétractation et un retournement vers les filières conventionnelles [VL2, 2023]. La sollicitation des producteurs ou des représentants de la marque en amont permet d'éviter ce genre de situation.

### 2.3.1.2.3 Critères de qualité

Outre le prix de la semence, l'absence d'un critère de qualité sur le matériel produit dans le cadre de la marque VL est un frein à son adoption aux yeux de la clientèle [A3, 2023; BE1, 2023; VL2, 2023]. C'est d'autant plus vrai pour les acteurs ayant l'habitude de s'approvisionner auprès de la filière commerciale conventionnelle, au sein de laquelle la plupart des espèces vendues sont des cultivars dont les caractéristiques, telles que le taux de germination et la vitesse de croissance, sont connus et affichés [VL2, 2023].

Un des prescripteurs (BE) interrogé nous dit apprécier l'intégration de critères forts de traçabilité du matériel végétal, ainsi que les réflexions de la marque les questions de biodiversité, encore trop absentes des pratiques usuelles. Toutefois, il déplore l'absence de critères (1) de suivi du parcours de mise en culture pouvant affecter la germination des graines, (2) concernant la durée et les conditions de conservation des semences avant revente, pouvant là-aussi affecter leur viabilité, (3) sur la teneur des lots vendus en « déchets » (*i.e.* matières inertes, matériels autres que de la semence : *e.g.* terre, tiges, son etc.), et enfin (4) concernant la pureté spécifique du matériel vendu [BE1, 2023]. Concernant ce dernier point, le référentiel technique de VL dispose bien d'une clause obligatoire pour le producteur de vérification visuelle de la pureté spécifique des semences utilisées pour les semis de multiplication, mais pas à notre connaissance sur les produits finaux de vente [Végétal local, 2023a]. L'absence d'obligation de test et d'affichage des taux de germination par la marque s'explique par une nécessité d'établir des évaluations de viabilité et non de germination des semences, dans des standards différents de ceux des semences sélectionnées [VL1, 2023, communication personnelle]. Cette approche apparaît aux yeux de certains clients comme un risque potentiel à la faisabilité des opérations de végétalisation [BE1, 2023; VL2, 2023], qui semble pourtant questionnable au vu des retours d'expérience des utilisateurs et des travaux menés dans le cadre de cette étude (*cf.* Partie 2 – Chapitre 3).

### 2.3.1.3 Suivi et contrôle des pratiques de végétalisation

#### 2.3.1.3.1 Instrumentalisation de la marque par les porteurs de projets

La marque est de plus en plus citée au sein des politiques publiques nationales (Fond Vert) et régionales avec des possibilités d'obtention de financements pour son usage. Ainsi,

certaines aménageurs utilisent la marque afin de bénéficier d'indemnités issues de fonds publics, indépendamment d'une justification de son utilité ce qui va à l'encontre de la chaîne de valeurs sur laquelle repose la marque [VL1, 2023]. L'utilisation est également parfois plus motivée par une volonté d'amélioration de l'image de l'entreprise et d'acceptabilité du projet que par réelle conviction pour ses retombées environnementales et économiques [P1, 2023; P2, 2023; VL2, 2023; VL3, 2023; VL4, 2023]. Dans le cas de telles utilisations, la citation de la marque peut devenir un "leurre écologique", permettant de donner l'image d'un projet respectueux de la biodiversité sans qu'il ne le soit vraiment [VL1, 2023]. Il arrive même que des porteurs de projet bénéficient d'indemnités, ou réalisent un affichage de la marque à des fins communicationnelles, sans un approvisionnement effectif en végétaux VL *in fine*, pouvant conduire à une mobilisation du service juridique de l'OFB ou des services douaniers afin de qualifier une pratique frauduleuse et tenter des poursuites juridiques [VL1, 2023]. Bien qu'assez rares, ces cas de mésusages se retrouvent plutôt chez les constructeurs privés, au contraire des instances publiques telles que les Conseils Départementaux, plus impliqués dans une démarche d'amélioration de leurs pratiques en faveur de la biodiversité et l'application des mesures associées [P1, 2023; VL4, 2023]. Afin d'éviter cette instrumentalisation, la marque a établi des limites à l'utilisation du logo par les utilisateurs de VL. Celle-ci se traduit par exemple par une restriction de l'utilisation du logo de la marque aux semences, et non aux chantiers [VL3, 2023]. Aussi, l'utilisation de « kits média » par les entreprises est soumise à vérification que des végétaux de la marque VL ont bien été achetés sur la base de factures [VL1, 2023].

### 2.3.1.3.2 *Contrôle des pratiques au sein des chantiers*

Il n'est pas rare d'observer que les choix d'utiliser des mélanges favorables à la biodiversité, qu'ils bénéficient ou non de la marque VL, n'aboutissent pas à leur mise en place effective sur le terrain en fin de chantier [A2, 2023; A4, 2023; P1, 2023; P2, 2023; P3, 2023; VL1, 2023; VL3, 2023]. Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de ce constat. Le mauvais alignement des budgets alloués à la végétalisation avec les objectifs associés ou le manque d'anticipation de la disponibilité du matériel, qu'ils soient à l'origine de la MOA ou des prescripteurs, peuvent expliquer cela [A2, 2023; P1, 2023; P3, 2023]. Les difficultés à contrôler les pratiques des prestataires successifs au sein des grands projets peu également avoir un impact. Les MOE en charge de la conduite des travaux sous-traitent dans la plupart des cas les services de végétalisation auprès de prestataires, comme des entreprises d'engazonnement, sous-traitant elles-mêmes une entreprise d'hydroseeding [P3, 2023]. Bien qu'un dispositif contractuel fort soit établi avec les prestataires pour l'application des CCTP, il arrive que des fautes soient commises, comme la réduction des doses de semis ou l'achat de végétaux ne correspondant pas à l'accord initial [A1, 2023; A4, 2023; P3, 2023]. L'évitement de ces pratiques passe par une formulation claire des exigences par le MOA, mais surtout un contrôle à chaque étape du chantier par le MOE, via la vérification des factures et des visites de terrain régulières, sous peine de sanction ou d'arrêts du chantier [A1, 2023; A2, 2023; A4, 2023; P2, 2023; P3, 2023].

*« Le MOA qui passe sa commande, il doit être ferme, et bien préciser ses attentes dans son dossier de consultation, pour que l'entreprise puisse comprendre ce*



*qu'on attend d'elle, avec en face les prix qui permettent d'atteindre ces objectifs. Parce que l'entreprise si elle n'a pas assez d'argent elle va chercher à vous rogner, elle ne le fera pas, ou le fera mal, c'est toute une chaîne. » [A2, 2023]*

*« On a beau avoir des exigences, on a du mal à les faire tenir jusqu'au bout (...) si on n'a pas le suivi adéquat (sur les chantiers). » [A4, 2023]*

*« C'est souvent qu'à l'étude, c'est marqué Végétal local, et puis finalement, ça n'est pas utilisé parce que personne n'a suivi, personne n'est allé voir sur le terrain pour savoir ce qui avait poussé. » [P2, 2023]*

Le contrôle des végétaux effectivement implantés peut être réalisé par la DREAL si l'utilisation de végétaux marqués est soumise à obligation, par des membres de la marque VL de manière volontaire ou sur demande du MOA, par les prescripteurs / MOE / BEV s'ils disposent des compétences nécessaires à cette vérification. Cependant, le manque de ressources humaines au sein de la marque et des DREAL limite fortement la mobilisation de personnels sur le terrain [VL1, 2023; VL3, 2023]. Des pays comme la Suisse ou l'Autriche semblent mobiliser plus de moyens pour la mise en place de contrôle de la bonne application des modalités de végétalisation sur les chantiers au sein de leur territoire [P3, 2023]. Il semblerait que certaines méconduites soient parfois involontaires, avec des acteurs qui pensent acheter du matériel VL, et qui, une fois l'expertise de terrain réalisée, réalisent que les semences n'ont pas été produites sous l'égide de la marque. Cela montre encore une fois le besoin d'accompagnement et de formation des acteurs aux pratiques d'approvisionnement [VL1, 2023].

#### *2.3.1.3.3 Du manque de continuité entre les acteurs*

Les grands projets d'aménagement mobilisent un grand nombre d'acteurs de manière successive et étalée dans le temps. Les préconisations faites par les producteurs semenciers aux bureaux d'études en charge de la végétalisation (BEV) concernant les techniques de mise en œuvre du semi n'ont pas la garantie d'être transmises aux entreprises de travaux [P1, 2023]. De même, les éventuelles préconisations de gestion des sites après végétalisation formulées par les producteurs et les prescripteurs peuvent ne pas parvenir aux concessionnaires de l'ouvrage. Si toutefois c'est le cas, leur bonne mise en application reste à leur discrétion [BE2, 2023]. Les entreprises sollicitées à une des étapes du processus sont généralement libérées dès la fin de leur mission. Après la livraison de l'ouvrage effectuée par le MOE au MOA concessionnaire, une courte période de suivi de la végétation est assurée, visant à vérifier la conformité des garanties de reprise fournies par le constructeur (*i.e.* la survie des plants et l'établissement du couvert végétal), puis ce dernier est libéré [BE2, 2023]. Sur le projet du COS, où un travail plus important sur le plan de la végétalisation a été mené, les concessionnaires ont été en contact avec les concepteurs, mais ne sont malheureusement pas sensibilisés à la gestion des herbacées, posant ainsi de gros doutes sur le maintien des cortèges dans le temps [A5, 2023]. La mise en place et le maintien de mesures environnementales devrait s'accompagner d'un suivi renforcé afin d'obtenir un retour d'expérience sur les efforts fournis, et la collecte de données permettant d'en évaluer les bénéfices. Toutefois, ce travail est rarement fait en dehors des zones de compensation soumises à obligations réglementaires et des ouvrages spécifiques comme les passages à faune.

#### 2.3.1.3.4 Manque de suivi et d'indicateurs de réussite

*« (...) mais typiquement, tout ce qui est insecte et autre biodiversité, à part pour les mesures compensatoires, je n'ai pas de mesures qui me permettent de dire qu'on a bien fait le boulot. » [A5, 2023]*

En l'absence de moyens pour vérifier la conformité et l'expression de la végétation semée, la difficulté d'évaluation de la réussite de la végétalisation vient du choix des critères à considérer. Un mélange herbacé industriel s'implantant rapidement, sans se poser la question des services qu'il apporte à l'écosystème, ou de sa capacité d'adaptation à des conditions biotiques ou abiotiques exceptionnelles sur le long terme, peut être vu comme étant très efficace du point de vue technique :

*« (...) un mélange d'espèces fourragères classique du commerce s'implante mieux et plus facilement, mais qu'est-ce qu'on a mesuré comme indicateur ? On a juste mesuré combien il recouvre vite le sol et combien il produit de feuilles... (Est-)ce qu'on a mesuré quel service il va rendre à l'écosystème sur le long terme, combien d'insectes vont pouvoir se nourrir grâce à ce mélange, (...) enfin tous les services qui pourraient être vus dans leur intégralité ? Est-ce que l'érosion est vraiment stoppée sur le long terme ? S'il y a un hiver froid, est-ce que le mélange résiste quand même ou pas ? S'il y a un été sec sans arrosage, est-ce qu'il résiste quand même ? » [VL1, 2023]*

On touche ici à la mesure de l'ensemble des facteurs propres au fonctionnement et la dynamique d'un écosystème, ce que l'Homme ne maîtrise pas. L'évaluation des services écosystémiques se concentre généralement sur ceux lui apportant un bénéfice direct [VL1, 2023].

Ce manque systématique de suivi des opérations de végétalisation mises en place au sein des projets d'aménagement engendre des difficultés pour les prescripteurs, BEV, membres de la marque VL et producteurs à capitaliser sur les retours d'expérience pour faire évoluer leurs pratiques et conseils au cours du temps [BE2, 2023; P1, 2023; P2, 2023; VL3, 2023]. Par conséquent, il n'y a pas aujourd'hui un recul suffisant pour juger de l'efficacité en termes de reprise des milieux au moyen de végétaux locaux dans certains contextes d'aménagement comme les talus [VL2, 2023]. En contexte de cicatrisation de milieux au sein de projets à visée écologique ou touristique, les résultats sont plus connus et montrent un bon taux de succès [VL2, 2023]. Les tests de germination en laboratoire sur certaines espèces montrent une germination plus lente pour les semences VL, ce qui ne veut pas dire que leur taux de germination *in fine* est inférieur, et ce qui ne donne pas d'information sur la survie en conditions de terrain [VL3, 2023]. La multitude de modalités de préparation des sols, de techniques, de compositions de mélanges et de modes de gestion rendent difficiles l'évaluation formelle de ces opérations sans un suivi rigoureux de chaque étape de réalisation et une capitalisation sur les retours d'expérience [VL1, 2023].

#### 2.3.1.3.5 Mésusages parmi les producteurs de semences

Comme mentionné au 2.2.2.3.1, des contrôles réguliers des producteurs sont mis en place par la marque. Ces contrôles permettent de s'assurer du suivi de la charte de bonnes pratiques

relatives à la collecte et la production des végétaux, que l'affichage des espèces au sein des catalogues ou sites Internet corresponde bien aux productions effectives, ainsi que les méthodes de ventes respectent bien les valeurs de la marque [VL1, 2023; VL4, 2023]. Les producteurs se soumettent à un audit initial au moment de l'adhésion, puis peuvent être soumis à un ou deux contrôles supplémentaires sur la durée d'obtention de la marque [VL4, 2023]. En cas de non-respect de la charte, les sanctions peuvent consister en un simple rappel à l'ordre, ou se traduire par une suspension du droit d'usage de la marque pour le producteur [VL1, 2023].

Certains producteurs ont pu demander à bénéficier de la marque tout en décalant la mise en production des semences. Ils ont été alors suspendus du droit d'usage de la marque jusqu'à que leur production soit effective. Cela a pu constituer pour eux un moyen d'attirer la clientèle, pour ensuite la réorienter vers d'autres végétaux issus de modes de productions différents. Toutefois, cela représente des cas très isolés et marginaux en comparaison avec le nombre de producteurs effectifs [VL3, 2023; VL4, 2023].

Outre les producteurs bénéficiaires VL, il existe beaucoup de greenwashing autour des termes liés aux mélanges de végétalisation vendus dans le commerce. En jardinerie, ou auprès de fournisseurs conventionnels, de nombreux mélanges vendus sous l'appellation "Prairies fleuries" contiennent peu ou pas d'espèces indigènes, mais plutôt une majorité de cultivars aux fonctions écologiques altérées, comme l'absence d'organes nectarifères, ayant un effet de leurre écologique [VL4, 2023].

### **2.3.2 Enjeux autour de la filière de production de semences sauvages et locales**

#### **2.3.2.1 Cadre réglementaire encadrant la commercialisation des semences**

Différentes réglementations interviennent dans le cadre de la collecte et la commercialisation d'espèces herbacées pour les producteurs de semence, qu'ils soient bénéficiaires de la marque VL ou non. Premièrement, le Code de l'Environnement, par ses articles L-411-1 et L411-2 [Légifrance, 2024], interdit toutes actions de collecte, de destruction et de transport d'une liste d'espèces de la flore sauvage rare et menacée fixée par arrêté ministériel au niveau national, et complétée par des listes régionales (au sens administratif). Cela contraint les producteurs bénéficiaires ou prestataires dans leurs actions de collecte, mais aussi les entreprises désireuses d'utiliser pour leurs besoins de végétalisation des semences issus de brossage par exemple [VL2, 2023]. Les personnes souhaitant réaliser des opérations de brossage ou de collecte de foin vert doivent ainsi s'assurer de l'absence au sein du milieu de ces espèces [Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2021]. Certains membres de la marque VL suggèrent une réflexion sur l'assouplissement de la réglementation pour certains cas d'application, et sous certaines conditions relatives à la vulnérabilité des espèces en question, notamment lorsque la collecte en vue d'un semi ultérieur n'affecterait pas la viabilité de la population d'origine, avec de surcroît la possibilité de créer d'autres populations viables au sein du site d'accueil [VL2, 2023].

Il n'existe pas de réglementation sur la commercialisation d'écotypes sauvages d'espèces non fourragères lorsque celles-ci ne sont pas protégées au sens du code de l'environnement. En revanche, pour les espèces fourragères en France, la réglementation a pu

être un obstacle majeur au développement de la filière herbacée en freinant considérablement la production de certaines espèces. En effet, la commercialisation d'écotypes sauvages d'espèces fourragères était interdite jusqu'à 2010 par la réglementation sur les plantes fourragères, depuis 1966 – Directive 66/401 [Légifrance, 1966]. Elle a été rendue possible sous conditions par la directive 2010/60/UE [Commission européenne, 2010] dans des mélanges appelés « mélanges de préservation » pour lesquels une demande était nécessaire à chaque nouveau mélange créé. L'arrêté du 2 octobre 2017 [Légifrance, 2017] émanant du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, détaille les type de semences concernées — variétés fourragères inscrites au catalogue officiel (Annexe 1.A) ou non (Annexe 1.B) et écotypes sauvages de toutes plantes fourragères — ainsi que les règles de commercialisation associées à chacun. Les contraintes sont fortes : est interdite par exemple la commercialisation des espèces inscrites à l'annexe 1.A en semences pures (*i.e.* hors mélanges). Les producteurs doivent réaliser une demande de commercialisation de tous mélanges de préservation, c'est à dire contenant au moins un écototype sauvage des espèces de l'annexe 1.A, auprès du Comité Technique Permanent de la Sélection du Groupe d'Etude et de contrôle des Variétés Et des Semences (GEVES). Le producteur doit par ailleurs être enregistré auprès de la SEMAE et sa Direction de la qualité et du contrôle , et déclarer annuellement ses prévisions de collecte et de commercialisation de mélanges de préservation pour l'année à venir [Végétal local, 2023b].

Cette réglementation émanant d'une directive européenne intègre de nombreuses espèces couramment utilisées au sein des mélanges de végétalisation (fétuques, dactyles, pâturins, agrostis...), et son application en France est la plus contraignante des pays de l'UE [VL1, 2023]. Avant 2023, pour pouvoir les mettre sur le marché, les producteurs devaient réaliser une demande d'autorisation, non pas pour chaque espèce, mais pour chacune de leur utilisation au sein des mélanges commercialisés [VL1, 2023]. C'est à dire qu'à chaque nouvelle demande d'un client, pour peu que le ratio de quantité de l'espèce visée diffère d'un mélange similaire déjà commercialisé par le passé, une nouvelle demande d'autorisation était à prévoir. Ces demandes pouvaient mettre plusieurs mois à être traitées, compliquant considérablement la fourniture rapide de tout mélange de végétalisation aux potentiels clients de la marque [P3, 2023]. Les gestionnaires de la marque ainsi que les producteurs sont en négociation constante depuis plusieurs années avec les autorités afin d'assouplir ces règles, car les cadres d'utilisation des végétaux de la marque VL ne rentrent pas en concurrence avec les activités agricoles initialement visées par la réglementation [VL1, 2023].

La marque a permis une évolution en 2023 de la réglementation, en s'y inscrivant et en offrant par exemple une procédure simplifiée de déclaration aux bénéficiaires de la marque dans le cadre de la commercialisation de mélanges de 100% d'espèces attributaires. Toutes les demandes peuvent être effectuées annuellement en début de saison, et le dossier, si non traité, est automatiquement accepté au-delà d'un délai de 2 mois. La grande majorité de mélanges commercialisés par les semenciers bénéficiaires sont réalisés sur mesure pour s'adapter aux contraintes des projets, et on perçoit ici l'avantage que peut procurer la marque dans le cadre de l'exercice de leur activité, bien qu'elle impose en outre un certain nombre d'exigences.



*Entreposage des produits de collecte*



*Séchage des produits de collecte*



*Machine de tri des semences*



*Machine de tri des semences*



*Serres d'expérimentation et de multiplication des semences*



*Ensachage avant livraison*

Illustration 5 : Equipements et procédés pour la production de semences – Nungesser semences –  
Crédits : Anaël Mayeur

### **2.3.2.2 Reconstruction des savoirs relatifs à la production d'herbacées sauvages**

Un des freins majeurs au développement de la filière herbacée concerne les savoirs relatifs à la collecte, mais surtout la production des semences d'écotypes locaux. Concernant la collecte, elle demande de bonnes connaissances en botanique et en écologie permettant d'identifier à la fois les espèces, mais aussi l'ancienneté et le niveau de conservation des milieux sources [BE2, 2023]. Les acteurs de la conservation possèdent ces savoirs, mais les plus gros semenciers bénéficiaires de la marque VL, dont certains sont issus de la production conventionnelle, ne les ont pas toujours.

De nombreux guides décrivant les itinéraires techniques de production d'espèces ligneuses existent aujourd'hui, produit de la mise en commun des connaissances émanant de l'Afac-Agroforesterie et des pépiniéristes [P1, 2023; P2, 2023; VL1, 2023; VL2, 2023; VL3, 2023]. Cette filière est constituée en majorité de petites structures agissant à une échelle très locale, et qui ne se voient donc pas comme des concurrents directs [P1, 2023]. Ces itinéraires techniques sont donc maîtrisés, capitalisés et diffusés publiquement par la marque VL [P1, 2023; P2, 2023; P3, 2023; VL2, 2023]. Contrairement à la filière ligneuse, au sein de laquelle les producteurs travaillent conjointement, tant sur le partage des marchés que celui des connaissances, la logique concurrentielle inhérente à filière herbacée pousse à la rétention des connaissances acquises et développées par chaque producteur [P1, 2023; P2, 2023; P3, 2023; VL1, 2023; VL3, 2023]. Bien que chaque producteur ait des marchés locaux privilégiés, tous sont soumis à une concurrence à l'échelle nationale voire internationale avec les producteurs des pays limitrophes [P2, 2023]. Des groupements de producteurs de semences sauvages à l'échelle européenne commencent à voir le jour, permettant la visite mutuelle des installations et l'ouverture de discussions sur l'évolution des réglementations notamment, mais les itinéraires techniques ne sont encore que rarement partagés [P2, 2023].

La marque s'est lancée alors que les savoirs autour de la production de semences herbacées sauvages et locales avaient quasiment disparus ou n'avaient jamais été développés en France [VL1, 2023]. Les connaissances sur les itinéraires techniques de production des espèces sont majoritairement détenues par trois ou quatre producteurs en France, et il y a une absence de ressources bibliographiques formelles sur le sujet [P3, 2023; VL1, 2023]. Ainsi, ils sont développés en interne par l'expérimentation, s'appuyant sur certaines connaissances en botanique mais surtout sur le « *bon sens paysan* » [P2, 2023], ce qui favorise les acteurs déjà bien établis dans le milieu. Avec une durée estimée à 10 ans avant de formaliser l'itinéraire technique pour chaque espèce, l'absence de cette connaissance peut constituer une barrière majeure au lancement de nouvelles structures [VL1, 2023].

La marque, via les animations nationales et régionales, tente malgré tout de favoriser la création de liens entre les producteurs pour le partage des connaissances, mais ce travail s'effectue sur le temps long [VL1, 2023]. Pour tenter d'accélérer le processus, d'autres moyens sont mis en œuvre par les CBN, comme des programmes de recherche et d'expérimentation généralement financés par des institutions publiques d'échelle régionale ou européenne [VL3, 2023]. Les structures expertes du végétal, telles que les CBN ou les lycées agricoles, éditent au sein des régions d'origine des itinéraires techniques espèce par espèce [Dupin et al., 2014], et un premier guide est à paraître sur les espèces messicoles [VL3, 2023]. Le CBNMC met par

exemple à disposition sur son site des cartes permettant d'identifier les sites de collectes de certaines espèces, des retours d'expérience sur les projets expérimentaux suivis par le conservatoire, ainsi que des formations pour les producteurs. La conception de formations à destination des producteurs de semences herbacées est toutefois difficile car les itinéraires techniques dépendent à la fois du contexte écologique, de la localisation des structures, des outils leur disposition et du choix des méthodes. [VL3, 2023].

### **2.3.2.3 Enjeux techniques pour les producteurs**

Au lancement de la marque, de nombreux producteurs émettaient une réserve, voire une résistance face à la complexité du référentiel technique imposé pour la production des semences sauvages et locales : large effort de collecte, absence de sélection, limitation du nombre de générations de multiplication pour les herbacées (cf 2.2.2.3.1)... et pour certains producteurs, le simple fait de produire français aurait été satisfaisant [VL1, 2023].

*« Il s'est avéré qu'effectivement, le Végétal local, à l'époque, c'est arrivé sur une niche où il n'y avait personne. Ça reste une filière qui est quand même très différente de l'horticulture étant donné qu'il faut faire de la collecte en milieu naturel sur un certain périmètre, ça prend en compte pas mal de contraintes qui sont liées à la temporalité, aux saisonnalités, et cetera. Et puis on a tout le traitement de la graine qui demande un certain savoir-faire et un certain temps. » [VL4, 2023]*

Bien que la production des semences sauvages et locales fasse appel à des savoirs et techniques de base communs avec d'autres types de végétaux, elle présente certains défis techniques, et un certain degré d'incertitude liés à la multiplicité des étapes pour les producteurs [P2, 2023]. Le premier est la collecte des semences de plantes sauvages, dont certaines espèces présentent des périodes de floraison et de fructification très étalées, à l'inverse des cultivars en conditions de culture pour lesquels la floraison est généralement regroupée [P1, 2023]. Ensuite, le temps de germination des semences sauvages et la période de fructification sont souvent spécifiques et incertains, rendant la récolte moins efficace [P1, 2023]. Certaines espèces mettent jusqu'à 2 ans avant de donner les premiers fruits contrairement à leurs équivalents commerciaux [P2, 2023]. Ces différences impliquent nécessairement des rendements inférieurs. Des efforts sont engagés par des instituts techniques tels qu'ASTRED'HOR, pour l'acquisition de connaissances sur les levées de dormance à travers un projet financé par la région Ile-de-France [VL2, 2023], susceptible d'inspirer d'autres structures au développement des connaissances.

Afin d'être concurrentiel sur le marché de la semence herbacée, il est nécessaire pour les nouveaux producteurs de s'équiper en machines spécifiques, pour le tri, la mise en culture, la récolte, le conditionnement des semences produites [P3, 2023]. Malgré des aides à l'acquisition de certains matériels, cela représente malgré tout une grosse barrière financière au lancement d'une activité dans ce marché naissant. Une dernière contrainte technique majeure est la difficulté à trouver des terrains pour la multiplication, ou de contractualiser avec des agriculteurs acceptant de travailler avec des espèces habituellement considérées comme de la « mauvaise herbe » [P3, 2023]. Cette opération est rendue d'autant plus difficile que la production d'espèces et d'écotypes sauvages ne permet pas la mise en œuvre de pratiques



mécanisées conventionnelles ou l'emploi de produits phytosanitaires, et fait régulièrement appel à des techniques plus ancestrales comme le binage à la main [P3, 2023]. Les agriculteurs sont de plus en plus incités à diversifier leurs productions et leurs sources de revenus, mais il reste parfois compliqué de faire appliquer à la lettre des préconisations sur des méthodes de culture éloignées de leurs pratiques habituelles [P3, 2023].

#### **2.3.2.4 Alignement de l'offre et la demande**

Au lancement de VL, il a été reproché à la marque l'absence de végétaux et de stocks pour pouvoir répondre aux demandes. Ce manque s'explique facilement par l'inertie de la croissance de la marque lors des premières années, symptôme de la perte ou de l'absence des savoirs liés à la production décrite précédemment, par la réticence des producteurs à investir massivement dans ce nouveau secteur d'activité, et par le temps nécessaire à établir une relation de confiance entre producteurs et utilisateurs [VL1, 2023]. Le manque de visibilité sur la demande saisonnière, liée à la fréquence variable d'apparition de nouveaux chantiers sur les territoires, n'incite pas les producteurs à la constitution de stocks importants [BE1, 2023; VL2, 2023]. Certains acteurs de l'aménagement interrogés suggèrent une prise de risque par les producteurs afin d'augmenter leur offre, en se concentrant par exemple sur la constitution de stocks importants sur les espèces les plus couramment utilisées [A3, 2023; A4, 2023]. Cependant, la plupart des interrogés considèrent que les producteurs n'ont pas à assumer cette prise de risque, et que les aménageurs doivent impérativement apprendre à anticiper leurs besoins, mieux formuler leurs demandes, et faire évoluer leurs modes de consommation vers l'établissement de contrats de culture ou de dispositifs partenariaux (cf. 2.3.1.2.1) [BE2, 2023; VL1, 2023; VL4, 2023]. Dans le cas du COS, cité comme exemple de l'évolution des pratiques vers une réflexion plus poussée sur la végétalisation herbacée, le producteur n'a été prévenu qu'un an à l'avance des besoins du chantier, malgré un projet s'étalant sur plusieurs années [P3, 2023]. Une anticipation de deux à trois ans à l'avance ne semble pas irréaliste, et représente généralement la période nécessaire à la production des végétaux sauvages par les producteurs.

#### **2.3.2.5 Valeurs de la marque**

Les aménageurs se tournent régulièrement vers les CBN pour questionner les principes et valeurs de la marque. La vision de VL apparaît parfois comme fixiste, par sa volonté de conserver la biodiversité existante, et contraignante lorsqu'imposée au sein des cahiers des charges [VL2, 2023]. Un certain niveau d'incompréhension persiste face à la stochasticité des effets à venir du changement climatique, et l'approche de Végétal local est moins facile à intégrer que les approches de migration assistée adoptées par l'ONF par exemple [ONF, 2024]. Face à ce constat, un besoin essentiel et répété de communication est nécessaire auprès des acteurs afin de présenter les mécanismes d'adaptation spécifiques aux espèces herbacées, mais aussi ligneuses [VL2, 2023; VL3, 2023].

*« On n'a pas de certitudes pour l'instant. On ne sait pas comment le climat va se comporter et l'effet qu'il va avoir sur les populations. Est-ce que ce sont vraiment les végétaux ou les cortèges qui existent actuellement plus au sud qui vont migrer vers le nord ? On ne sait pas du tout comment ça va se comporter. Donc c'est une incertitude scientifique, qui va encore perdurer pendant longtemps je pense. Face*



*à ça, Végétal local a toujours été très humble et s'est toujours dit : on va plutôt prendre le parti de baser l'adaptation au changement climatique sur des semences qui sont récoltées sur plusieurs populations, afin d'avoir une diversité génétique importante qui soit force de résilience ; et pour l'instant le fait de favoriser, dans Végétal local, des récoltes plus au sud pour des projets qui seraient plus au nord, on a dit non, on n'est pas assez mûrs pour ça. » [VL3, 2023]*

### **2.3.2.6 Perspectives d'évolution de la filière**

La marque connaît une croissance importante depuis sa création, tant sur le nombre de demandes de producteurs pour bénéficier de la marque que sur la demande des utilisateurs en végétaux. Concernant les herbacées, cette demande grandissante semble émaner des professionnels plus jeunes du secteur de l'aménagement, plus sensibles aux problématiques environnementales, ainsi que des professionnels formés à l'écologie. De plus en plus de lycées agricoles, de personnes sortant de filières professionnalisantes s'intéressent et s'impliquent dans la démarche [P3, 2023]. La présence de soutiens par des structures institutionnelles au niveau régional ou à plus large échelle témoigne de la montée en puissance progressive de la filière.

Cette croissance rapide de la demande et de la filière a eu un impact sur la gestion et l'organisation de la marque, qui nécessite des budgets adéquats pour permettre une bonne structuration et un accueil des entrants dans de bonnes conditions [VL1, 2023]. Les besoins majeurs se situent au niveau de l'audit, de la formation et l'accompagnement des candidats, ainsi que le porté à connaissance et l'accompagnement des potentiels utilisateurs sur les territoires [VL1, 2023; VL2, 2023; VL3, 2023]. Les référents de la marque assurent ces missions en parallèle de celles incombant à leur poste au sein des CBN, et le temps qui leur est alloué ne suffit souvent pas encore à une gestion efficace [VL2, 2023]. En conséquence, des producteurs font part d'un sentiment de manque de prise en compte des remontées de terrain dans l'évolution des orientation de la marque [P1, 2023].

Le maillage territorial des producteurs reste encore inégal, comme en Ile-de-France, et devrait évoluer avec l'arrivée de financements européens permettant de structurer la filière où l'offre fait le plus défaut [VL2, 2023]. Les études d'opportunités réalisées en région, comme celle menée en Nouvelle-Aquitaine ayant débouché sur la parution d'une feuille de route VL [Du vert dans les rouages, 2022, 2020], permettent de formuler clairement les besoins de la filière et les actions concrètes à mener pour le développement de la filière dans cette région, et qui peuvent être inspirantes pour certaines autres [VL4, 2023].

## **DISCUSSION CONCLUSIVE : REFLEXION ENGAGEE SUR UNE EVOLUTION DES PRATIQUES ET DES MENTALITES**

Malgré une prise en compte croissante des enjeux environnementaux dans la réalisation des grands projets d'aménagement, les enjeux spécifiques de biodiversité sont intégrés de manière encore trop parcellaire. Les grandes infrastructures linéaires terrestres de transport présentent des contraintes techniques de mise en œuvre et de maintien évidents, mais il apparaît que ce secteur présente un retard sur l'intégration de ces enjeux. La priorité donnée à répondre aux contraintes techniques est légitime, mais la quasi-absence de réflexions basées sur une vraie approche écologique des opérations de végétalisation qui les accompagne montre un retard de ce secteur sur l'intégration de la biodiversité aux projets, et un manque de compétences au sein des structures y prenant part. La bonne prise en compte de ces questions est encore trop souvent perçue comme une contrainte, conduisant certains acteurs à réaliser le strict nécessaire en réponse aux obligations réglementaires. En l'absence de vrais profils écologues en interne, les porteurs de projets doivent aller chercher conseil, s'appuyer sur les structures porteuses de cette connaissance et dimensionner les moyens en conséquence. Les prescripteurs sont les fers de lance de l'évolution des pratiques et des exigences en matière d'écologie. Ils ne doivent pas se contenter de répondre aux demandes, mais doivent également monter en compétence et accompagner les commanditaires dans la définition de leurs exigences.

L'acte de végétaliser doit s'intégrer dans une démarche écologique engagée, dont les modalités de mise en œuvre sont anticipées, et dont les moyens sont dimensionnés en conséquence, avec la mise en place de suivis sérieux et d'une capitalisation sur les retours d'expérience permettant d'en évaluer les bénéfices et les pistes d'amélioration. Les acteurs multiples et successifs mobilisés sur les grands projets doivent être sensibilisés et suivis dans leurs actions, pour garantir la bonne exécution des initiatives engagées, et éviter une revue à la baisse systématique des ambitions en fin de chantier. La marque Végétal local ne doit pas être utilisée dans un but unique de valorisation des projets et de faire-valoir de la bonne volonté des aménageurs. Elle nécessite la connaissance et le respect de la chaîne de valeur nécessaire à la bonne intégration de sa démarche. Le choix d'utiliser des végétaux sauvages et locaux doit être perçu comme un investissement dans un produit à valeur ajoutée sociale et environnementale, plus que comme un surcoût à la réponse aux attentes techniques de routine. Considérant la chaîne de valeur des projets toujours plus tournée vers l'environnement, le prix d'achat de végétaux VL ne devrait pas être de nature à dissuader les aménageurs de leur utilisation.

*« Et derrière y a quelque chose qui ne se mesure pas, c'est la valorisation que peuvent en faire les entreprises. On peut y attacher une certaine importance. C'est à dire que on quand on a une publication à l'appui de l'efficacité des mesures mises en place, vous pouvez le valoriser dans votre dans votre bilan RSE et dans vos indicateurs extra financiers. Vous avez donc un investissement qui est bon pour la planète, et d'un point de vue économique, quand on fait vraiment le bilan complet, je ne suis pas sûr qu'il soit défavorable. » [A4, 2023]*

Pour certains, cette évolution doit passer par une adaptation des modes de consommation et des méthodes de travail : une prise de contact directe avec les producteurs, une phase d'information sur l'état du marché et la disponibilité locale des semences en amont de l'établissement du CCTP, l'intégration de critères supplémentaires dans le choix des partenaires... Les formations, l'accompagnement, l'organisation de groupes d'échange, la mise à disposition de ressources par la marque Végétal local, les associations comme l'Afac-Agroforesteries, les groupements de professionnels comme l'UPGE et AI-GEco, les réseaux comme REVER, ou l'initiative de personnes isolées porteuses de convictions, contribuent à cette évolution des mentalités, à même de se transformer en actions concrètes. La science a aussi son rôle à jouer, bien qu'un décloisonnement entre milieux scientifiques et opérationnels soit encore nécessaire, par la mise en place de programmes tenant compte de l'expérience des professionnels et des contraintes du terrain, mais également par une démarche active d'ouverture et de réflexion de ce monde professionnel sur l'évolution des pratiques et des enjeux scientifiques actuels.

*« Moi les scientifiques parfois, il me font un peu trop peur. C'est à dire qu'ils sont très théoriques mais ils n'ont pas la vision du terrain. Les gens de terrain comme moi, on se fait aussi peur parce qu'on est trop terre-à-terre, et on n'a pas forcément la bonne vision. Donc marier les deux, je trouve que c'est indispensable. (...) C'est vraiment par l'échange, le partage des expériences que l'on améliore encore plus ces projets. » [A2, 2023]*

La formation des futurs chercheurs et professionnels n'est pas à négliger. Beaucoup de profils d'ingénieurs agronomes et paysagistes se retrouvent sur des postes nécessitant de nombreuses connaissances en écologie, qui manquent encore trop largement à leur formation. A l'inverse, les écologues souffrent souvent de lacunes sur les compétences sociales et opérationnelles appréciées des recruteurs. De nombreuses évolutions sont constatées au sein des formations ces dernières années, mais les écologues sont encore sous-représentés dans les corps de métiers liés à l'aménagement des territoires, qui bénéficieraient pourtant de leurs compétences.

## **Annexes de la Partie 1**

### Annexe 1 : Guide d'entretien simplifié – Prescripteurs

**1- Pouvez-vous nous décrire la politique d'engagement en faveur de la biodiversité de votre structure ?**

Quels sont les principaux moteurs qui vous poussent à monter en compétences sur ces questions ?

**2- Pouvez-vous nous décrire succinctement les services fournis par votre bureau d'études aux acteurs de l'aménagement pour la bonne prise en compte des enjeux de biodiversité au sein des grands projets ?**

A. La nature et l'étendue de ces services sont-ils dictés par des facteurs extérieurs ?

B. Poussez-vous les maîtres d'œuvre et d'ouvrage à une plus grande prise en compte de la biodiversité, voire à une montée en compétences ces questions ?

Si oui, par quels moyens ?

**3- Pouvez-vous nous présenter succinctement les enjeux et attentes liés à la végétalisation dans le cadre des projets auxquels vous avez participé ?**

**Pouvez-vous nous parler plus précisément de ce qui est attendu sur la question des mélanges herbacés ?**

**Ces attentes ont-elles connues des évolutions au fil du temps ?**

**4- Pouvez-vous nous décrire les étapes du parcours type d'opérations de végétalisation et l'intégration de ce parcours dans la temporalité du projet ?**

**5- Sur quoi vos choix se basent-ils afin de définir la composition en espèces des mélanges, les caractéristiques spécifiques des semences et les aspects techniques du semis ?**

**L'ensemble de ces critères ont-t-ils évolué au cours du temps ?**

**Oui → 5.a** Quels ont été les moteurs de cette évolution des pratiques ?

Si vous proposez des mélanges avec des semences Végétal Local ou équivalent, comment êtes-vous arrivés à vous poser la question de leur intégration dans les pratiques dans le cadre spécifique des grandes infrastructures linéaires ?

**Non → 5.b** Quels sont selon vous les raisons pouvant expliquer l'absence d'évolution de vos pratiques concernant le choix de végétaux utilisés au sein des mélanges de végétalisation dans le cadre des infrastructures linéaires de transport et en particulier l'autoroute ?

**6- Quels sont les freins perçus ou constatés liés au choix d'utilisation de mélanges différenciants (mélanges riches et/ou VL) ?**

A. Ce choix implique-t-il des changements de pratique ou une nécessité de montée en connaissance sur ces sujets ?

B. Existente-t-il des barrières économiques, réglementaires, organisationnelles, techniques, autres ?

C. Quelles sont les moyens pouvant permettre de lever ces barrières ?

**7- Quel accompagnement pensez-vous pouvoir fournir aux grands afin qu'ils soient prêts à adapter leurs attentes et pratiques d'approvisionnement en semences afin de favoriser le développement de filières alternatives telles que Végétal Local ?**

**8- L'utilisation de VL ou de mélanges riches en espèces représente-t-elle une différence significative de coûts ?**

Annexe 2 : Guide d'entretien simplifié – Aménageurs

- 1- Pouvez-vous nous décrire la politique et l'organisation de votre entreprise et/ou de votre filiale et/ou équipe et/ou marque en matière d'engagement en faveur de la biodiversité ?**
  - A. Quels sont les moteurs en interne ? Quels sont les moteurs externes ?
  - B. Quelles sont les motivations qui sous-tendent ces actions ?
  - C. Existe-t-il une volonté de montée en compétences sur les aspects environnementaux et de biodiversité liés aux grands projets ?
  - D. Quelles sont les compétences nécessaires à une telle montée en compétence ?
- 2- Quels sont les facteurs d'organisation interne qui influencent le partage de la connaissance et l'évolution/adoption des pratiques innovantes en matière de biodiversité ?**
- 3- Pouvez-vous nous présenter succinctement les enjeux et attentes liés à la végétalisation dans le cadre des projets dont vous avez la charge ou auxquels vous avez participé ?**
- 4- Pouvez-vous nous décrire les étapes du parcours type d'opérations de végétalisation au moyen de mélanges herbacés et leur intégration dans la temporalité du projet ?**
  - A. Comment se fait l'approvisionnement en semences et qu'est-ce qui détermine le choix des fournisseurs ?
  - B. Quels sont les techniques d'ensemencement que vous utilisez ? Qu'est-ce qui détermine le choix de la technique à employer ?
  - C. Comment assurez-vous la gestion des espaces végétalisés ? Quelles sont les opérations que vous sous-traitez dans la végétalisation ? Pourquoi ? Si c'est le cas, un appel d'offre est-il réalisé à chaque fois ? Comment se fait le choix des prestataires ? L'existence de relations partenariales préétablies entre les acteurs de la maîtrise d'œuvre est-elle déterminante dans le choix des prestataires ? Cela a-t-il une conséquence sur la qualité des services in fine ?
- 5- Sur quoi vos choix se basent-ils afin de définir la composition spécifique ou l'origine des mélanges herbacés que vous souhaitez semer ?**

**La nature des végétaux et la composition des mélanges utilisés ont-elles évolué au cours du temps ?**

**Oui → 6.a** Quels ont été les moteurs de cette évolution des pratiques ?  
Si vous utilisez des semences Végétal local ou équivalent, comment êtes-vous arrivés à vous poser la question de leur intégration à vos pratiques dans le cadre des grandes infrastructures linéaires ?

  - A. Cette démarche s'intègre-t-elle à une volonté de montée en compétences sur les aspects environnementaux et de biodiversité liés aux grands projets ?
  - B. Comment justifiez-vous l'utilisation de Végétal Local auprès de vos commanditaires ?

**Non → 6.b.** Quels sont selon vous les raisons pouvant expliquer l'absence d'évolution de vos pratiques concernant le choix des végétaux utilisés dans le cadre des infrastructures linéaires de transport et en particulier l'autoroute ?
- 6- Quels sont les freins perçus ou constatés en lien avec l'utilisation de végétaux différenciants (mélanges riches et/ou VL) ?**
  - A. Ce choix implique-t-il des changements de pratique ou une nécessité de montée en compétences sur ces sujets ?
  - B. Existence-t-il des barrières économiques, réglementaires, organisationnelles, techniques, autres ?
  - C. Le choix des végétaux (Végétal local, semence industrielle, mélange riche ou mélange standard) a-t-il de fortes conséquences sur l'expérience (délais, discussions...) de végétalisation ?
- 7- Seriez-vous prêt à adapter vos attentes et pratiques d'approvisionnement en semences afin de favoriser le développement de filières alternatives telles que Végétal Local ?**
  - A. Comment vous pouvez établir des relations de partenariat avec les fournisseurs pour favoriser la production à grande échelle des semences VL de la filière herbacée ?
  - B. Comment vous pouvez mettre en place des mécanismes pour mieux anticiper les besoins ?
- 8- Quelle est la part des coûts de la végétalisation à l'échelle des coûts globaux du projet ? L'utilisation de VL ou de mélanges riches en espèce représente-t-elle une différence significative de coût ?**

Annexe 3 : Guide d'entretien simplifié – Représentants de Végétal local

**1- Pouvez-vous nous faire l'état des lieux actuel du fonctionnement de la filière herbacée au sein de la marque ? Quelles sont les perspectives d'évolution ?**

**Quels sont les freins majeurs au développement de la filière herbacée ?**

- A. Quelles sont les principales difficultés rencontrées dans la filière par rapport aux caractéristiques propres des régions ?
- B. En particulier concernant la réglementation relative à certaines espèces (fourragères) ?
- C. Des actions sont-elles entreprises afin de faire évoluer cette situation ?

**2- Quels sont cadres d'utilisation des semences herbacées VL qui avaient été prévu lors de la création de la marque ? Quels sont les cadres d'utilisation actuels ?**

**Par quelle entrée Végétal Local a commencé à être utilisé dans le cadre des grands projets d'aménagement ?**

**Comment percevez-vous que les grands groupes se mettent à utiliser des semences herbacées de la marque Végétal Local dans les grands projets d'aménagement ?**

**3- Ce qui est affiché par la marque : « l'utilisation de végétaux sauvages, issus de collecte en milieu naturel est adaptée à des chantiers ou des opérations ayant un objectif de restauration de la fonctionnalité écologique des milieux. »**

**L'utilisation de végétaux locaux au sein des projets d'aménagement semble-t-il une contribution pertinente aux objectifs de restauration des fonctionnalités écologiques, l'adaptation au changement climatique ? Végétal local répond-il mieux aux besoins de certains projets spécifiques (en milieux sensibles / restauration écologique...) ?**

**Quels peuvent être selon-vous les autres raisons qui poussent les grandes sociétés d'aménagement à utiliser les végétaux de la marque dans ce contexte ?**

- A. Végétal Local représente-t-il une solution à certaines contraintes techniques dans ce cadre-là ?
- B. Est-ce que le choix d'utiliser la marque représente un investissement dans des solutions d'avenir pour les aménageurs ?
- C. Est-ce que c'est le moyen d'établir un différentiel dans le cadre des marchés publics ?

**4- Existe-t-il une instrumentalisation connue de la marque par certains acteurs (producteurs, clients) ? Quelles sont les mauvaises pratiques identifiées ?**

**Existent-ils des mécanismes de contrôle de cette instrumentalisation ?**

**5- Quels sont les conséquences sur Végétal local de la demande grandissante actuelle ?**

**6- Quels sont les leviers d'action pouvant permettre à la filière herbacée Végétal local de développer et de répondre à cette demande grandissante ?**

Annexe 4 : Guide d'entretien simplifié – Producteurs de semences

- 1- Pouvez-vous présenter succinctement les différentes gammes de végétaux herbacés que vous produisez ? Pour quels types de projets / clients ?  
Que représentent les semences locales (VL et/ou autres) dans votre production ? Pour quels usages ?**
- 2- Comment en êtes-vous arrivé à produire du VL ? Quelles sont les raisons qui sous-tendent votre engagement dans un tel dispositif ?**
- 3- Quelles ont été les compétences nécessaires à développer en interne pour la production de semences sauvages et locales (VL et/ou autres) ?**
  - A. Fonctionnez-vous en réseau avec d'autres producteurs afin de partager les savoirs et les expériences ?
  - B. Quels sont les moyens de transfert et de développement des connaissances ?
- 4- Quelles sont les contraintes techniques liées à la production des semences locales (VL/autres) ? Comment parvenez-vous à faire face aux contraintes, à appliquer le référentiel technique de la marque et honorer vos engagements auprès de vos partenaires ?**
- 5- Comment percevez-vous l'utilisation de semence locale (VL et/ou autres) dans les grands projets d'aménagement linéaire ?  
Qu'est-ce qui caractérise spécifiquement la demande en semences pour ce type de projets ?  
Comment cette demande a-t-elle évolué avec le temps ?**
  - A. Quels sont les attentes / contraintes principales des porteurs de projets ou la maîtrise d'œuvre lors de la constitution des mélanges ?
  - B. Le travail avec ce type de clients implique-t-il des contraintes spécifiques pour vous producteurs ? Si oui, comment vous y adaptez-vous ?
- 6- Comment percevez-vous l'avenir de la marque ? Quels sont les besoins de la filière (herbacée) pour se développer ? Quels sont les changements nécessaires au sein de votre organisme pour répondre à un tel besoin ?**

Si vous assurez aussi un rôle d'accompagnement et de conseil auprès de la Maîtrise d'Ouvrage ou en appui aux Bureaux d'Etudes :

- 7- Pouvez-vous nous décrire votre rôle aux différentes étapes du parcours de végétalisation au sein d'un projet d'aménagement (conception → mise en œuvre → gestion/suivi) ?**
  - A. Constatez-vous une intégration grandissante des enjeux de biodiversité par les acteurs de l'aménagement ? Les budgets réservés à la végétalisation évoluent-ils dans le même sens ?
  - B. Quel est votre niveau d'influence sur le choix des mélanges utilisés *in fine* ?
  - C. La collaboration avec de grandes entreprises de l'aménagement rend-il le travail de conseil plus complexe ?
- 8- Comment s'établit la collaboration avec vos clients (à la fois pour la vente de semences et pour les missions de conseil) ?**

## **PARTIE 2 : EVALUATION EXPERIMENTALE DES MODALITES DE VEGETALISATION**

Au sein de la Partie 1, nous avons pu constater une considération grandissante pour des critères de biodiversité dans les choix de constitution des mélanges de végétalisation, y compris au sein des grands projets. Toutefois, nous avons également constaté que la capacité des mélanges à coloniser rapidement les milieux afin d'enrayer les processus d'érosion des sols remaniés reste un critère prédominant de choix des semences pour les aménageurs. Certains s'inquiètent de l'absence de critères de qualité des semences Végétal local concernant leurs taux de germination et la vitesse de croissance des plantes, comme on pourrait les retrouver sur des semences conventionnelles. L'abaissement de la proportion de graminées et de légumineuses au sein des mélanges, au profit d'un cortège plus diversifié d'espèces, inquiète également ces aménageurs sur la capacité des semis à répondre aux impératifs techniques. Outre le surcoût lié à l'achat de mélanges de semences favorables à la biodiversité, certains praticiens émettent des réserves quant à la capacité d'expression de cortèges floristiques plus riches en milieu contraint tel que les talus autoroutiers. Pour eux, l'hétérogénéité spatiale et la variation temporelle de ces milieux, les conditions pédologiques contraignantes et l'absence de mesures de gestion appropriées ne sont pas compatibles avec des objectifs écologiques et de restauration de la biodiversité.

Dans cette partie nous tenterons, à travers plusieurs dispositifs expérimentaux, d'adresser ces questionnements. Le chapitre 3 sera consacré à l'évaluation de la capacité de différents mélanges de végétalisation à répondre aux impératifs techniques de réduction de l'érosion des sols, grâce à une expérimentation en serre et une autre expérimentation *in situ* sur des talus d'autoroute. Ce travail a, pour les résultats de l'expérimentation en serre, fait l'objet d'une publication (Mayeur, A., Carpentier, F., Soki-Makilutila, A., and Colas, B. (2024). Assessing Seed Mixtures for Roadside Revegetation – Richness and Origin as Predictors for Erosion Control. *Journal of Ecological Engineering*, 25(7), pp.8-24. <https://doi.org/10.12911/22998993/187147>). Dans un souci d'homogénéité avec le reste du manuscrit de thèse, nous n'insérerons cet article sous son format publié, mais son contenu n'a pas été altéré. Le chapitre 4 sera quant à lui tourné vers l'évaluation de la capacité des mélanges semés sur les talus autoroutiers à contribuer à la diversité végétale des communautés qui s'y installent. Enfin, nous évaluerons dans ce chapitre, grâce à une autre expérimentation en serre menée spécifiquement pour cette problématique, la capacité des mélanges sélectionnés à rentrer en compétition avec une espèce exotique envahissante (*Solidago canadensis*) afin de faire obstacle à son établissement sur sols perturbés.

Trois dispositifs expérimentaux distincts ont donc été utilisés : un dispositif *in situ* implanté sur les talus du récent projet autoroutier du Contournement Ouest de Strasbourg, et deux dispositifs *ex situ* dans les serres de l'Université Paris-Saclay à Orsay. Un étudiant de première année de Master Biodiversité, Ecologie, Evolution, Augustin Soki-Makilutila, a été recruté et encadré afin de participer aux efforts de collecte et d'analyse des données. Deux collaborations scientifiques ont été établies pour l'analyse des données et l'interprétation des résultats, avec Florence Carpentier et Blanche Collard, enseignantes-chercheuses à AgroParisTech.





Illustration 6 : Fauche des parcelles expérimentales – Contournement Ouest de Strasbourg – Crédits : Anaël Mayeur

### **Chapitre 3. LA VEGETALISATION COMME REponse AUX ENJEUX TECHNIQUES DANS LE CADRE DES GRANDS PROJETS D'AMENAGEMENT**

### INTRODUCTION OF CHAPTER 3

Roadside revegetation practices have undergone a lot of changes in the last decades, partially due to the birth and growth of the "road ecology" research field, and to increasing concerns regarding the acceptability and integration of biodiversity into the design of large land-planning projects [Forman et al., 2003]. These evolutions are driven by factors that are external to land-planning companies, namely the evolution of environmental laws [Alligand et al., 2018; MEDDTL, 2012; Morgan, 2012] as well as internal factors like the economic interests for developing innovative techniques and businesses.

A broad range of objectives are associated with revegetation operations, like (1) establishing a plant cover and ensuring that it is maintained over time for geotechnical purposes, (2) maintaining or increasing biodiversity levels by controlling invasive species, establishing ecological connectivity and functionally diverse communities, (3) increasing the public acceptability of projects in regard to landscape integration and efforts concerning environmental aspects, (4) ensuring user safety by maintaining visibility for the road users notably. From there, practitioners have to choose seed composition and characteristics, mainly on the basis of their availability and cost-effectiveness, as well as their ability to germinate and establish a vegetation cover under certain conditions [Federal Highway Administration, 2007a; Soper, 2019].

In this regard, the use of rich mixtures of native species (i.e. indigenous to a given region) for roadside revegetation practices has developed since the 1970s in the USA and other countries as a means of meeting conservation and ecosystem services provision goals, as well as other technical and economic objectives [Federal Highway Administration, 2007b; Forman et al., 2003; Soper, 2019]. More and more practitioners are now going further by prioritising the use of locally sourced seeds (i.e. species that are collected in the biogeographical area in which they are reimplanted) for ecological restoration and revegetation operations, following guidelines such as the ones from the Society for Ecological Restoration [Bochet et al., 2010; Henry et al., 2011; Huc et al., 2022; Pedrini and Dixon, 2020; Rogers and Montalvo, 2004]. Many recent studies have explored the potential benefits associated with the use of locally sourced and genetically diverse seeds. Among these benefits, (1) the better local adaptation and establishment of the seeded populations reduces the risks of technical failure [Bucharova et al., 2017; Grossman and Rice, 2012; Krautzer et al., 2011; Vander Mijnsbrugge et al., 2010] and (2) the avoidance of alien invasive species introduction prevents practitioners from potential future added management costs; (3) the better alignment with local commensal or mutualist species in respect of their phenology [Bucharova et al., 2017; Sackville Hamilton, 2001; Vander Mijnsbrugge et al., 2010], and other (4) functional traits [Gadoum et al., 2007; Henry et al., 2011], and (5) local populations genetic diversity [Keller et al., 2000] contribute to the restoration or conservation of local biodiversity, as well as to the adaptation to the effects of climate change.

These new considerations, relating to the environment in and around development areas, the biodiversity and adaptation processes, have not replaced the technical issues that practitioners must address. Rather, they have added to them. On roadsides for example, it is essential that vegetation quickly contributes to maintaining the soil on slopes, to avoid

jeopardizing the infrastructure and safety of the road. Indeed, slopes of road embankments are prone to diverse forms of wind and water erosion. The water erosion is constituted of several processes including (i) splash erosion, (ii) sheet and interrill erosion, and (iii) rill and gully erosion. Splash erosion is due to the impact of raindrops causing the soil particles to detach, leading to runoffs. Several studies have established a positive relationship, either exponential or linear between vegetation cover and a reduction in splash erosion (e.g. [Bochet et al., 2002; Flanagan and Nearing, 1995; Knisel, 1980; Morgan et al., 1998; Thornes, 1985; Wischmeier and Smith, 1978]). This is because the presence of a canopy considerably reduces the velocity of raindrops and thus their kinetic energy when hitting the ground, breaking up the droplets, and causing losses of water volume by evaporation. This effect is modulated by the plant morphological characteristics (height, leaf surface, orientation and rigidity). [Bochet et al., 2002] showed for example that stiff and dense tussocks, shrubs, or plants producing large amounts of litter are more effective at mitigating splash erosion than smaller, deciduous species. Some studies tried to establish a minimum plant cover in order to significantly reduce erosion rates, but it seems to greatly vary depending on the edaphic and topographic conditions, ranging from 10% [Abrahams et al., 1988] to 70% [Dinger, 1997]. The cover percentage usually expected by construction companies is around 20% in the first year and 50% in the second (Pierre Grasset, Vinci Autoroute, personal communication).

Sheet and interrill erosion are the transport and loss of fine surface particles by shallow water flow, which can be worsened by mass movements. Rill and gully erosion corresponds to the formation of small to large channels in which water flows rapidly, resulting in losses of soil in the embankment and water quality in the surrounding environment due to increased turbidity and the transport of pollutants [Gyssels et al., 2005; Morgan, 2005]. The presence of vegetation helps mitigating these erosion types by adding some roughness to the ground, reducing the velocity of surface water flows [Engman, 1986; Petryk and Bosmajian III, 1975; Temple, 1982]. This effect is greater as the vegetation is denser and more uniform. Large and isolated individuals like trees or tussocks can sometimes have the negative effect of redirecting the rainfalls on concentrated areas, leading eventually to higher water velocity and fewer infiltrations into the ground [Armstrong and Mitchell, 1987; De Ploey, 1982].

The erodibility of the soil also depends on its intrinsic properties such as aggregate stability, infiltration capacity or shear strength [Cruse and Larson, 1977; Gyssels et al., 2005]. These properties are modified by plant root systems. The studies from [Li et al., 1992a, 1992b] show that plant roots reduce soil erodibility and increase infiltration capacity, leading to less surface water flow and ultimately a reduction in the risk associated with runoff. The natural resistance of the soil to compression combined with the root system resistance to tension ultimately increases its shear strength [Simon and Collison, 2001]. A study by [Tengbeh, 1993] on *Lolium perenne* has established a positive relationship between root density (kg.m<sup>-3</sup>) and the soil shear strength. An increased shear strength of the soil reduces its vulnerability to erosion by acting on a number of parameters linked to particles detachment process.

Adding biodiversity considerations to the technical constraints of revegetating embankments is not trivial. Some studies have shown a negative relationship between cover and species richness [Fayiah et al., 2019; Iturrate-Garcia et al., 2016]. By association, these

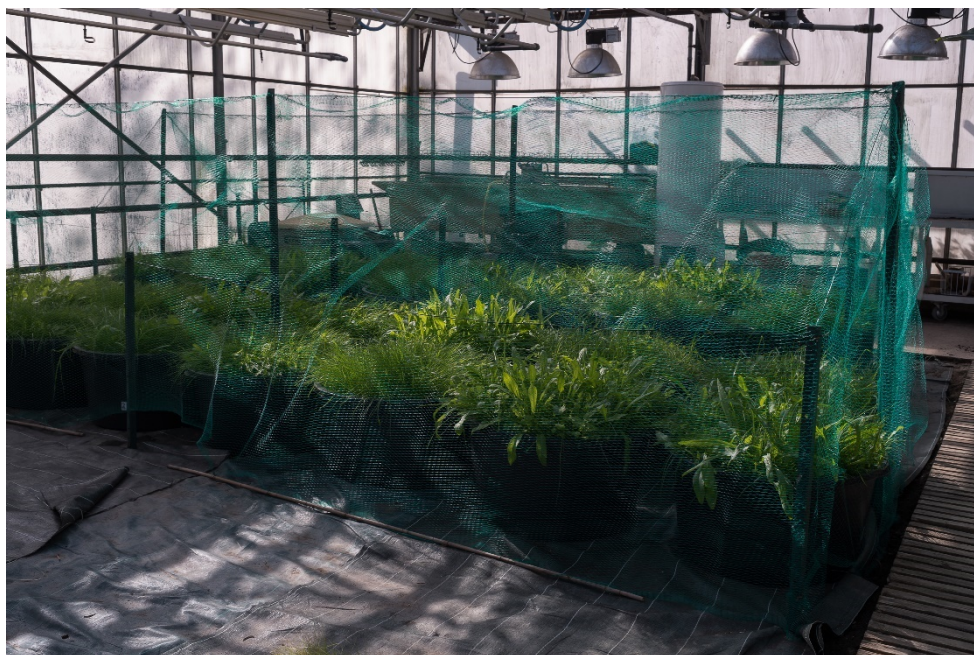
results suggest that revegetation that favours plant biodiversity could increase erosion and adversely affect slope stability. However, other studies suggest that diversified implanted plant communities on road verges could increase establishment and productivity [Lepê et al., 2007], and reduce erosion by diversifying root systems architectures [Fattet et al., 2011; Reubens et al., 2007].

Studies conducted by researchers and feedbacks from practitioners on the use of native species for revegetation include both ecological and bioengineering purposes [Bochet et al., 2010; Federal Highway Administration, 2007a]. Studies specifically oriented towards the use of wild and locally sourced seed mixtures are mostly focused on conservation and restoration outcomes. To our knowledge, no study has examined the consequences of using locally sourced seed mixtures on practitioners' expectations for limiting erosion. Yet local adaptations of functional traits within species are likely to favour the germination or growth of individuals [Gya et al., 2023; Leimu and Fischer, 2008]. This study tries to fill this gap by comparing mixtures of varying species compositions and origins in their ability to answer the expectations of practitioners regarding erosion-control and interspecific competitiveness potential.

The following sections 3.1 and 3.2 present *ex situ* and *in situ* experiments respectively. In these, we aim at assessing the effect of the composition and the origin of revegetation seed mixtures on different variables such as plant cover, density and root biomass, and the potential at mitigating the different erosion processes previously described. Specific problematics and associated hypotheses will be presented at the beginning of each section.







*Dispositif expérimental en serres d'Orsay*



*Bac de culture : composition Standard*



*Bac de culture : composition Biodiversité*



*Comptage des plantes*

Illustration 7 : Dispositif expérimental *ex situ*, bacs de culture et comptage des plantes – Crédits : haut et bas : Gaëtan Soerensen ; centre : Anaël Mayeur

### **3.1 ASSESSING SEED MIXTURES FOR ROADSIDE REVEGETATION UNDER CONTROLLED CONDITIONS: RICHNESS AND ORIGIN AS PREDICTORS FOR EROSION CONTROL**

#### **3.1.1 Problematics**

The main questions we seek to answer are how the species composition and origin influence the expression of revegetation seed mixtures regarding cover, density, and root biomass, and what is the potential influence of these factors on the erosion processes. To guide our research, we tested the following hypothesis: (1) In a controlled and favourable environment, grass-rich and non-local mixtures yield higher cover and density during vegetation establishment; (2) Locally-sourced seeds provide greater resistance to harsher environmental constraints and inter-specific competition; (3) Locally-sourced and richer mixtures produce more root biomass, as cultivars of landscape species are often selected with priority given to their above-ground traits.

#### **3.1.2 Methods**

##### ***Seed mixtures***

Six seed mixtures were tested, comprised of three species compositions and, for each, two geographical origins. The species compositions (detailed in Table 2) were:

- Standard (S): a common composition used to vegetate roadside verges in temperate climates, composed of 7 species in 3 families (Poaceae, Fabaceae, Rosaceae),
- Competitive (C): a composition designed to cover the soils quickly and compete effectively with invasive species by depriving them of resources, composed of 12 species in 4 families. The proportion in weight of legumes was higher than in the other mixtures.
- Biodiversity (B): a composition designed to maximise species diversity, aerial and root morphologies, life cycles and flowering periods. This composition was composed of 28 species in 11 families. The proportion of grasses and legumes was lowered to allow better growth of other forbs.

The two geographical origins were “local” (L) and “non-local” (NL). The non-local seeds came from the industrial seed production sector and were selected based on their availability with no regard to their geographical origin or whether they were cultivars or not (see Appendix 5 for origins by taxon). The local versions of the seed mixtures were produced by the Nungesser Semences company (Erstein, Bas-Rhin, France) from wild seeds harvested in the “North-East zone” as one of the 11 French metropolitan biogeographical regions defined as part of the Végétal local® brand, a national traceability tool for commercialised wild plants. The brand imposes clear criteria regarding harvesting and production methods [Végétal local, 2023], conservation of genetic diversity, and delineates regions of origin by their ecological, pedological, geological and climatic characteristics, as well as other economic considerations.

The seed mixtures were designed with the help of the Nungesser Semences company to be able to grow in the specifically harsh conditions of road embankments. For some taxa, when the exact equivalent was not available for both origins, the closest equivalent was determined and picked following the order of priority: cultivar > subspecies > species (Table 2). We



considered that these few differences were not such as to bias the comparison between local and non-local mixtures. All the mixtures were cut to 50% by weight with wheat bran to facilitate the sowing process by hand.

Table 2: Composition of the six revegetation mixtures: taxa variations and percentages of seed content. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively.

Taxa		Families	Seed content (% of total seed weight)		
Non-local	Local		S	C	B
<b>Grasses</b>					
Overall percentage			88	88	60
Overall richness			3	5	5
<i>Anthoxantum odoratum</i> <sup>d</sup>	<i>Anthoxantum odoratum</i> <sup>b</sup>	Poaceae	-	7	6
<i>Bromus erectus</i> <sup>a</sup>	<i>Bromus erectus</i> <sup>b</sup>	Poaceae	15	15	15
<i>Festuca rubra ssp rubra</i> <sup>a</sup>	<i>Festuca rubra ssp rubra</i> <sup>b</sup>	Poaceae	48	38	20
<i>Festuca ovina</i> <sup>a</sup>	<i>Festuca guestfalica</i> <sup>b</sup>	Poaceae	25	20	12
<i>Koeleria macrantha</i>	<i>Koeleria macrantha</i> <sup>b</sup>	Poaceae	-	8	7
<b>Legumes</b>					
Overall percentage			8	9	6.6
Overall richness			3	3	3
<i>Anthyllis vulneraria</i> <sup>a</sup>	<i>Anthyllis vulneraria</i> <sup>b</sup>	Fabaceae	-	3	1.8
<i>Lotus corniculatus</i> <sup>a</sup>	<i>Lotus corniculatus</i> <sup>b</sup>	Fabaceae	2	-	-
<i>Medicago sativa ssp lupulina</i> <sup>a</sup>	<i>Medicago sativa ssp falcata</i> <sup>b</sup>	Fabaceae	2	1	1.8
<i>Onobrychis viciifolia</i> <sup>a</sup>	<i>Onobrychis viciifolia</i> <sup>c</sup>	Fabaceae	4	5	3
<b>Other forbs</b>					
Overall percentage			4	3	33.4
Overall richness			1	4	20
<i>Achillea millefolium</i> <sup>a</sup>	<i>Achillea millefolium</i> <sup>b</sup>	Asteraceae	-	0.5	0.8
<i>Anthemis tinctoria</i> <sup>a</sup>	<i>Anthemis tinctoria</i> <sup>c</sup>	Asteraceae	-	-	0.5
<i>Centaurea jacea</i> <sup>a</sup>	<i>Centaurea jacea</i> <sup>b</sup>	Asteraceae	-	1.5	2
<i>Centaurea scabiosa</i> <sup>a</sup>	<i>Centaurea scabiosa</i> <sup>b</sup>	Asteraceae	-	-	2
<i>Cyanus segetum</i> <sup>a</sup>	<i>Cyanus segetum</i> <sup>b</sup>	Asteraceae	-	-	4.5
<i>Crepis rubra</i> <sup>a</sup>	<i>Crepis biennis</i> <sup>b</sup>	Asteraceae	-	-	1
<i>Daucus carotta</i> <sup>a</sup>	<i>Daucus carotta</i> <sup>b</sup>	Apiaceae	-	-	1.5
<i>Dianthus barbatus</i> <sup>a</sup>	<i>Dianthus carthusianorum</i> <sup>b</sup>	Caryophyllaceae	-	-	1
<i>Echium vulgare</i> <sup>a</sup>	<i>Echium vulgare</i> <sup>b</sup>	Boraginaceae	-	-	2.5
<i>Knautia arvensis</i> <sup>a</sup>	<i>Knautia arvensis</i> <sup>b</sup>	Caprifoliaceae	-	-	3.5
<i>Leucanthemum vulgare</i> <sup>a</sup>	<i>Leucanthemum ircutianum</i> <sup>b</sup>	Asteraceae	-	0.5	1
<i>Malva moschata</i> <sup>a</sup>	<i>Malva moschata</i> <sup>b</sup>	Malvaceae	-	-	2
<i>Papaver rhoeas</i> <sup>a</sup>	<i>Papaver rhoeas</i> <sup>b</sup>	Papaveraceae	-	-	1
<i>Poterium sanguisorba</i> <sup>a</sup>	<i>Poterium sanguisorba</i> <sup>b</sup>	Rosaceae	4	-	3
<i>Reseda alba</i> <sup>a</sup>	<i>Reseda lutea</i> <sup>b</sup>	Resedaceae	-	-	1
<i>Salvia pratensis</i> <sup>a</sup>	<i>Salvia pratensis</i> <sup>b</sup>	Lamiaceae	-	-	1.6
<i>Scabiosa atropurpurea</i> <sup>a</sup>	<i>Scabiosa columbaria</i> <sup>b</sup>	Caprifoliaceae	-	-	1.5
<i>Silene vulgaris</i> <sup>a</sup>	<i>Silene vulgaris</i> <sup>b</sup>	Caryophyllaceae	-	0.5	1
<i>Stachys byzantina</i> <sup>a</sup>	<i>Stachys recta</i> <sup>b</sup>	Lamiaceae	-	-	1.5
<i>Thymus pulegioides</i> <sup>a</sup>	<i>Thymus pulegioides</i> <sup>b</sup>	Lamiaceae	-	-	0.5

<sup>a</sup> Cultivars; <sup>b</sup> Végétal local branded seeds; <sup>c</sup> Wild and locally sourced in Rhine basin but non-branded seeds; <sup>d</sup> Wild but non-local

### **Experimental design**

The experiment was conducted at the University Paris-Saclay greenhouses in Orsay, France, from February to August 2022. The seed mixtures were kept in a cold storage room during three months before sowing to allow vernalisation.

Ten pots per mixture were sown by hand at a rate of 10 grams of seeds per square-meter (see Appendix 6 for weight/seed number equivalents) for a total of 60 pots, constituting an experiment with 6 modalities repeated 10 times: S-L, S-NL, C-L, C-NL, B-L and B-NL. The pots were round, 60 cm in diameter and 25 cm of potting compost ( $\approx 70$  litres) was placed in it. Two culture compartments were used: (1) an enclosed and glazed growing compartment (GC) with exposure and temperature control, where watering was done manually; (2) a glazed greenhouse (GH) with ventilation and an automatic watering system. Each culture compartment contained 30 pots, with 5 replicates for each modality. In each compartment, the arrangement of pots was randomised with the constraint that two pots of the same modality could not stand side by side.

### **Measurements**

Vegetation cover (%) was assessed visually by standing vertically above the pots on days 8, 11, 18, 28, 40, 49, 56, 77, 91, 98, 118. Densities were calculated from the estimation of the abundance of individuals for each species group. Abundance was estimated by counting the individuals present in two 8.5 x 8.5 cm quadrats placed randomly in each pot (i.e. approximately 5.1% of the total surface area). Once the vegetation was too developed for quadrats to be placed, we counted the individuals in a linear strip 5 cm wide from one edge of the pot to the other, passing through the centre, in a random direction using strings (i.e. approximately 10.6% of the total surface). Grass species were easy to identify and were counted on days 11, 18, 44, 68, 91, 105. Forbs were counted on days 11, 18, 34, 40, 69, 98, 118, among which legumes were identifiable and counted separately on days 34, 40, 69, 98, 118.

To estimate root biomass, soil samples were collected with a 2 cm wide gouge throughout the depth of the soil, i.e. 78.54 cm<sup>3</sup> of soil sample per pot. The extracted cores were divided into two parts of equal length: the top half and the bottom half (12.5cm each). Using tweezers, the fresh roots were then separated from the substrate of each half-core for 15 minutes and then placed in a sealed and identified aluminium foil. The fresh root samples were then soaked for 2 minutes in clear water and removed from any remaining soil, then weighed using an electronic weighting scale (precision of 0.001 g). The roots were then left to dry for 24 hours at 60°C and weighed again using the same material.

### **Data analysis**

We considered different response variables (cover, densities and root biomass) in various models with a constant set of factors: origin (two-levels factor, fixed effect) mix (three-levels factor, fixed effect), day (fixed effect) and their interactions, and block (two-level factor). The random effect of individual pots was added to address the repetition of measurements. All analyses were conducted in R (v2023.12.0+369) using the "stats", "brms" (v2.20.4), "lme4" (v1.1-34) packages. Differences among days, origins and compositions were assessed by Tukey posthoc test using the "emmeans" package (v1.8.8).

The cover variable represents proportional data with values between 0 and 1. The evolution of the cover metric exhibits an initial phase of increase, which we refer to as the growth phase, followed by variations around a plateau, denominated the competition phase. To account for the specific characteristics of each phase, the statistical analysis on cover were performed separately for each phase. In the growth phase, the evolution of cover was modelled using a two-parameter Weibull growth model:  $(1 - \exp(-\exp(\text{lrc})x^{\{\text{pwr}\}}))$  with  $x$ , the day. The log rate of change (lrc) and the power (pwr) parameters act as scale and shape parameters, respectively [Mode, 1985]. The fixed effects modulated both the lrc and pwr parameters, while the random pot effect was applied solely to the lrc parameter. The estimation of this non-linear mixed model was performed in a Bayesian framework using the package brms (v2.20.4). We used the posterior parameters distribution to compute the estimations of times to reach target cover thresholds and compare them. The 20%, 50%, 80% thresholds were selected based on the expectations of land-planners in the context of a road slopes revegetation setting. For phase 2, we performed a binomial generalized mixed model (glmm) to explain the *Cover* by the effect of the factors *Day*, *Origin* and *Composition* and all their tri-wise and pairwise interactions, the *Bloc* effect, and the individuals as a random effect.  $(\text{Day} + \text{Origin} + \text{Composition})^3 + \text{Bloc} + (1|\text{Indiv})$ .

We performed a linear mixed model using the same factors as previously described for the *Cover* of phase 2:  $\sim (\text{Day} + \text{Composition} + \text{Origin})^3 + \text{Bloc} + (1|\text{Indiv})$  on the density of grasses, legumes and non-legume forbs separately. At day 68-69, the total density of individuals was assessed and we performed a linear model:  $\sim (\text{Composition} + \text{Origin})^2 + \text{Bloc}$ . All density data were log-transformed to achieve more normal distributed errors with constant variance.

We based our study of the root biomass production on the dry mass per volume of soil to eliminate the variation caused by moisture heterogeneity amongst pots at the time of sample collection. The dry mass was analysed considering the effect of the *Mix* and *Origin* and their interaction, and the effect of *Bloc*. Biomass data were log-transformed to achieve more normal distributed errors with constant variance.



*Prélèvement des racines à la tarière*



*Carottes de terre*



*Tamissage par Augustin*



*Séparation des racines et de la terre*



*Etuvage après lavage et pesée  
des racines fraîches*



*Pesée à sec des racines après étuvage*

Illustration 8 : Etapes du protocole d'évaluation de la biomasse racinaire – Crédits : Anaël Mayeur

### 3.1.3 Results

#### Cover

During the growth phase, the Biodiversity mixes reached all three target cover thresholds (20%, 50%, 80%) faster, followed by the Competitive (C) and lastly the Standard (S) mixes (Figure 5). The differences among the compositions were significant for the three thresholds (Appendix 7). Mixes of non-local origin (NL) reached the three cover thresholds more quickly in B and S, but more slowly in the case of C. However, these differences were only significant for B.

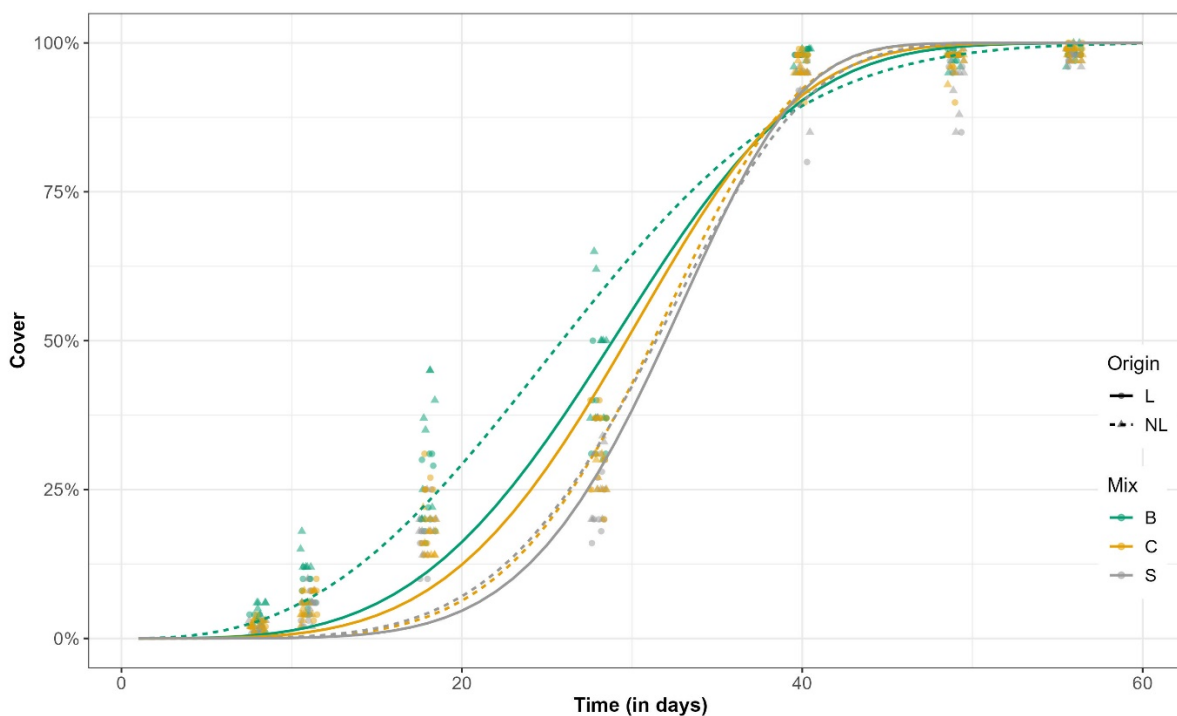


Figure 5: Evolution of the estimated cover (%) in time for all six mixtures following a two parameters Weibull growth model during the establishment phase. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins.

After day 56 (i.e. the beginning of the competition phase), when plant cover was at its peak for all 6 mixtures, ranging from 98.2% to 99.3% on average per composition, we observed a general trend towards cover loss until day 91, followed by a stabilisation from day 91 to 98 and a slight regain at day 118. Overall, the mean cover of all 6 mixtures remained high ( $\geq 90\%$ ) with few differences among them (Appendix 8). Comparison between the origin of the mixes revealed a slightly higher overall cover in B-L compared with B-NL, only significant at day 77 ( $p < 0.0001$ ). The cover of C-NL was slightly higher than C-L from day 91 to 118, as was S-NL compared with S-L (only significant at day 118) (Figure 6).



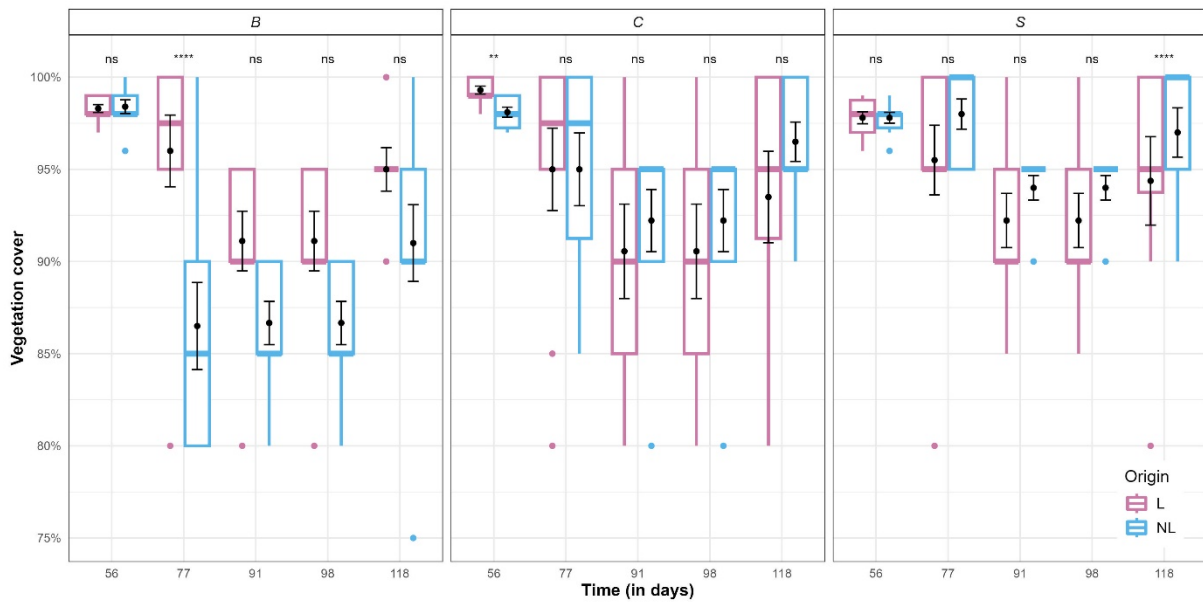


Figure 6: Vegetation cover of local and non-local versions of all three compositions at the times of measurement. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between origins: ns (non-significant), \*\* ( $P \leq 0.01$ ), \*\*\*\* ( $P \leq 0.0001$ ).

### Density

The Day\*Origin, Day\*Composition interactions were present for the density of grasses, legumes and non-legume forbs, with Day\*Composition\*Origin for the latter. A Composition\*Origin interaction was detected for the total density.

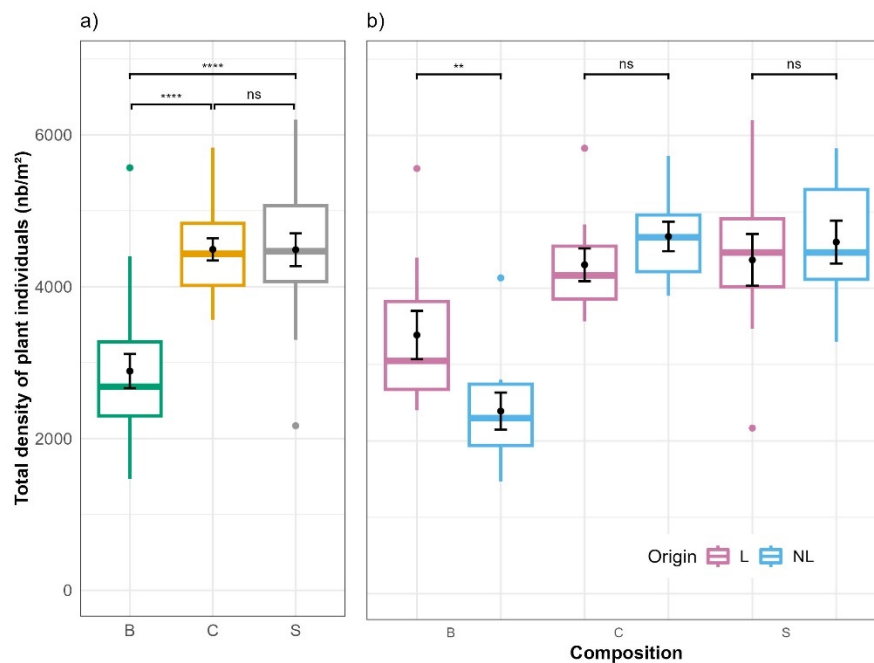


Figure 7: Total density of plant individuals per square meter at day 68-69. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between compositions and origins: ns (non-significant), \*\* ( $P \leq 0.01$ ), \*\*\*\* ( $P \leq 0.0001$ ).

At day 68-69, the total density of plant individuals was significantly lower in B than in C and S. No difference was found between origins for C and S, but the total density was higher in B-L than in B-NL (Figure 7).

Across all compositions, the density of grasses followed an overall downtrend throughout the length of the experiment (Appendix 9a). As a logical consequence of the differences of grass seed content among compositions (see Table 2 and Appendix 6), the mean density of grasses in B was always significantly lower than in S and C ( $p \leq 0.001$ ). S and C did not show significant differences except at day 91 ( $p = 0.0018$ ) in favour of S (Appendix 9a). Throughout the period except for day 91, B-L had a slightly higher density of grasses, significant on days 18 ( $p = 0.0062$ ) and 68 ( $p = 0.0029$ ). From day 11 to 44, the L origin also provided a slight edge to S, significant on days 11 ( $p = 0.028$ ) and 44 ( $p = 0.002$ ). The effect of origin was unclear for the C mixes (Figure 8a).

Overall, the density of legumes was the highest in S, followed by C and lastly B, with differences decreasing in significance over time (Appendix 9b), which is concordant to the number of seeds in each Mix (Appendix 6). The NL origin favourably impacted the density of legumes across all three compositions with varying degrees of significance from day 34 to 118 (Figure 8b).

With high significance from day 34 to 118 ( $p < 0.0001$ ), the density of non-legume forbs was higher in B, followed by C and S (Appendix 9c). The local origin gave a significantly higher density of non-legume forbs in C on days 34, 40, 98 and 118. For the other species compositions, the effect of origin was unclear (Figure 8c).

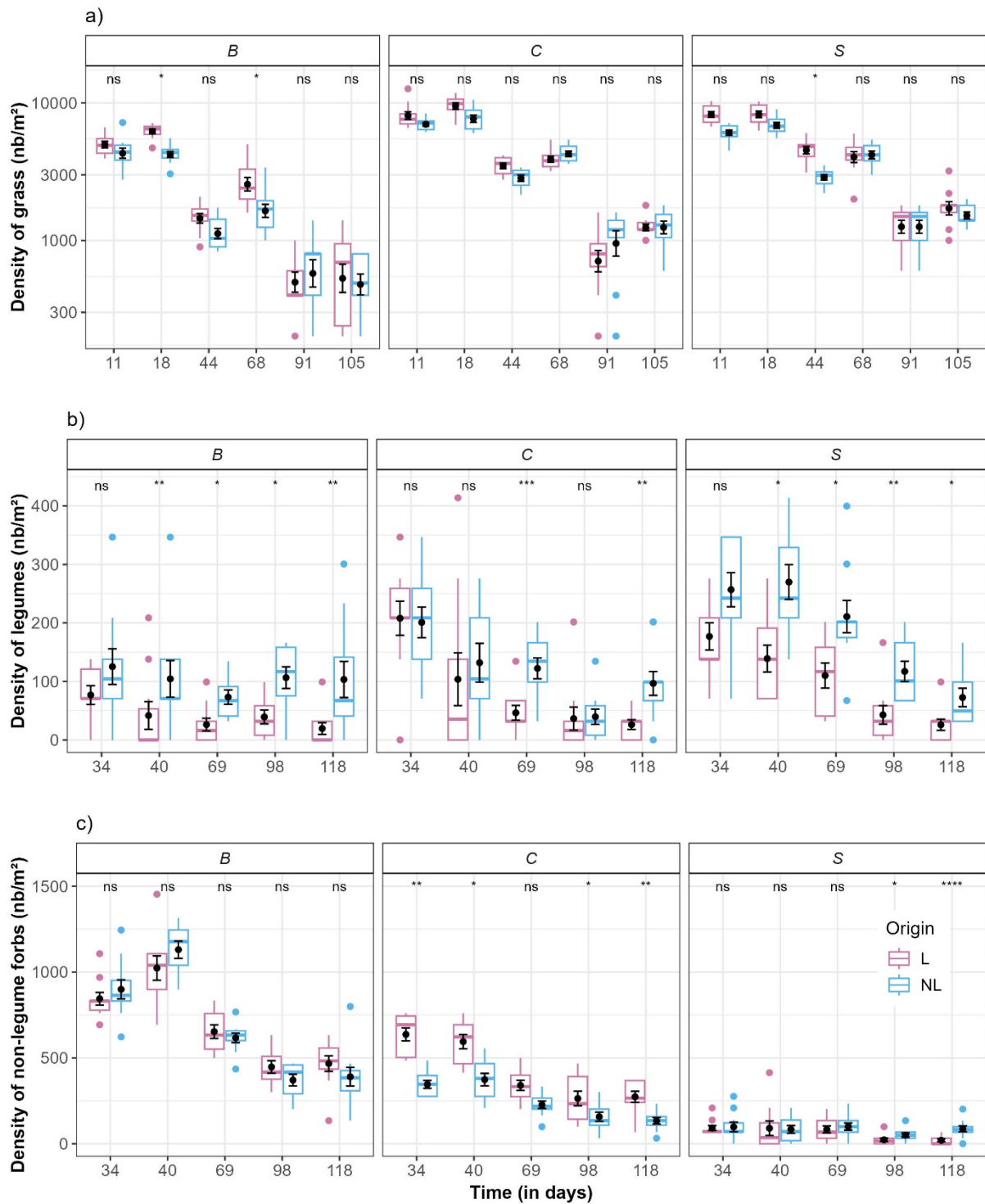


Figure 8: Density of (a) grass, (b) legume and (c) non-legume forbs individuals per square meter per origin in all three compositions. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between origins: ns (non-significant), \* ( $P \leq 0.05$ ), \*\* ( $P \leq 0.01$ ), \*\*\* ( $P \leq 0.001$ ), \*\*\*\* ( $P \leq 0.0001$ ).



### Root biomass

No significant difference was found among modalities regarding dry root biomass production in the bottom-half core samples. In the top-half soil, although not significantly, the root biomass of B and C was respectively 40% and 49% higher than the one in S. The local origin had an overall positive effect on the dry root biomass production ( $p=0.0035$ ). Considering the 3 species compositions separately, the trend was the same, significant for B ( $p=0.006$ ), marginally significant for S ( $p=0.089$ ), and not significant for C ( $p=0.4942$ ) (Figure 9).

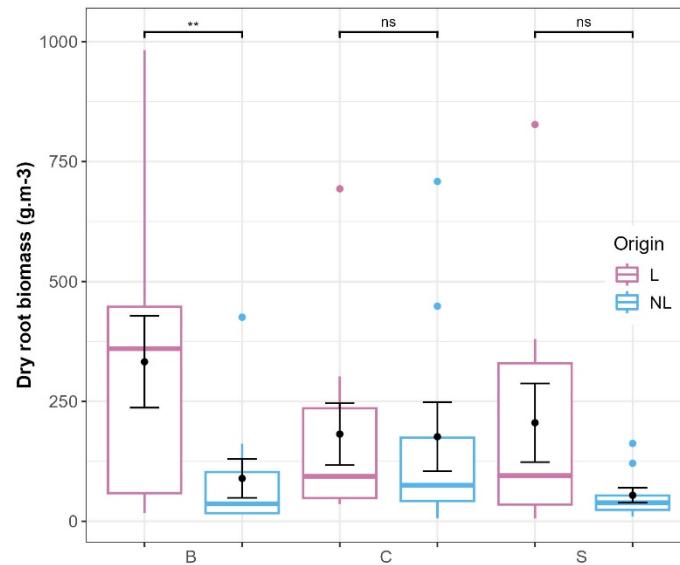


Figure 9: Mass of dry roots (grams) per cubic meter in the topsoil. S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between origins: ns (non-significant), \*\* ( $P \leq 0.01$ ).

### Bloc

A slightly higher overall cover was found in GH ( $0.940 \pm 0.008$ ) compared with GC ( $0.964 \pm 0.005$ ,  $p=0.006$ ) during the competition phase. No effect of the bloc was detected for the grasses or the legumes, but a significantly higher density of non-legume forbs was shown in GH ( $p=0.02$ ). The effect of the bloc was especially present regarding the dry root biomass in the soil top-half, significantly higher in GC than in GH ( $p < 0.0001$ ).

### 3.1.4 Discussion

#### **Cover**

Under the growing conditions of this experiment, the forbs produced individuals with very large leaf areas, certainly due to the absence of growth-limiting factors (abundant light, nutrients and water). This is probably why the Biodiversity mix, which contains more forbs, covered the ground more quickly than the other mixes. The loss of these large individuals during mortality inducing events may cause a direct deficit in cover.

The local origin resulted in a slower cover in the biodiversity composition during the growth phase, probably due to the smaller size of wild forbs individuals compared to cultivars, but a slightly better cover during the competition phase. Overall, the effect of the origin on cover is not clear enough in our experiment to draw conclusions. In difficult conditions where resources are limited and environmental stochasticity is high, the greater genetic diversity of local seeds, combined with a high species richness, could constitute a bet-hedging advantage because the probability of having a portion of species or genotypes resistant to these conditions is greater.

#### **Density**

The difference in density of grass among compositions followed the expectations considering their relative proportion in seed number. Regarding the effect of origin, we can notice that the higher densities of grass in the locally sourced mixtures during the early period after sowing (day 11 to 44) suggests a better germination rate of local grasses. This goes against the expected advantage of cultivars under favourable controlled conditions because they are likely to have been selected for this by private breeders. Staab et al. [2015] also found a better establishment of “regional” seeds in the early period after sowing.

The densities of non-legume forbs observed in all three compositions were aligned with the seed content regarding species richness, relative weight, and number of seeds (see Table 2 and Appendix 6). The effect of the origin is not clear in the case of S and B. C-L however had consistently higher densities of forbs than C-NL. It is possible that the wild and local variants of the few non-legume forbs present in the Competitive composition showed higher competitive differential than the rest of the species. Species-centred experiments would be necessary to answer these issues.

The densities of legumes observed were in line with the seed count of each composition (Appendix 6). Across all three species compositions, the non-local origin returned higher densities than their local counterpart. Because of their widespread historical use in agriculture, the selection of characteristics providing a competitive advantage to Fabaceae cultivars might explain the higher densities observed across all three compositions.

Past the midpoint of the experiment and a few days after the end of the growth phase, the total density of plant individuals was very similar between S and C, but significantly lower in B. The quantity of seeds initially sown cannot explain this (Appendix 6). We believe the higher cover observed during the entire growth phase and the presence of very covering forbs might have caused more mortality due to restricted access to light [Haynes, 1980]. The significantly

higher total density in the local version of B is most likely linked to the higher density of grasses observed during the experiment.

### **Roots biomass**

The lower root biomass of the S composition might seem counterintuitive as the grasses are known to have a very dense and ramified root system in the top 20cm of soil. However, grasses usually have finer and more ramified roots, providing a large exchange surface area but not contributing as much when evaluating root biomass following our sampling protocol. The higher species richness present in both C and B might translate into more diverse root architecture allowing for better exploitation of soil space and resources and reducing both intra and inter-specific competition. The likely higher genetic diversity in local seeds from the wild could lead to a greater variation of root morphologies. This can be an advantage in exploiting soil resources and in the ability to survive from one year to the next for perennial species.

The difference observed in the root biomass production between blocs corroborates the differential phenotypic response of the plant to the environment [Fitter, 2002]. Studies show the influence of air and soil temperature, delayed irrigation and available water on root growth, elongation and mass [McMichael and Burke, 1996]. We suspect the edge of local seeds regarding root biomass production might be further reinforced under changing and harsher edaphic conditions. In fact, when testing the model with the interaction of Mix\*Origin\*Bloc, the local origin presented a clear advantage regarding root biomass production in the growing compartment (GC), where higher hydric stress occurred throughout the experiment due to irregularities in the manual watering process (Anaël Mayeur, personal observations). Accordingly, studies have shown adaptive responses of root system architecture and growth to environmental conditions. For instance, nutrient deprivation can lead to a stimulated root hair development, resulting in an improved aggregate stability on constructed slopes [Ola et al., 2015].

### **Relations between cover and density**

Density and cover are affected by multiple factors and influence each other, especially when competition processes occur. During the establishment phase, density is mainly influenced by the total number of sown seeds and the germination rate of every species, given that competition for access to resources is low. The total number of seeds depends on the relative proportion of each species in the mixture and the Weight of Thousand Seeds (WTS) associated with each of them. We know from our supplier that the WTS of a species can also vary depending on its origin and selection process, with a rough estimate of 4% difference in favour of the cultivars (Appendix 6). It is possible that this difference has had some effect on our density results. During this same phase, the evolution of cover depends on the density of plants as well as their size. The present study is part of a broader research project conducting multiple experiments both *ex situ* and *in situ* on road embankments. *In situ*, we were able to notice a great phenotypic variability between individuals of the same species, influencing both the quantity and size of the leaves (Anaël Mayeur, personal observations).

Once the carrying capacity of the milieu is reached, competition processes regulate populations sizes. The competition for soil nutrients and water can play a role but is most likely

negligible under the growing conditions of our experiment. The competition for underground space among the root systems might play a role in the survival of plant individuals. The access to light, highly dependent on vegetation cover, is most likely the major factor of influence on density and can be strongly influenced by plants morphological characteristics defining canopy height and architecture [Haynes, 1980]. Here lays the trade-off between cover and density: as less light is available, the mortality of individuals increases. Grasses are also well known for their high competitiveness regarding soil nutrients and water [Annicchiarico et al., 2014], hindering the development of forbs. During our experiment, grasses, that usually present more vertically oriented leaves under natural conditions, formed a dense carpet of leaves over the surface of the growing pots, effectively blocking the light for other species developing underneath. Like so, a dominance of highly covering species might ultimately result in a lower richness overall.

#### ***Implications for practitioners***

As previously explained, the ability of a plant cover to reduce splash erosion depends on the morphological characteristics of the plant. We think that, during the first years of colonization, and before grasses can form into tussocks, the more vertical orientation and low surface of their leaves may offer less of an obstacle to the falling raindrops. However, the high density of individuals may facilitate infiltration and add some roughness to the soil surface, thus retaining more sediments from water runoffs. Associating grasses with a diversity of other forbs could bring complementary functions regarding erosion control. The diversity of roots and canopy architectures in richer mixtures should allow for a better exploitation of soil and aerial resources, and act on a variety of erosion process including splash erosion, surface erosion and shallow mass movement. Indeed, it is already admitted that herbaceous vegetation contributes greatly to increase the soil shear strength and particles cohesion at roots' proximity. Our results regarding cover during the growth phase and root biomass production are in line with the suggestion made by Fattet et al. [2011] that a variety of plant functional types in revegetation mixtures on slopes would result in a better ability to restrain surface erosion and superficial mass movement.

The expectations of practitioners regarding species diversity, functionality, the density of individuals and cover must be carefully assessed beforehand in regard of the local conditions of implantation and the objectives that are pursued. The present study mainly focuses on answering the geotechnical outcomes of different revegetation seed mixtures. One shall keep in mind the synergies and trade-offs with ecosystem functions and biodiversity-related services. For example, [Mola et al., 2011] show the antagonist relationship between vegetation cover and species richness linked to the early stages of ecological succession, suggesting that the dominance of a limited set of species might restrain the development of a richer community with more diversified functional traits. In any case, we believe that a bet-hedging strategy regarding the choice of seeds, including species and genetic diversity within species, is a good way to avoid technical failure and promote ecological functionality associated with revegetation operations. The success of revegetation operations can also depend on the involvement of other ecological processes, like shown in [Bulot, 2023] regarding the role of engineer species (e.g. seed dispersing ants). The choice of adequate and functional revegetation mixes should in any case be complemented with an adequate engineering and

treatment of the soils following some basic principles: (1) appropriately mould the slopes and redirect the water runoffs, (2) reduce soils compaction to support infiltration, (3) minimize exposure to chemicals to maintain plant survival and (4) create microrelief on landscaped areas [Forman, 2003].

### **3.1.5 Conclusions**

The relation between plant cover and erosion underlines the vulnerability of bare soils in the interval between the end of the landscaping operations and emphasizes the need for a prompt establishment of vegetation, either by spontaneous colonization or seeding operations. The use of native species for revegetation purpose is nowadays widespread among practitioners, to reduce the risk of introduction and compete with exogenous and potentially invasive species [Corbin and D'Antonio, 2004; Walker et al., 2015], and improve landscape integration [Federal Highway Administration, 2007a]. Reflexions now go beyond and consider with a rising interest the use of wild and locally sourced seeds, betting on the co-evolution with other components of the ecosystems to favour biodiversity, the natural process of selection and the higher genetic diversity provided by this kind of material to anticipate the needs of adaptation to climate change [Rivière et al., 2022].

Despite conducting this experiment under controlled conditions supposed to favour conventional compositions and cultivars, we observed no real disadvantage in the use of species-diverse and wild and locally sourced seeds. These mixes even showed better performances regarding the early development of grasses and the overall production of root biomass. Further experiments are being conducted on road embankments, seeking to assess the geotechnical and ecological capabilities of these revegetation mixtures under field conditions.

**Appendices of Chapter 3 – 3.1**

Type	Species	Variety	Type	Origin
<b>Grasses</b>	<i>Anthoxantum odoratum</i>		Wild	Germany
	<i>Bromus erectus</i>		Cultivar	Canada
	<i>Festuca rubra ssp rubra</i>	Mellori	Cultivar	Germany
	<i>Festuca ovina</i>	Bornito	Cultivar	Germany
	<i>Koeleria macrantha</i>		Cultivar	France
<b>Legumes</b>	<i>Anthyllis vulneraria</i>	Palmir	Cultivar	Czech Republic
	<i>Lotus corniculatus</i>	Baco	Cultivar	Argentina
	<i>Medicago sativa ssp lupulina</i>	Virgo	Cultivar	Denmark
	<i>Onobrychis viciifolia</i>		Cultivar	Russia
<b>Other forbs</b>	<i>Achillea millefolium</i>		Cultivar	New-Zeland
	<i>Anthemis tinctoria</i>	Kelwayi	Cultivar	China
	<i>Centaurea jacea</i>		Cultivar	Hungary
	<i>Centaurea scabiosa</i>		Cultivar	Germany
	<i>Cyanus segetum</i>		Cultivar	Hungary
	<i>Crepis rubra</i>	Rose-Pink	Cultivar	Poland
	<i>Daucus carotta</i>	Purple Kisses	Cultivar	China
	<i>Dianthus barbatus</i>	Tall Single Standard	Cultivar	The Netherlands
	<i>Echium vulgare</i>		Cultivar	Germany
	<i>Knautia arvensis</i>		Cultivar	Germany
	<i>Leucanthemum vulgare</i>		Cultivar	The Netherlands
	<i>Malva moschata</i>	Rosea	Cultivar	China
	<i>Papaver rhoeas</i>	Shirley Flowered	Single Cultivar	The Netherlands
	<i>Poterium sanguisorba</i>		Cultivar	France
	<i>Reseda alba</i>	White	Cultivar	China
	<i>Salvia pratensis</i>	Blue	Cultivar	China
	<i>Scabiosa atropurpurea</i>		Cultivar	China or The Netherlands
	<i>Silene vulgaris</i>		Cultivar	Germany
	<i>Stachys byzantina</i>	Pink Woolly Leaves	Cultivar	China
	<i>Thymus pulegioides</i>		Cultivar	The Netherlands

Appendix 5: Table of origins and varieties of non-local seeds

Number of seeds	$\Delta$
S - C	-11%
S - B	-13%
C - B	5%

$\Delta$ number of seeds	
<b>Grasses</b>	
S - C	-9%
S - B	33%
C - B	41%
<b>Legumes</b>	
S - C	44%
S - B	52%
C - B	9%
<b>Other Forbs</b>	
S - C	-160%
S - B	-194%
C - B	-149%

Number of seeds			
Grasses	NL	L	$\Delta$
S	2700	2700	<b>0,00%</b>
C	2940	2940	<b>0,00%</b>
B	1931	1931	<b>0,00%</b>
<b>Legumes</b>			
S	80	78	<b>3,22%</b>
C	51	50	<b>2,53%</b>
B	47	45	<b>4,95%</b>
<b>Non-legume forbs</b>			
S	16	16	<b>0,00%</b>
C	145	145	<b>0,00%</b>
B	996	1009	<b>-1,33%</b>

Mean WTS (g)		
Grasses	NL	L
S	1,66	1,66
C	1,60	1,60
B	1,94	1,94
<b>Legumes</b>		
S	10,80	10,85
C	12,27	12,29
B	10,40	10,45
<b>Non-legume forbs</b>		
S	7,00	7,00
C	1,27	1,27
B	2,99	2,82

Appendix 6: Detail of the differences in seed number per growing pot (a) regardless of the species group among compositions, (b) per species group among compositions and (c) per species group between origins; (d) Weight of Thousand Seeds (WTS) in grams per species group between origins.

a)

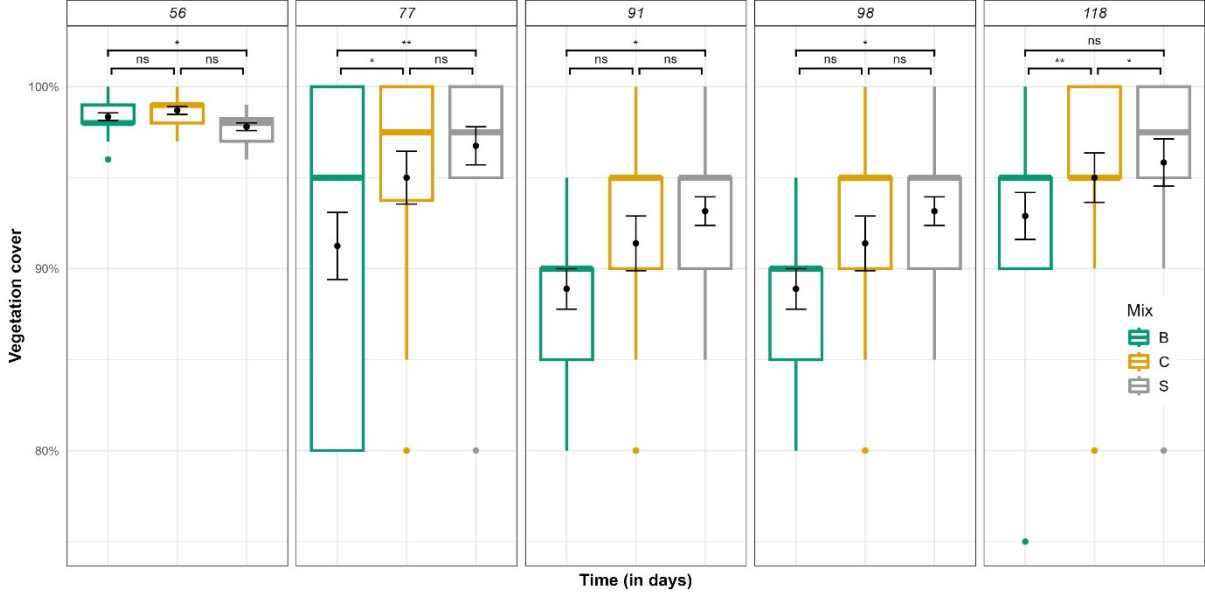
Target cover threshold	Mix1	Mix2	qinf	qsup
20%	C	S	-0.8520585	-0.05136114
	B	S	-1.8316469	-1.04074766
	B	C	-1.3858415	-0.56368586
50%	C	S	-2.6467355	-0.15954227
	B	S	-5.6896150	-3.23285751
	B	C	-4.3048169	-1.75096822
80%	C	S	-6.1455295	-0.37044567
	B	S	-13.2108768	-7.50646269
	B	C	-9.9954753	-4.06562230

b)

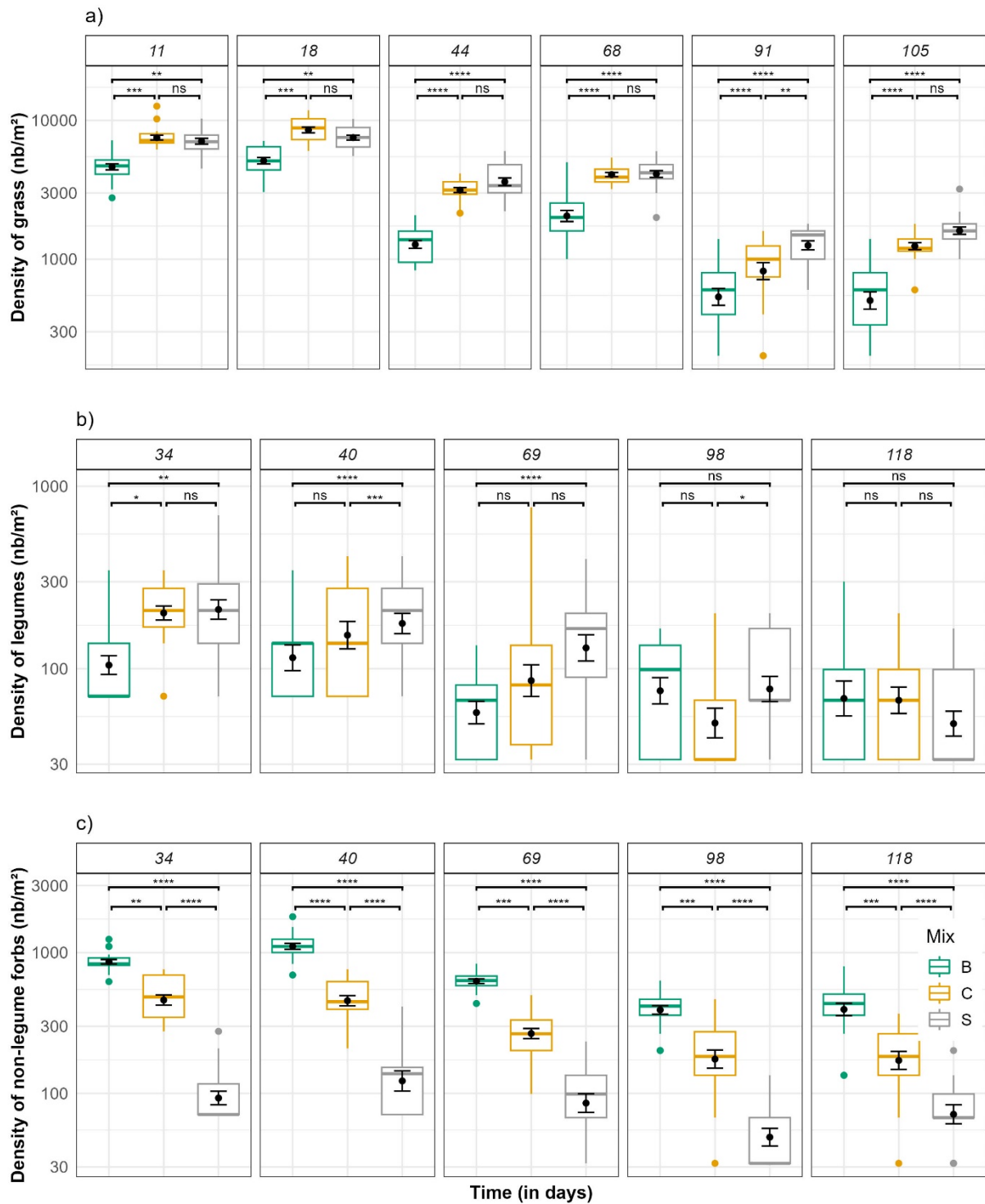
Target cover threshold	Mix	Contrast (origins)	qinf	qsup
20%	S	L - NL	-0.2077519	0.32277196
	C	L - NL	-0.5209248	0.02580751
	B	L - NL	0.2001462	0.79375578
50%	S	L - NL	-0.6453365	1.00262130
	C	L - NL	-1.6181402	0.08016544
	B	L - NL	0.6217109	2.46563067
80%	S	L - NL	-1.4984249	2.32801456
	C	L - NL	-3.7572052	0.18613839
	B	L - NL	1.4435681	5.72501713

Appendix 7: Results of the comparisons among compositions and origins for the estimations of times to reach target cover thresholds (20%, 50% and 80%). The test is significant when 0 is not included in the [qinf : qsup] interval.





Appendix 8: Vegetation cover of the three compositions at the times of measurement. Symbols above indicate the level of significance for Tuckey comparisons between among compositions: ns (non-significant), \* ( $P \leq 0.05$ ), \*\* ( $P \leq 0.01$ ).



Appendix 9: Density of (a) grass, (b) legume and (c) non-legume forbs individuals per square meter in all three compositions. Symbols above indicate the level of significance for Tuckey comparisons among compositions: ns (non-significant), \* (P ≤ 0.05), \*\* (P ≤ 0.01), \*\*\*\* (P ≤ 0.0001).



Illustration 9 : Parcelles expérimentales sur talus – Contournement Ouest de Strasbourg, kilomètre n°3 – Crédits : Gaëtan Soerensen

## **3.2 ASSESSING SEED MIXTURES FOR ROADSIDE REVEGETATION ON ROAD BANKS: RICHNESS AND ORIGIN AS PREDICTORS FOR EROSION CONTROL**

### **3.2.1 Problematics**

The main questions we wish to answer in this section are how the species composition and origin influence the expression of revegetation seed mixtures regarding cover and density under the field conditions of road embankments, and how does it impact the erosion processes. To guide our research, we tested the following hypothesis: (1) The vegetation cover and plant density, regardless of the species cortège, are affected by the local site conditions; (2) Because of their adaptation to the regional conditions of implantation, wild and locally-sourced seeds allow for a higher survival rate and vegetation cover through seasonal changes and challenging climatic conditions; (3) Richer seed-mixtures provide equivalent plant densities at lower seeding dose because of a better exploitation of resources by the different species.

### **3.2.2 Methods**

#### ***Seed mixtures***

Six seed mixtures were tested, plus an unseeded control (Control), for a total of seven modalities. The mixtures included three species compositions (B, C, S), and for each, two geographical origins (L, NL). Complete details of the mixtures can be found in 3.1.2 and Table 2.

#### ***Experimental design***

The experimental set-up is located on the Strasbourg Western Bypass project site (COS - Contournement Ouest de Strasbourg), in the Rhine basin, France, between 48°31'27.2 "N 7°34'55.3 "E and 48°39'20.6 "N 7°39'46.1 "E, on a North-South axis. The region has a semi-continental climate [Météo-France, 2023]. Construction work began in 2018, and the line was put into service in December 2021. The experimental plots are located exclusively on embankment slopes outside of restricted-access areas, to always ensure free access.

Five locations were selected, two at kilometre 3, and one at kilometres 9, 18 and 19 of the motorway route. On each of the five locations, two replicates were set up on either side of the road, facing east and west, for a total of 10 replicates, hereafter referred to as sites. Every site is named according to its kilometre position and the orientation of the slope: PK3SE, PK3SW, PK3NE, PK3NW, PK9E, PK9W, PK18E, PK18W, PK19E, PK19W. Each site comprises each of the 7 modalities: B-L, B-NL, C-L, C-NL, S-L, S-NL, Control. Each modality are 25 square meters (5 \* 5m) in size and were arranged in a row along the linear direction of the road. The spatial arrangement of the modalities was randomized within each site. We placed 3 quadrats, named "low", "mid", and "high", along the median line of each plot, from the bottom of the slope to the top, starting at 50cm from bottom and each quadrat spaced 50cm apart. This configuration minimizes any potential edge effect as quadrats were placed 2m away from the borders of the adjacent plots. The complete diagram of the experimental set-up is shown in Appendix 10.

In landscaping projects of this scale, revegetation is carried out on a section-by-section basis. At the start of our experiment in October 2021, our sites were therefore embankments

of varying ages that had undergone different treatments. Sites PK3SE, PK3SW, PK3NE, PK3NW and PK19W had been seeded in 2020, and PK19E in March 2021, with a mixture of 7 species including 3 Fabaceae and 4 Poaceae. PK9E, PK18E and PK18W had not been seeded but had moderately dense spontaneous vegetation. Only PK9W, which had not been seeded either, had bare soil at the time of experimental sowing. Thus, before the experimental seeding, we carried out two consecutive mowing operations spaced a month apart, as well as shallow tillage of the soil using a rototiller, to deplete the soil's seed bank and eliminate or weaken the initial vegetation as much as possible. Sowing was carried out manually on day 21<sup>st</sup> of October 2021, at a rate of 5 g/m<sup>2</sup> for the Biodiversity composition ( $\approx 5'300$  seeds) and 10 g/m<sup>2</sup> for the Competition ( $\approx 11'200$  seeds) and Standard ( $\approx 10'000$  seeds) compositions, following the supplier's recommendations.

### **Measurements**

We measured the vegetation cover, ranging from 0 to 100%, by visual estimation, standing vertically over each quadrat, at months 5, 7, 8, 11, 18, 19, 20, 23 after sowing. The density of individual plants was estimated for each species within our total list of seeded species at months 7, 8, 11, 18, 19, 20, 23 after sowing. The density of all detected species including spontaneous vegetation was measured at months 7, 18 and 23 after sowing. The density of individual plants was estimated by abundance classes as follows: class 1 [1-5 individuals], 2 [6-20], 3 [21-100], 4 [100+].

To better understand the composition and dynamics of the vegetation observed on sites, we classified the species in three categories relative to their phylogeny and associated functionality: grasses, legumes and non-legume forbs. Also, we identified for each plot associated with their respective treatment, the potential source of each species, whether they had been seeded by us as part of the experiment, by land-planner only during previous sowing campaigns, by both at different time intervals, or whether they were likely to have appeared spontaneously.

### **Data analysis**

We analysed two response variables in different models (cover and density) with a common set of factors: time (fixed effect), treatment (combination of the composition and origin; seven-level fixed effect), with a time x treatment interaction, and site (ten-level fixed effect). The height of the quadrat was added as factor for the analysis of the cover (three-level fixed effect), and a pseudo replicate in the model for density. The random effect of individual plots was added to address the repetition of measurements. All analyses were conducted in R (RStudio 2023.12.1+402). Differences among time intervals, treatments (compositions + origins + control), sites (locations + exposures) and plots were assessed by Tukey posthoc test using the "emmeans" package (v1.10.0).

The cover variable represents proportional data with values between 0 and 1. A binomial generalized mixed model (glmm) was performed to explain the cover by the effect of the factors time, treatment and their pairwise interactions, the site effect, the quadrat height effect, and the individuals as a random effect:  $Cover \sim (time + treatment)^2 + site + height + (1|Indiv)$ . A linear mixed model was performed using the same factors as previously described for the

density, except for the height of the quadrats on the slope:  $Density \sim (time + treatment)^2 + site + (1|Indiv)$ . All density data were log-transformed to achieve more normal distributed errors with constant variance.

### 3.2.3 Results

#### Cover

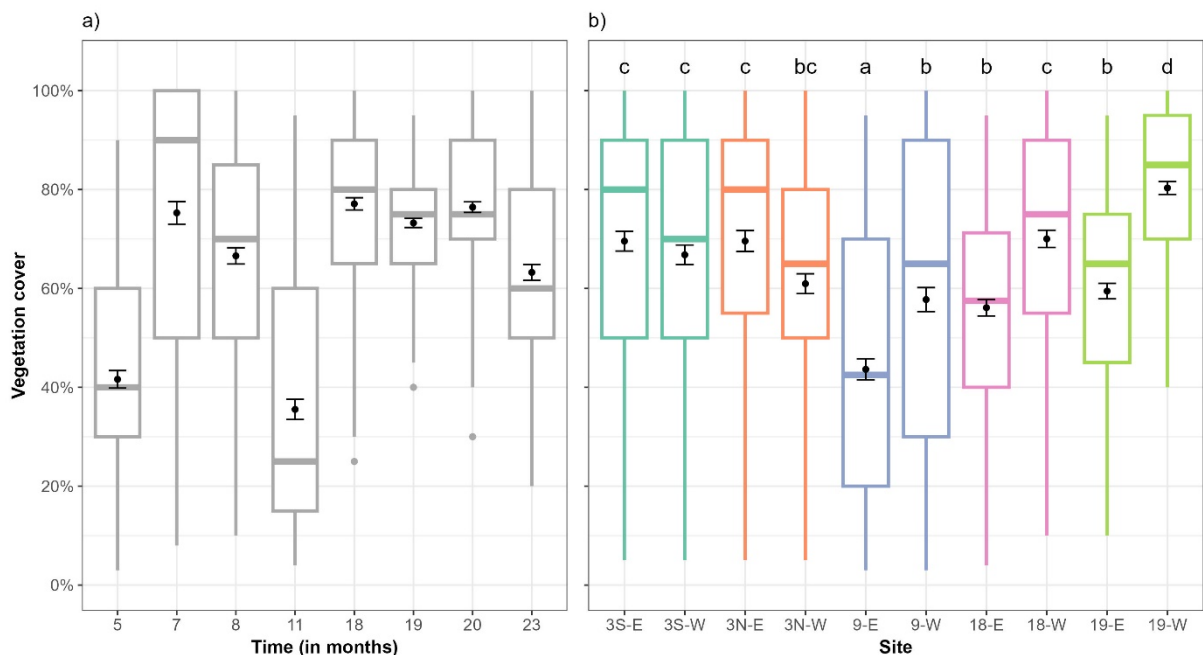


Figure 10: Mean vegetation cover per plot (a) at the times of measurement regardless of treatment, and (b) at each site regardless of the time of measurement. Across sites, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test,  $p < 0.05$ ).

The vegetation cover varied greatly over time in 2022, the first year after sowing, starting around 40% in March (month 5), raising to 75% in May (month 7) and decreasing back to 35% in September (month 11). In 2023, the second year after sowing, the cover remained high around 75% from April to June (months 18-20) and decreased to 65% in September (month 23) (Figure 10a).

Over the entire duration of the experiment, location and exposure had a significant impact on the vegetation cover. The cover on the different locations is classified as follow: PK19 > PK3S > PK3N > PK18 > PK9. PK9 presented the lowest cover compared to the other sites ( $p < 0.001$ ), with a difference around 15%. Overall, the vegetation cover is higher on West than East exposures ( $p < 0.001$ ). Per site, this difference in cover was not significant at PK3S ( $\Delta \approx 3\%$ ), small in favour of East at PK3N ( $\Delta \approx 9\%$ ,  $p < 0.001$ ), and marked in favour of West at PK9 ( $\Delta \approx 15\%$ ,  $p < 0.001$ ), PK18 ( $\Delta \approx 15\%$ ,  $p < 0.001$ ) and PK19 ( $\Delta \approx 21\%$ ,  $p < 0.001$ ) locations (Figure 10b). Cover was significantly higher on quadrats placed closest to the bottom of the slope compared to both the higher ones ( $\Delta \approx 5\%$ ,  $p < 0.001$ ).

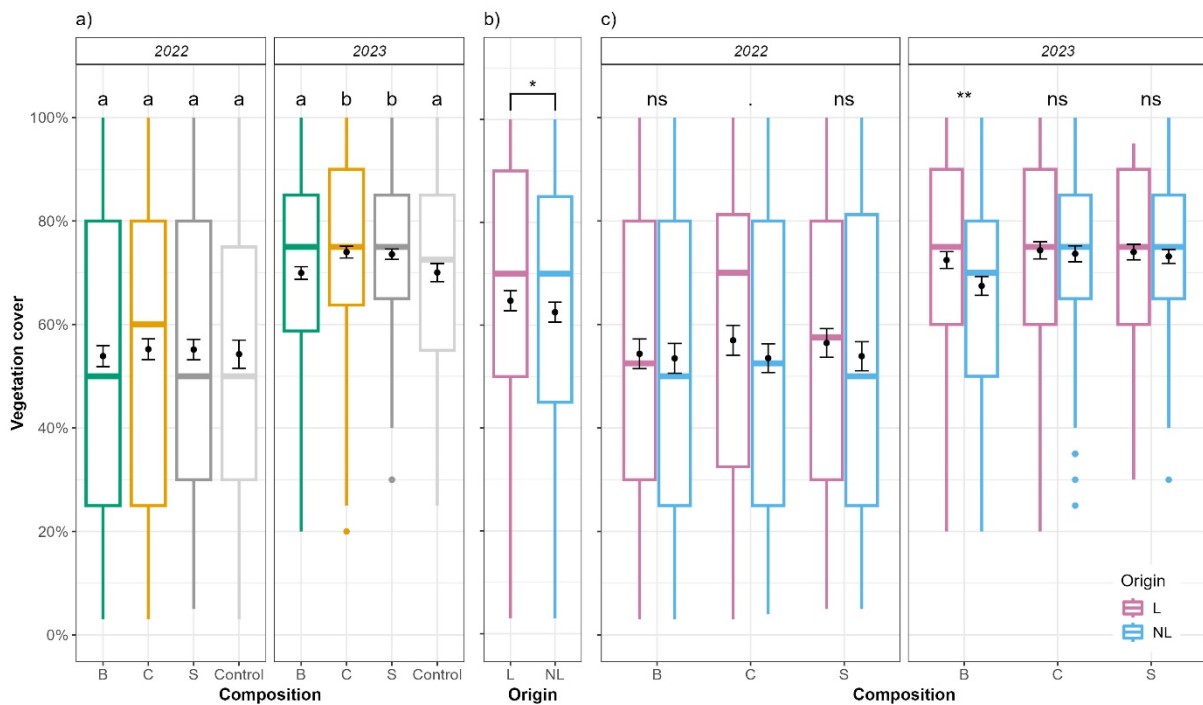


Figure 11: Mean vegetation cover per plot (a) per mixture composition for each year of measurements, (b) per origin regardless of time and composition, and (c) of local and non-local versions of the three compositions for each year of measurements. Across sites, means not sharing any letter are significantly different (Tukey’s test,  $p < 0.05$ ). S, C, and B are for Standard, Competitive, and Biodiversity seed composition, respectively. NL and L are of non-local and local origins. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between origins: ns (non-significant), . (on the verge of significance,  $0.1 \leq P \leq 0.05$ ), \* ( $P \leq 0.05$ ), \*\* ( $P \leq 0.01$ ).

There was little to no difference in vegetation cover among modalities, including Control, during the first year after sowing. In the second year, S and C both showed a slightly higher cover than B and Control ( $p < 0.05$ ). (Figure 11a)

Small differences in cover were observed between origins. First, regardless of the composition or time, the local mixtures yielded a slightly better cover than their non-local equivalents ( $p < 0.05$ ) (Figure 11b). When looking at the yearly mean cover, the local version of all three compositions yielded slightly higher covers than the non-local versions. However, it only is on the verge of significance for C in 2022 and significant for B in 2023 ( $p < 0.01$ ) (Figure 11c).



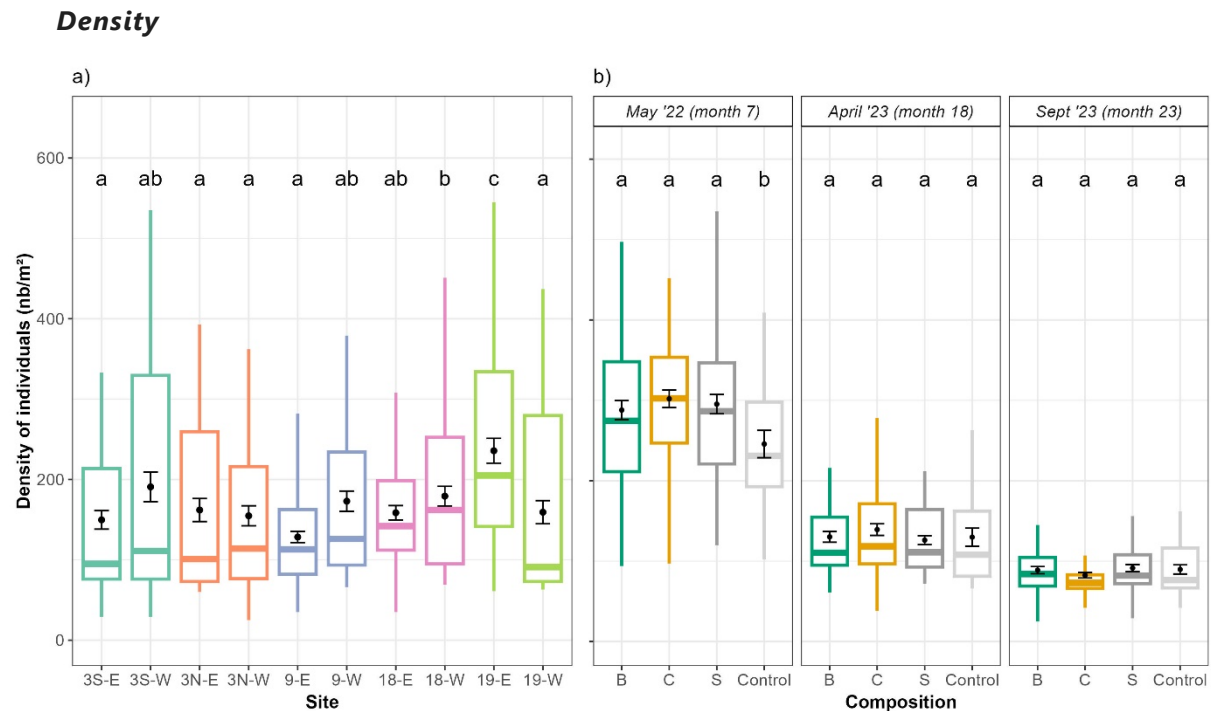


Figure 12: Density of individuals per plot (a) per site regardless of time, and (b) per composition on months 7, 18 and 23 after the experimental sowing. Across sites and across compositions, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test,  $p < 0.05$ ).

The site had a significant effect on the overall density of individuals (Figure 12a). Differences existed among locations, regardless of the exposure: PK3S, PK3N and PK9 expressing lower densities than PK18 and PK19 ( $p < 0.01$ ). No overall effect of the exposure has been detected. However, differences do exist between exposures within each location, generally returning higher densities on West than East for PK3S ( $p = 0.013$ ), PK3N ( $p = 0.730$ ), PK9 ( $p < 0.001$ ), PK18 ( $p = 0.116$ ), except for PK19 returning a higher density of plants on the eastern face ( $p < 0.001$ ).

In May 2022, 7 months after sowing, the seeded plots expressed a higher density of individuals compared to Control ( $p \leq 0.01$ ), and no significant differences were found among the three compositions overall. When the analysis is carried out site by site, however, an effect of species composition on density at month 7 is significant at all sites except the four sites at kilometre 3. No difference was found among plots at months 18 and 23, whether they were seeded or not (Figure 12b). Regardless of time, no effect of the origin was detected on the density of plants.



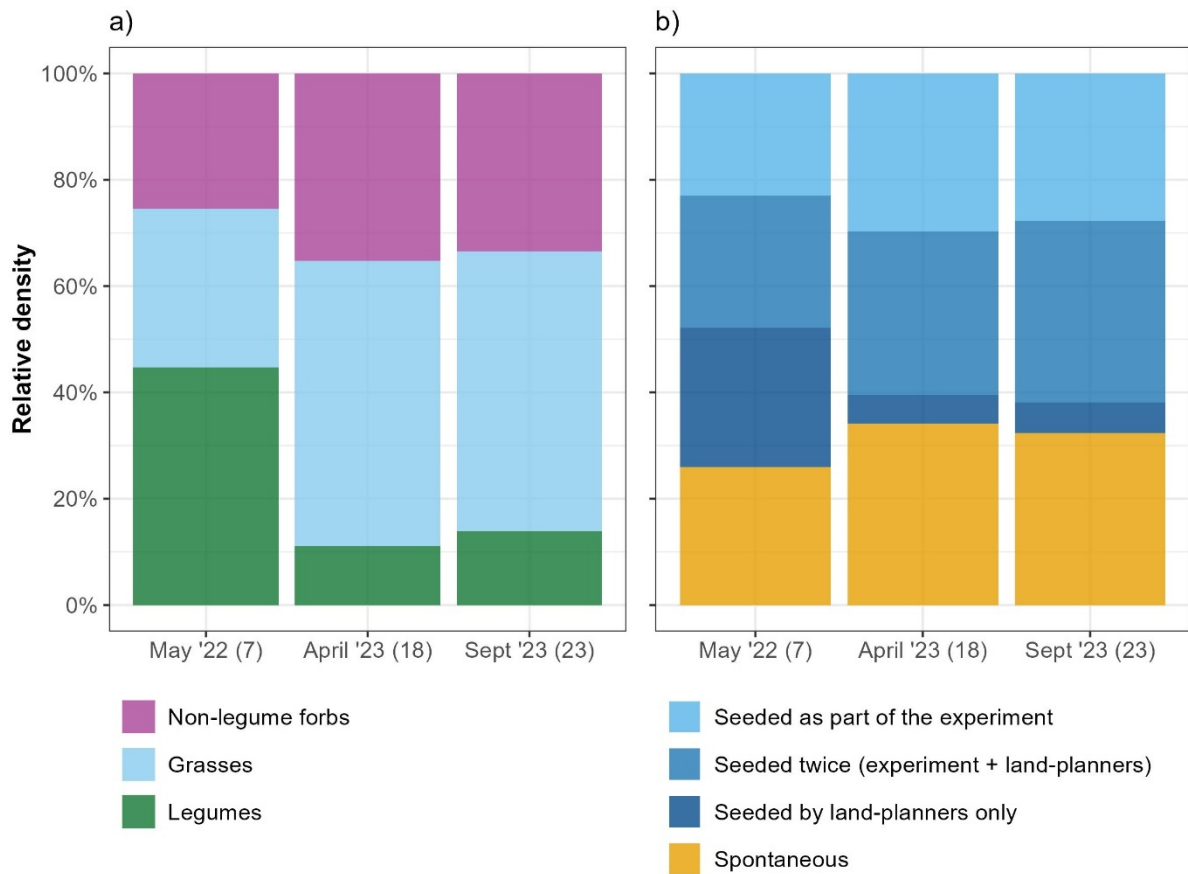


Figure 13: Relative proportion of the density of individuals in time (a) by type of plant and (b) by most probable provenance.

The average proportion of legumes decreased from 2022 to 2023, where the proportion of grasses increased, and the percentage of non-legume forbs slightly increased as well (Figure 13a). The density proportion of species that have been seeded either as part of the experiment or twice increased with time. The proportion of individuals from species that have been seeded merely by the land-planners during the 2021 and 2022 seeding campaigns, solely composed of legumes, decreased with time. The proportion of individuals from strictly spontaneous species increased (Figure 13b).

### 3.2.4 Discussion

#### *Temporal change and environmental impacts on cover*

The vegetation cover establishment was relatively quick the first year after sowing but suffered from the unusually high sun exposures and low amounts of precipitations observed this year, especially from October 2021 to July 2022 (Appendix 11). These harsh conditions might have led to a higher than usual mortality among plants, especially seedlings, and to high foliar losses or low above-ground biomass growth in surviving individuals [Olivera Vicedo et al., 2019]. This could explain the great seasonal variation in cover during the first year. The greater cover in the quadrats located at the bottom of the slope implies that the seeds may have been washed away by rainfall. This justifies the use of the hydroseeding technique on bare, sloping land such as motorway embankments, allowing the seeds to adhere to the substrate and aiding germination. Other techniques, like the use of covering media such as mulching, could be envisaged, but would appear to be difficult and costly to implement over large areas.

Regardless of time, the sites yielded different covers, which could be explained by the differences in the amount of topsoil, which can vary greatly due to the inaccuracy of earthmoving machinery when carrying out the spreading [Pierre Grasset, Vinci company, personal communication]. The soil structural quality affected by the time spent between topping-out and spreading operations, and the soil's nutrient content depending on the extraction site characteristics might strongly impact the expression of vegetation. Indeed, [Li et al., 2022] showed the impact of high nitrogen content on both the leaf area and above-ground biomass. Hence, the proximity of some of our plots to enriched cultivated lands might have influenced these factors. The slope, affecting the surface flow of water and its ability to penetrate the soil, as well as the distance to a water source affects water availability. Yet, the absence of formal soil-related data does not allow us to draw clear conclusions from these elements.

The fact that some sites had already been seeded before our experiment was set up may explain a large part of the differences in cover among sites. The mixtures previously seeded were exclusively composed of grasses (4 species) and legumes (3 species), which, in association, present rapid and high covering potential and competitiveness [Haynes, 1980], as it was the case in the four PK3 sites and in PK19W. Also, cover legumes contribute increasing the organic nitrogen in soils, thus promoting vegetation growth [Hu et al., 2023]. Other sites have waited several months before the implementation of our experiment, allowing for the establishment of a spontaneous vegetation from the expression of seedbank and natural seed dispersals, which remained partially present despite our initial efforts to impoverish the soil seedbank and vegetation before sowing. Nonetheless, we observed an overall lower cover on these sites (PK9E, PK9W, PK18E and PK18W) compared to the ones seeded two years before. On PK19E, the sowing operations occurred only a few months prior to our experiment, not letting the time for grasses and legumes to grow enough to create a clear cover differential.

The exposure induced a differential vegetation cover. The amount of solar radiation is theoretically supposed to be equal between East and West [Koyamatsu et al., 2015], but field studies have shown a differential solar radiation [Singh, 2018] and mean soil temperature

[Burnett et al., 2008], directly linked to insolation, skewed to the west in the Northern Hemisphere. The access to light and water are strong determinants of plant growth [Guo et al., 2019, 2013] and can affect the allocation of plant growth between above- and below-ground biomass [Portsmouth and Niinemets, 2006]. Yet, the response of plants to these factors is dependent on the species ecological optima, and the response of a community to changes among these drivers is harder to predict.

In our case, sites of opposite orientations within the same location present discrepancies influencing the development of vegetation. The eastern and western sides of PK9 are both at close proximity to a water pond, but the eastern pond level is more sensible to seasonal variations, and part of the western side is placed behind a thicket. At PK18, the eastern embankment presents a steeper slope than its eastern counterpart. The western face of PK19 is peculiar compared to the other sites, as it presents a flatter slope and is adjacent to a hill densely covered by trees (mainly *Robinia pseudoacacia*). The four sites at PK3 are relatively exempt of discrepancies when it comes to topography or surrounding vegetation. Thus, we observe a slightly, despite non significantly, higher cover on east-facing slopes. We believe all these specificities to be part of the explanatory variables for the differences of cover observed among sites. Studies have linked the slope steepness and direction to insolation [Sartz, 1972] and water retention capacity [Norton and Smith, 1930]. From there, the water availability and temperature variations have proven to affect plants above- and below-ground biomass production and their C:P and C:N ratio [Olivera Vicedo et al., 2019]. Other studies on multiple road banks have directly linked the slope angle to the amount of vegetation cover and species richness observed [Bochet and Garcia-Fayos, 2004].

#### ***Impact of revegetation mixtures' composition and origin on cover***

No difference in the establishment of cover was found the first year after sowing among the different compositions nor control. At this time, a large proportion of the seeded specimens already germinated but the perennial species were still not grown, and grasses for instance have not had time to form large covering tussocks. Then, the cover of the newly seeded species was diffused among the previously seeded and spontaneous vegetation. The second year however, the Standard and Competitive compositions showed higher cover than the Biodiversity, which was not different from control. As time passed, the vegetation in place prior to the experimentation was gradually and partially replaced by the overseed, as underlined by Figure 13. The installation and growth of grasses and other forbs started creating a differential compared to the control. The lower proportion of grasses and legumes, and the overall lower dosage at which was seeded the Biodiversity mixtures might explain the difference with both Competitive and Standard mixtures. We believe the possibility of a differential to appear in the future is not to exclude though.

The local origin slightly but significantly favoured the cover of locally sourced mixtures over their non-local cultivar counterparts. As no difference was observed between origins regarding the density of plants, reflecting the germination and survival rates, we believe that local plants might be able to retain their foliage more effectively under harsh conditions. This could be explained by a superior ability to exploit soil water and nutrient resources due to the better development of their root systems, as shown in [Mayeur et al., 2024].

### ***Temporal change and environmental impacts on density***

In May 2022, 7 months after sowing, the density of individuals was the highest measured, as we think that many spontaneous species had established on bare soils and most of the sown seeds had germinated. At that time, seeded individuals were still small, particularly grasses, the environment was still relatively open, and minimum competition for light and nutrients were at play. As previously mentioned, 2022 was particularly harsh climatically, with high temperatures from early in the season and low precipitations through spring and summer, probably causing mortality and contributing to the big density drop from year one to year two after sowing. The strong presence the first year of legumes on some sites, and particularly alfalfa, might have induced competition for water and light [Haynes, 1980; Li et al., 2022] with other species during summer 2022, partially explaining the lower densities observed afterwards. Alfalfa as for legumes in general are particularly competitive regarding the soil's water resources and cover capacity [Annicchiarico et al., 2014], effectively blocking light for other species be able to survive underneath the canopy. In 2022, year two after seeding, the growth and dominance of grasses induced an exploitation of topsoil resources and created a denser vegetation carpet.

We observed a significantly lower density of seeded individuals on the four sites located at PK3 and the two at PK9. Pk3 sites are not adjacent to a water source and their open environment, stuck in-between corn plantations, combined with a dry first year after sowing, might explain the dominance of the grass-legume complex while other species struggled to establish. However, a great set of other variables may explain these differences. Topsoil quality and quantity and the content in nutrients or the presence of pollutants could play a role. PK9, on the other hand, presented a scarce vegetation at the beginning of the experiment, and the lower densities of plants compared to PK18 and PK19 might simply be due to the time for the normal establishment process to occur.

The lack of effect of the exposure on the density make us believe this factor had in our experiment a greater impact on the plant's morphological development than on the germination or survival rate [Li et al., 2022]. However, when looking closer to the differences between exposures within sites, the densities of seeded individuals are indeed higher on West exposure, aside from PK19 which seems to bias the overall effect. Because of the specificities of the western face of PK19 and its inflated vegetation cover compared to other sites, greatly dominated by an alternance of grasses and legumes depending on the season, a trade-off probably occurred in this particular site between the cover and the density of individuals, as shown in [[Mayeur et al, 2024]].

We saw that the share in density of species that have been seeded as part of the experiment and/or seeded by both us and the land-planners tends to increase over time. However, when also including the species that have only been introduced as part of the past revegetation campaigns, we observed an overall diminution of this proportion of seeded vegetation to the profit of strictly spontaneous flora. This spontaneous vegetation results from the expression of the seed bank in the soil displaced during earthmoving operations, as well as from the dispersal of seeds by natural means or facilitated by human actions, such as mowing operations [Gardner, 2016] or the air corridors created by topography combined with traffic. The ongoing

decline in seeded vegetation needs to be monitored and verified in the coming years of this experiment to determine whether the impact of seeding operations influences vegetation dynamics only in the initial years or persists over the long term. It is important to note that the exact source of the individuals counted remains uncertain. For instance, an individual of a species known to have been sown in a particular plot may indeed have resulted from the sowing operation, but may also have come from the expression of the seed bank.

#### ***Impact of revegetation mixtures' composition and origin on density***

Despite a lower grass-legume content and seeding the Biodiversity composition at half the dosage (5g/m<sup>2</sup>) compared to the other two compositions (10g/m<sup>2</sup>), hence about half the number of seeds, the density of individuals expressed on plots containing this mixture was not different. The lower content in grasses and legumes compared to C and S might have reduced the interspecific competition in the access to light. The greater diversity of species in this composition might also have resulted in a wider range of community adaptation to the pedo-climatic conditions, inducing the expression and survival of equivalent number of individuals despite the lower dosage. The higher root biomass production in this mixture, shown by [Mayeur et al, 2024] in controlled conditions, combined with a greater diversity in the root system architectures, might also have given an advantage to its establishment.

It seems the origin of the seeds had little to no effect on the density of plants, hence on the seed germination rates and the survival of individuals. This is an interesting result that could answer the preoccupations of many French practitioners regarding the lack of warranty/standards regarding quality of vegetal materials produced under the Végétal local brand. Indeed, one of the arguments against its adoption in highway projects is the lack of quality requirements for germination rates (see 2.3.1.2.3), unlike seeds from the seed industry. However, our experiment demonstrates no significant difference between the two, which weakens this argument and could help ease the concerns of sceptical developers.

#### ***Implications for practitioners***

As already explained, the erosion processes occurring on slopes are greatly influenced by the presence, amount and characteristics of vegetation. The plant cover greatly reduces the detachment of soil particles by raindrops, and our results indicate that this process, called splash erosion, can be further mitigated by using local revegetation mixtures containing high proportions of grasses and legumes, especially during the first years of establishment. On the other hand, lowering the proportion of grasses and legumes to the profit of non-legume forbs and reducing the sowing dosage does not seem to affect the ability of mixtures to mitigate the sheet and inter-rill erosion processes. We should also consider that these richer mixtures might close the gap in cover in the later years as grasses form into tussocks and other surviving plants grow, effectively increasing their leaf area. Moreover, the diversity of root system architectures and above-ground morphologies could provide to richer mixes an advantage when it comes to occupying ecological niches and acting on the different erosion processes [Fattet et al., 2011]. So, in order to meet erosion reduction requirements as effectively as possible, practitioners shall adapt their vegetation practices to the local sites' conditions, as soil and terrain characteristics also play a role in vegetation establishment and the erosion processes.

Considering the ongoing consequences of climate modifications, practitioners might have to consider the implications for survival and above-ground biomass development of plants used for revegetation. As shown previously, the prolonged drought and abnormal temperature episodes will certainly affect the ability of plants to survive and grow in accordance with the technical requirements. Thus, the better establishment of locally-sourced plants shown by the present study and others [Staab et al., 2015] could prove useful in the future of climate conditions, avoiding the practitioners further potential costs linked to management or overseeding operations.

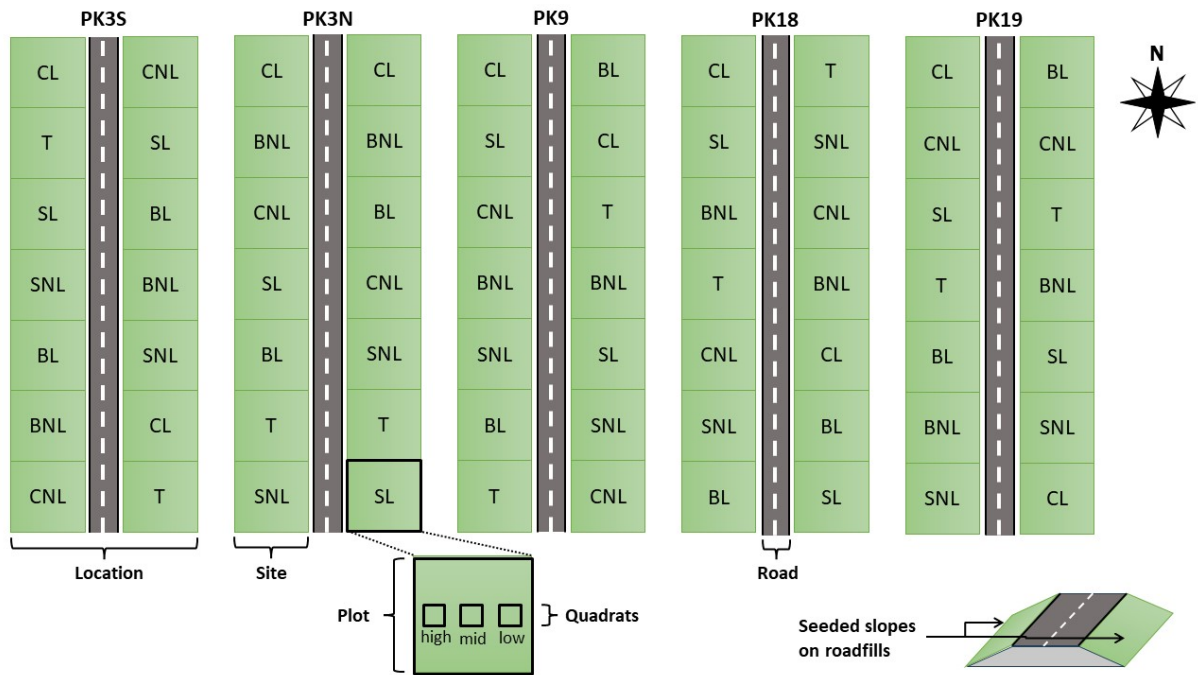
When it comes to development projects, expectations are no longer limited to technical issues alone though. In response to whether project proponents' requirements, public acceptance, or increasing regulatory constraints, developers must now incorporate environmental considerations within their projects, notably by contributing to the enhancement of biodiversity. In this perspective, trade-offs between vegetation cover and species richness during the early stages of ecological succession should be avoided when possible. Indeed, the dominance of a small set of species can potentially hinder the development of a richer, more functionally diverse community [Mola et al., 2011]. The contribution to cover and density of spontaneous flora, as well as potential benefits for species richness, should not be overseen. Furthermore, aside from the richness of revegetation mixtures' composition, the potential adaptative advantages provided by the higher genetic diversity could represent a non-neglectable asset in order to cope with the effects of climate change on plant populations [Rivière et al., 2022].

### **3.2.5 Conclusions**

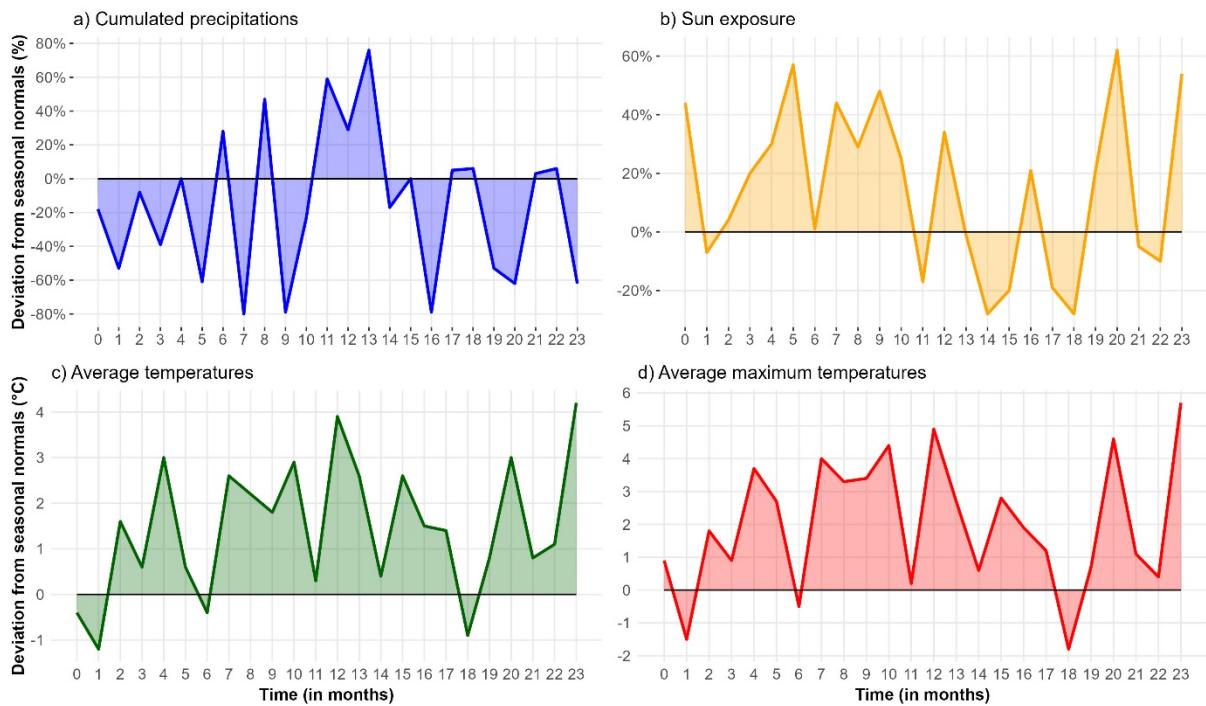
The use of native species in revegetation practices along roadsides is now widely adopted for their better adaptation to local conditions, as well as for the reducing the risk of introduction of exogenous invasive species [Corbin and D'Antonio, 2004; Walker et al., 2015]. However, practitioners are still not familiar with the use of wild and local seeds for this kind of operations. This can be explained by a variety of factors, ranging from the lack of awareness, the price barrier, the lack of availability, but also the lack of guaranty and control provided by producers when it comes to germination rates. Our results suggest that there is no disadvantage regarding germination or survival rates of these materials, and they are well suited to answer the revegetation needs in the context of land-planning projects.

The answer to technical expectations through revegetation is however not sufficient, and one shall also consider the added value for biodiversity. In this perspective, richer and locally sourced seed mixtures might provide advantages for pollinators and other associated fauna. Further studies are being conducted on variables such as species richness and flower production to assess these issues.

**Appendices of Chapter 3 – 3.2**



Appendix 10 : Schematic of the experimental set-up.



Appendix 11: Climate data for the duration of the experiment from month 0 (sowing) to 23. Source : ["Climatologie de l'année 2023 à Strasbourg-Entzheim - Infoclimat," 2024].







Illustration 10 : *Cyanus segetum* – Crédits : Anaël Mayeur

## **Chapitre 4. LA VEGETALISATION COMME REponse AUX ENJEUX DE BIODIVERSITE**





*Mélange Standard*



*Mélange Compétitif*



*Mélange Biodiversité*

Illustration 11 : Echantillons visuels des cortèges floristiques semés – Crédits : Anaël Mayeur

## **4.1 SHORT-TERM EFFECTS OF SOWING LOW- TO HIGH-DIVERSITY SEED MIXTURES TO PROMOTE PLANT DIVERSITY ON ROADSIDE EMBANKMENTS**

### **4.1.1 Introduction**

The construction of linear infrastructures is an important cause of habitat destruction and contributes to landscape alteration and threats to biodiversity [IPBES, 2019]. At the species and population levels, linear infrastructures disrupt the flow of individuals and genes, and lead to constant disturbances due to traffic, pollution and management operations such as mowing [Fensome and Mathews, 2016; Forman et al., 2003; Holderegger and Di Giulio, 2010; Moore et al., 2020; Muñoz et al., 2015; Soanes et al., 2024]. At the ecosystem level, these disturbances disrupt the establishment process of native species and make the surrounding environments vulnerable to pioneer species including invasive alien species [Gelbard and Belnap, 2003; Von Der Lippe and Kowarik, 2007].

Since the 2000s, ecologists have been taking an increasing interest in the management of spaces and species linked to linear infrastructures in order to limit their deleterious impact on wild fauna and flora. An abundance of literature is available on devices that allow animals to cross them to connect different habitats necessary for the survival of a population (*e.g.*, egg-laying and foraging sites) or to connect populations together [Claireau et al., 2021; Corlatti et al., 2009; Helldin, 2022; Seiler et al., 2019; Soanes et al., 2024]. For plant species, the scientific literature focuses more on the evolution of communities on reworked soils in terms of vegetation structure, species composition and resistance to invasive alien species [Gardner, 2016; Soper, 2019; Staab et al., 2015; Wigginton and Meyerson, 2018].

From an ecological standpoint, most studies recommend seeding after any earthmoving activity that leaves the soil bare. From the point of view of builders, the management of unsealed reworked soils along infrastructures is not without interest. Indeed, this land, particularly if it is in the immediate vicinity of the infrastructure (a road, for example), should contribute to its solidity and durability, contribute to the safety of users and to the acceptance of the project by the local population, and allow for light and inexpensive landscape management ([Forman et al., 2003; Steinfeld et al., 2011; Tinsley et al., 2006], but see [Soper, 2019; Wigginton and Meyerson, 2018] for different recommendations under specific site conditions).

In this regard, practitioners have historically tended to choose simple mixtures of grasses and legumes for their competitiveness and ability to quickly establish a cover, sometimes supplemented by a limited selection of species with wide ecological amplitudes [Dinger, 1997] in order to adapt to a diversity of site conditions. Since the 1970s, the use of native plant species has been increasingly favoured in revegetation projects. Their use reduces the risk of technical failure, lowers the risk of exogenous invasive species becoming established or helps to compete with them when they are already present, ensures better adaptation to local pedo-climatic conditions and contributes in some extent to the constitution of functional communities [Corbin and D'Antonio, 2004; Federal Highway Administration, 2011, 2007b, 2007a; Soper, 2019; Tinsley et al., 2006].

More recently, the edges of linear infrastructure have begun to be considered as suitable for inclusion in conservation or restoration projects, particularly for semi-natural grasslands [Auestad et al., 2011; Hovd and Skogen, 2005; Rydgren et al., 2010; Staab et al., 2015; Tikka et al., 2000]. In these projects, in addition to the choice of species, particular attention is paid to intraspecific genetic diversity [Durka et al., 2017; Hufford and Mazer, 2003; Walker et al., 2004]. The use of local or regional seeds is usually recommended to avoid the possible maladaptation of non-local plant material [Bischoff et al., 2008; Sgrò et al., 2011] and reduce the risk of outbreeding depression [Hufford and Mazer, 2003]. While the delimitation of seed transfer zones, in which the seeds are to be collected, reproduced and ultimately used, would ideally be based upon the spatial genetic structure of species, it is not always possible in the perspective of a commercial use. To allow for the creation of a market of native and local seeds, as well as to maximize the feasibility of their use in various revegetation contexts, the definition of these transfer zones is often based on biogeographic and pedoclimatic criteria [Malaval et al., 2010; Vander Mijnsbrugge et al., 2010]. To achieve this, traceability of the material is crucial, and initiatives have emerged in the last decade to make these local seeds accessible to practitioners [Bischoff et al., 2015; ErMiV, 2011; SKEW, 2009].

Studies on roadside revegetation using different seed mixtures yield mixed results regarding the influence of revegetation operations and both the composition and richness of seed mixtures on the plant diversity [Enríquez-de-Salamanca, 2022; Wigginton and Meyerson, 2018]. Some suggest that, in the long term, the composition and structure of the plant community depend more on the surrounding vegetation than on the initial seed mixture. In such cases, using fast-growing, species-poor mixtures or allowing spontaneous colonization may be sufficient to meet erosion control objectives or to establish communities similar to the neighbouring vegetation [Mehlhoop et al., 2022; Soper, 2019; Wigginton and Meyerson, 2018]. However, others highlight the benefits of using species-rich mixtures to increase plant diversity, particularly when the surrounding landscape is highly anthropized or degraded [Soper, 2019]. Although feedback from practitioners shows good results when revegetation roadside embankments and high-altitude slopes using wild and local seeds, there is little formal scientific evidence available. In previous studies, we compared a set of revegetation mixtures adapted to roadside contexts, varying by their species composition, richness and origin (local provenance vs. cultivars), to assess their ability to mitigate the erosion processes. We found that the wild and local plants tend to better maintain cover over time (*cf* 3.2.3), produce more root biomass than their non-local counterparts [Mayeur et al., 2024] and that richer mixtures yield satisfying density of individuals despite a lower seeding dosage (*cf* 3.2.3). In this study, we will focus on the ability of the same set of revegetation mixtures to promote overall plant diversity on embankments and assess the overall benefits of seeding operations in this context.

To achieve this, will ask the following questions: How do revegetation efforts on road embankments influence local plant diversity compared to spontaneous colonization, regardless of seed mixture composition and richness? Do the species composition, richness, and origin of the revegetation mixtures influence the diversity of revegetated areas and affect the balance between spontaneous and seeded flora establishment? We hypothesize that the revegetation using standard or competitive mixtures – mainly composed of a grass-legume association – can hinder the establishment of a diverse community originating from naturally

dispersed seeds from neighbouring habitats or from the soil seedbank. Conversely, the use of richer mixtures with a reduced proportion of grasses and legumes could contribute to the establishment of a diverse plant community without compromising the development of spontaneous vegetation.

#### **4.1.2 Methods**

##### ***Seed mixtures***

The experiment included seven treatments: six seeded and one unseeded (Control). For the seeded treatments, three species compositions of varying richness were used (Standard - S, Competitive - C and Biodiversity - B), and for each two distinct origins (Local – L and Non-Local – NL). Complete details of the six mixtures can be found in 3.1.2 and Table 2.

All species included in Table 2 will also be further referred to as introduced as part of the experiment. Species that have been seeded during one of the sowing campaigns as part of the road-building operations will be referred to as seeded by the road practitioners. Other species will be mentioned as spontaneous, which presence either resulted hence resulted from the expression of soil's seedbank or natural dispersal.

##### ***Experimental design***

The experimental set-up is located on the Strasbourg Western Bypass project (COS - Contournement Ouest de Strasbourg) in the Rhine basin, France, along a north-south axis. The plots are situated exclusively on embankment slopes outside restricted-access areas to ensure free access. Further details can be found at 3.2.2 - Methods.

As a reminder, five locations along the motorways route were selected: two at kilometre 3, one at kilometres 9, 18, and 19. At each location, two replicates were set up on either side of the road, facing east and west, for a total of 10 replicates, hereafter referred to as sites. Every site is named according to its kilometre position and the orientation of the slope: PK3SE, PK3SW, PK3NE, PK3NW, PK9E, PK9W, PK18E, PK18W, PK19E, PK19W. Each site includes all seven plots, one for each treatment: B-L, B-NL, C-L, C-NL, S-L, S-NL, and Control. Each treatment corresponded to a plot of 25 square meters (5m x 5m). The plots were arranged in a row along the road embankment, in random order within each site. In each plot, three quadrats – "low," "mid," and "high" – measuring 1 m by 1 m, were placed along the median line from the bottom to the top of the slope, starting 50 cm from the bottom and spaced 50 cm apart. This arrangement minimizes potential edge effects, as quadrats are located 2 m away from the borders of adjacent plots. A complete diagram of the experimental set-up is shown in Appendix 10.

Also, at the time of seeding for our experiment, some areas had already been seeded as part of the project's vegetation campaigns. Sites PK3SE, PK3SW, PK3NE, PK3NW, and PK19W were seeded in 2020, and PK19E in March 2021, with a mixture of 7 species, including 3 Fabaceae (*Medicago sativa*, *Onobrychis viciifolia* and *Trifolium repens*) and 4 Poaceae (*Festuca ovina* and *rubra*, *Lolium perenne* and *Poa pratensis*). PK9E, PK18E, and PK18W were not seeded but had moderately dense spontaneous vegetation, and only PK9W had bare soil before the beginning of the experiments. In order to deplete the soil's seed bank and to eliminate or

weaken as much vegetation as possible before seeding for our experiment, two consecutive mowing operations spaced a month apart followed with a shallow tillage using a rototiller were performed. Sowing was carried out manually on day 21<sup>st</sup> of October 2021, at a rate of 5 g/m<sup>2</sup> for the Biodiversity composition ( $\approx 5,300$  seeds) and 10 g/m<sup>2</sup> for the Competitive ( $\approx 11,200$  seeds) and Standard ( $\approx 10,000$  seeds) compositions, following the supplier's recommendations.

### **Data collection**

Species abundance in the quadrats was measured repeatedly from October 2021 (7 months after sowing). Poaceae, whose species have not been identified, were not included in the following diversity analyses. Forbs were identified to the species level when possible, and to the genus level otherwise. The abundance of species seeded as part of the experiment (Table 1) was estimated at months 7, 8, 11, 18, 19, 20, 23 after sowing, while the abundance of other species, either from the soil seed bank (including material from previous sowings by developers) or from dispersal from surrounding areas, was estimated at months 7, 18 and 23. Abundance classes were used for all species: class 1 [1-5 individuals], 2 [6-20], 3 [21-100], and 4 [100+].

### **Data analysis**

We analysed three response variables in different models (species richness, Shannon and Pielou indices) with a common set of factors: the treatment (combination of the composition and origin; seven-levels, fixed effect), the site (combination of the location and exposure; ten-levels, fixed effect), and time (*i.e.* month number after sowing, random effect). All analyses were conducted in R ([R Core Team, 2024]). Differences among treatments and among sites were assessed by Tukey *post hoc* tests using the “emmeans” package (v1.10.0), and contrast results represented with letters of significance [Piepho, 2018].

Shannon index values were computed using the equation:

$$H' = -\sum_{i=1}^S p_i \cdot \log_2(p_i)$$

while Pielou index values were calculated using the equation:

$$J' = \frac{H'}{H_{max}}$$

where  $S$  = total number of species per plot,  $p_i = \frac{n_i}{N}$ ,  $n_i$  = number of individuals per species per plot,  $N$  = total number of individuals per plot,  $H_{max} = \log_2(S)$  [Pielou, 1966]. To calculate the indices, the abundance values for each class were transformed into a number of individuals ( $n_i$ ) using the median value for classes 1 [3], 2 [13], and 3 [60], and using 150 for class 4 [150]. The Shannon is a positive index translating the species richness and equitability, while the Pielou index varies between 0 and 1 and measures the variations between the Shannon index and its value if all species abundances were the same (even distribution). A Poisson generalized mixed model (glmm) was performed to explain the species richness by the effect of the above-mentioned factors: Richness  $\sim$  (Composition + Origin)<sup>2</sup> + (Location + Exposure)<sup>2</sup> + (1|Time). A linear mixed model was performed using the same factors as previously described for the Shannon and Pielou indices: Shannon or Pielou  $\sim$  (Composition + Origin)<sup>2</sup> + (Location + Exposure)<sup>2</sup> + (1|Time). Models' residuals were inspected for dispersion, normality, and



outliers (Appendices 13 to 15). The conditional  $R^2$  represents the proportion of variance explained by both the fixed and random effects. The marginal  $R^2$  represents the proportion of variance explained by the fixed effects alone.

### 4.1.3 Results

#### *Diversity at the global scale ( $\gamma$ diversity)*

Overall, during the two years after the experimental seeding operations, a total of 105 forb species have been detected in the plots (Appendix 22). Of these 105 forb species, 24 were sown for our experiment, and 22 were observed at least once. Of these 24 forb species, 3 had also been sown by the road landscapers. Of the remaining 81 species, 1 had been sown by the road practitioners and 80 most likely appeared spontaneously. We observed a total number of 76 species on the East exposures against 90 on the West (Table 3a). Of the 24 forb species seeded as part of the experiment, 22, 19, 14 and 15 were detected in the plots seeded with the Biodiversity (B), Competitive (C), Standard (S) compositions and the Control respectively (Table 3b).

Table 3 : Total number of forbs species inventoried on experimental plots for each a) exposure, b) mixture composition and c) location.

a)		b)				c)	
Exposure	Richness	Modality	Species seeded in the experiment (Table 2)	Other species	Total	Location	Richness
E	76					PK3S	54
W	90	B	22	62	84	PK3N	49
		C	19	64	83	PK9	77
		S	14	64	78	PK18	59
		Control	15	54	69	PK19	50

#### *Diversity at the site scale ( $\alpha$ diversity)*

##### *Forb richness per plot*

The fixed effects explained 25.2% of the total variance of richness (marginal  $R^2 = 0.252$ ), and the combination of both fixed and random effects explained 65.3% of the total variance of richness (conditional  $R^2 = 0.653$ ).

Plots seeded with whichever mixture returned significantly higher species richness than the control ( $p \leq 0.01$ ) (Figure 14). The plots seeded with the Biodiversity (B) composition yielded a higher species richness than both the Competitive (C,  $p \leq 0.001$ ) and the Standard (S,  $\leq 0.001$ ) ones. Plots seeded with C and S did not show any significant differences despite a slightly lower richness in C. No effect of the origin was found on the species richness per plot within compositions. Results of all pairwise T-tests can be found in Appendix 16b-c.

There were also differences in the mean species richness per plot between the sites along the highway. Of the 105 total forb species observed overall, 54, 49, 77, 59 and 50 were present in at least one plot of the PK3S, PK3N, PK9, PK18 and PK19 locations respectively (Table



3c – see Appendix 12). PK3S, PK3N and PK19 did not differ significantly from each other, but yielded significantly lower richness per plot compared PK9 and PK18 ( $p < 0.02$ ). PK18 yielded a significantly lower richness per plot than PK9 ( $p < 0.001$ ). Although no overall effect of the exposure was detected, but significant differences were detected locally at PK9 ( $p < 0.001$ , higher richness per plot on the West exposure) and PK19 ( $p < 0.001$ , higher richness per plot on the East exposure). At PK3S, PK3N and PK18, species richness was higher to the west, but not significantly. (see Appendix 16d-e).

The proportion of species that most probably originated from our experimental seedings or from previous seedings by the practitioners was 49.9%, 41% and 30.9% in B, C and S respectively. The proportion of species that most probably originated from the expression of the soil seedbank or natural dispersion was 48.4%, 57.2%, 67.5% and 82.3% in B, C, S and Control respectively. The rest most probably originated from the previous sowing operations conducted as part of the land-scaping project.

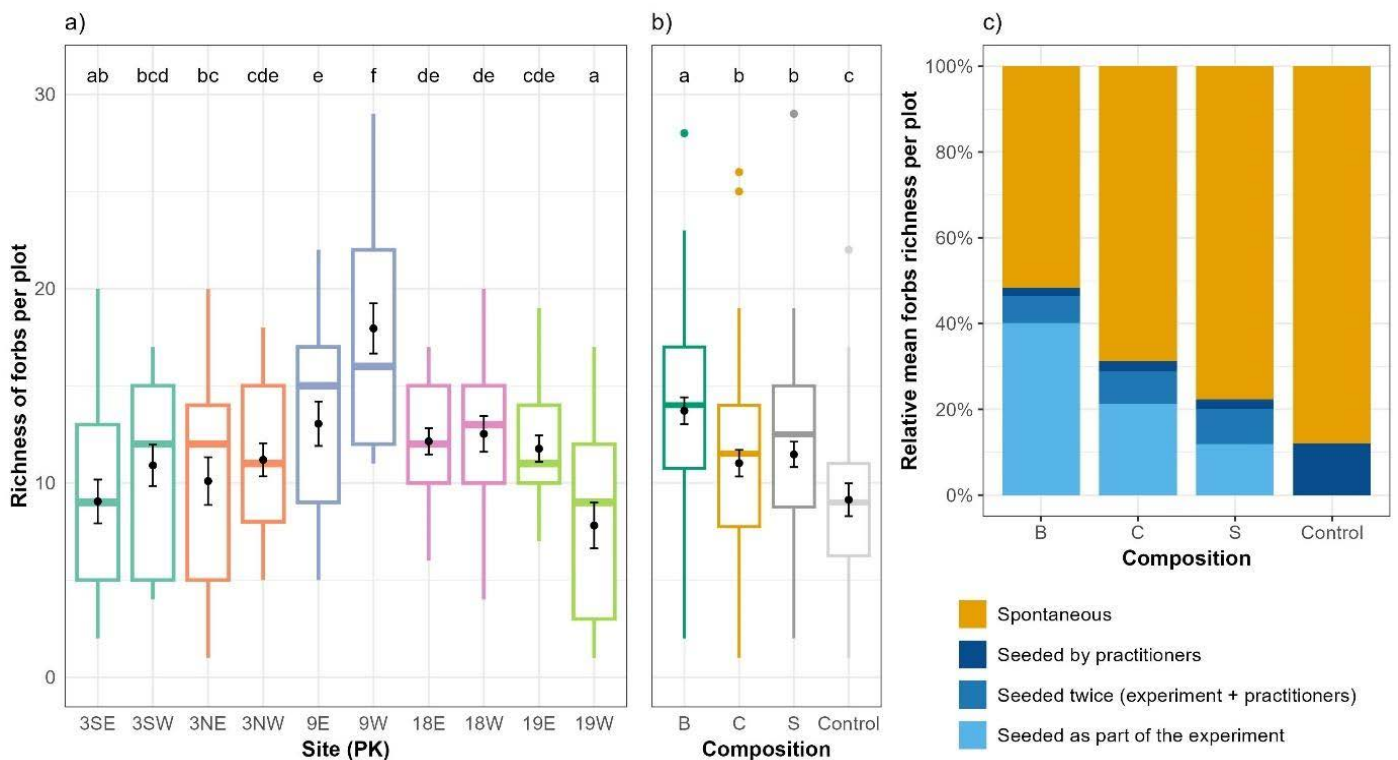


Figure 14: Boxplot of mean species richness of forbs per plot on each a) site and for each b) composition of seeded mixture. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Within each plot, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test,  $p < 0.05$ ). c) Relative mean forb richness per plot by most probable source.

*Shannon and Pielou indices on forbs per plot*

The fixed effects explained 21.7% of the total variance (marginal  $R^2$ ), and the combination of both fixed and random effects explained 65.7% of the total variance of Shannon index (conditional  $R^2$ ). The fixed effects explained 10.7% of the total variance (marginal  $R^2$ ), and the combination of both fixed and random effects explained 46% of the total variance of Pielou index (conditional  $R^2$ ).

PK9 presented the highest Shannon diversity ( $p \leq 0.01$ ), followed by PK18, PK3N, PK3S and PK19. Overall, no significant effect of the exposure on the Shannon index was found, except locally at PK19 where it was significantly higher on the East ( $p < 0.001$ ) (Figure 15a, Appendix 17). Regarding the seeding modalities, the B composition returned the highest Shannon index compared to S, C and control ( $p < 0.001$ ). The Shannon index of S was significantly higher than the one of the control ( $p < 0.01$ ), which was not the case for C. The Shannon index also was not significantly different between S and C (Figure 15b, Appendix 17). The Shannon index was not different between origins (Appendix 17).

The Pielou index, further referred to as evenness, was significantly lower at PK19 compared to the other locations ( $p < 0.001$ ). No other significant differences were found between the other locations (Figure 15c, Appendix 18). The Pielou index did not significantly differ among the seeding modalities regardless of the site (Figure 15d, Appendix 18), neither between origins (Appendix 18).

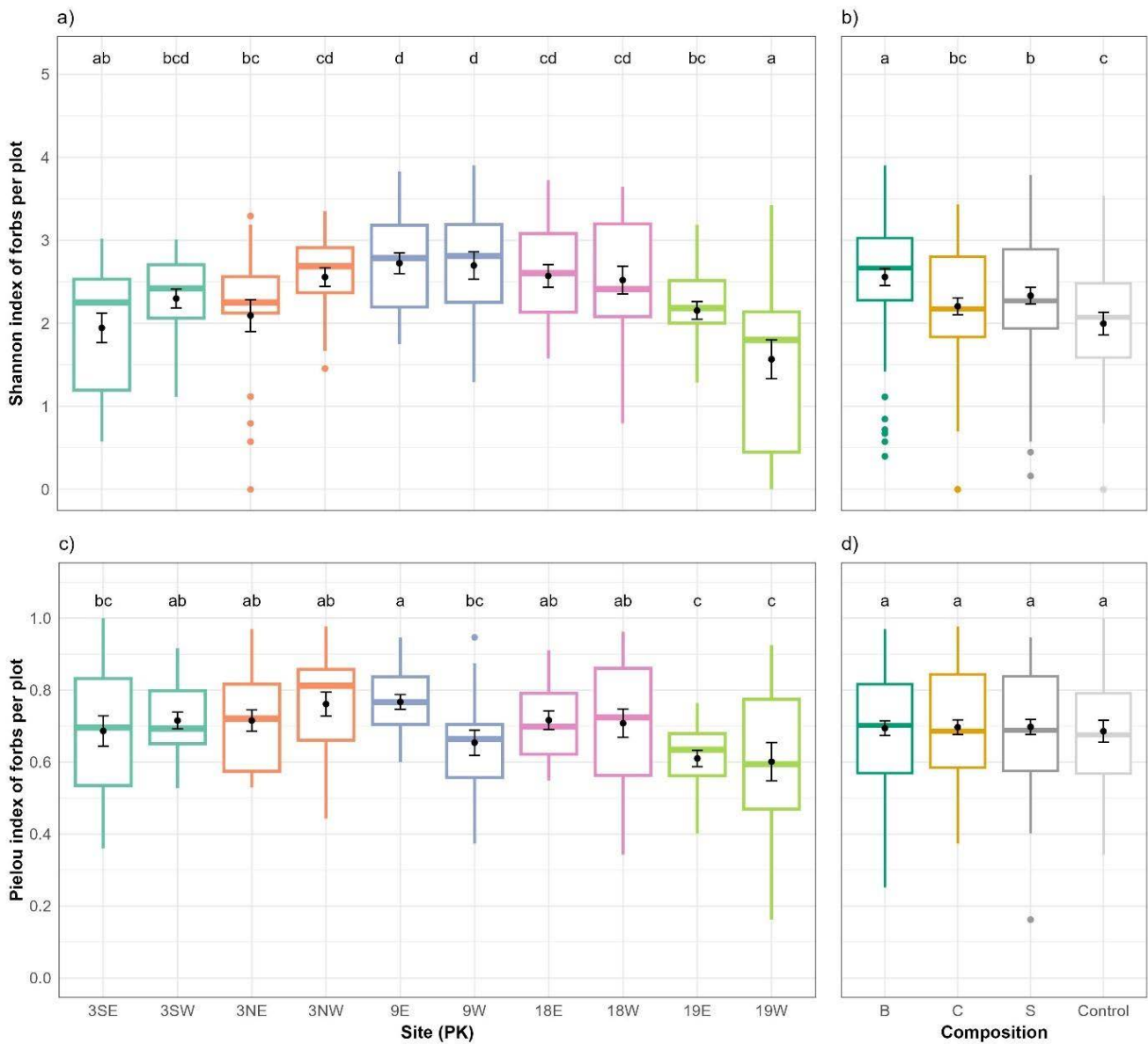


Figure 15: Boxplot of mean Shannon index value on forbs per plot on each a) site and for each b) composition of seeded mixture. Boxplot of mean Pielou (evenness) index value on forbs per plot on each c) site and for each d) composition of seeded mixture. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Within each plot, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test,  $p < 0.05$ ).

#### 4.1.4 Discussion

##### ***Effects of revegetation and spontaneous colonisation on forb diversity***

###### *Diversity at local scale (Sites)*

At the local scale the experimental seeding operations increased significantly the richness of forbs. Plots seeded with any of the revegetation mixtures returned a higher forb richness than the passively revegetated plots (*i.e.* control), suggesting that the sowing did not hinder the development of spontaneous vegetation. We hypothesized that the use of mixtures mainly composed of grasses and legumes might hinder the establishment of diverse plant communities emanating from natural sources (*i.e.* control plots), which was not the case. The higher proportion of legumes in the competitive mixture composition (Table 2) did not make a significant difference with the standard mixture composition on the plant diversity *in fine*, neither the evenness. On the other hand, following our predictions, the sowing of a considerably richer seed mixture composition increased significantly the diversity of the local plant corteges.

The Shannon index returned similar results to the species richness when testing the differences either between sites or mixture compositions, but with lower levels of significance (Figure 14a,b, Figure 15a,b). This is probably because the Shannon index is sensitive to both the species richness and evenness, and, when looking at the evenness alone (Pielou index), it returned very little differences between sites neither mixture compositions (Figure 2c,d). Yet we might have expected to observe differences in the evenness between these factors. Revegetation mixtures mainly composed of grasses and legumes are quite known for their ability to germinate and grow quickly, effectively hindering the establishment of other species during the first few years after seeding operations [Staab et al., 2015]. We believe this lack of significant differences in the evenness is most likely due to the absence of data on grass richness and abundance in our study, as the results we observed were focusing on the forbs rather than the whole plant cortège.

###### *Diversity at large scale (motorway)*

Previous studies showed that the vegetation composition along roadsides and other linear infrastructures is affected by the neighbouring vegetation, which contributes to the structuration of plant communities [Forman and Gordon, 1986; Soper, 2019]. Our results seem to corroborate this assumption, as the total number of forbs detected varied greatly among sites (Table 3c, Appendix 16e). To illustrate, the sites presenting the higher richness, namely PK9E, PK9W and PK18W, have in common the be proximate to areas restored as offsetting measures, being a pond, a wetland or a riverbank, thus benefiting from a better access to water, and being located close to a bigger pool of neighbouring native species, either naturally dispersed or human-assisted, than the sites implanted among croplands.

The role of neighbouring native vegetation in the structuration of plant communities along roadsides also depends on the land-use history of the larger surrounding landscape and road characteristics. For example, long-established croplands often present lower conservation values [Spooner and Lunt, 2004] than semi-natural grasslands for instance, and larger roads and highways are more prone to non-native dispersion and overall homogenization of

communities [Gelbard and Belnap, 2003]. Soper, [2019] suggested that revegetation using less diverse seeding mixtures to cope with erosion-related challenges could suffice for the establishment of diverse plant communities at landscape scale as long as the neighbouring environments present a good level of conservation and a wide range of native species. On the other hand, he suggested that revegetation operations might improve the diversity in plant communities of roadsides surrounded by croplands, which are prone to the establishment of non-native species, like it is the case in our study. Indeed, the environments crossed by the motorway we focused on are largely dominated by intensively farmed croplands. In this regard and considering our results on  $\alpha$  diversity and other studies [Mehlhoop et al., 2022], revegetation operations using rich native species might be better suited to achieve ecological objectives.

### ***Identifying the sources of diversity***

The diversity observed at local and global scales can originate from different sources. Thanks to our control plots and observations of the surrounding plant communities, we noticed that some seeded species such as *Leucanthemum sp*, *Achillea millefolium*, *Medicago sativa ssp*, *Daucus carota*, *Papaver sp* and *Onobrychis viciifolia* occur spontaneously on certain sites (Appendix 21, Appendix 22 ; also, see Table 3b for the number of seeded species detected in the plots of each composition across all the sites). Thus, some individuals from these species might come from the soil seedbank or natural dispersal. It means that our seeding operations sometimes only reinforced the populations of species that occur spontaneously on a given site.

This raises the question of whether the diversity observed locally ( $\alpha$  diversity) is the result of revegetation operations or spontaneous colonisation. By analysing the sources of diversity differences between the mixtures, we found that the more diverse the composition of the revegetation mixture, the higher the likelihood that local diversity originated from our seedings. The higher diversity observed in the plots sown with the biodiversity mixture (B) appears to largely stem from the species we seeded (over 40%), whereas the diversity in the C and S plots was mostly spontaneous, with fewer than 30% of the species originating from the seeding. We were able to statistically confirm this observation by running models similar to the ones performed on the overall data and described in Methods, but this time separately on the group of species experimentally sown (*i.e.* included in Table 2 – see results in Appendix 19), and the others (see results in Appendix 20). Regardless of their sources, we found the same effect of the mixture composition on the diversity of forbs from Table 2 (B > C = S > Control), but no effect of the mixture composition on the diversity of the other species (*i.e.* spontaneous or seeded solely by the road practitioners). This confirmed that differences in the forbs diversity at local scale overall were most probably caused by our seeding operation.

### ***Impact of biotic and abiotic factors on the different diversities***

At PK3SE, PK3SW, PK3NE, PK3NW, and PK19W, the vegetation was dominated by an alternance of grasses and legumes (see Chapitre 3 - 3.2.3 Results) and returned among the lowest diversity values (Figure 14, Figure 15). Previous studies have shown multiple interactions between plant diversity and other factors such as vegetation cover, above-ground biomass, soil's enzyme activity, soil's physical and physio-chemical parameters and soil microbial functional diversity (e.g. [Bassett et al., 2005; Iturrate-Garcia et al., 2016; Li, 2022; Li et al., 1992a;

Rodríguez-Loinaz et al., 2008; Wang et al., 2022]). For instance, the soil nutrient content can promote the rapid growth of perennial species, reducing the diversity of plant communities by their competitive potential [Grime, 1973]. On the above-mentioned sites, embankments are implanted in between croplands, and the topsoil spread on these sites most likely originated from nearby sources. Thus, we believe the topsoil was most likely containing high nutrient content (N, P, K) resulting from fertilization activities, which could explain our observations.

The slope profile and exposure of the embankments also influence the development of vegetation and community assembly by acting on a set of factors like soil temperature, access to light, soil moisture and nutrient content, especially in mid-latitude regions [Elnaker and Zaleski, 2021; Singh, 2018; Yang et al., 2020]. This is illustrated by the effect of exposure on species richness at landscape level (Table 2), showing higher values on West exposures. The PK19E showed interesting and distinct characteristics compared to the other sites. The slope is less steep, and the embankment faces a tree-covered hill (mainly *Robinia pseudoaccacia*), creating a lot of shade in the afternoon. As a potential consequence, we observed a very dense vegetation compared to other sites (as shown in 3.2), resulting in the lowest densities of all the experimental sites (Figure 1, Figure 2). Overall, the species richness and diversity indices varied greatly among the locations and exposures, reflecting different soil properties, slope aspects and micro-climatic conditions.

#### ***Implications for practitioners and biodiversity***

Our study showed that revegetating using species-rich mixtures on road embankments can have a positive effect on plant diversity at local scale. We also found that the spontaneous vegetation, *i.e.* originating from the soil seedbank or natural dispersal, greatly contributes to the plant diversity and can establish despite revegetation actions being operated. With the aim of meeting the expectations of developers, we have shown in a previous research that using forb-rich and less competitive seed mixtures on road embankments often suffice to attend the erosion-reduction objectives [Mayeur et al., 2024; Chapitre 3]. The outcome of revegetation operations may however vary depending on the context. For instance, studies have shown that species richness [Matesanz et al., 2006] and plant cover [Enríquez-de-Salamanca, 2022] have a harder time establishing on roadcuts than embankments. Under specific conditions like semi-arid climates in the south of Spain, studies have shown that hydroseeding highly competitive revegetation mixtures can hinder the species richness found along the roadway [Matesanz et al., 2006]. The origin of the seeds did not show a significant impact on plant diversity in this study. Nonetheless, other research have shown that the establishment of a vegetation cover, germination, productivity and survival rates are ranging from equivalent to far better when using locally-sourced and native seed mixtures compared to standard commercial mixtures containing a majority of non-native species or cultivars [Bischoff et al., 2008, 2006; Bochet et al., 2010; Tinsley et al., 2006; Tormo et al., 2007]. Thus, the use of genetically diverse seeds and richer mixtures, presenting a diversity of plant functional types and a wider range of ecological preferences could prove useful, provided that their selection has been made in accordance with their habitat requirements [Bochet et al., 2010; Brown, 1997].

Creation of flower strips and grassland restoration operations using forb-rich seed mixtures have the potential to increase floral species richness, but also pollen and nectar production

[Schmidt et al., 2022] along with the associated richness and abundance of pollinators like bees [Hopwood, 2008]. If the embankment communities are usually divergent from grasslands', they often host a great variety of species [Tikka et al., 2000], among which are important producers of nectar and pollen resources. Some of the species seeded and frequently observed as part of this study have proved to be great producers of these resources, like *D. carota*, *A. millefolium*, *C. jacea*, *Centaurea cyanus*, *Papaver rhoeas*, *Salvia pratensis*, *Lotus corniculatus* and *Malva moschata* but also spontaneous species often detected like *Capsella bursa-pastoris*, *Taraxacum sp* and *Veronica persica* (Appendix 22) [Schmidt et al., 2022]. If the effect of the origin (seed sourcing) of the seeds did not prove significant regarding the expression of the metrics considered in the current study ( $\alpha$  and  $\gamma$  diversity), it might play a decisive role in the ability of species to produce these resources. Studies showed that some imported species induced further difficulties for insects to reach the nectar resources (e.g. *Salvia splendens*) and cultivar variants of otherwise existing wildflowers secreted little to no nectar (e.g. *Lotus corniculatus*) [Corbet et al., 2001].



*Cyanus segetum* (local, *écotype sauvage*)



*Cyanus segetum* (cultivar)

Illustration 12 : Comparaison visuelle entre les fleurs d'un *écotype sauvage* et un *cultivar* de *Cyanus segetum* – Credits : Anaël Mayeur

Road builders often have to cope with multiple constraints and objectives that affect the choices made relative to the revegetation modalities which are often set by the project managers and contractors when the project is established (Chapitre 1): mitigating the erosion processes to ensure structural integrity of infrastructures, promoting biodiversity or avoiding biological invasions. Roadways are recognised to be corridors for the dispersal of invasive plants [Gardner, 2016; Gelbard and Belnap, 2003; Von Der Lippe and Kowarik, 2007], and studies have linked the plant community structure and richness of functional traits with the biotic resistance to invasions [Byun et al., 2013; Drenovsky and James, 2010; Dukes, 2001; Von Holle and Simberloff, 2004; Young et al., 2009]. Despite a lack of consensus among scientists, designing plants communities with a wide variety of functional traits might help improving

resistance to invasions. What is for certain is that using traceable local seeds usually permits avoiding the introduction of invasive alien species. The final decision of trying to further improve the contribution of the newly introduced vegetation to the local biodiversity or be satisfied with answering the routine objectives of controlling erosion and invasive species dispersal, like it is often the case [Akbar et al., 2003], is ultimately often dictated by the cost of purchasing seeds, their availability, and the ecological or technical expectations surrounding each project. If enhancing biodiversity or aesthetics using species-rich seed mixtures is part of practitioners' goals and budgets are dimensioned accordingly, given that our study found no disadvantage of local over non-local mixtures, we support the recommendation to apply the precautionary principle by using wild, locally sourced seeds instead of cultivars to minimize the risk of ecological disruptions [Mouret et al., 2022; USDA Natural Resources Conservation Service, 2014].

#### **4.1.5 Conclusions**

We have shown that revegetation operations can improve the floristic diversity of road embankments in the short term, and even more so if using species-rich seed mixtures, confirming the assumptions and results of other similar studies [Schmidt et al., 2020; Soper, 2019]. As other research show an increased similarity of species composition [Mehlhoop et al., 2022] and a decrease in the presence of sown species [Enríquez-de-Salamanca, 2022] over time along roadsides, further monitoring is necessary to evaluate whether the experimental revegetation operations conducted in this study have an impact on plant communities in the longer term. If practitioners incorporate biodiversity considerations into the routine objectives of erosion control and invasive species management, and given adequate seed availability, the use of regional and species-rich seed mixtures could help prevent environmental disruptions and promote the restoration of ecosystem services.



**Appendices of Chapter 4 – 4.1**

Appendix 12 : Total number of forbs species inventoried on experimental plots for each site

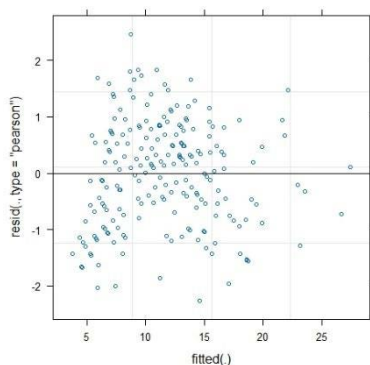
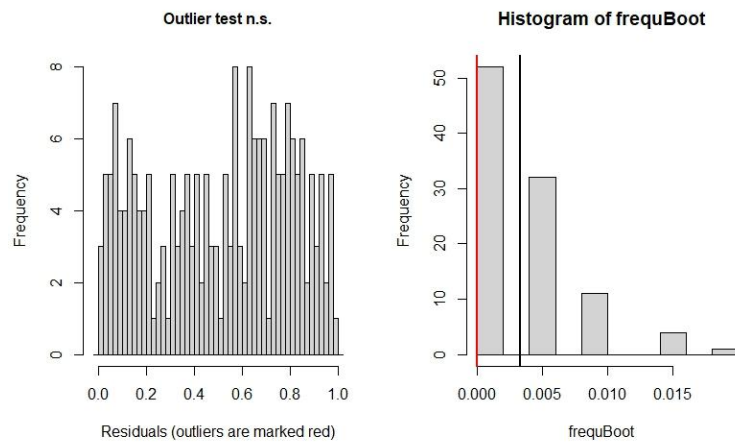
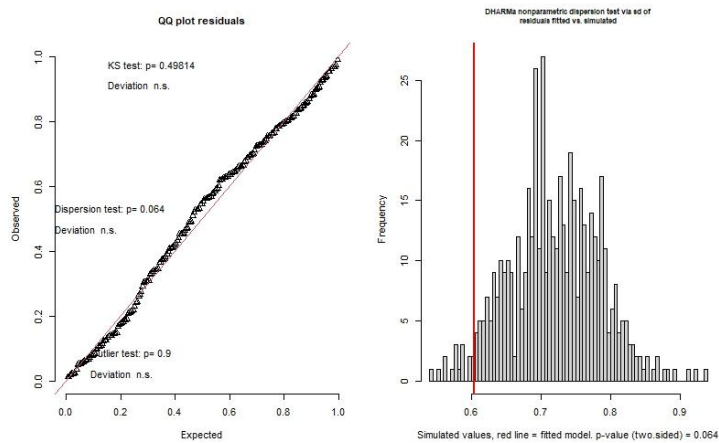
<b>Location</b>	<b>Exposure</b>	<b>Richness</b>
PK3S	E	36
PK3S	W	43
PK3N	E	37
PK3N	W	41
PK9	E	48
PK9	W	66
PK18	E	41
PK18	W	54
PK19	E	44
PK19	W	32

Appendix 13: outputs for the richness model: all forb species per plot.

Asymptotic one-sample Kolmogorov-Smirnov test (uniformity):  $D = 0.05719$ ,  $p\text{-value} = 0.4981$  (ns)

DHARMA nonparametric dispersion test via sd of residuals fitted vs. simulated:  
 dispersion = 0.83815,  $p\text{-value} = 0.064$  (.)

DHARMA bootstrapped outlier test: outliers at both margin(s) = 0, observations = 210,  $p\text{-value} = 1$   
 percent confidence interval: 0.00000000 0.01428571  
 sample estimates: outlier frequency (expected: 0.003333333333333333 )



Appendix 14: outputs for the Shannon index model: all forb species per plot.

Asymptotic one-sample Kolmogorov-Smirnov test

D = 0.050476, p-value = 0.6584

DHARMA nonparametric dispersion test via sd of residuals fitted vs. simulated

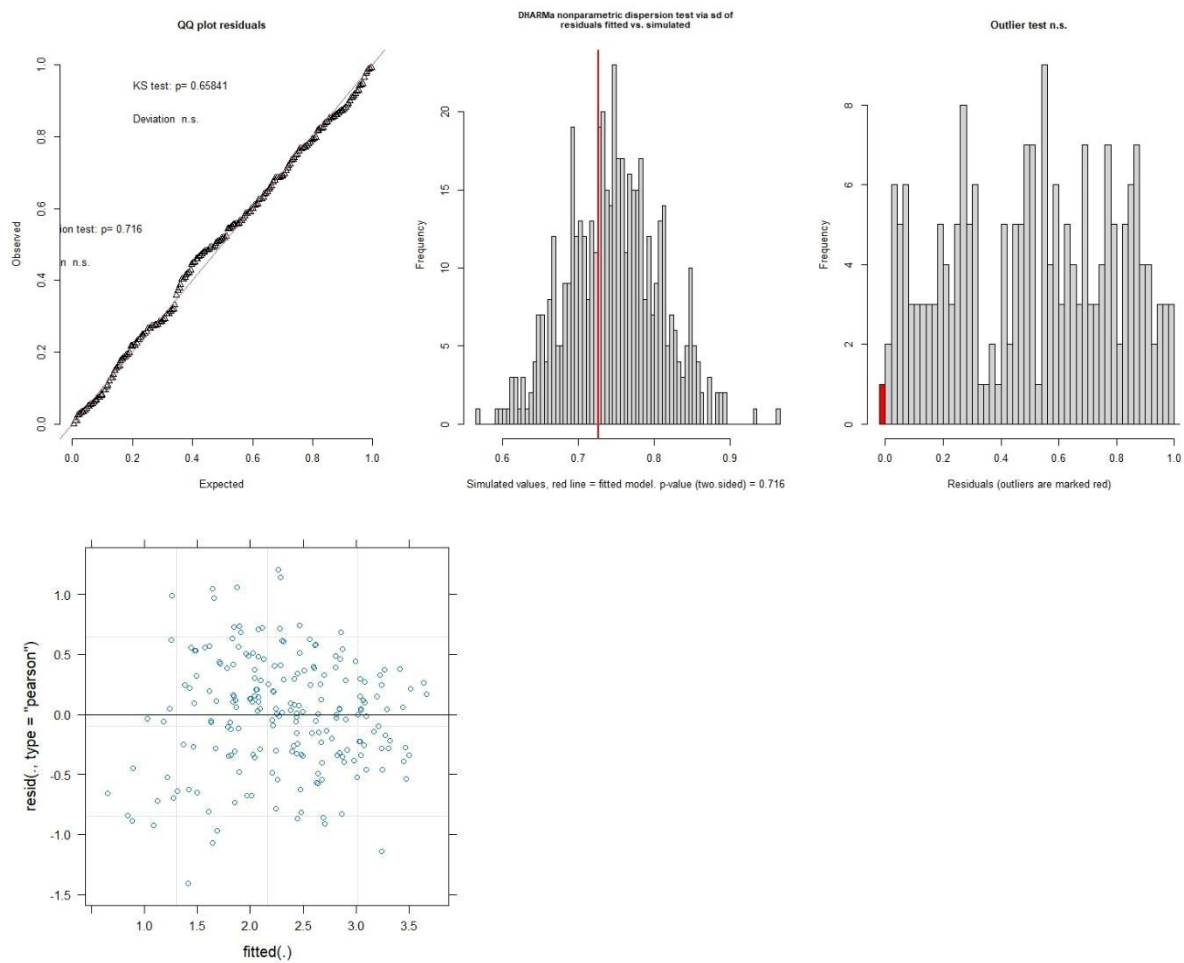
dispersion = 0.97358, p-value = 0.716

DHARMA outlier test based on exact binomial test with approximate expectations

outliers at both margin(s) = 1, observations = 210, p-value = 0.5683

alternative hypothesis: true probability of success is not equal to 0.003992016

frequency of outliers (expected: 0.00399201596806387 )  $\square$  0.004761905



Appendix 15: outputs for the Pielou index model: all forb species per plot.

Asymptotic one-sample Kolmogorov-Smirnov test

D = 0.060913, p-value = 0.4292

DHARMA nonparametric dispersion test via sd of residuals fitted vs. simulated

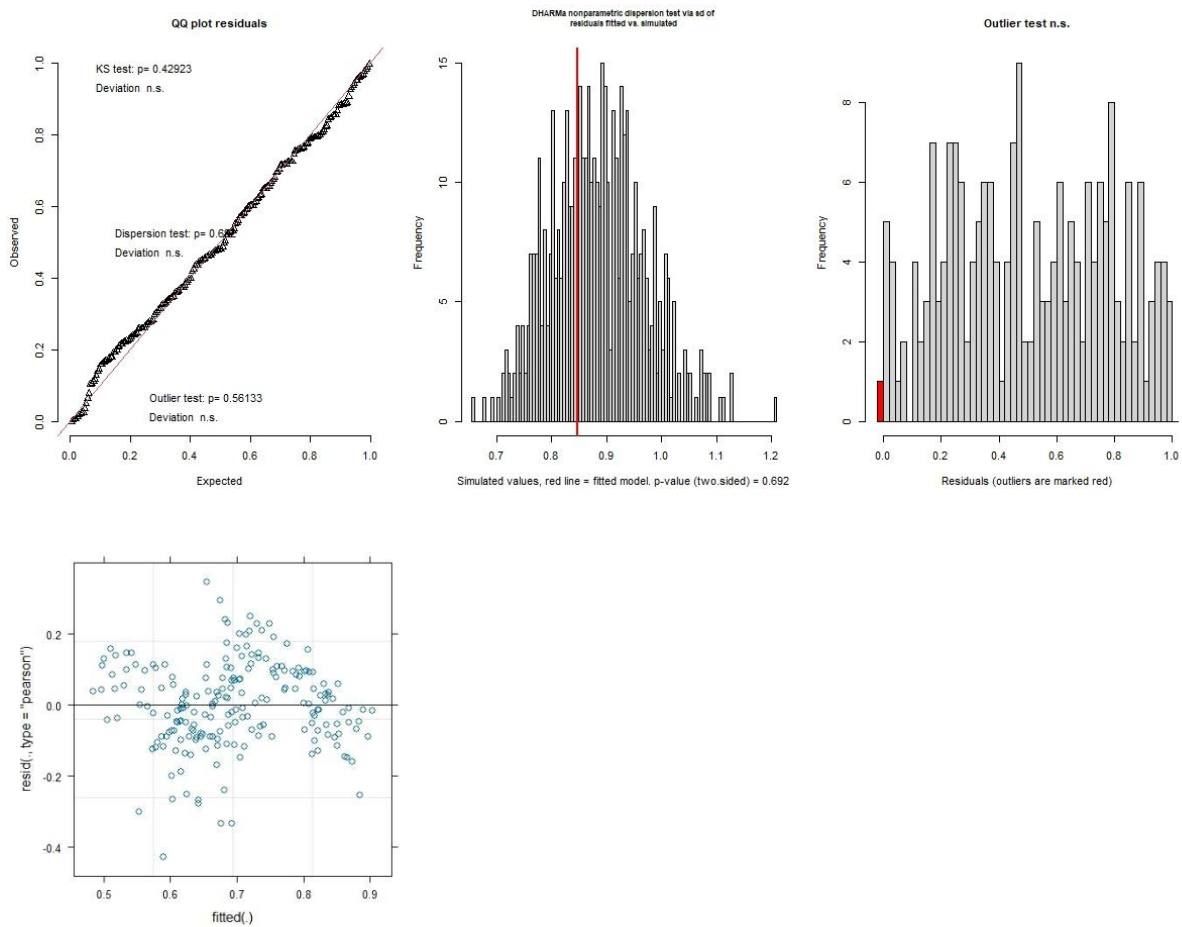
dispersion = 0.95998, p-value = 0.692

DHARMA outlier test based on exact binomial test with approximate expectations

outliers at both margin(s) = 1, observations = 206, p-value = 0.5613

alternative hypothesis: true probability of success is not equal to 0.003992016

frequency of outliers (expected: 0.00399201596806387 )  $\square$  0.004854369



Appendix 16: a) Anova table for the total richness per plot (all forbs' species). Table of contrasts among b) compositions, c) mixtures (composition x origin), d) locations and e) sites (location x exposures) for all forbs species. Values are the difference in forbs species richness values between intersecting columns and lines. The level of significance of pairwise Tukey's tests are marked: ns (non-significant), \* ( $p \leq 0.05$ ), \*\* ( $p \leq 0.01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0.001$ ).

**a) Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests) :**

Response: Richness

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)	signif
MO (Composition*Origin)	40.826	6	3.133e-07	***
SF (Location * exposure)	118.679	9	< 2.2e-16	***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

**b)**

Contrast	B	C	S
B			
C	0.2191 ***		
S	0.1794 ***	-0.0398 ns	
Control	0.4066 ***	0.1875 **	0.2272 **

**c)**

Contrast	BL	BNL	CL	CNL	SL	SNL
BL						
BNL	0.0267 ns					
CL	0.237 **	0.2103 **				
CNL	0.228 **	0.2012 **	-0.0091 ns			
SL	0.216 **	0.1892 *	-0.0211 ns	-0.012 ns		
SNL	0.1695 *	0.1427 *	-0.0676 ns	-0.0585 ns	-0.0465 ns	
TNA	0.42 ***	0.3932 ***	0.1829 *	0.192 *	0.204 *	0.2505 **

**d)**

Contrast	PK3S	PK3N	PK9	PK18
PK3S				
PK3N	-0.0677 ns			
PK9	-0.4323 ***	-0.3646 ***		
PK18	-0.2163 **	-0.1486 *	0.2160 ***	
PK19	0.0357 ns	0.1035 ns	0.4681 ***	0.2521 ***

**e)**

Contrast	PK3SE	PK3SW	PK3NE	PK3NW	PK9E	PK9W	PK18E	PK18W	PK19E
PK3SE									
PK3SW	-0.1867 ns								
PK3NE	-0.1096 ns	0.0771 ns							
PK3NW	-0.2126 *	-0.0259 ns	-0.103 ns						
PK9E	-0.3661 ***	-0.1794 *	-0.2565 **	-0.1535 ns					
PK9W	-0.6852 ***	-0.4985 ***	-0.5757 ***	-0.4727 ***	-0.3191 ***				
PK18E	-0.2942 **	-0.1075 ns	-0.1847 *	-0.0817 ns	0.0719 ns	0.391 ***			
PK18W	-0.3251 ***	-0.1384 ns	-0.2156 *	-0.1126 ns	0.041 ns	0.3601 ***	-0.0309 ns		
PK19E	-0.2624 **	-0.0757 ns	-0.1528 ns	-0.0498 ns	0.1037 ns	0.4229 ***	0.0319 ns	0.0628 ns	
PK19W	0.1472 ns	0.3339 **	0.2567 *	0.3597 ***	0.5133 ***	0.8324 ***	0.4414 ***	0.4723 ***	0.4095 ***

Appendix 17: a) Anova table for the Shannon index values per plot (all forbs' species). Table of contrasts among b) compositions, c) mixtures (composition x origin), d) locations and e) sites (location x exposures) for all forbs species. Values are the difference in Shannon index values between intersecting columns and lines. The level of significance of pairwise Tukey's tests are marked: ns (non-significant), \* ( $p \leq 0.05$ ), \*\* ( $p \leq 0.01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0.001$ ).

**a) Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests) :**

Response: Shannon

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)	signif
MO (Composition*Origin)	35.241	6	3.869e-06	***
SF (Location * exposure)	109.667	9	< 2.2e-16	***

b)

Contrast	B	C	S
B			
C	0.3529 ***		
S	0.2249 *	-0.128 ns	
Control	0.561 ***	0.2081 ns	0.3361 **

c)

Contrast	BL	BNL	CL	CNL	SL	SNL
BL						
BNL	-0.1911 ns					
CL	0.2783 *	0.4694 ***				
CNL	0.2364 ns	0.4275 ***	-0.0419 ns			
SL	0.225 ns	0.4161 **	-0.0533 ns	-0.0114 ns		
SNL	0.0338 ns	0.2249 ns	-0.2445 ns	-0.2026 ns	-0.1912 ns	
Control	0.4654 ***	0.6565 ***	0.1871 ns	0.229 ns	0.2405 ns	0.4316 ***

d)

Contrast	PK3S	PK3N	PK9	PK18
PK3S				
PK3N	-0.2035 ns			
PK9	-0.5888 ***	-0.3853 ***		
PK18	-0.424 ***	-0.2205 *	0.1648 ns	
PK19	0.2612 *	0.4647 ***	0.85 ***	0.6852 ***

e)

Contrast	PK3SE	PK3SW	PK3NE	PK3NW	PK9E	PK9W	PK18E	PK18W	PK19E
PK3SE									
PK3SW	-0.3531 *								
PK3NE	-0.1479 ns	0.2052 ns							
PK3NW	-0.6121 ***	-0.259 ns	-0.4642 **						
PK9E	-0.7791 ***	-0.426 **	-0.6312 ***	-0.167 ns					
PK9W	-0.7516 ***	-0.3985 **	-0.6036 ***	-0.1395 ns	0.0275 ns				
PK18E	-0.6255 ***	-0.2723 ns	-0.4775 **	-0.0133 ns	0.1536 ns	0.1261 ns			
PK18W	-0.5756 ***	-0.2224 ns	-0.4276 **	0.0366 ns	0.2035 ns	0.176 ns	0.0499 ns		
PK19E	-0.2086 ns	0.1446 ns	-0.0606 ns	0.4036 **	0.5705 ***	0.543 ***	0.4169 **	0.367 *	
PK19W	0.3779 *	0.731 ***	0.5258 ***	0.99 ***	1.157 ***	1.1295 ***	1.0033 ***	0.9534 ***	0.5865 ***

Appendix 18: a) Anova table for the Pielou index values per plot (all forbs' species). Table of contrasts among b) compositions, c) mixtures (composition x origin), d) locations and e) sites (location x exposures) for all forbs species. Values are the difference in Pielou index values between intersecting columns and lines. The level of significance of pairwise Tukey's tests are marked: ns (non-significant), \* ( $p \leq 0.05$ ), \*\* ( $p \leq 0.01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0.001$ ).

**a)**

Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests) :

Response: Pielou index

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)	signif
MO (Composition*Origin)	3.1895	6	0.7847	
SF (Location * exposure)	37.4191	9	2.215e-05	***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

**b)**

Contrast	B	C	S
<b>B</b>			
<b>C</b>	0.0013 ns		
<b>S</b>	-0.0035 ns	-0.0048 ns	
<b>Control</b>	0.0125 ns	0.0113 ns	0.016 ns

**c)**

Contrast	BL	BNL	CL	CNL	SL	SNL
<b>BL</b>						
<b>BNL</b>	-0.05 ns					
<b>CL</b>	-0.0151 ns	0.0349 ns				
<b>CNL</b>	-0.0323 ns	0.0176 ns	-0.0173 ns			
<b>SL</b>	-0.0207 ns	0.0293 ns	-0.0056 ns	0.0116 ns		
<b>SNL</b>	-0.0363 ns	0.0137 ns	-0.0212 ns	-0.0039 ns	-0.0156 ns	
<b>Control</b>	-0.0125 ns	0.0375 ns	0.0026 ns	0.0199 ns	0.0082 ns	0.0238 ns

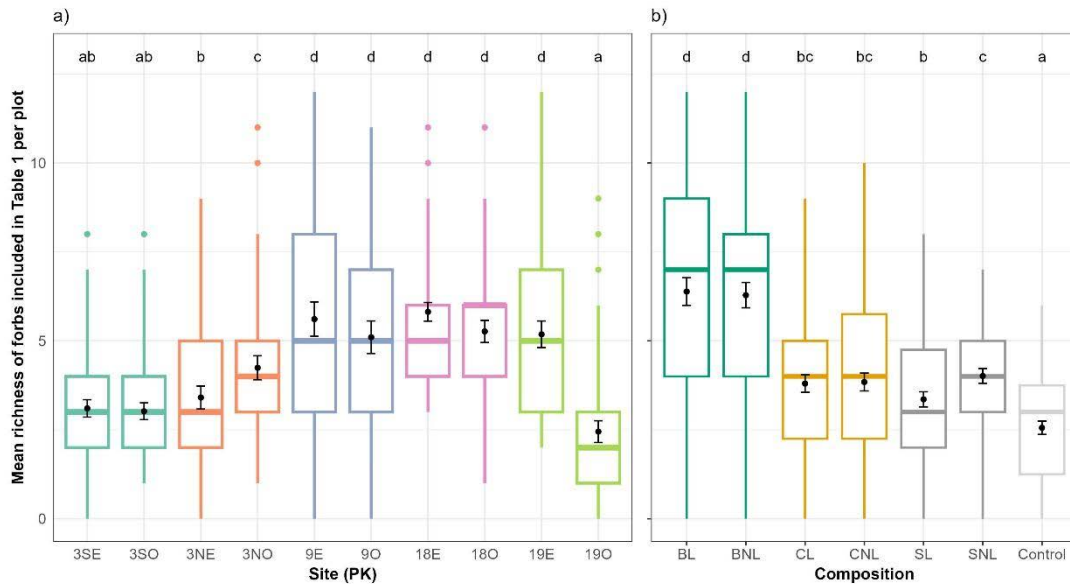
**d)**

Contrast	PK3S	PK3N	PK9	PK18
<b>PK3S</b>				
<b>PK3N</b>	-0.0372 ns			
<b>PK9</b>	-0.0096 ns	0.0276 ns		
<b>PK18</b>	-0.0113 ns	0.0259 ns	-0.0017 ns	
<b>PK19</b>	0.0974 ***	0.1346 ***	0.107 ***	0.1087 ***

**e)**

Contrast	PK3SE	PK3SW	PK3NE	PK3NW	PK9E	PK9W	PK18E	PK18W	PK19E
<b>PK3SE</b>									
<b>PK3SW</b>	-0.029 ns								
<b>PK3NE</b>	-0.0284 ns	6e-04 ns							
<b>PK3NW</b>	-0.0749 ns	-0.046 ns	-0.0466 ns						
<b>PK9E</b>	-0.0807 *	-0.0517 ns	-0.0523 ns	-0.0058 ns					
<b>PK9W</b>	0.0325 ns	0.0615 ns	0.0609 ns	0.1075 **	0.1132 **				
<b>PK18E</b>	-0.0299 ns	-9e-04 ns	-0.0016 ns	0.045 ns	0.0508 ns	-0.0625 ns			
<b>PK18W</b>	-0.0216 ns	0.0073 ns	0.0067 ns	0.0533 ns	0.059 ns	-0.0542 ns	0.0083 ns		
<b>PK19E</b>	0.0764 ns	0.1054 **	0.1047 **	0.1513 ***	0.1571 ***	0.0438 ns	0.1063 **	0.098 *	
<b>PK19W</b>	0.0894 *	0.1184 **	0.1178 **	0.1644 ***	0.1701 ***	0.0569 ns	0.1194 **	0.1111 **	0.0131 ns

Appendix 19: Boxplot of mean species richness of forbs included in Table 2 per plot on each a) site and for each b) composition of seeded mixture. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Within each plot, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test,  $p < 0.05$ ). c) Anova table for the richness of species included in Table 2. Table of contrasts among d) compositions, e) mixtures (composition x origin) and c) sites (location x exposures) for the species included in Table 2. Values are the difference in mean richness between intersecting columns and lines. The level of significance of pairwise Tukey's tests are marked: ns (non-significant), \* ( $p \leq 0.05$ ), \*\* ( $p \leq 0.01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0.001$ ).



**c) Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests) :**

Response: Richness

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)	signif
MO (Composition*Origin)	199.42	6	< 2.2e-16	***
SF (Location * exposure)	150.36	9	< 2.2e-16	***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

**d)**

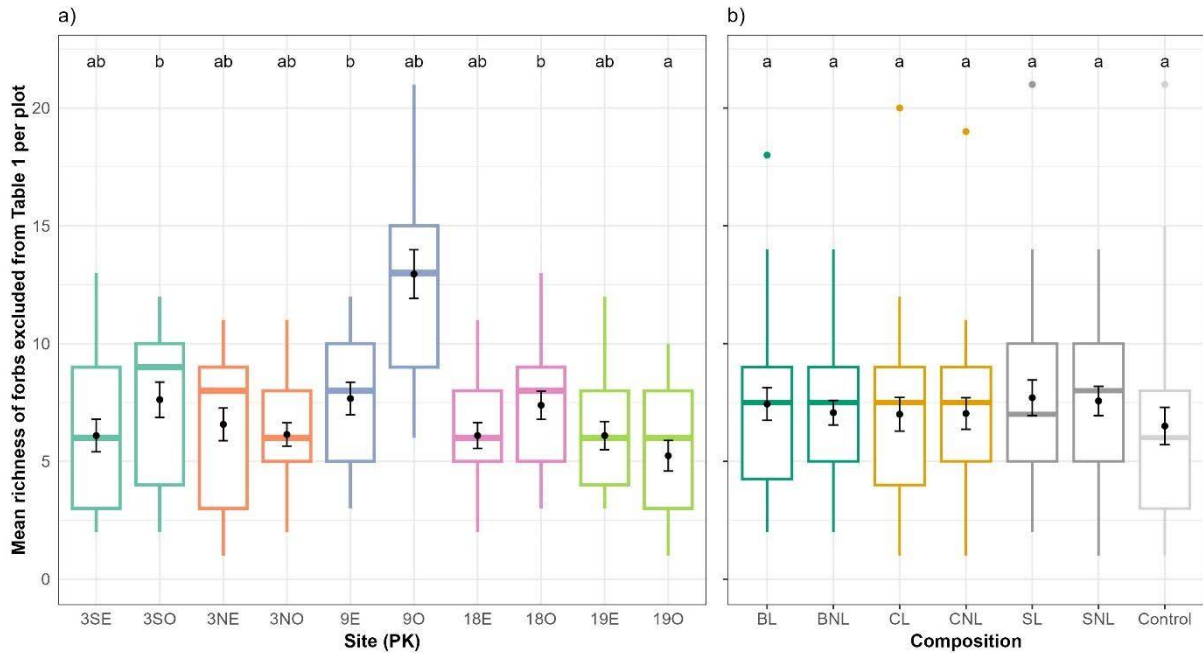
Contrast	BL	BNL	CL	CNL	SL	SNL
BL						
BNL	0.0158 ns					
CL	0.5191 ***	0.5033 ***				
CNL	0.5078 ***	0.4921 ***	-0.0112 ns			
SL	0.643 ***	0.6272 ***	0.1239 ns	0.1351 ns		
SNL	0.4642 ***	0.4484 ***	-0.0549 ns	-0.0436 ns	-0.1788 *	
TNA	0.9152 ***	0.8994 ***	0.3961 ***	0.4073 ***	0.2722 **	0.451 ***

**e)**

Contrast	PK3SE	PK3SW	PK3NE	PK3NW	PK9E	PK9W	PK18E	PK18W	PK19E
PK3SE									
PK3SW	0.0267 ns								
PK3NE	-0.0941 ns	-0.1208 ns							
PK3NW	-0.3137 **	-0.3403 **	-0.2195 *						
PK9E	-0.5929 ***	-0.6196 ***	-0.4988 ***	-0.2792 **					
PK9W	-0.4976 ***	-0.5243 ***	-0.4035 ***	-0.1839 *	0.0953 ns				
PK18E	-0.6286 ***	-0.6553 ***	-0.5345 ***	-0.315 ***	-0.0357 ns	-0.131 ns			
PK18W	-0.5291 ***	-0.5558 ***	-0.435 ***	-0.2154 *	0.0638 ns	-0.0315 ns	0.0995 ns		
PK19E	-0.5135 ***	-0.5401 ***	-0.4193 ***	-0.1998 *	0.0794 ns	-0.0159 ns	0.1152 ns	0.0156 ns	
PK19W	0.2364 ns	0.2097 ns	0.3305 **	0.55 ***	0.8293 ***	0.734 ***	0.865 ***	0.7655 ***	0.7498 ***



Appendix 20: Boxplot of mean species richness of forbs excluded from Table 2 per plot on each a) site and for each b) composition of seeded mixture. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Within each plot, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test,  $p < 0.05$ ). c) Anova table for the richness of species excluded from Table 2. Table of contrasts among d) mixtures (composition x origin) and e) sites (location x exposures) for the species excluded from Table 2. Values are the difference in mean richness between intersecting columns and lines. The level of significance of pairwise Tukey's tests are marked: ns (non-significant), \* ( $p \leq 0.05$ ), \*\* ( $p \leq 0.01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0.001$ ).



**c) Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests):**

Response: Richness

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)	signif
MO (Composition*Origin)	4.2281	6	0.6458	ns
SF (Location * exposure)	119.631	9	< 2.2e-16	***

**d)**

Contrast	BL	BNL	CL	CNL	SL	SNL
BL						
BNL	0.0506 ns					
CL	0.06 ns	0.0095 ns				
CNL	0.0553 ns	0.0047 ns	-0.0047 ns			
SL	-0.0353 ns	-0.0858 ns	-0.0953 ns	-0.0906 ns		
SNL	-0.0178 ns	-0.0684 ns	-0.0778 ns	-0.0731 ns	0.0175 ns	
TNA	0.1342 ns	0.0836 ns	0.0741 ns	0.0789 ns	0.1694 ns	0.152 ns

**e)**

Contast	PK3SE	PK3SW	PK3NE	PK3NW	PK9E	PK9W	PK18E	PK18W	PK19E
PK3SE									
PK3SW	-0.2231 ns								
PK3NE	-0.0752 ns	0.1479 ns							
PK3NW	-0.0078 ns	0.2154 ns	0.0674 ns						
PK9E	-0.2294 ns	-0.0062 ns	-0.1542 ns	-0.2216 ns					
PK9W	-0.7538 ***	-0.5306 ***	-0.6786 ***	-0.746 ***	-0.5244 ***				
PK18E	0 ns	0.2231 ns	0.0752 ns	0.0078 ns	0.2294 ns	0.7538 ***			
PK18W	-0.1914 ns	0.0318 ns	-0.1162 ns	-0.1836 ns	0.038 ns	0.5624 ***	-0.1914 ns		
PK19E	0 ns	0.2231 ns	0.0752 ns	0.0078 ns	0.2294 ns	0.7538 ***	0 ns	0.1914 ns	
PK19W	0.1516 ns	0.3747 **	0.2268 ns	0.1593 ns	0.3809 **	0.9053 ***	0.1515 ns	0.3429 **	0.1516 ns

Appendix 21: List of species seeded at least once among the experimental plots, their frequency of observation (/time interval /composition /repetition) and their most probable source (Twice = Experiment + Practitioners).

Seeded as part of the experiment	Most probable source	Species	B	C	S	Control
Yes	Experiment	<i>Leucanthemum sp</i>	72,14%	59,29%	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Leucanthemum sp</i>	NA	NA	52,14%	51,43%
Yes	Experiment	<i>Achillea millefolium</i>	57,14%	52,86%	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Achillea millefolium</i>	NA	NA	40,71%	35,71%
Yes	Experiment	<i>Medicago sativa ssp</i>	30,00%	30,00%	27,14%	NA
Yes	Practitioners	<i>Medicago sativa ssp</i>	NA	NA	NA	54,29%
Yes	Seeded twice	<i>Medicago sativa ssp</i>	55,00%	52,14%	55,00%	NA
Yes	Spontaneous	<i>Medicago sativa ssp</i>	NA	NA	NA	21,43%
Yes	Experiment	<i>Daucus carota</i>	53,57%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Daucus carota</i>	NA	11,43%	10,00%	5,71%
Yes	Experiment	<i>Poterium sanguisorba</i>	46,43%	NA	50,00%	NA
Yes	Spontaneous	<i>Poterium sanguisorba</i>	NA	2,14%	NA	1,43%
Yes	Experiment	<i>Papaver rhoeas</i>	48,57%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Papaver rhoeas</i>	NA	37,14%	23,57%	22,86%
Yes	Experiment	<i>Anthemis tinctoria</i>	44,29%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Anthemis tinctoria</i>	0,00%	0,71%	0,00%	2,86%
Yes	Experiment	<i>Onobrychis viciifolia</i>	35,00%	32,86%	28,57%	NA
Yes	Practitioners	<i>Onobrychis viciifolia</i>	NA	NA	NA	24,29%
Yes	Seeded twice	<i>Onobrychis viciifolia</i>	31,43%	30,71%	37,86%	NA
Yes	Spontaneous	<i>Onobrychis viciifolia</i>	NA	NA	NA	15,71%
Yes	Experiment	<i>Cyanus segetum</i>	33,57%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Cyanus segetum</i>	0,00%	6,43%	0,00%	0,00%
Yes	Experiment	<i>Anthyllis vulneraria</i>	19,29%	32,14%	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Anthyllis vulneraria</i>	0,00%	0,00%	5,71%	4,29%
Yes	Experiment	<i>Lotus corniculatus</i>	NA	NA	29,29%	NA
Yes	Spontaneous	<i>Lotus corniculatus</i>	1,43%	2,14%	0,00%	1,43%
Yes	Experiment	<i>Silene vulgaris</i>	23,57%	13,57%	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Silene vulgaris</i>	NA	0,00%	4,29%	5,71%
Yes	Experiment	<i>Echium vulgare</i>	17,14%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Echium vulgare</i>	0,00%	0,71%	0,71%	0,00%
Yes	Experiment	<i>Stachys sp</i>	12,86%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Stachys sp</i>	0,00%	2,86%	0,71%	0,00%
Yes	Experiment	<i>Centaurea jacea</i>	11,43%	10,00%	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Centaurea jacea</i>	0,00%	0,00%	0,00%	2,86%
Yes	Experiment	<i>Malva moschata</i>	10,71%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Malva moschata</i>	0,00%	0,71%	1,43%	1,43%
Yes	Experiment	<i>Knautia arvensis</i>	10,00%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Knautia arvensis</i>	0,00%	1,43%	0,00%	1,43%
Yes	Experiment	<i>Crepis sp</i>	7,86%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Crepis sp</i>	0,00%	2,14%	1,43%	2,86%
Yes	Experiment	<i>Dianthus sp</i>	5,71%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Dianthus sp</i>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Yes	Experiment	<i>Scabiosa sp</i>	5,00%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Scabiosa sp</i>	0,00%	0,71%	0,00%	0,00%
Yes	Experiment	<i>Reseda sp</i>	0,71%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Reseda sp</i>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Yes	Experiment	<i>Salvia pratensis</i>	0,71%	NA	NA	NA
Yes	Spontaneous	<i>Salvia pratensis</i>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
No	Practitioners	<i>Trifolium repens</i>	25,00%	25,00%	25,00%	30,00%
No	Spontaneous	<i>Trifolium repens</i>	15,00%	13,33%	18,33%	16,67%

Appendix 22 : List of species observed at least once in the experimental plots and their frequency of observation (/time interval /mixture /repetition).

Seeded as part of the experiment	Species	B	C	S	Control
Yes	<i>Medicago sativa ssp</i>	85,00%	82,14%	82,14%	75,71%
Yes	<i>Leucanthemum sp</i>	72,14%	59,29%	52,14%	51,43%
Yes	<i>Onobrychis viciifolia</i>	66,43%	63,57%	66,43%	40,00%
Yes	<i>Achillea millefolium</i>	57,14%	52,86%	40,71%	35,71%
Yes	<i>Daucus carota</i>	53,57%	11,43%	10,00%	5,71%
Yes	<i>Poterium sanguisorba</i>	46,43%	2,14%	50,00%	1,43%
Yes	<i>Papaver rhoëas</i>	48,57%	37,14%	23,57%	22,86%
Yes	<i>Anthemis tinctoria</i>	44,29%	0,71%	0,00%	2,86%
Yes	<i>Cyanus segetum</i>	33,57%	6,43%	0,00%	0,00%
Yes	<i>Anthyllis vulneraria</i>	19,29%	32,14%	5,71%	4,29%
Yes	<i>Lotus corniculatus</i>	1,43%	2,14%	29,29%	1,43%
Yes	<i>Silene vulgaris</i>	23,57%	13,57%	4,29%	5,71%
Yes	<i>Echium vulgare</i>	17,14%	0,71%	0,71%	0,00%
Yes	<i>Stachys sp</i>	12,86%	2,86%	0,71%	0,00%
Yes	<i>Centaurea jacea</i>	11,43%	10,00%	0,00%	2,86%
Yes	<i>Malva moschata</i>	10,71%	0,71%	1,43%	1,43%
Yes	<i>Knautia arvensis</i>	10,00%	1,43%	0,00%	1,43%
Yes	<i>Crepis sp</i>	7,86%	2,14%	1,43%	2,86%
Yes	<i>Dianthus sp</i>	5,71%	0,00%	0,00%	0,00%
Yes	<i>Scabiosa sp</i>	5,00%	0,71%	0,00%	0,00%
Yes	<i>Reseda sp</i>	0,71%	0,00%	0,00%	0,00%
Yes	<i>Salvia pratensis</i>	0,71%	0,00%	0,00%	0,00%
No	<i>Veronica persica</i>	56,67%	55,00%	60,00%	56,67%
No	<i>Lactuca seriola</i>	45,00%	51,67%	40,00%	36,67%
No	<i>Stellaria media</i>	46,67%	43,33%	46,67%	30,00%
No	<i>Trifolium repens</i>	40,00%	38,33%	43,33%	46,67%
No	<i>Cirsium vulgare</i>	31,67%	38,33%	31,67%	20,00%
No	<i>Galium aparine</i>	35,00%	26,67%	36,67%	26,67%
No	<i>Plantago lanceolata</i>	33,33%	28,33%	36,67%	26,67%
No	<i>Matricaria chamomilla</i>	33,33%	35,00%	30,00%	30,00%
No	<i>Cirsium arvense</i>	31,67%	28,33%	33,33%	30,00%
No	<i>Taraxacum officinale</i>	23,33%	13,33%	30,00%	13,33%
No	<i>Coronilla varia</i>	26,67%	16,67%	23,33%	26,67%
No	<i>Rumex obtusifolius</i>	26,67%	26,67%	18,33%	13,33%
No	<i>Plantago major</i>	16,67%	13,33%	23,33%	10,00%
No	<i>Sonchus arvensis</i>	23,33%	20,00%	18,33%	23,33%
No	<i>Senecio vulgaris</i>	15,00%	21,67%	15,00%	20,00%
No	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	10,00%	20,00%	20,00%	10,00%
No	<i>Erigeron annuus</i>	13,33%	20,00%	16,67%	13,33%
No	<i>Ranunculus acris</i>	18,33%	13,33%	11,67%	20,00%
No	<i>Vicia sativa</i>	18,33%	16,67%	16,67%	13,33%
No	<i>Convolvulus arvensis</i>	11,67%	10,00%	13,33%	10,00%
No	<i>Geranium dissectum</i>	8,33%	8,33%	13,33%	10,00%
No	<i>Geranium molle</i>	5,00%	8,33%	13,33%	3,33%
No	<i>Potentilla reptans</i>	8,33%	8,33%	0,00%	13,33%
No	<i>Crepis sp</i>	8,33%	8,33%	11,67%	6,67%
No	<i>Mercurialis annua</i>	11,67%	8,33%	6,67%	6,67%
No	<i>Lamium purpureum</i>	6,67%	5,00%	10,00%	3,33%
No	<i>Ranunculus repens</i>	6,67%	6,67%	5,00%	10,00%
No	<i>Senecio inaequidens</i>	3,33%	1,67%	8,33%	10,00%
No	<i>Arctium lappa</i>	3,33%	6,67%	8,33%	3,33%
No	<i>Lathyrus arvensis</i>	3,33%	5,00%	8,33%	3,33%
No	<i>Silene latifolia</i>	8,33%	5,00%	6,67%	6,67%
No	<i>Sisymbrium officinale</i>	1,67%	3,33%	8,33%	0,00%

PARTIE 2 – CHAPITRE 4.1 : Végétalisation et biodiversité – *in situ*

No	<i>Ajuga reptans</i>	6,67%	1,67%	5,00%	3,33%
No	<i>Anthriscus cerefolium</i>	6,67%	6,67%	6,67%	0,00%
No	<i>Cerastium fontanum</i>	1,67%	0,00%	3,33%	6,67%
No	<i>Cerastium glomerata</i>	6,67%	5,00%	5,00%	3,33%
No	<i>Erigeron canadensis</i>	3,33%	3,33%	3,33%	6,67%
No	<i>Geranium pusillum</i>	5,00%	3,33%	3,33%	6,67%
No	<i>Glechoma hederacea</i>	5,00%	1,67%	5,00%	6,67%
No	<i>Hypochaeris glabra</i>	6,67%	3,33%	5,00%	3,33%
No	<i>Silene noctifolia</i>	3,33%	5,00%	1,67%	6,67%
No	<i>Symphytum officinale</i>	5,00%	6,67%	6,67%	3,33%
No	<i>Trifolium dubium</i>	1,67%	0,00%	1,67%	6,67%
No	<i>Ficaria verna</i>	5,00%	3,33%	3,33%	3,33%
No	<i>Lactuca virosa</i>	3,33%	3,33%	5,00%	3,33%
No	<i>Plantago ovata</i>	1,67%	5,00%	1,67%	0,00%
No	<i>Rubus fruticosus</i>	5,00%	3,33%	3,33%	0,00%
No	<i>Chenopodium album</i>	1,67%	3,33%	3,33%	0,00%
No	<i>Chenopodium vulvaria</i>	1,67%	3,33%	1,67%	3,33%
No	<i>Epilobium angustifolium</i>	0,00%	0,00%	0,00%	3,33%
No	<i>Equisetum arvense</i>	0,00%	0,00%	0,00%	3,33%
No	<i>Equisetum pratense</i>	0,00%	0,00%	3,33%	0,00%
No	<i>Helminthotheca echioides</i>	0,00%	1,67%	3,33%	3,33%
No	<i>Hydrocotyle sibthorpioides</i>	1,67%	0,00%	1,67%	3,33%
No	<i>Hypericum perforatum</i>	1,67%	3,33%	1,67%	0,00%
No	<i>Papaver agremonium</i>	0,00%	0,00%	0,00%	3,33%
No	<i>Rumex crispus</i>	0,00%	1,67%	0,00%	3,33%
No	<i>Salvia argentea</i>	0,00%	0,00%	3,33%	0,00%
No	<i>Sison anomum</i>	1,67%	1,67%	1,67%	3,33%
No	<i>Sonchus oleraceus</i>	1,67%	1,67%	1,67%	3,33%
No	<i>Tanacetum vulgare</i>	0,00%	0,00%	0,00%	3,33%
No	<i>Vicia lathyroides</i>	3,33%	3,33%	3,33%	3,33%
No	<i>Anchusa officinalis</i>	0,00%	0,00%	1,67%	0,00%
No	<i>Anthemis cotula</i>	0,00%	0,00%	1,67%	0,00%
No	<i>Linaria repens</i>	0,00%	1,67%	0,00%	0,00%
No	<i>Lythrum virgatum</i>	0,00%	1,67%	0,00%	0,00%
No	<i>Melilotus officinalis</i>	1,67%	0,00%	0,00%	0,00%
No	<i>Mentha pratensis</i>	0,00%	1,67%	0,00%	0,00%
No	<i>Myosotis arvensis</i>	0,00%	1,67%	0,00%	0,00%
No	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	1,67%	1,67%	0,00%	0,00%
No	<i>Plantago media</i>	1,67%	0,00%	1,67%	0,00%
No	<i>Pulicaria odorata</i>	0,00%	0,00%	1,67%	0,00%
No	<i>Raphanus raphanistrum</i>	1,67%	0,00%	0,00%	0,00%
No	<i>Silene armeria</i>	0,00%	1,67%	0,00%	0,00%
No	<i>Sinapis arvensis</i>	1,67%	0,00%	0,00%	0,00%
No	<i>Solidago canadensis</i>	0,00%	1,67%	0,00%	0,00%
No	<i>Sonchus asper</i>	0,00%	0,00%	1,67%	0,00%
No	<i>Stachys germanica</i>	1,67%	0,00%	0,00%	0,00%
No	<i>Succisa pratensis</i>	1,67%	1,67%	1,67%	0,00%
No	<i>Urospermum dalechampii</i>	0,00%	1,67%	0,00%	0,00%
No	<i>Valerianella locusta</i>	1,67%	1,67%	1,67%	0,00%
No	<i>Verbascum sinuatum</i>	0,00%	0,00%	1,67%	0,00%
No	<i>Viola arvensis</i>	0,00%	1,67%	0,00%	0,00%





Illustration 13 : *Solidago canadensis* en bordure de parcelles expérimentales – Crédits : Gaëtan Soerensen

## **4.2 RECRUITMENT AND COMPETITIVE ABILITIES OF DIFFERENT REVEGETATION MIXTURES IN THE PRESENCE OF THE INVASIVE ALIEN SPECIES *SOLIDAGO CANADENSIS***

### **4.2.1 Introduction**

Invasive alien species represent a great threat to ecosystems and are one of the main factors of the erosion of biodiversity [IPBES, 2019]. They have direct consequences for natural habitats, but also economic and social impacts, requiring political decisions and actions by those involved in planning and managing areas and infrastructures [McNeely et al., 2001; Mologni et al., 2023; Pejchar and Mooney, 2009; Thomas et al., 2016]. This problematic becomes more pregnant with the consequences of climate change, the changes in land-use and the perturbation of habitats globally [GIEC, 2014]. Alien invasive plants have large-scale effects including the homogenization of floras in phytogeographical entities [Hejda et al., 2009; Kühn and Klotz, 2006], and the impoverishment of corteges at community level [Pyšek and Pyšek, 1995; Richardson et al., 1989].

The present study is part of a larger project aiming at comparing the ability of different revegetation modalities of embankments along motorways to mitigate erosion and enhance species diversity and ecosystem functions. Roadways are highly vulnerable to invasions due to the constant disturbance regimes weighting on the nearby habitats, notably originating from pollutions and management operations [Forman et al., 2003], and represent dispersal corridors for the invasive flora [Gelbard and Belnap, 2003; Von Der Lippe and Kowarik, 2007]. Management operations, often necessary to ensure the safety of users and prevent the development of crop weeds in agricultural landscapes, can contribute to the dispersal of these species [Gardner, 2016].

Road practitioners are used to managing invasive alien species (IAS). They try to eradicate or contain the spread of populations that are already established, either because they are required to do so by law, or to avoid altering well-preserved environments or compromising the results of compensatory measures that they have implemented. Research efforts have focused on understanding the factors affecting the invasibility of plant communities, with the aim of designing IAS-resistant communities that can be considered as part of ecological restoration or revegetation operations [Davis et al., 2000; Dukes, 2001]. The idea is to create an ecological barrier, or filter, to avoid further colonization and dispersal of invasive plants [Funk et al., 2008; Kettenring and Adams, 2011; Richardson et al., 2000].

The invasibility of a habitat depends in particular on the ecosystem's resource availability, disturbance regime, soil properties, and the availability of invasive propagules [Davis et al., 2000], and these characteristics can be modified by human actions. Community ecology theory teaches us that species can coexist in the same habitat when (i) they exploit different portions of that habitat and (ii) they exploit the available resources differently [Whittaker, 1977]. The choice of species in revegetation mixtures may therefore have some influence on the competitive mechanisms at work within communities, and on their resistance to invasion by IAS. In particular, the communities put in place can limit the probability of being invaded through (i) competition for resources (water, nutrients or light), if, by growing earlier or faster,

they make them insufficient for IAS, or (ii) through the emission of allelopathic molecules [Schoener, 1983].

In practice, researchers and practitioners have found that in many cases, species with the same functional traits as a target IAS are more likely to compete with it, hindering its establishment, growth and survival [Byun et al., 2013; Funk et al., 2008; Von Holle and Simberloff, 2004; Young et al., 2009]. However, this criteria alone is often not sufficient, and the establishment success, competitiveness and survivorship of species has to be accounted for [Young et al., 2009]. Recent studies have given a particular interest to important traits describing plants' ecological strategies [Diaz et al., 2004], especially those linked to the tissue economics spectrum, hence the capture and conservation of resources through leaves and roots construction [Drenovsky and James, 2010]. Placing species along this gradient can allow to better identify the potential competitors among native and invasive species.

When revegetating large portions of land crossing a variety of habitats, several, if not many, IAS need to be considered. Under these conditions, focusing on a specific functional type would not guarantee competitiveness against all the range of potential IAS [Funk et al., 2008], and it is rather recommended to use a diversity of native species of different functional types [Byun et al., 2013; Dukes, 2001; Funk et al., 2008]. In the same vein, [Dukes, 2001] showed that IAS affected the growth of species-poor communities more than that of species-rich ones. In an experiment we conducted on highway embankments along the "COS" (*Strasbourg western bypass*) road infrastructure, we showed that when sown mixtures are species-rich, they result in significantly richer local plant communities in the first years of establishment (see 4.1), likely to compete more effectively with a variety of IAS while providing some ecosystem services.

This study takes interest in the two IAS *Solidago canadensis* L. and *S. gigantea* Aiton (Asteraceae), as they have similar biology and impacts in the area of interest. Populations from both species have been detected along the COS route, and both species are invasive in the Grand-Est region, France [Hog et al., 2020], although not listed among the invasive species of greatest concern in the European Union [CDR-EEE, 2022]. Details on the biology of *S. canadensis* and *gigantea* species can be found in [Werner et al., 1980], and the following elements are particularly relevant for this study: They reproduce by clonal production from rhizomes and by large quantities of wind-dispersed achenes, which can be stored in the soil seedbank before germination. They thrive in fairly open habitats and have a preference for moist soils, although they can adapt to a wide range of soil conditions. They produce a wide range of allelopathic molecules interfering with germination and growth processes of coexisting native plants [Smith, 1969; Sun et al., 2017]. When soil is disturbed during construction work, the fragmentation of rhizomes causes clones to disperse, making the management of these species particularly difficult. These species are the subject of various management operations in France to eradicate their populations or limit their dispersal and mitigate their impacts [Watterlot et al., 2015]. *S. canadensis* and *S. gigantea* alter soil nutrient cycle [Scharfy et al., 2009] and impact meso- and micro-fauna [Sterzyńska et al., 2017]. Pollinator diversity is also affected in communities dominated by these species, as the diversity of other plant species tends to decrease [Gusev, 2018; Pal et al., 2015], and the availability of pollen and nectar is restricted to the solidago flowering period [De Groot et al., 2007].

The effect of inter-specific competition and herbivory has been tested on *S. canadensis* in field conditions. Survival and flowering probabilities, plant biomass, height and organ size were significantly lower when competition was higher (i.e. when neighbouring vegetation was denser) and herbivory was lower [Goldberg, 1988]. More recent work has corroborated these results and explored further solutions to stop invasions, using a combination of clear-cutting, top-soil removal to eliminate the seedbank, followed by sowing of native species adapted to local soil and climatic conditions [Dedonder, 2024]. However, this type of treatment can be costly and destructive to the soil and should only be applied in the case of established populations presenting specific conservation issues for the surrounding habitats.

In this study, we assessed the recruitment capacity of *S. canadensis* in the face of different revegetation mixtures, by comparing the germination, survival and growth of *S. canadensis* depending on whether it was sown on bare soil or vegetated with different seed mixtures. On the other hand, we also assessed the species richness, germination and growth of these revegetation mixtures depending whether it was sown on bare soil or in presence of a *S. canadensis* cover. We hypothesize that *S. canadensis* will present lower germination rates when sown on established ground cover. We also assume that, in presence of *S. canadensis*, richer revegetation mixtures will survive better than poorer mixtures due to their greater diversity of functional types and niche occupation preferences.



### 4.2.2 Methods

#### *Seeding material*

We tested a total of six revegetation mixtures, including three species compositions, named Standard (S, 7 species, three families), Competitive (C, 12 species, 4 families) and Biodiversity (B, 28 species, 11 families), each with two origins: Local and Non-Local. The non-local seeds were mostly cultivars, seeded from the conventional industry and originating from diverse countries globally. Local seeds were produced from wild and regionally collected seeds, in the North-East region under the Végétal local brand® (for details, refer to [Mayeur et al., 2024]). Goldenrod seeds were collected in the autumn 2021, in the same region, near Strasbourg, France. The panniculus was cut at the end of fruiting and stored in bags in a humidity-controlled cold room for a year and a half before the beginning of the experiment. This modality ensured good conservation over time and allowed for vernalization, as studies showed that *S. canadensis* (*S.c.*) germinates better, if not exclusively, after exposure to cold temperatures [Bradbury, 1973; Root, 1971]. The six revegetation mixtures, obtained from the Nungesser company [Mayeur et al., 2024], were stored in the same conditions.

#### *Experimental design*

The experiment was conducted in the greenhouses of the Paris-Saclay University, Orsay, France, from the 17<sup>th</sup> of March to the 11<sup>th</sup> of October 2023. The growing area was equipped with an automatic watering system, the frequency of which was manually adjusted according to the temperatures observed and the needs of the plants.

We tested the germination and survival ability of goldenrods on bare soil and in presence diverse types of vegetation. We used 60 pots, 60 cm in diameter and 30 cm high, in which we placed 5 cm of pozzolan, 15 cm of topsoil and 5 cm of mould on the surface. Thirty pots were sown with the vegetation mixes described above (3 species compositions x 2 origins x 5 repetitions) at a dose of 5 g/m<sup>2</sup>, then overseeded with 0.4 g (1.4 g/m<sup>2</sup>) of goldenrod seeds 25 days later. Conversely, the other 30 pots were first sown with goldenrod and then, 25 days later, with the revegetation mixtures, at the same doses as for the first thirty pots. All the seeds were hand-sown, mixed with 50% in weight of wheat bran, to facilitate the spreading and allow for a more homogenous cover. Considering the estimated weight of thousand seeds (WTS) of *S.c.* (between 0.027g and 0.103g) [Gould et al., 2013; Werner et al., 1980], we seeded around 9350 ± 3900 seeds.

#### *Data collection and analysis*

Considering that day 0 corresponds to the first sowing operation, on days 26, 33, 40, 48, 61, 74, 104, 126 and 178 we counted the number of goldenrods in a 5 cm wide strip running from one edge of the pot to the other, passing through the centre in a random direction (approximately 10.6% of the total surface area) in all pots. The other individuals, from revegetation mixtures, were counted as a whole, regardless of their species on days 126 and 178. Finally, we measured the maximum height of *S.c.* individuals in each pot on day 61.

We analysed three response variables: *S.c.* density, density of individuals from the revegetation mixtures, and maximum goldenrod individuals' height. We focused our analysis

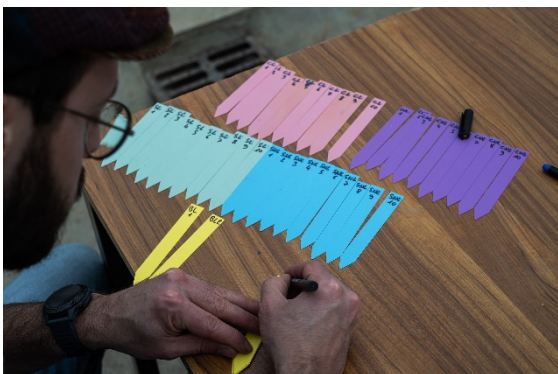
on days 126 and 178, at which both *S.c.* density and that of other species were available. To study the influence of the sowing order (*i.e.* *S.c.* first or revegetation mixture first) on the density of *S.c.*, we ran a linear model  $\sim$  (Order \* Composition). We also performed simple linear models both on goldenrod density and that of other species, with a common set of factors:  $\sim$  (Time \* Composition). On goldenrod maximum height variable, we ran a linear models testing the influence of a single factor:  $\sim$ Composition. We ran ANOVAs on all models and further explored contrasts among factor levels with Tukey tests using the “emmeans” package (v1.10.0). All model outputs, including the Kolmogorov-Smirnov test, the nonparametric dispersion test and the outlier test, can be found in Appendix 23 to Appendix 26. All analyses were conducted in RStudio (v. 2023.12.1+402).



*Remplissage des bacs de culture*



*Pesée des mélanges avant semis*



*Etiquetage des bacs de culture*



*Semis manuel des bacs de culture*

Illustration 14 : Mise en place de l'expérimentation sur les espèces exotiques envahissantes – Crédits : Gaëtan Soerensen

### 4.2.3 Results

The sowing order had a significant effect on the recruitment of *S.c.* ( $F=163.59$ ,  $p<2e-16$ ). When *Solidago* was overseeded in the pots previously sown with the revegetation mixtures, the existing plant cover varied from 10% to 90%, averaging 31.2%. As shown in Figure 16, no *S.c.* was detected afterwards in these pots, suggesting little, if any, emergence of the taxon. When the revegetation mixtures were overseeded into the pots previously sown with *S.c.*, the existing vegetation cover varied from 4% to 15%, averaging 7.4%. The emergence rate of *S.c.* was estimated at  $\approx 10 \pm 4\%$ .

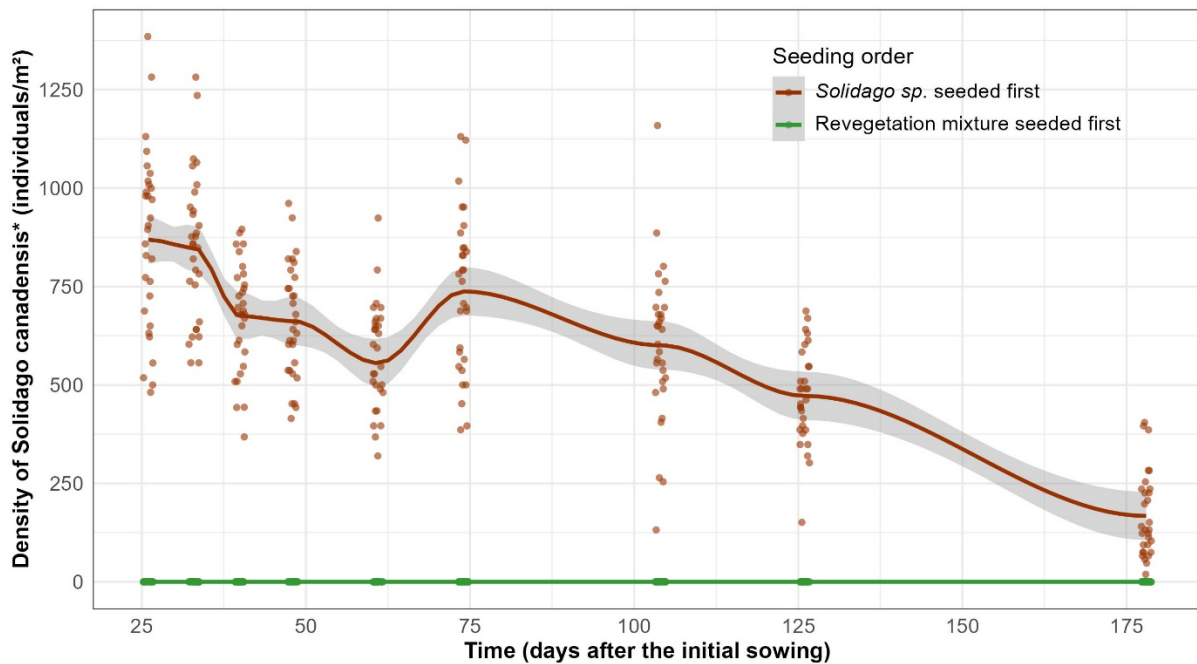


Figure 16: Density of *Solidago* individuals in time, in the pots where they were first seeded (in red), and in the pots first seeded with the revegetation mixtures (in green).

As no goldenrods were observed in the pots pre-seeded with revegetation mixtures, and because we aim at studying the interactions between *S.c.* and the revegetation mixtures, we focused our analysis on the 30 pots where *S.c.* was seeded first, and on days 126 and 178 when both data were available.

The ANOVA revealed a statistically significant effect of the time on the density of *S.c.* ( $F=17.69$ ,  $p=5.21e-5$ ), but no effect of the mixture composition nor its interaction with time. Post-hoc comparisons using the Tukey HSD test confirmed that at days 126 and 178, no effect of the composition of the overseeded mixture was found on the density of *S.c.* The number of *S.c.* individuals decreased between day 126 and day 178. (Figure 17a, Appendix 27a)

Time had a significant effect on the density of individuals in the revegetation mixtures ( $F=14.36$ ,  $p=3.83e-4$ ), as did the interaction between mixture composition and time ( $F=4.52$ ,  $p=1.50e-2$ ). At day 126, the density of individuals from the standard composition was significantly higher than the density of individuals from the competitive ( $-137$  indiv.,  $p<0.05$ ) and biodiversity ( $-181$  indiv.,  $p<0.01$ ) compositions. At day 178, the density of individuals from the mixtures had increased in compositions B ( $+258.3$  individuals,  $p<0.001$ ) and C ( $+128.4$



individuals,  $p < 0.05$ ) and there was no longer any significant difference between the mixtures ( $p > 0.70$ , Figure 17b, Appendix 27a).

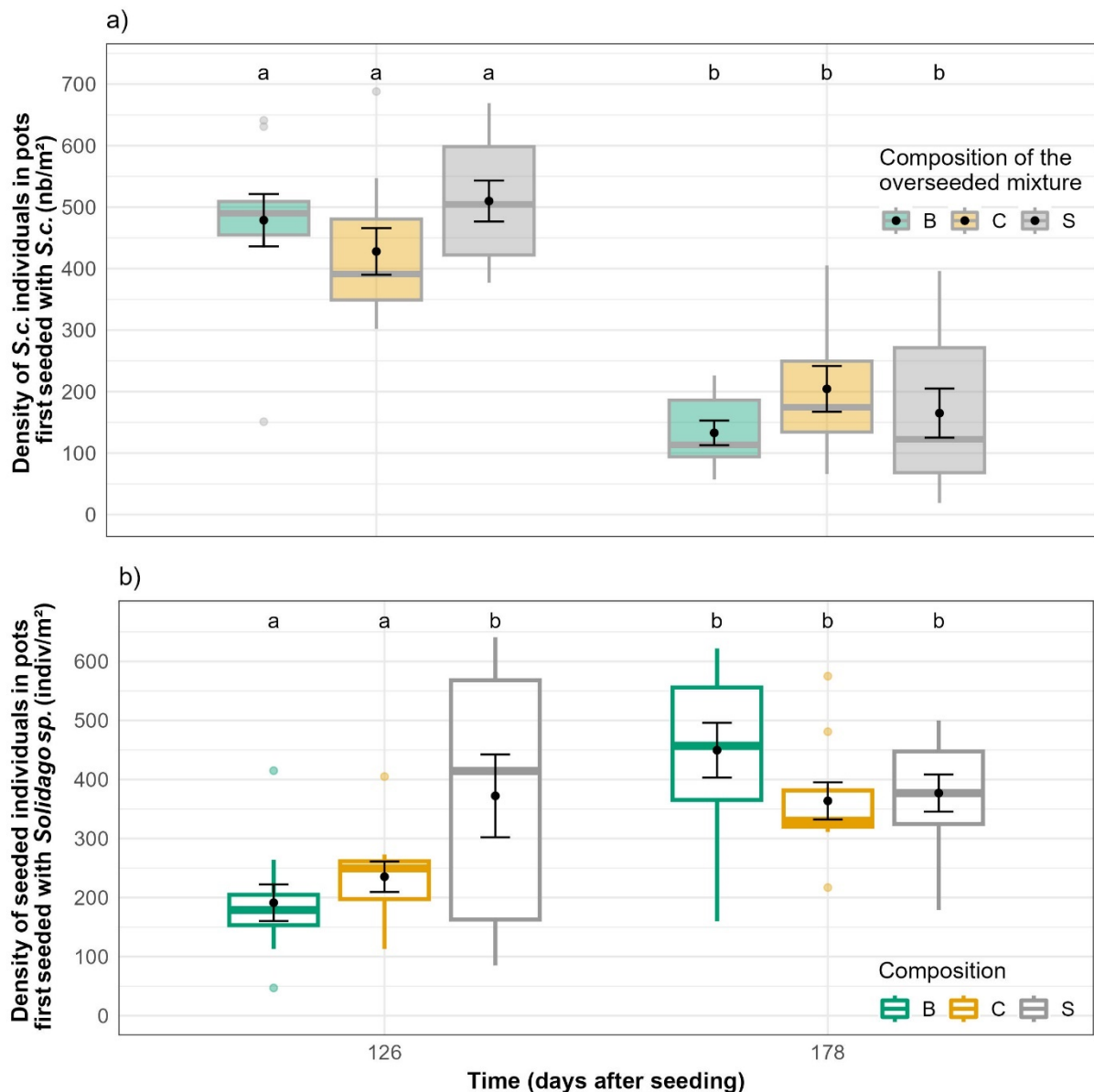


Figure 17: Mean density of a) S.c. individuals and b) revegetation mixtures individuals at days 126 and 178. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Across time and treatments, means not sharing any letter are significantly different (Tukey's test,  $p < 0.05$ ).

The one-way ANOVA revealed no statistically significant effect of the mixture composition on maximum S.c. height ( $F = 1.50$ ,  $p = 0.24$ ) on day 61.

#### 4.2.4 Discussion

##### *Development of *Solidago canadensis* on vegetated soils*

We observed no S.c. in the pots seeded beforehand with a revegetation mixture. There are three main reasons for this. Firstly, a few goldenrod seeds may have been hanging on leaves that were already developed at the time of sowing, never reaching the soil and conditions favourable to germination. Secondly, the over-sown material was not covered with a thin layer

of potting soil like the material from the initial sowings, which confers less favourable conditions for germination than in the pots where the goldenrods were sown first, but which corresponds to a situation where goldenrod seeds arrive by wind dispersal in the wild on soils. Thirdly, *solidago* may have suffered from competitive exclusion [Tilman, 1994] in pots already seeded with the mixtures. Given the controlled inputs of water and the rich nature of the soils used in this experiment, it is unlikely that water and nutrients were limiting factors. On the other hand, the plant cover was already high when the *solidago* seeds were sown, so the lack of light certainly hindered germination, and possibly the growth of young seedlings [Mayeur et al., 2024], although we did not observe any.

*Solidago canadensis* plants can grow taller (up to 250 cm) than the species in the revegetation mixtures (e.g. 120 cm for *Bromopsis erecta*, 80 cm for *Medicago sativa*, 150 cm for *Crepis biennis*, *Daucus carota* or *Echium vulgare*), which allows them to access light without being hindered by other herbaceous plants. However, in our experiment, plant cover in the pots first seeded with *solidago* was significantly slower than in the other pots (Appendix 28), indicating relatively slow germination or growth of individuals compared with the other herbaceous plants. This may explain the non-installation of *solidago* in pots that had already been seeded, and confirms their reduced growth when exposed to shade [Du et al., 2017] as well as their ecological preference for open habitats [Werner et al., 1980].

The germination rate of *S.c.* was low compared to the literature [Gould et al., 2013; Werner et al., 1980], at around 10%. We believe that the sowing density was maybe too high to allow all seeds to germinate, but also that the relatively long storage period might have affected the viability of seeds.

#### **Competition between *Solidago canadensis* and the different revegetation mixtures**

In the pots previously sown with the revegetation mixtures, we observed a continuous decrease in the density of *S.c.* over time. We explain this partly by the competition processes established among and within species, especially under these very favourable growing conditions [Grime, 1977; Mayeur et al., 2024]. The rapid growth of individuals, both in height and leaf area, quickly blocks the light underneath, impeding other species to germinate and grow [Annicchiarico et al., 2014; Haynes, 1980]. This type of competitive process is called "overgrowth" in [Schoener, 1983].

On day 126, the mean density of plants from revegetation mixtures was 895 in the pots where they had been sown first, against 266 in the pots where *S.c.* was already present. Vegetation mixtures had difficulty in developing, the size of individuals in presence of *S.c.* was strikingly small, presenting signs on abnormal development and representing only a small fraction of the overall cover [Anaël Mayeur, personal observations]. Goldenrods are known to produce a number of allelopathic molecules, such as diterpenoid compounds [Whittaker et al., 1970], effectively inhibiting germination and growth of seedlings of other species and even their own species [Smith, 1969; Sun et al., 2017]. This is probably a major factor influencing the ability of other plants to become established, but also the continuing decline in goldenrod individuals, allowing only the most developed to survive. On day 126, in the pots initially seeded with *S.c.*, we observed a greater density of plants from the Standard mixture than from the

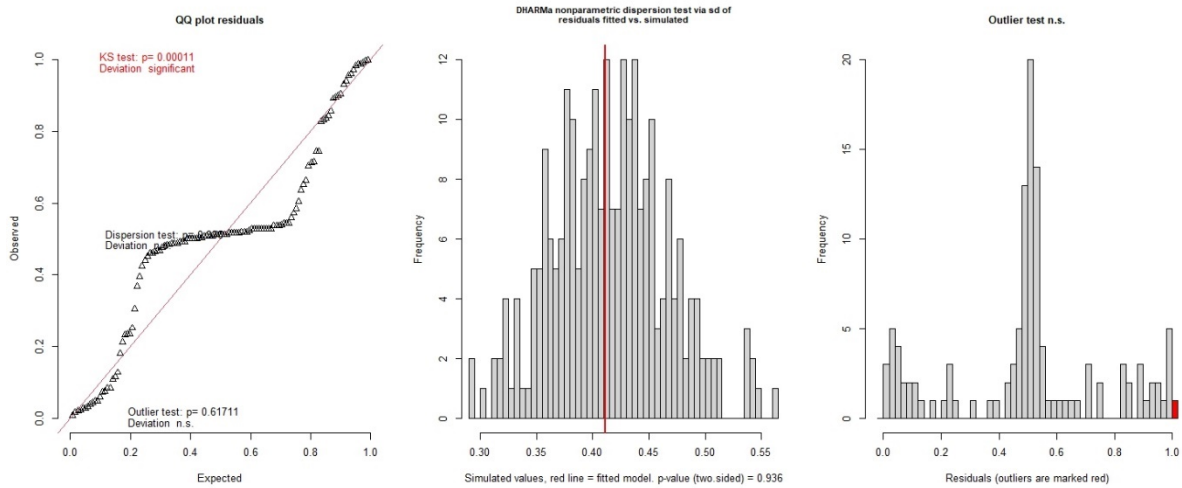
Biodiversity and Competitive mixtures. We cannot explain the difference observed between S and C, but we think the simpler species composition and the high grass content gave an advantage to these mixture compositions over B. This went against our initial assumption that more diverse revegetation mixtures would grow better than less diverse ones in presence of an IAS. The individuals from revegetation mixtures observed in pots containing S.c. were almost exclusively grasses, known for their great ability to exploit soil's water and nutrients, and their overall competitiveness, which might have contributed to their survival [Haynes, 1980].

***Implication for practitioners and research perspectives***

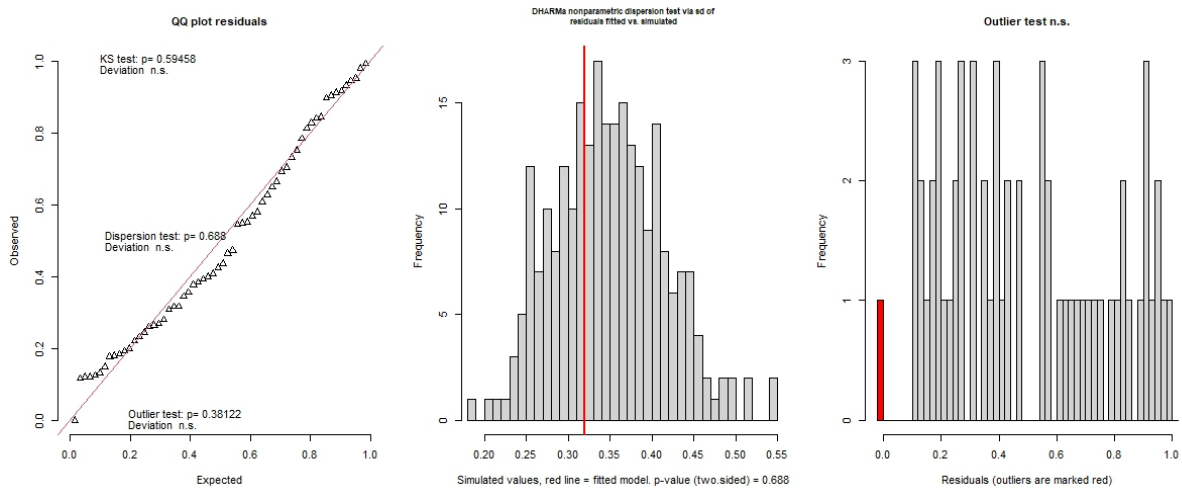
This study reaffirms the importance for practitioners involved in landscaping projects of a prompt revegetation of newly disturbed soils. Seeding operations leading to a quick establishment of a vegetation cover can have a significant impact on the ability of invasive species to establish and form new populations. Thus, we recommend that adequate assemblages of native species, based on the adequation of site conditions with plant habitat preferences, should be seeded by operators as soon as possible after the end of landscaping operations. Companies usually consider this, but in the case of large-scale projects, many constraints sometimes lead to letting soils bare during several months and therefore exposed to the arrival of undesired species. This is particularly true on poor soils, or under especially harsh climatic conditions, in which cases the development of a spontaneous flora from soil's seedbank or natural dispersal is not enough to cover the soil quickly.

Our very contrasting results between the pots first sown with solidago and the pots first sown with revegetation mix are probably due to the time elapsed between the first sowings and the second (25 days). Repeating this experiment by reducing the time and simultaneously sowing the invasive species and the revegetation mixes would probably give interesting results between the two extremes of the present study. We are encouraging this type of study with solidago and other invasive plant species.

**Appendices of Chapter 4 – 4.1**

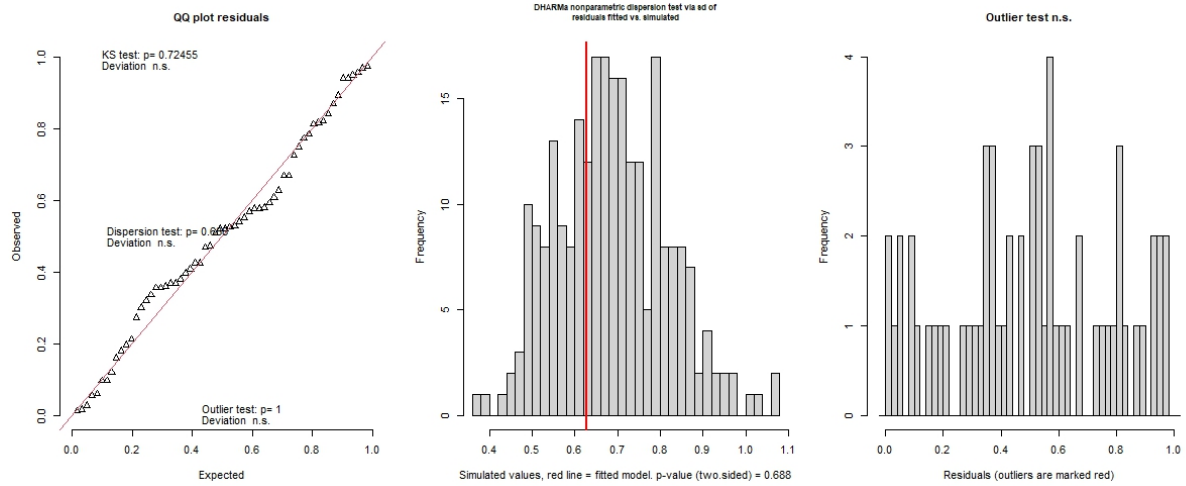


Appendix 23: outputs for the S.c. density model comparing the seeding order, including Kolmogorov-Smirnov, nonparametric dispersion and outlier tests (from left to right).

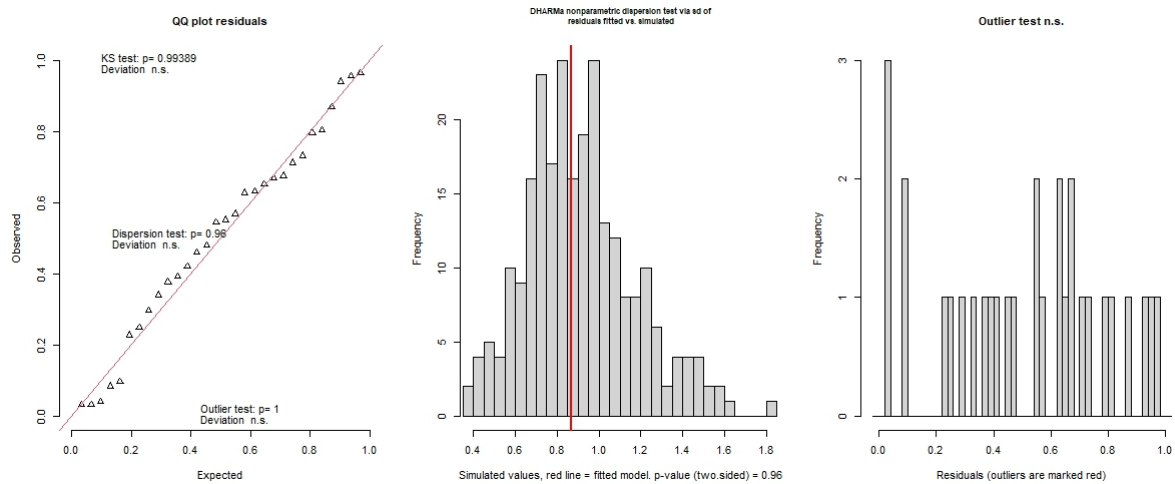


Appendix 24: outputs for the S.c. density model, including Kolmogorov-Smirnov, nonparametric dispersion and outlier tests (from left to right).





Appendix 25: outputs for the revegetation mixtures' individuals density model, including Kolmogorov-Smirnov, nonparametric dispersion and outlier tests (from left to right).



Appendix 26: outputs for the maximum height model, including Kolmogorov-Smirnov, nonparametric dispersion and outlier tests (from left to right).

a)

Response variable: Density of S.c.

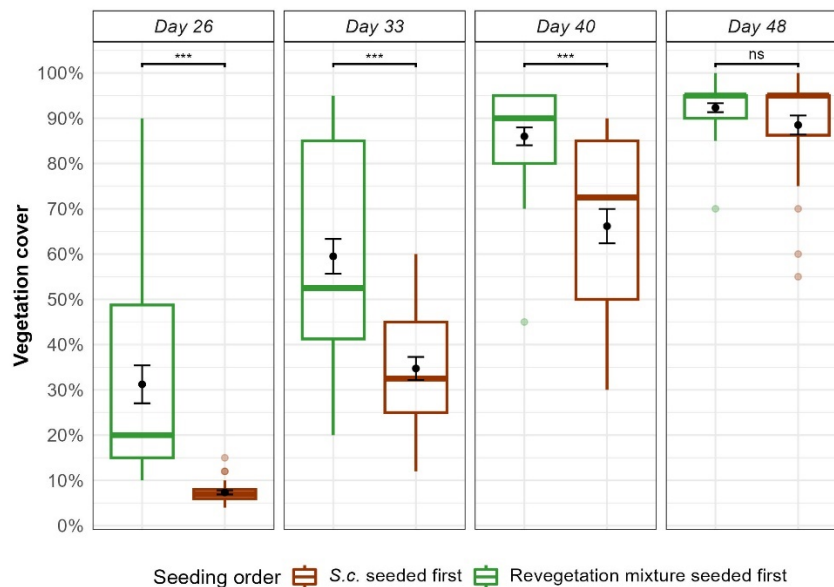
Contrasts	B126	C126	S126	B178	C178
<b>B126</b>					
<b>C126</b>	50.9 ns				
<b>S126</b>	-31.1 ns	-82 ns			
<b>B178</b>	345.9 ***	-295 *	-377 ***		
<b>C178</b>	274.4 ***	223.5 ***	-305.5 ***	-71.5 ns	
<b>S178</b>	313.8 ***	262.9 ***	344.9 ***	-32.1 ns	39.4 ns

b)

Response variable: Density of seeded species

Contrasts	B126	C126	S126	B178	C178
<b>B126</b>					
<b>C126</b>	-44.1 ns				
<b>S126</b>	-181 **	-136.9 *			
<b>B178</b>	-258.3 ***	214.2 ***	77.3 ns		
<b>C178</b>	-172.5 **	-128.4 *	-8.5 ns	85.8 ns	
<b>S178</b>	-185.7 **	-141.6 *	-4.7 ns	72.6 ns	-13.2 ns

Appendix 27: Contrast tables based on Tuckey tests of a) the density of S.c. and b) the density of individuals from revegetation mixtures.



Appendix 28: Mean cover at days 26, 33, 40 and 48 for the pots of different seeding orders. Black points represent the mean and error bars represent the standard error. Symbols indicate the level of significance for Tuckey comparisons between seeding order: ns (non-significant), \*\*\* ( $P \leq 0.001$ ).



Illustration 15 : Talus végétalisé, Contournement Ouest de Strasbourg, kilomètre 3 – Crédits: Anaël Mayeur

## DISCUSSION GENERALE

### LA VEGETALISATION DES EMPRISES AUTOROUTIERES : ENTRE PRATIQUES HISTORIQUES ET IMPERATIFS TECHNICO-ECONOMIQUES

Les grandes infrastructures linéaires, et en particulier les autoroutes, sont des milieux contraignants, tant pour l'aménageur que pour la biodiversité. L'ampleur de ces infrastructures place les entreprises en charge de leur construction et de leur exploitation face à des enjeux techniques et économiques majeurs. Les impératifs sécuritaires et budgétaires dictés par les commanditaires posent le cadre des actions des entreprises de conception, de réalisation des travaux et de gestion des ouvrages. La nature alentour, et en particulier la végétation, est contrainte par le caractère artificiel des sols et est constamment sous influence anthropique.

La place accordée au végétal par les aménageurs en charge des grandes infrastructures a évolué avec le temps, mais les attentes techniques initiales persistent aujourd'hui. Ces attentes sont le contrôle de l'érosion, formalisée dans les années 1970, et la volonté d'une meilleure intégration paysagère des ouvrages, développée au cours des années 1980. Les impératifs économiques ont toujours été un pilier central dans le choix des végétaux, et la recherche d'optimisation des dépenses, par la réduction des risques d'échecs techniques, s'est encore renforcée à partir des années 1990. La volonté d'améliorer la réussite des opérations de végétalisation par semis a conduit à l'usage généralisé, en France, d'espèces indigènes, impulsé notamment par les travaux menés aux Etats-Unis depuis une décennie. L'ensemble de ces attentes techniques, économiques et esthétiques ont persisté, mais de nouvelles considérations pour la biodiversité sont venues s'y ajouter jusqu'à devenir incontournables à partir des années 2010. La demande grandissante de la part des commanditaires pour l'usage de mélanges de végétalisation plus riches, voire sauvages et d'écotype locaux, préoccupe certains aménageurs. La marque Végétal Local, de plus en plus fléchée pour répondre à cette demande, fournit des garanties de traçabilité, et concentre ses efforts sur la fourniture de semences favorables à la biodiversité, à des prix nécessairement plus élevés que des végétaux conventionnels, mais surtout sans garanties de « qualité » sur les taux de germination, la pureté spécifique des lots, ou la teneur en matière inerte. Cela induit parfois la crainte que les végétaux implantés ne permettent pas d'atteindre les objectifs techniques attendus.

Notre exploration de la littérature grise en France, et de la littérature scientifique plus globalement, ne nous a pas permis de confirmer cette inquiétude exprimée par certains acteurs. Un des enjeux de la recherche menée dans cette thèse était précisément de tester expérimentalement cette hypothèse. Nous avons ainsi mesuré *in* et *ex situ* les taux et les vitesses de recouvrement, les densités d'individus par unité surfacique, ainsi que la quantité de biomasse racinaire produits par plusieurs mélanges de végétalisation herbacés, comme des prédicteurs de contrôle des processus d'érosion. Parmi les résultats qui nous semblent marquants, on relèvera la production de biomasse racinaire significativement plus élevée au sein des mélanges sauvages et locaux, qui peut s'avérer essentielle pour la résistance des sols aux décrochements.

En condition de terrain sur les talus, des différences marginales de recouvrement et de densités ont été constatées entre les différentes compositions spécifiques et les origines des mélanges, malgré une dose de semis deux fois inférieure appliquée aux mélanges les plus diversifiés. On pouvait s'attendre à ce que les parcelles semées de manière plus éparse, avec des mélanges comportant un dosage inférieur de graminées, soient moins bien recouvertes par la végétation, et donc plus vulnérables à l'érosion, que les parcelles semées avec des mélanges spécialement conçus pour leur performance de germination et de croissance. Cependant, dans les conditions de notre expérimentation, nous pouvons affirmer que les mélanges de composition riches semés à faibles doses, ainsi que les mélanges de semences d'écotypes sauvages et locaux, ont parfaitement rempli leur fonction. Nous en concluons donc que, dans les conditions testées, l'usage de ces mélanges peut suffire à répondre aux attentes de verdissement et de limitation des processus d'érosion.

Les résultats obtenus en serre suggèrent une corrélation négative entre la densité et le recouvrement, pouvant influencer indirectement les processus d'érosion. Toutefois, la nature extrêmement favorable de ce type d'environnement pour le développement des plantes rend les résultats plus difficilement transposables en conditions réelles. De manière générale, la littérature nous montre que les stratégies de végétalisation sont à adapter à la nature du terrain, qui peut influencer la dynamique d'établissement, de succession et de persistance de la végétation (voir par ex. [Morgan, 2005; Scotton and Andreatta, 2021; Tormo et al., 2008, 2007]). Aussi, la préparation des sols et la technique de semis employée peuvent exercer une influence sur l'établissement du couvert végétal, et la gestion de la végétation en place affecte sa persistance [Bochet et al., 2010, 2009; Bochet and Garcia-Fayos, 2004; Le Bris, 2011; Meunier et al., 1998; Tormo et al., 2007; Vanpeene, 2018]. Nous conseillons donc d'aborder les décisions concernant les modalités de végétalisation avec circonspection, en les intégrant à un panel de considération allant au-delà du simple choix des mélanges de semences. Enfin de valider l'ensemble des résultats collectés dans le cadre de notre recherche, des études complémentaires sont à prévoir pour, par exemple, mesurer directement la stabilité des agrégats du sol, la résistance au cisaillement, ou la capacité d'infiltration de l'eau de pluie (voir méthodes dans [Bochet and Garcia-Fayos, 2004; Fattet et al., 2011]). De même, une mesure de la biomasse racinaire reste à effectuer sur le terrain pour confirmer les résultats obtenus en serre.

### **VEGETALISER POUR LA BIODIVERSITE EN CONTEXTE ANTHROPISE**

Nous avons pu constater que les entreprises de l'aménagement du territoire intègrent de plus en plus des considérations écologiques dans le cadre de la réalisation de leurs projets. Cette dynamique est mue par la multiplication croissante de dispositifs législatifs, réglementaires ou normatifs, ainsi que par des pressions extérieures de la part des commanditaires des projets ou des membres de la société civile. On note aussi une volonté interne de montée en compétence sur le volet environnemental, se traduisant par la mise en place de stratégies entrepreneuriales pour une meilleure circulation de l'information, et la mise en place de dispositifs de contrôle des pratiques sur les chantiers. Toutefois, les volets énergétiques, de décarbonation et d'économie circulaire constituent les piliers d'innovation dans le secteur du transport, et il nous est apparu que la biodiversité reste le parent pauvre

des avancées dans le domaine de l'environnement. Les actions tournées vers la conservation et la restauration de la faune et la flore restent souvent dictées par des contraintes réglementaires, ou des demandes spécifiques émanant des commanditaires des projets. Dans le domaine autoroutier, la construction d'infrastructures tournées vers la restauration des connectivités écologiques (*i.e.* passages à faune) est remarquable, et les compétences déjà acquises par les entreprises dans la réalisation d'ouvrages facilitent sa mise en œuvre. Cependant, le manque de profils écologues parmi le personnel pour une prise en compte plus holistique de la biodiversité limite l'intégration d'organismes vivants moins emblématiques, notamment la flore, et le champ des actions qu'il serait possible de mettre en place pour les conserver.

Les marges décisionnelles dans le choix des modalités de végétalisation résident, dans le cas des grands projets d'infrastructures linéaires, entre les mains de prescripteurs issus du domaine de l'architecture paysagère. Bien que l'organisation en groupements de conception-construction permette une mise en commun de connaissances, et que la maîtrise d'œuvre puisse faire appel à des bureaux d'études spécialisés en végétalisation, là n'est pas la norme. L'approche majoritairement paysagère de ces structures n'intègre encore pas suffisamment de considérations écologiques dans la conception des cortèges floristiques, et moins encore dans le choix de l'origine géographique du végétal utilisé. Par ailleurs, à travers nos entretiens, certains praticiens ont montré des réticences à l'emploi de mélanges riches et locaux, étant donné leur prix souvent plus élevé, et sur l'argument que la nature des sols sur les talus ne permettrait pas une bonne expression de ces mélanges. Nous avons voulu tester ce postulat en étudiant la diversité spécifique sur de parcelles de talus autoroutiers semées avec nos mélanges de revégétalisation variant par leur composition spécifique et par l'origine des semences.

Dans nos conditions expérimentales, la végétalisation a permis une augmentation de la diversité végétale à court terme quel que soit le mélange utilisé par rapport aux parcelles non semées. Pourtant, Staab et al., [2015] ont montré que la diversité végétale peut être impactée négativement par l'utilisation de mélanges dont la proportion de graminées était élevée. On pouvait donc s'attendre à ce que les mélanges « Standard » et « Compétitif » réduisent la richesse spécifique à l'échelle locale, ce qui n'a pas été confirmé dans nos conditions expérimentales. Dans toutes les parcelles étudiées, la flore spontanée – issue de l'expression de la banque de graines présente dans les couches superficielles de terre végétale ou arrivée par dispersion naturelle – s'est avérée représenter une part très importante de la richesse observée. Cela peut témoigner de la richesse de la terre étalée en surface des remblais ou de la préparation adéquate des sols par les terrassiers (voir par exemple [Bochet et al., 2009; Bochet and Garcia-Fayos, 2004; Staab et al., 2015; Tormo et al., 2007]). Nous n'avons pas constaté de différences dans la contribution à la diversité spécifique des parcelles semées entre un mélange courant (« Standard », 7 espèces) et un mélange légèrement plus riche en espèces (« Compétitif », 12 espèces). En revanche, nous avons constaté une augmentation significative de la richesse à l'échelle locale des parcelles ensemencées avec le mélange à la diversité spécifique plus importante (« Biodiversité », 28 espèces). Par ailleurs, à plus large échelle, nous avons pu observer 22 des 23 espèces herbacées non graminoides et non légumineuses du mélange « Biodiversité ». Ce constat va à l'encontre des préoccupations de certains acteurs



interrogés et nous montre une bonne expression globale des mélanges riches dans les conditions testées. Si une volonté claire de contribuer à la biodiversité par l'établissement de communautés végétales diversifiées est poursuivie par les commanditaires ou les prescripteurs des projets, nous pouvons affirmer que l'utilisation de mélanges de semences riches peut s'avérer efficace.

Les recherches et les retours d'expérience des praticiens montrent qu'au fil du temps, les cortèges semés, largement constitués d'espèces annuelles, sont peu à peu remplacés par une flore spontanée plus pérenne [Enríquez-de-Salamanca, 2022], ce qui tend à minimiser l'importance de l'emploi de mélanges plus riches et coûteux pour la végétalisation des emprises routières aux yeux des aménageurs. Nous pensons toutefois que les efforts dirigés vers la constitution de communautés florales diversifiées au cours des premières années suivant les travaux de remaniement des sols recèlent une importance non négligeable. Les communautés florales diversifiées sont en effet essentielles, même à court terme, pour la restauration du microbiote, des caractéristiques physico-chimiques et des attributs fonctionnels du sol (voir par exemple [Kardol and Wardle, 2010; Li, 2022; Mitchell et al., 2010; Rodríguez-Loinaz et al., 2008; Stephan et al., 2000; Wang et al., 2008; Watson et al., 2022]). Aussi, les milieux des abords autoroutiers, lorsqu'implantés au sein de paysages dégradés ou sous forte influence anthropique, ont le potentiel d'accueillir des espèces prairiales ou menacées [Tikka et al., 2000], ou plus largement une flore à même d'assurer des fonctions écologiques favorables à l'entomofaune [Hopwood, 2008; Schmidt et al., 2022, 2020]. Par ailleurs, la mise en place d'une gestion appropriée des surfaces végétalisées peut contribuer à la persistance des cortèges floristiques dans le temps [Jakobsson et al., 2018]. Sa mise en place est toutefois souvent contrainte par des limitations techniques et budgétaires, et doit donc être prévue et intégrée aux projets dès la phase de conception.

Les résultats des expérimentations *in situ* n'ont pas permis d'identifier de différences dans l'expression de la diversité végétale entre les origines sauvages et locales et les origines non-locales (cultivars) des mélanges de même composition spécifique. Néanmoins, des exemples au sein de la littérature montrent que les végétaux sauvages et locaux sont plus à même de participer efficacement au fonctionnement de l'écosystème où ils sont implantés et auquel ils sont théoriquement mieux adaptés. C'est le cas notamment pour la fonction de pollinisation, dont l'efficacité réside dans l'adaptation réciproque entre les espèces végétales entomophiles et les insectes pollinisateurs. Or, les processus de sélection de certaines variétés horticoles ont engendré des modifications progressives des organes, comme la transformation de tout ou partie des pièces nectarifères en pétales [Mouret et al., 2022]. Ces transformations peuvent empêcher les insectes d'accéder aux ressources florales (*i.e.* le pollen et le nectar), affectant ainsi leur potentiel de survie ou leur capacité à polliniser. Ces différences morphologiques sont notamment connues chez le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*) ou le bleuet (*Cyanus cegetum*), et nos observations semblent abonder en ce sens (Illustration 12). Nous avons aussi pu observer des différences de formes et de couleurs entre individus de différentes origines, comme chez le coquelicot (Illustration 16), mais nous ne pouvons en l'état confirmer une différence fonctionnelle avérée. D'autres études montrent également les différences fonctionnelles existant entre deux espèces d'un même genre (*e.g.* *Salvia pratensis* vs. *Salvia splendens* ou *Stachys officinalis* vs. *Stachys palustris*) en termes de production

nectarifère ou d'accessibilité de la ressource liée à leur morphologie florale [Corbet et al., 2001]. En l'absence des mêmes espèces entre les semences sauvages et les cultivars disponibles dans le commerce, des espèces différentes d'un même genre ont été utilisées entre nos mélanges locaux et non locaux (*Festuca sp.*, *Crepis sp.*, *Dianthus sp.*, *Leucanthemum sp.*, *Reseda sp.*, *Scabiosa sp.*, *Stachys sp.*). Bien que les plus proches équivalents aient été recherchés, les cultivars présentent parfois des aspects morphologiques très différents des espèces retrouvées à l'état sauvage en France (Illustration 16), et nous pensons que leur adéquation fonctionnelle avec l'entomofaune locale peut en être affectée. Des données sur la production florale en serre ont été collectés au cours de la thèse, mais n'ont pas encore fait l'objet d'analyses formelles, ce qui constitue donc une piste de recherche à explorer par la suite.

Le choix d'utiliser des semences sauvages permet une meilleure adaptation de ces semences à la région climatique d'implantation [Bucharova et al., 2017]. Ce choix peut également offrir un plus grand potentiel évolutif des communautés végétales, notamment face au changement climatique, sous réserve d'une diversité génétique suffisante au sein des espèces semées [Breed et al., 2013; Broadhurst et al., 2008; Havens et al., 2015]. La collecte au sein de plusieurs populations d'une même région d'origine (au sens de la marque Végétal Local) peut permettre de maximiser cette diversité génétique. Ce mode de collecte est recommandé, mais non-obligatoire, ce qui pourrait s'avérer préjudiciable pour les espèces présentant des populations de petite taille et isolées. Dans tous les cas, nous pensons que l'utilisation de semences sauvages et locales, d'un point de vue purement écologique, constitue l'application d'une certaine forme de principe de précaution, en maximisant les chances de conservation des aspects fonctionnels de la flore introduite et en minimisant les risques de maladaptation ou d'introduction de génotypes ou d'espèces exogènes potentiellement impactants.

### ***Végétaliser pour freiner la propagation des espèces exotiques envahissantes***

A travers nos échanges avec les entreprises de l'aménagement, nous avons pu constater que la question des espèces exotiques envahissantes est récurrente. Les entreprises sont soumises à des obligations réglementaires et contractuelles afin d'éviter leur introduction, et également de gérer les populations déjà présentes. Les populations repérées en amont des chantiers font généralement l'objet d'opérations de destruction, par arrachage voire par décaissement des sols contenant les organes souterrains (racines, rhizomes, tubercules, etc.) de ces espèces. Toutefois, les routes sont reconnues pour être des corridors de dispersion d'espèces exotiques envahissantes [Gelbard and Belnap, 2003; Von Der Lippe and Kowarik, 2007], et l'arrivée de nouvelles populations représente un enjeu de gestion si elles viennent à s'établir après la livraison des projets. La première action à mettre en place à la suite des opérations de terrassement est donc d'établir un couvert végétal le plus rapidement possible, afin de protéger les sols mis à nu, qui sont particulièrement vulnérables à l'établissement de ces espèces [Eschtruth and Battles, 2009]. La composition des communautés mises en place par végétalisation peut avoir un impact sur la résistance du milieu aux invasions biologiques [Byun et al., 2013; Drenovsky and James, 2010; Young et al., 2009].





*Stachys recta* (sauvage local)



*Stachys byzantina* var. Pink woolly leaves (cultivar)



*Dianthus carthusianorum* (sauvage local)



*Dianthus barbatus* var. Tall single standard (cultivar)



*Papaver rhoeas* (local, écotype sauvage)



*Papaver rhoeas* var. Shirley flowered (cultivar)

Illustration 16 : Comparaison visuelle entre les fleurs de cultivars et d'écotypes sauvages et locaux –  
Crédits : Anaël Mayeur

Dans le cadre de nos travaux, nous avons cherché à tester *ex situ* le différentiel d'installation d'une espèce exotique envahissante (*Solidago canadensis*, présente sur plusieurs localités au long du Contournement Ouest de Strasbourg), sur sol nu d'une part, et d'autre part sur sols recouverts par chacun de nos six mélanges expérimentaux. Nos résultats montrent que la présence importante *Solidago canadensis* empêche l'installation de toute autre espèce dont une pluie de graine arrive sur le milieu, probablement en raison de l'importante production de substances allopathiques par cette espèce [Smith, 1969; Sun et al., 2017; Werner et al., 1980]. Réciproquement, la présence d'un couvert végétal dense empêche la germination des semences de *Solidago canadensis*, et ce quel que soit le mélange de végétalisation employé. Nous pensons que la privation de ressources lumineuses a un fort impact sur l'installation de l'espèce. Toutefois, notre expérience a été menée dans des conditions très favorables à la germination et la croissance des plantes semées sur sol nu. En conditions de terrain, l'établissement plus lent du couvert végétal implique une vulnérabilité des sols plus importante dans le temps. C'est pourquoi nous préconisons que les aménageurs continuent leurs efforts dans la réalisation des opérations de semis au plus tôt après la fin des travaux de terrassement. De plus amples expérimentations sont nécessaires afin d'évaluer le potentiel compétitif des mélanges de végétalisation face à un plus large panel d'espèces exotiques envahissantes communément rencontrées aux abords des autoroutes.

### **PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES PRATIQUES DE VÉGÉTALISATION AU SEIN DES GRANDS PROJETS D'INFRASTRUCTURES LINEAIRES**

La marque Végétal Local joue un rôle important dans les possibilités d'évolution des pratiques de végétalisation, que soit pour la restauration écologique, mais aujourd'hui aussi dans le cadre des grands projets d'aménagement. La structuration d'une filière de production nationale et la création de standards d'exigence concernant la traçabilité des végétaux rassure les porteurs de projet, et attire l'attention sur les enjeux de biodiversité liés à la végétalisation. La filière rassemble et s'appuie sur un certain nombre d'initiatives engagées dès les années 1970 avec les travaux du Cemagref sur les milieux de montagne et les pratiques innovantes dans le domaine autoroutier portées par quelques structures en avance sur leur temps. L'utilisation de végétaux sauvages et locaux apparaît comme un outil supplémentaire pour répondre aux ambitions fixées par la France dans le cadre de sa feuille de route pour l'Agenda 2030, incitant les entreprises à intégrer la biodiversité à leurs pratiques et à adopter de nouveaux modèles plus durables de consommation, sobres en carbone et circulaires [Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2019].

Cet impératif d'action en faveur de la biodiversité engendre toutefois des effets pervers. L'instrumentalisation de la marque comme faire valoir de l'action environnementale, ou son usage sans intégration de la chaîne de valeurs faisant son essence peuvent nuire à la saine évolution des pratiques. Même lorsque les commanditaires des projets d'aménagement témoignent d'une réelle volonté de prise en compte de la biodiversité, la complexité des chaînes d'acteurs et le suivi souvent lacunaire des pratiques sur les chantiers mettent en péril son débouché en actions concrètes. Les habitudes de consommation auprès des grands industriels conduisent encore trop souvent au manque d'anticipation des besoins en semences, et la méconnaissance du marché du végétal local débouchent fréquemment sur des demandes

mal formulées auxquelles les producteurs ne peuvent répondre. Il nous est apparu que les prescripteurs intervenant dans le cadre de la construction d'infrastructures linéaires présentent un manque de formation sur le sujet, au contraire de bureaux d'études écologues intervenant sur des projets d'ampleur moindre ou spécifiquement dirigés vers des actions de restauration. Les formations et les opérations de sensibilisation proposés par Végétal Local ou les groupements professionnels tels que l'UPGE permettent néanmoins de former progressivement les commanditaires et constructeurs aux pratiques favorables à la biodiversité, mais la nécessité d'internalisation de la compétence écologique par le recrutement de profils qualifiés semble encore un impératif pour y arriver. Notre étude, bien qu'ayant intégré plusieurs groupes d'acteurs, reste néanmoins parcellaire. La sollicitation d'un panel plus large de prescripteurs et constructeurs intervenant dans des projets d'aménagement d'échelles diverses permettrait de mieux étayer les conclusions formulées ici.

Les freins à l'élargissement de l'usage de végétaux favorables à la biodiversité n'émanent toutefois pas seulement du secteur de l'aménagement. La lente reconstruction des savoirs autour de la collecte et la production des végétaux sauvages est entravée par un manque de partage des connaissances au sein d'un marché herbacé historiquement concurrentiel, non seulement à l'échelle nationale mais aussi internationale. L'application parfois laborieuse des règles d'usage de la marque Végétal Local, couplée aux réglementations contraignantes, brident les productions et sont parfois de nature à intimider les nouveaux producteurs désireux de se lancer. Ces éléments engendrent une disponibilité encore limitée des productions semencières, et des coûts encore perçus comme trop élevés par rapport aux standards de l'industrie. De plus en plus de soutiens publics sont mis à disposition des nouveaux producteurs, mais aussi des porteurs de projets pour les inciter à surmonter cette barrière. Néanmoins, la question des coûts est largement discutable, considérant la part dérisoire que représente le prix d'achat des semences à l'échelle des budgets alloués à la construction des ouvrages. Une réflexion sur la valeur que l'on attribue à la biodiversité est à engager, afin, peut-être, de transformer la perception des dépenses comme une contrainte vers un investissement dans une valeur ajoutée. Cette transformation passe évidemment par une évolution des mentalités, mais également par des mécanismes incitatifs permettant de mieux valoriser les actions environnementales des entreprises.





Illustration 17 : Anaël Mayeur – Observation d'un individu de *Cyanus segetum* – Crédits : Gaëtan Soerensen



## REFERENCES

- A1, 2023. Entretien semi-directif - Acteur de l'aménagement n°1. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d'Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- A2, 2023. Entretien semi-directif - Acteur de l'aménagement n°2. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d'Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- A3, 2023. Entretien semi-directif - Acteur de l'aménagement n°3. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d'Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- A4, 2023. Entretien semi-directif - Acteur de l'aménagement n°4. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d'Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- A5, 2023. Entretien semi-directif - Acteur de l'aménagement n°5. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d'Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- Abrahams, A.D., Parsons, A.J., Luk, S., 1988. Hydrologic and sediment responses to simulated rainfall on desert hillslopes in southern Arizona. *CATENA* 15, 103–117. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(88\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0341-8162(88)90022-7)
- Aitken, S.N., Whitlock, M.C., 2013. Assisted Gene Flow to Facilitate Local Adaptation to Climate Change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 44, 367–388. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135747>
- Akbar, K.F., Hale, W.H.G., Headley, A.D., 2003. Assessment of scenic beauty of the roadside vegetation in northern England. *Landscape and Urban Planning* 63, 139–144. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00185-8](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00185-8)
- Alligand, G., Hubert, S., Legendre, T., Millard, F., Müller, A., 2018. Théma – Evaluation environnementale. Guide d'aide à la définition des mesures ERC.
- Anderson, J.T., Inouye, D.W., McKinney, A.M., Colautti, R.I., Mitchell-Olds, T., 2012. Phenotypic plasticity and adaptive evolution contribute to advancing flowering phenology in response to climate change. *Proc. R. Soc. B.* 279, 3843–3852. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1051>
- Andrés, P., Jorba, M., 2000. Mitigation Strategies in Some Motorway Embankments (Catalonia, Spain). *Restoration Ecology* 8, 268–275. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80038.x>
- Annicchiarico, P., Louarn, G., Julier, B., Maamouri, A., 2014. Alfalfa intercropping and competitive ability. *Legume Perspectives*.
- Armstrong, C.L., Mitchell, J.K., 1987. Transformations of rainfall by plant canopy. *Transactions of the ASAE* 30, 688–696.
- Auestad, I., Rydgren, K., Austad, I., 2011. Road Verges: Potential Refuges for Declining Grassland Species Despite Remnant Vegetation Dynamics. *Annales Botanici Fennici* 48, 289–303. <https://doi.org/10.5735/085.048.0401>
- Balding, M., Williams, K.J.H., 2016. Plant blindness and the implications for plant conservation. *Conservation Biology* 30, 1192–1199. <https://doi.org/10.1111/cobi.12738>
- Barbé, H., Frascaria-Lacoste, N., 2021. Integrating Ecology into Land Planning and Development: Between Disillusionment and Hope, Questioning the Relevance and Implementation of the Mitigation Hierarchy. *Sustainability* 13, 12726. <https://doi.org/10.3390/su132212726>
- Barnosky, A.D., Hadly, E.A., Bascompte, J., Berlow, E.L., Brown, J.H., Fortelius, M., Getz, W.M., Harte, J., Hastings, A., Marquet, P.A., Martinez, N.D., Mooers, A., Roopnarine, P., Vermeij, G., Williams, J.W., Gillespie, R., Kitzes, J., Marshall, C., Matzke, N., Mindell, D.P., Revilla, E.,

## REFERENCES

- Smith, A.B., 2012. Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature* 486, 52–58. <https://doi.org/10.1038/nature11018>
- Barnosky, A.D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G.O.U., Swartz, B., Quental, T.B., Marshall, C., McGuire, J.L., Lindsey, E.L., Maguire, K.C., Mersey, B., Ferrer, E.A., 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471, 51–57. <https://doi.org/10.1038/nature09678>
- Bassett, I.E., Simcock, R.C., Mitchell, N.D., 2005. Consequences of soil compaction for seedling establishment: Implications for natural regeneration and restoration. *Austral Ecol* 30, 827–833. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2005.01525.x>
- BE1, 2023. Entretien semi-directif - Acteur de bureau d'études n°1. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d'Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- BE2, 2023. Entretien semi-directif - Acteur de bureau d'études n°2. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d'Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- Berthonnet, A., 2009. Petite histoire des routes et des ponts à péage en France de l'antiquité à nos jours. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer n° 7-Viabilité hivernale Reboisement.
- Bischoff, A., Provendier, D.D., Dao, J., Millet, J., Sandra, M., 2015. Végétal Local: une marque française pour la conservation de la flore indigène. Eurogard VII The Seventh European Botanic Gardens Congress.
- Bischoff, A., Steinger, T., Müller-Schärer, H., 2008. The Importance of Plant Provenance and Genotypic Diversity of Seed Material Used for Ecological Restoration. *Restoration Ecology* 18, 338–348. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00454.x>
- Bischoff, A., Vonlanthen, B., Steinger, T., Müller-Schärer, H., 2006. Seed provenance matters — Effects on germination of four plant species used for ecological restoration. *Basic and Applied Ecology* 7, 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2005.07.009>
- Bochet, E., Garcia-Fayos, P., 2004. Factors Controlling Vegetation Establishment and Water Erosion on Motorway Slopes in Valencia, Spain. *Restoration Ecology* 12, 166–174. <https://doi.org/10.1111/j.1061-2971.2004.0325.x>
- Bochet, E., García-Fayos, P., Tormo, J., 2009. How can we control erosion of roadslopes in semiarid mediterranean areas? Soil improvement and native plant establishment. *Land Degrad Dev* 21, 110–121. <https://doi.org/10.1002/ldr.911>
- Bochet, E., Poesen, J., Rubio, J.L., 2002. Influence of plant morphology on splash erosion in a Mediterranean matorral. *zfg* 46, 223–243. <https://doi.org/10.1127/zfg/46/2002/223>
- Bochet, E., Tormo, J., García-Fayos, P., 2010. Native Species for Roadslope Revegetation: Selection, Validation, and Cost Effectiveness. *Restoration Ecology* 18, 656–663. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00496.x>
- Bradbury, I.K., 1973. The strategy and tactics of *Solidago canadensis* L. in abandoned pastures [Ph.D. Dissertation]. University of Guelph, Guelph, Ont.
- Breed, M.F., Stead, M.G., Ottewell, K.M., Gardner, M.G., Lowe, A.J., 2013. Which provenance and where? Seed sourcing strategies for revegetation in a changing environment. *Conserv Genet* 14, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10592-012-0425-z>
- Bretzel, F., Vannucchi, F., Romano, D., Malorgio, F., Benvenuti, S., Pezzarossa, B., 2016. Wildflowers: From conserving biodiversity to urban greening—A review. *Urban Forestry & Urban Greening* 20, 428–436. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.008>
- Broadhurst, L.M., Lowe, A., Coates, D.J., Cunningham, S.A., McDonald, M., Vesk, P.A., Yates, C., 2008. Seed supply for broadscale restoration: maximizing evolutionary potential: Seed



## REFERENCES

- supply for broadscale restoration. *Evolutionary Applications* 1, 587–597. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2008.00045.x>
- Brook, B., Sodhi, N., Bradshaw, C., 2008. Synergies among extinction drivers under global change. *Trends in Ecology & Evolution* 23, 453–460. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.03.011>
- Brown, N., 1997. Re-defining native woodland. *Forestry* 70, 191–198. <https://doi.org/10.1093/forestry/70.3.191>
- Bucharova, A., Michalski, S., Hermann, J.-M., Heveling, K., Durka, W., Hölzel, N., Kollmann, J., Bossdorf, O., 2017. Genetic differentiation and regional adaptation among seed origins used for grassland restoration: lessons from a multispecies transplant experiment. *J Appl Ecol* 54, 127–136. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12645>
- Bugg, R.L., Brown, C.S., Anderson, J.H., 1997. Restoring Native Perennial Grasses to Rural Roadsides in the Sacramento Valley of California: Establishment and Evaluation. *Restoration Ecology* 5, 214–228. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1997.09726.x>
- Bulot, A., 2023. Restauration écologique d'une pelouse sèche méditerranéenne (La plaine de La Crau, Sud-Est de la France): du génie civil au génie écologique [Sciences du Vivant]. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (UAPV).
- Burnett, B.N., Meyer, G.A., McFadden, L.D., 2008. Aspect-related microclimatic influences on slope forms and processes, northeastern Arizona. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JF000789>
- Byun, C., de Blois, S., Brisson, J., 2013. Plant functional group identity and diversity determine biotic resistance to invasion by an exotic grass. *J Ecol* 101, 128–139. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12016>
- Cadotte, M.W., Carscadden, K., Mirotnick, N., 2011. Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services: Functional diversity in ecology and conservation. *Journal of Applied Ecology* 48, 1079–1087. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02048.x>
- Cambecèdes, J., Largier, G., Lombard, A., 2012. Plan national d'actions en faveur des plantes messicoles 2012-2017.
- Carlson, S.M., Cunningham, C.J., Westley, P.A.H., 2014. Evolutionary rescue in a changing world. *Trends in Ecology & Evolution* 29, 521–530. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.06.005>
- CBNA, n.d. Flore commune: l'extraordinaire à portée de main – Conservatoire Botanique National Alpin. URL <https://cbn-alpin.fr/actions/flore-commune> [accessed 9.6.24].
- CDR-EEE, 2022. Liste des espèces exotiques envahissantes préoccupantes pour l'Union européenne en date du 19 juillet 2022.
- Ceballos, G., Ehrlich, P.R., Barnosky, A.D., García, A., Pringle, R.M., Palmer, T.M., 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Sci. Adv.* 1, e1400253. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253>
- Choay, F., 1970. L'histoire et la méthode en urbanisme. *Annales* 25, 1143–1154. <https://doi.org/10.3406/ahess.1970.422350>
- Claireau, F., Kerbiriou, C., Charton, F., Braga, C.D.A., Ferraille, T., Julien, J.-F., Machon, N., Allegrini, B., Puechmaille, S.J., Bas, Y., 2021. Bat Overpasses Help Bats to Cross Roads Safely by Increasing Their Flight Height. *Acta Chiropterologica* 23. <https://doi.org/10.3161/15081109ACC2021.23.1.015>
- Climatologie de l'année 2023 à Strasbourg-Entzheim - Infoclimat [WWW Document], 2024. . Infoclimat.fr. URL <https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2023/strasbourg-entzheim/valeurs/07190.html> [accessed 6.13.24].



## REFERENCES

- Commander, L.E., Coates, D.J., Broadhurst, L., Offord, C.A., Makinson, R.O., Matthes, M., 2018. Guidelines for the translocation of threatened plants in Australia, Third edition. ed. Australian Network for Plant Conservation Inc., Canberra [Australian Capital Territory].
- Commission européenne, 2010. Directive 2010/60/UE de la Commission du 30 août 2010 introduisant certaines dérogations pour la commercialisation des mélanges de semences de plantes fourragères destinés à la préservation de l'environnement naturel.
- Corbet, S.A., Bee, J., Dasmahapatra, K., Gale, S., Gorringer, E., La Ferla, B., Moorhouse, T., Trevail, A., Van Bergen, Y., Vorontsova, M., 2001. Native or Exotic? Double or Single? Evaluating Plants for Pollinator-friendly Gardens. *Annals of Botany* 87, 219–232. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1322>
- Corbin, J.D., D'Antonio, C.M., 2004. Competition between native perennial and exotic annual grasses: implications for an historical invasion. *Ecology* 85, 1273–1283. <https://doi.org/10.1890/02-0744>
- Corlatti, L., Hackländer, K., Frey-Roos, F., 2009. Ability of Wildlife Overpasses to Provide Connectivity and Prevent Genetic Isolation. *Conservation Biology* 23, 548–556. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01162.x>
- Cormier, L., Lajartre, A.B.D., Carcaud, N., 2010. La planification des trames vertes, du global au local: réalités et limites. *cybergegeo*. <https://doi.org/10.4000/cybergegeo.23187>
- Coumoul, H., Mineau, H., 2002. Les jardins de l'autoroute: Histoire de graines, d'herbes et de rocailles, Actes Sud. ed.
- Crespi, B.J., 2000. The evolution of maladaptation. *Heredity* 84, 623–629. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2540.2000.00746.x>
- Crosaz, Y., 2002. Motivations, objectifs et contraintes des opérations de végétalisation dans le domaine ferroviaire. *revec* 57, 97–106. <https://doi.org/10.3406/revec.2002.6209>
- Cruse, R.M., Larson, W.E., 1977. Effect of soil shear strength on soil detachment due to raindrop impact. *Soil Science Society of America Journal* 41, 777–781. <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100040034x>
- Davis, M.A., Grime, J.P., Thompson, K., 2000. Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. *J Ecology* 88, 528–534. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00473.x>
- De Bello, F., Lavorel, S., Díaz, S., Harrington, R., Cornelissen, J.H.C., Bardgett, R.D., Berg, M.P., Cipriotti, P., Feld, C.K., Hering, D., Martins Da Silva, P., Potts, S.G., Sandin, L., Sousa, J.P., Storkey, J., Wardle, D.A., Harrison, P.A., 2010. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodivers Conserv* 19, 2873–2893. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9850-9>
- De Groot, M., Kleijn, D., Jogan, N., 2007. Species groups occupying different trophic levels respond differently to the invasion of semi-natural vegetation by *Solidago canadensis*. *Biological Conservation* 136, 612–617. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.01.005>
- De Ploey, J., 1982. A stemflow equation for grasses and similar vegetation. *Catena* 9, 139–152. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(82\)80010-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(82)80010-6)
- De Vitis, M., Abbandonato, H., Dixon, K., Laverack, G., Bonomi, C., Pedrini, S., 2017. The European Native Seed Industry: Characterization and Perspectives in Grassland Restoration. *Sustainability* 9, 1682. <https://doi.org/10.3390/su9101682>
- Dedonder, E., 2024. Deuxième webconférence «Plantes exotiques envahissantes: retours d'expériences et solutions pratiques». CDR-EEE. URL <https://especes-exotiques-envahissantes.fr/deuxieme-webconference-plantes-exotiques-envahissantes-retours-dexperiences-et-solutions-pratiques/> [accessed 7.3.24].

## REFERENCES

- Desjardins, X., Gêneau de Lamarlière, I., 2016. L'aménagement du territoire en France, La documentation française. ed.
- Devictor, V., Godet, L., 2010. The forgotten nature of national parks. *Nova Science Publishers, National Parks: Conservation, Biodiversity and Tourism* 1–23. <https://doi.org/ISBN: 978-1-60741-465-0>
- Diallo, M., Mayeur, A., Vaissière, A.-C., Colas, B., 2023. The relevance of plant translocation as a conservation tool in France. *Plant Ecol* 224, 777–790. <https://doi.org/10.1007/s11258-023-01295-4>
- Diaz, S., Hodgson, J.G., Thompson, K., Cabido, M., Cornelissen, J.H.C., Jalili, A., Montserrat-Martí, G., Grime, J.P., Zarrinkamar, F., Asri, Y., Band, S.R., Basconcelo, S., Castro-Díez, P., Funes, G., Hamzehee, B., Khoshnevi, M., Pérez-Harguindeguy, N., Pérez-Rontomé, M.C., Shirvany, F.A., Vendramini, F., Yazdani, S., Abbas-Azimi, R., Bogaard, A., Boustani, S., Charles, M., Dehghan, M., De Torres-Espuny, L., Falczuk, V., Guerrero-Campo, J., Hynd, A., Jones, G., Kowsary, E., Kazemi-Saeed, F., Maestro-Martínez, M., Romo-Díez, A., Shaw, S., Siavash, B., Villar-Salvador, P., Zak, M.R., 2004. The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *J Vegetation Science* 15, 295–304. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02266.x>
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E.S., Ngo, H.T., Agard, J., Arneeth, A., Balvanera, P., Brauman, K.A., Butchart, S.H.M., Chan, K.M.A., Garibaldi, L.A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S.M., Midgley, G.F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razzaque, J., Reyers, B., Chowdhury, R.R., Shin, Y.-J., Visseren-Hamakers, I., Willis, K.J., Zayas, C.N., 2019. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science* 366, eaax3100. <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>
- Dinger, F., 1997. Végétalisation des espaces dégradés en altitude. Cemagref Editions 144.
- Dinger, F., 1995. Les techniques de réhabilitation des domaines skiables. Ingénieries eau-agriculture-territoires.
- Drenovsky, R.E., James, J.J., 2010. Designing Invasion-Resistant Plant Communities: The Role of Plant Functional Traits. *Rangelands* 32, 32–37. <https://doi.org/10.2111/RANGELANDS-D-09-00002.1>
- Du, L., Liu, H., Yan, M., Li, Junmin, Li, Junsheng, 2017. Individual Plasticity of the Shade Response of the Invasive *Solidago canadensis* in China. *PLoS ONE* 12, e0170049. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170049>
- Du vert dans les rouages, 2022. Feuille de route du Végétal Sauvage d'Origine Locale en Nouvelle Aquitaine.
- Du vert dans les rouages, 2020. Étude d'opportunité du végétal sauvage d'origine locale pour la filière horticole en Nouvelle Aquitaine.
- Dukes, J.S., 2001. Biodiversity and invasibility in grassland microcosms. *Oecologia* 126, 563–568. <https://doi.org/10.1007/s004420000549>
- Dumont, G.-F., 2020. Quel aménagement du territoire?: Face aux enjeux du développement durable, de la décentralisation et de la mondialisation. *Les Analyses de Population & Avenir* N° 27, 1–18. <https://doi.org/10.3917/lap.027.0001>
- Dupin, B., Malaval, S., Couëron, G., Cambecèdes, J., 2014. Comment reconstituer la flore en montagne pyrénéenne?
- Dupré la Tour, A., Labatut, J., Spiegelberger, T., 2020. Unraveling the concept of local seeds in restoration ecology. *Restor Ecol* 28, 1327–1334. <https://doi.org/10.1111/rec.13262>

## REFERENCES

- Durka, W., Michalski, S.G., Berendzen, K.W., Bossdorf, O., Bucharova, A., Hermann, J.-M., Hölzel, N., Kollmann, J., 2017. Genetic differentiation within multiple common grassland plants supports seed transfer zones for ecological restoration. *J Appl Ecol* 54, 116–126. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12636>
- EDF, 2024. Énergie hydraulique: agir en faveur de la biodiversité [WWW Document]. URL <https://www.edf.fr/groupe-edf/produire-une-energie-respectueuse-du-climat/accelerer-le-developpement-des-energies-renouvelables/lenergie-hydraulique/les-avantages-de-lhydroelectricite/enjeux-environnementaux/preserver-la-biodiversite> [accessed 7.16.24].
- EDF, 2023. EDF engagé depuis 50 ans pour la biodiversité | Groupe EDF [WWW Document]. URL <https://www.edf.fr/groupe-edf/agir-en-entreprise-responsable/responsabilite-societale-dentreprise/biodiversite> [accessed 7.19.24].
- EDF, 2022. Document d'enregistrement universel - EDF.
- Elnaker, N., Zaleski, T., 2021. The impact of slope aspect on soil temperature and water content. Presented at the International soil science symposium on soil science and plant nutrition.
- Engman, E.T., 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 112, 39–53. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1986\)112:1\(39\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:1(39))
- Enríquez-de-Salamanca, Á., 2022. Vegetation change in road slopes in the Mediterranean region over 25 years. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 30, 94–105. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2022.16324>
- Erickson, V.J., Halford, A., 2020. Seed planning, sourcing, and procurement. *Restoration Ecology* 28. <https://doi.org/10.1111/rec.13199>
- ErMiV, 2011. Verordnung über das Inverkehrbringen von Saatgut von Erhaltungsmischungen (Erhaltungsmischungsverordnung). Bundesgesetzblatt Teil I.
- Eschtruth, A.K., Battles, J.J., 2009. Assessing the relative importance of disturbance, herbivory, diversity, and propagule pressure in exotic plant invasion. *Ecological Monographs* 79, 265–280. <https://doi.org/10.1890/08-0221.1>
- Falk, A.D., Holsinger, K.E., 1991. Genetics and conservation of rare plants. Oxford University Press. <https://doi.org/10.2307/1940865>
- Fattet, M., Fu, Y., Ghestem, M., Ma, W., Foulonneau, M., Nespoulous, J., Le Bissonnais, Y., Stokes, A., 2011. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *CATENA* 87, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.006>
- Fayiah, M., Dong, S., Li, Y., Xu, Y., Gao, X., Li, S., Shen, H., Xiao, J., Yang, Y., Wessell, K., 2019. The relationships between plant diversity, plant cover, plant biomass and soil fertility vary with grassland type on Qinghai-Tibetan Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 286, 106659. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106659>
- Federal Highway Administration, U.S.D. of T., 2011. Current and Innovative Solutions to Roadside Revegetation Using Native Plants.
- Federal Highway Administration, U.S.D. of T., 2007a. A manager's guide to roadside revegetation using native plants.
- Federal Highway Administration, U.S.D. of T., 2007b. Roadside Revegetation - An Integrated Approach to Establishing Native Plants.

## REFERENCES

- Fensome, A.G., Mathews, F., 2016. Roads and bats: a meta-analysis and review of the evidence on vehicle collisions and barrier effects. *MAMMAL REVIEW* 46, 311–323. <https://doi.org/10.1111/mam.12072>
- Ferrière, R., Dieckmann, U., Couvet, D. [Eds.], 2004. *Evolutionary conservation biology, Cambridge studies in adaptive dynamics*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Fitter, A.H., 2002. Characteristics and functions of root systems, in: *Plant Roots: The Hidden Half*. CRC Press 1–20. <https://doi.org/10.1201/9780203909423.ch2>
- Flanagan, D.C., Nearing, M.A., 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. Nserl Rep 10, 1–123.
- Forman, R.T.T., Gordon, M., 1986. *Landscape Ecology*, John Wiley and Sons Ltd. ed. New York.
- Forman, R.T.T., Sperling, D., Bissonette, J.A., Clevenger, A.P., Cutshall, C.D., Dale, V.H., Fahrig, L., France, R., Goldman, C.R., Heanue, K., 2003. *Road Ecology: Science And Solutions*. Island Press, Washington, DC.
- Freeman, B.G., Scholer, M.N., Ruiz-Gutierrez, V., Fitzpatrick, J.W., 2018. Climate change causes upslope shifts and mountaintop extirpations in a tropical bird community. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 11982–11987. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804224115>
- Funk, J.L., Cleland, E.E., Suding, K.N., Zavaleta, E.S., 2008. Restoration through reassembly: plant traits and invasion resistance. *Trends in Ecology & Evolution* 23, 695–703. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.07.013>
- Gadour, S., Terzo, M., Rasmont, P., 2007. Jachères apicoles et jachères fleuries: la biodiversité au menu de quelles abeilles? *Courrier de l'environnement de l'INRA* 54.
- Gann, G.D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C.R., Jonson, J., Hallett, J.G., Eisenberg, C., Guariguata, M.R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., Dixon, K.W., 2019. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology* 27. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- Gardner, H., 2016. Seed Dispersal by Roadside Mowing. *Natural Areas Journal* 36, 102. <https://doi.org/10.3375/043.036.0117>
- Gelbard, J.L., Belnap, J., 2003. Roads as Conduits for Exotic Plant Invasions in a Semiarid Landscape. *Conservation Biology* 17, 420–432. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2003.01408.x>
- GIEC, 2014. *Changements climatiques 2014: incidences, adaptation et vulnérabilité: résumés, foire aux questions et encarts thématiques: contribution du groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Organisation météorologique mondiale, Genève (Suisse).
- Goldberg, D.E., 1988. Response of *Solidago canadensis* clones to competition. *Oecologia* 77, 357–364. <https://doi.org/10.1007/BF00378042>
- Gould, K., Smreciu, A., Wood, S., 2013. *Solidago canadensis*: Canada goldenrod, common goldenrod.
- Gouvernement Français, 2023. *Stratégie Nationale Biodiversité 2030*.
- Grime, J.P., 1977. Evidence for the Existence of Three Primary Strategies in Plants and Its Relevance to Ecological and Evolutionary Theory. *The American Naturalist* 111, 1169–1194. <https://doi.org/10.1086/283244>
- Grime, J.P., 1973. Competitive Exclusion in Herbaceous Vegetation. *Nature* 242, 344–347. <https://doi.org/10.1038/242344a0>
- Grossman, J.D., Rice, K.J., 2012. Evolution of root plasticity responses to variation in soil nutrient distribution and concentration. *Evolutionary Applications* 5, 850–857. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2012.00263.x>

## REFERENCES

- Guevara, R., Rosales, J., Sanoja, E., 2005. Pioneer vegetation on rocks, a biological potential for revegetation of degraded areas by iron-ore mining. *INTERCIENCIA* 30, 644–652.
- Guo, X., Guo, W., Luo, Y., Tan, X., Du, N., Wang, R., 2013. Morphological and biomass characteristic acclimation of trident maple (*Acer buergerianum* Miq.) in response to light and water stress. *Acta Physiol Plant* 35, 1149–1159. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1154-0>
- Guo, X., Luo, Y.-J., Xu, Z.-W., Li, M.-Y., Guo, W.-H., 2019. Response strategies of *Acer davidii* to varying light regimes under different water conditions. *Flora* 257, 151423. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.151423>
- Gusev, A.P., 2018. The Invasion of Canadian Goldenrod (*Solidago canadensis* L.) into Anthropogenic Landscapes of Belarus. *Russian Journal of Biological Invasions* 9, 22–28. <https://doi.org/10.1134/S2075111718010083>
- Gya, R., Geange, S.R., Lynn, J.S., Töpfer, J.P., Wallevik, Ø., Zernichow, C., Vandvik, V., 2023. A test of local adaptation to drought in germination and seedling traits in populations of two alpine forbs across a 2000 mm/year precipitation gradient. *Ecology and Evolution* 13, e9772. <https://doi.org/10.1002/ece3.9772>
- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., Li, Y., 2005. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 29, 189–217. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra>
- Hagen, D., 2002a. Propagation of native Arctic and alpine species with a restoration potential. *POLAR RESEARCH* 21, 37–47. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2002.tb00065.x>
- Hagen, D., 2002b. Propagation of native Arctic and alpine species with a restoration potential. *POLAR RESEARCH* 21, 37–47. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2002.tb00065.x>
- Harper-Lore, B., Wilson, M., 2000. Roadside use of native plants. Island Press & Federal Highway Administration.
- Harper-Lore, B.L., 1996. Using native plants as problem-solvers. *Environmental Management* 20, 827–830. <https://doi.org/10.1007/BF01205962>
- Hartl, D.L., Clark, A.G., 1997. Principles of population genetics (3rd edition), Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland. ed.
- Havens, K., Vitt, P., Still, S., Kramer, A.T., Fant, J.B., Schatz, K., 2015. Seed Sourcing for Restoration in an Era of Climate Change. *Natural Areas Journal* 35, 122–133. <https://doi.org/10.3375/043.035.0116>
- Haynes, R.J., 1980. Competitive Aspects of the Grass-Legume Association, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 227–261. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60168-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60168-6)
- Hejda, M., Pyšek, P., Jarošík, V., 2009. Impact of invasive plants on the species richness, diversity and composition of invaded communities. *Journal of Ecology* 97, 393–403. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01480.x>
- Helldin, J.O., 2022. Are several small wildlife crossing structures better than a single large? Arguments from the perspective of large wildlife conservation. *NC* 47, 197–213. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.47.67979>
- Helmisaari, H.-S., Salemaa, M., Derome, J., Kiikkila, O., Uhlig, C., Nieminen, T.M., 2007. Remediation of heavy metal-contaminated forest soil using recycled organic matter and native woody plants. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY* 36, 1145–1153. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0319>
- Henry, E., Cornier, T., Toussaint, B., Duhamel, F., Blondel, C., 2011. Guide pour l'utilisation de plantes herbacées pour la végétalisation à vocation écologique et paysagère en région Nord-Pas de Calais.

## REFERENCES

- HilleRisLambers, J., Harsch, M.A., Ettinger, A.K., Ford, K.R., Theobald, E.J., 2013. How will biotic interactions influence climate change-induced range shifts? *Annals of the New York Academy of Sciences* 1297, 112–125. <https://doi.org/10.1111/nyas.12182>
- Hog, J., Saint-Val, M., Duval, M., 2020. Liste catégorisée des espèces végétales exotiques envahissantes de la région Grand Est.
- Holderegger, R., Di Giulio, M., 2010. The genetic effects of roads: A review of empirical evidence. *Basic and Applied Ecology* 11, 522–531. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2010.06.006>
- Holling, C.S., 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 1–23.
- Hopwood, J.L., 2008. The contribution of roadside grassland restorations to native bee conservation. *BIOLOGICAL CONSERVATION* 9.
- Hovd, H., Skogen, A., 2005. Plant species in arable field margins and road verges of central Norway. *Agriculture Ecosystems & Environment - AGR ECOSYST ENVIRON* 110, 257–265. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.013>
- Hu, A., Huang, D., Duan, Q., Zhou, Y., Liu, G., Huan, H., 2023. Cover legumes promote the growth of young rubber trees by increasing organic carbon and organic nitrogen content in the soil. *Industrial Crops and Products* 197, 116640. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116640>
- Huc, S., Van Es, J., Abdulhak, S., Spiegelberger, T., Dupré La Tour, A., Planche, J., 2022. Quels mélanges de semences sauvages et locales pour revégétaliser les milieux ouverts dégradés des Alpes? *Naturae*. <https://doi.org/10.5852/naturae2022a17>
- Hufford, K.M., Mazer, S.J., 2003. Plant ecotypes: genetic differentiation in the age of ecological restoration. *Trends in Ecology & Evolution* 18, 147–155. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00002-8)
- Hughes, J.B., Daily, G.C., Ehrlich, P.R., 1997. Population Diversity: Its Extent and Extinction. *Science* 278, 689–692. <https://doi.org/10.1126/science.278.5338.689>
- Idt, J., 2009. Le pilotage des projets d'aménagement urbain: entre technique et politique une analyse basée sur les cas de paris, lille, et chartres. Université Paris VIII.
- IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Iturrate-Garcia, M., O'Brien, M.J., Khitun, O., Abiven, S., Niklaus, P.A., Schaepman-Strub, G., 2016. Interactive effects between plant functional types and soil factors on tundra species diversity and community composition. *Ecology and Evolution* 6, 8126–8137. <https://doi.org/10.1002/ece3.2548>
- IUCN, 2024. IUCN Red List of Threatened Species [WWW Document]. URL <https://iucn.org/resources/conservation-tool/iucn-red-list-threatened-species> [accessed 9.4.24].
- IUCN/SSC, 2013. Guidelines for reintroductions and other conservation translocations. Version 1.0. Gland, Switzerland: IUCN Species Survival Commission.
- Jablonski, 1994. Extinctions in the Fossil Record. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*

## REFERENCES

- Jakobsson, S., Bernes, C., Bullock, J.M., Verheyen, K., Lindborg, R., 2018. How does roadside vegetation management affect the diversity of vascular plants and invertebrates? A systematic review. *Environ Evid* 7, 17. <https://doi.org/10.1186/s13750-018-0129-z>
- Jalkanen, J., Toivonen, T., Moilanen, A., 2020. Identification of ecological networks for land-use planning with spatial conservation prioritization. *Landscape Ecol* 35, 353–371. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00950-4>
- Jax, K., 2005. Function and “functioning” in ecology: what does it mean? *Oikos* 111, 641–648. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2005.13851.x>
- Jeusset, A., Vargac, M., Bertheau, Y., Coulon, A., Deniaud, N., Flamerie De Lachapelle, F., Jaslier, E., Livoreil, B., Roy, V., Touroult, J., Vanpeene, S., Witté, I., Sordello, R., 2016. Can linear transportation infrastructure verges constitute a habitat and/or a corridor for biodiversity in temperate landscapes? A systematic review protocol. *Environ Evid* 5, 5. <https://doi.org/10.1186/s13750-016-0056-9>
- Joppa, L.N., Roberts, D.L., Pimm, S.L., 2011. How many species of flowering plants are there? *Proc. R. Soc. B* 278, 554–559. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.1004>
- Julien, M., Colas, B., Muller, S., Schatz, B., 2022. Quality assessment of mitigation translocation protocols for protected plants in France. *Journal of Environmental Management* 302, 114064. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114064>
- Kangas, K., Tolvanen, A., Kalkaja, T., Siikamaki, P., 2009. Ecological Impacts of Revegetation and Management Practices of Ski Slopes in Northern Finland. *ENVIRONMENTAL MANAGEMENT* 44, 408–419. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9336-2>
- Kardol, P., Wardle, D.A., 2010. How understanding aboveground–belowground linkages can assist restoration ecology. *Trends in Ecology & Evolution* 25, 670–679. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.001>
- Keller, M., Kollmann, J., Edwards, P.J., 2000. Genetic introgression from distant provenances reduces fitness in local weed populations 13. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2000.00517.x>
- Kerle, A., Stewart, K., Moreno Soares, T., Ankita, Karnik, N., Shallcross, W., Ross, K., 2021. An Eco-wakening: Measuring global awareness, engagement and action for nature - Commissioned by WWF. The Economist Intelligence Unit.
- Kettenring, K.M., Adams, C.R., 2011. Lessons learned from invasive plant control experiments: a systematic review and meta-analysis: Invasive plant control experiments. *Journal of Applied Ecology* 48, 970–979. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.01979.x>
- Kiehl, K., Pfadenhauer, J., 2007. Establishment and persistence of target species in newly created calcareous grasslands on former arable fields. *Plant Ecol* 189, 31–48. <https://doi.org/10.1007/s11258-006-9164-x>
- Knisel, W.G., 1980. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Koyamatsu, Y., Shiota, A., Mitani, Y., Qudaih, Y.S., Fuji, K., Department of Electrical and Electronic Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu, 804-8550, Japan, 2015. An index to evaluate the amount of the solar radiation for a surface with eight directions. *ijsgce*. <https://doi.org/10.12720/sgce.4.3.241-246>
- Kramer, A.T., Crane, B., Downing, J., Hamrick, J.L., Havens, K., Highland, A., Jacobi, S.K., Kaye, T.N., Lonsdorf, E.V., Ramp Neale, J., Novy, A., Smouse, P.E., Tallamy, D.W., White, A., Zeldin, J., 2019. Sourcing native plants to support ecosystem function in different planting contexts. *Restor Ecol* 27, 470–476. <https://doi.org/10.1111/rec.12931>

## REFERENCES

- Krautzer, B., Graiss, W., Peratoner, G., Partl, C., Venerus, S., Klug, B., 2011. The influence of recultivation technique and seed mixture on erosion stability after restoration in mountain environment. *Nat Hazards* 56, 547–557. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9491-z>
- Kremer, A., Ronce, O., Robledo-Arnuncio, J.J., Guillaume, F., Bohrer, G., Nathan, R., Bridle, J.R., Gomulkiewicz, R., Klein, E.K., Ritland, K., Kuparinen, A., Gerber, S., Schueler, S., 2012. Long-distance gene flow and adaptation of forest trees to rapid climate change. *Ecology Letters* 15, 378–392. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01746.x>
- Kühn, I., Klotz, S., 2006. Urbanization and homogenization – Comparing the floras of urban and rural areas in Germany. *Biological Conservation* 127, 292–300. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.06.033>
- Laury, C., Valet, N., 2017. Volet 2: Dossier de demande de dérogation au titre de l'article L.411-2 du Code de l'Environnement.
- Le Bris, C., 2011. Gestion des dépendances routières et bordures de champs à l'échelle de la région Centre. Association Hommes et Territoires.
- Le Moniteur, 2010. Conception-réalisation: recommandations pour un bon usage du processus.
- Légifrance, 2024. Code de l'Environnement.
- Légifrance, 2019. Article L2171-1 - Code de la commande publique - Légifrance [WWW Document]. [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000037703685](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000037703685) [accessed 7.23.24]. URL
- Légifrance, 2018. Section 1: Marché de conception-réalisation (Article L2171-2) - Légifrance [WWW Document]. <https://www.legifrance.gouv.fr/codes/id/LEGISCTA000037703687> [accessed 7.23.24]. URL
- Légifrance, 2017. Arrêté du 2 octobre 2017 relatif à la commercialisation des semences de plantes fourragères, AGRG1725559A.
- Légifrance, 2016. Loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, 2016-1087.
- Légifrance, 1966. Directive 66/401/CEE du Conseil du 14 juin 1966 concernant la commercialisation des semences de plantes fourragères.
- Leimu, R., Fischer, M., 2008. A Meta-Analysis of Local Adaptation in Plants. *PLoS ONE* 3, e4010. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004010>
- Leimu, R., Vergeer, P., Angeloni, F., Ouborg, N.J., 2010. Habitat fragmentation, climate change, and inbreeding in plants. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1195, 84–98. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05450.x>
- Lepš, J., Doležal, J., Bezemer, T.M., Brown, V.K., Hedlund, K., Igual Arroyo, M., Jörgensen, H.B., Lawson, C.S., Mortimer, S.R., Peix Geldart, A., Rodríguez Barrueco, C., Santa Regina, I., Šmilauer, P., van der Putten, W.H., 2007. Long-term effectiveness of sowing high and low diversity seed mixtures to enhance plant community development on ex-arable fields. *Applied Vegetation Science* 10, 97–110. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2007.tb00508.x>
- Li, M.-Y., Song, M.-X., Wang, B., Shi, C.-C., Li, W., Jiang, X.-L., Li, H.-M., Wang, H., Guo, X., 2022. Effects of light intensity and nitrogen deposition on ecophysiological characteristics of *Coreopsis grandiflora*. *The Journal of the Torrey Botanical Society* 149. <https://doi.org/10.3159/TORREY-D-21-00010.1>



## REFERENCES

- Li, Y., 2022. Revegetation enhances soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in the Tengger Desert, North China 11.
- Li, Y., Xu, X.-Q., Zhu, X.-M., 1992a. Preliminary study on mechanism of plant roots to increase soil antiscouribility on the Loess Plateau. *Science in China* 1085–1092.
- Li, Y., Xu, X.-Q., Zhu, X.-M., Tian, J.-Y., 1992b. Effectiveness of plant roots on increasing the soil permeability on the Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin* 1735–1738.
- Lignier, C., Rosset, O., 2012. *Guide européen de l'hydroseeding*.
- Loch, D.S., Johnston, P.W., Jensen, T.A., Harvey, G.L., 1996. Harvesting, processing, and marketing Australian native grass seeds. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 39, 591–599. <https://doi.org/10.1080/00288233.1996.9513218>
- Loreau, M., 2010. *From populations to ecosystems: Theoretical foundations for a new ecological synthesis (MPB-46)*. Princeton University Press.
- Malaval, S., Dupin, B., Dantin, G., 2015. Conservation et restauration de la flore dans un contexte anthropisé, quelles solutions? *Sciences Eaux & Territoires Numéro 16*, 70–75. <https://doi.org/10.3917/set.016.0070>
- Malaval, S., Lauga, B., Regnault-Roger, C., Largier, G., 2010. Combined definition of seed transfer guidelines for ecological restoration in the French Pyrenees. *Applied Vegetation Science* 13, 113–124. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2009.01055.x>
- Martin, L.M., Moloney, K.A., Wilsey, B.J., 2005. An assessment of grassland restoration success using species diversity components: Community structure of restored tallgrass prairie. *Journal of Applied Ecology* 42, 327–336. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01019.x>
- Martín-López, B., González, J.A., Montes, C., 2011. The pitfall-trap of species conservation priority setting. *Biodivers Conserv* 20, 663–682. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9973-z>
- Matesanz, S., Valladares, F., Tena, D., Costa-Tenorio, M., Bote, D., 2006. Early Dynamics of Plant Communities on Revegetated Motorway Slopes from Southern Spain: Is Hydroseeding Always Needed? *Restoration Ecology* 14, 297–307. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00132.x>
- Maxwell, S.L., Fuller, R.A., Brooks, T.M., Watson, J.E.M., 2016. Biodiversity: The ravages of guns, nets and bulldozers. *Nature* 536, 143–145. <https://doi.org/10.1038/536143a>
- Mayeur, A., Carpentier, F., Soki-Makilutila, A., Colas, B., 2024. Assessing Seed Mixtures for Roadside Revegetation – Richness and Origin as Predictors for Erosion Control. *J. Ecol. Eng.* 25, 8–24. <https://doi.org/10.12911/22998993/187147>
- McCann, K.S., 2000. The diversity–stability debate. *Nature* 405, 228–233. <https://doi.org/10.1038/35012234>
- McDonald, T., Jonson, J., Dixon, K.W., 2016. National standards for the practice of ecological restoration in Australia. *Restoration Ecology* 24, S4–S32. <https://doi.org/10.1111/rec.12359>
- McMichael, B.L., Burke, J.J., 1996. Temperature effects on root growth, in: *Plant Roots: The Hidden Half*. pp. 383–396.
- McNeely, J.A., Mooney, H.A., Neville, L.E., Schei, P., Waage, J.K., 2001. *A Global Strategy on Invasive Alien Species*, IUCN Gland, Switzerland, and Cambridge, UK. ed.
- MEDDTL, 2012. *Doctrine relative à la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur le milieu naturel*.
- Mehdi, L., Weber, C., Pietro, F.D., Selmi, W., 2012. Évolution de la place du végétal dans la ville, de l'espace vert a la trame verte. *vertigo*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.12670>

## REFERENCES

- Mehlhoop, A.C., Skringdo, A.B., Evju, M., Hagen, D., 2022. Best practice—Is natural revegetation sufficient to achieve mitigation goals in road construction? *Applied Vegetation Science* 25. <https://doi.org/10.1111/avsc.12673>
- Mell, H., Fack, V., Percevault, L., Vanpeene, S., Bertheau, Y., Coulon, A., De Lachapelle, F.F., Guinard, E., Jussset, A., Le Mitouard, E., Ouédraogo, D.-Y., Vargac, M., Sordello, R., Reyjol, Y., Touroult, J., Filoche, S., Hendoux, F., 2024. Can linear transportation infrastructure verges constitute a habitat and/or a corridor for vascular plants in temperate ecosystems? A systematic review. *Environ Evid* 13, 4. <https://doi.org/10.1186/s13750-024-00328-3>
- Merlin, P., Choay, F., 2009. *Dictionnaire de l'urbanisme*, Presse Universitaires de France. ed. Paris.
- Merritt, D.J., Dixon, K.W., 2011. Restoration Seed Banks—A Matter of Scale. *Science* 332, 424–425. <https://doi.org/10.1126/science.1203083>
- Météo-France, 2023. Le climat en France métropolitaine [WWW Document]. URL <https://meteofrance.com/comprendre-climat/france/le-climat-en-france-metropolitaine> [accessed 8.30.24].
- Meunier, F., Gauriat, C., Verheyden, C., Jouventin, P., 1998. Végétation des dépendances vertes autoroutières: influences d'un mode de gestion extensif et du milieu traversé. *revec* 53, 97–121. <https://doi.org/10.3406/revec.1998.2249>
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.
- Millet, J., Beuneiche, L., Peyre, L., 2023. Composition du Comité de gestion de la marque Végétal local.
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2023a. Infrastructures de transport [WWW Document]. Chiffres clés des transports 2023. URL <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-transports-2023/34-infrastructures-de-transport.php> [accessed 9.6.24].
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2023b. Trame verte et bleue [WWW Document]. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/trame-verte-bleue> [accessed 9.7.24].
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2023c. Le Fonds Vert pour l'accélération de la transition écologique dans les territoires.
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2021. L'autorisation environnementale [WWW Document]. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/lautorisation-environnementale> [accessed 8.14.24].
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2019. Agissons pour un monde plus durable et solidaire: Feuille de route de la France pour l'Agenda 2030.
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2017. Loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages [WWW Document]. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/loi-reconquete-biodiversite-nature-paysages> [accessed 7.16.24].
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023. Présentation du « Pacte en faveur de la haie » [WWW Document]. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. URL <https://agriculture.gouv.fr/presentation-du-pacte-en-faveur-de-la-haie-dote-dun-budget-de-110-meu-des-2024> [accessed 8.11.24].
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2022. Le plan Écophyto, qu'est-ce que c'est? [WWW Document]. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté

## REFERENCES

- alimentaire. URL <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest> [accessed 7.16.24].
- Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, 2020. Biodiversité: positions et actions de la France [WWW Document]. France Diplomatie - Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. URL <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/climat-et-environnement/la-preservation-de-la-biodiversite/l-action-de-la-france-en-matiere-de-biodiversite/article/biodiversite-positions-et-actions-de-la-france> [accessed 7.16.24].
- Mitchell, R.J., Hester, A.J., Campbell, C.D., Chapman, S.J., Cameron, C.M., Hewison, R.L., Potts, J.M., 2010. Is vegetation composition or soil chemistry the best predictor of the soil microbial community? *Plant Soil* 333, 417–430. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0357-7>
- Mitsch, W.J., 1998. Ecological engineering—the 7-year itch. *Ecological Engineering* 10, 119–130. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(98\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(98)00009-3)
- Mode, C.J., 1985. *Stochastic Processes in Demography and Their Computer Implementation*, Biomathematics. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-82322-0>
- Mola, I., Jiménez, M.D., López-Jiménez, N., Casado, M.A., Balaguer, L., 2011. Roadside Reclamation Outside the Revegetation Season: Management Options under Schedule Pressure. *Restoration Ecology* 19, 83–92. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00547.x>
- Mologni, F., Moffat, C.E., Pither, J., 2023. Collating existing evidence on cumulative impacts of invasive plant species in riparian ecosystems of British Columbia, Canada: a systematic map protocol. *Environ Evid* 12, 31. <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00320-3>
- Montalvo, A.M., Ellstrand, N.C., 2001. Nonlocal transplantation and outbreeding depression in the subshrub *Lotus scoparius* (Fabaceae). *American J of Botany* 88, 258–269. <https://doi.org/10.2307/2657017>
- Moore, L.J., Petrovan, S.O., Baker, P.J., Bates, A.J., Hicks, H.L., Perkins, S.E., Yarnell, R.W., 2020. Impacts and Potential Mitigation of Road Mortality for Hedgehogs in Europe. *Animals* 10, 1523. <https://doi.org/10.3390/ani10091523>
- Morgan, R.K., 2012. Environmental impact assessment: the state of the art. *Impact Assessment and Project Appraisal* 30, 5–14. <https://doi.org/10.1080/14615517.2012.661557>
- Morgan, R.P.C., 2005. *Soil erosion and conservation*, 3rd ed. ed. Blackwell Pub, Malden, MA.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E., 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group* 23, 527–544. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5)
- Mouret, Malaval, S., Provendier, D., Millet, J., 2022. Face au déclin des pollinisateurs sauvages, des clés pour agir localement. *Biodiversité, des clés pour agir*.
- Muñoz, P.T., Torres, F.P., Megías, A.G., 2015. Effects of roads on insects: a review. *Biodivers Conserv* 24, 659–682. <https://doi.org/10.1007/s10531-014-0831-2>
- Muratet, A., Machon, N., Jiguet, F., Moret, J., Porcher, E., 2007. The Role of Urban Structures in the Distribution of Wasteland Flora in the Greater Paris Area, France. *Ecosystems* 10, 661–671. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9047-6>
- Nations Unies, 1992. *Convention sur la Diversité Biologique*.

## REFERENCES

- Neby, M., Semenchuk, P., Neby, E., Cooper, E.J., 2022. Comparison of methods for revegetation of vehicle tracks in High Arctic tundra on Svalbard. *Arctic Science* 8, 1006–1025. <https://doi.org/10.1139/as-2021-0016>
- Newbold, T., Hudson, L.N., Hill, S.L.L., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R.A., Börger, L., Bennett, D.J., Choimes, A., Collen, B., Day, J., De Palma, A., Díaz, S., Echeverria-Londoño, S., Edgar, M.J., Feldman, A., Garon, M., Harrison, M.L.K., Alhusseini, T., Ingram, D.J., Itescu, Y., Kattge, J., Kemp, V., Kirkpatrick, L., Kleyer, M., Correia, D.L.P., Martin, C.D., Meiri, S., Novosolov, M., Pan, Y., Phillips, H.R.P., Purves, D.W., Robinson, A., Simpson, J., Tuck, S.L., Weiher, E., White, H.J., Ewers, R.M., Mace, G.M., Scharlemann, J.P.W., Purvis, A., 2015. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature* 520, 45–50. <https://doi.org/10.1038/nature14324>
- Nicolau, J., 2002. Runoff generation and routing on artificial slopes in a Mediterranean–continental environment: the Teruel coalfield, Spain. *Hydrological Processes* 16, 631–647. <https://doi.org/10.1002/hyp.308>
- Norton, E.A., Smith, R.S., 1930. The Influence of Topography on Soil Profile Character. *Agronomy Journal* 22, 251–262. <https://doi.org/10.2134/agronj1930.00021962002200030006x>
- Noss, R.F., 1990. Indicators for Monitoring Biodiversity: A Hierarchical Approach. *Conservation Biology* 4, 355–364. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1990.tb00309.x>
- notre-environnement, 2024a. Enquête ADEME : les Français sur le chemin d’une consommation plus durable? [WWW Document]. notre-environnement. URL <https://www.notre-environnement.gouv.fr/> [accessed 9.17.24].
- notre-environnement, 2024b. Biodiversité: quelles évolutions depuis dix ans? [WWW Document]. notre-environnement.gouv.fr. URL <https://www.notre-environnement.gouv.fr/> [accessed 7.18.24].
- Ola, A., Dodd, I.C., Quinton, J.N., 2015. Can we manipulate root system architecture to control soil erosion? *SOIL* 1, 603–612. <https://doi.org/10.5194/soil-1-603-2015>
- Olivera Vicedo, D., De Mello Prado, R., Martínez, C.A., Habermann, E., De Cássia Piccolo, M., 2019. Short-term warming and water stress affect *Panicum maximum* Jacq. stoichiometric homeostasis and biomass production. *Science of The Total Environment* 681, 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.108>
- ONB, 2022. Importance accordée par les Français aux problèmes de biodiversité [WWW Document]. naturefrance. URL <http://naturefrance.fr/indicateurs/importance-accordee-par-les-francais-aux-problemes-de-biodiversite> [accessed 7.18.24].
- ONF, 2024. Changement climatique et dépérissement: pourquoi il faut agir en forêt? [WWW Document]. Office national des forêts. URL <https://www.onf.fr/onf/+1544::deperissements-et-changement-climatique.html> [accessed 8.14.24].
- P1, 2023. Entretien semi-directif - Producteur semencier n°1. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d’Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- P2, 2023. Entretien semi-directif - Producteur semencier n°2. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d’Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- P3, 2023. Entretien semi-directif - Producteur semencier n°3. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d’Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- Pal, R.W., Chen, S., Nagy, D.U., Callaway, R.M., 2015. Impacts of *Solidago gigantea* on other species at home and away. *Biological Invasions* 17, 3317–3325. <https://doi.org/10.1007/s10530-015-0955-7>

## REFERENCES

- Parlement Européen, 2024. Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on nature restoration and amending Regulation (EU) 2022/869.
- Pedrini, S., Dixon, K.W., 2020. International principles and standards for native seeds in ecological restoration. *Restoration Ecology* 28. <https://doi.org/10.1111/rec.13155>
- Pejchar, L., Mooney, H.A., 2009. Invasive species, ecosystem services and human well-being. *Trends in Ecology & Evolution* 24, 497–504. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.016>
- Petryk, S., Bosmajian III, G., 1975. Analysis of flow through vegetation. *Journal of the Hydraulics Division* 101, 871–884. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004397>
- Pielou, E.C., 1966. The Measurement of Diversity in Different Types of Biological Colledions.
- Piepho, H., 2018. Letters in Mean Comparisons: What They Do and Don't Mean. *Agronomy Journal* 110, 431–434. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.10.0580>
- Pin, C., 2023. L'entretien semi-directif. LIEPP Fiche méthodologique n°3.
- Pinaya, I., Soto, B., Arias, M., Diaz-Fierros, F., 2000. Revegetation of burnt areas: relative effectiveness of native and commercial seed mixtures. *Land Degrad. Dev.* 11, 93–98. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-145X\(200001/02\)11:1<93::AID-LDR380>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-145X(200001/02)11:1<93::AID-LDR380>3.0.CO;2-U)
- Portsmuth, A., Niinemets, Ü., 2006. Interacting controls by light availability and nutrient supply on biomass allocation and growth of *Betula pendula* and *B. pubescens* seedlings. *Forest Ecology and Management* 227, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.02.020>
- Pyšek, P., Pyšek, A., 1995. Invasion by *Heracleum mantegazzianum* in different habitats in the Czech Republic. *J Vegetation Science* 6, 711–718. <https://doi.org/10.2307/3236442>
- R Core Team, 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Raup, D.M., Sepkoski, J.J., 1982. Mass Extinctions in the Marine Fossil Record. *Science* 215, 1501–1503. <https://doi.org/10.1126/science.215.4539.1501>
- Renard, A., 2014. Le paysage en semis.
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., Muys, B., 2007. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees* 21, 385–402. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0132-4>
- Reygrobelle, M.B., 2007. La nature dans la ville, Les éditions des Journaux officiels. ed, Avis et rapports du conseil économique et social. Les éditions des Journaux officiels.
- Richardson, D.M., Forsyth, G.G., Macdonald, I.A.W., 1989. Reductions in Plant Species Richness under Stands of Alien Trees and Shrubs in the Fynbos Biome. *South African Forestry Journal* 149, 1–8. <https://doi.org/10.1080/00382167.1989.9628986>
- Richardson, D.M., Py, P., Rejmánek, M., Barbour, M.G., Panetta, F.D., West, C.J., 2000. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distributions*.
- Rivière, S., Provendier, D., Malaval, S., Sanson, B., Gourvil, J., Albert, A., Millet, J., 2022. Structuring supply chains of native plant material of wild and local provenance in France: A contribution to ecological restoration and Nature-based solutions. *Nature-Based Solutions* 2, 100035. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100035>
- Rodríguez-Loinaz, G., Onaindia, M., Amezcaga, I., Mijangos, I., Garbisu, C., 2008. Relationship between vegetation diversity and soil functional diversity in native mixed-oak forests. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.04.015>
- Rogers, D.L., Montalvo, A.M., 2004. Genetically Appropriate Choices for Plant Materials to Maintain Biological Diversity.
- Román-Palacios, C., Wiens, J.J., 2020. Recent responses to climate change reveal the drivers of species extinction and survival. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117, 4211–4217. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913007117>

## REFERENCES

- Root, R.A., 1971. Selected aspects of the ecophysiology of *Solidago canadensis*: the phytotoxicity of the species and its role in old-field ecosystems. [Ph.D. Dissertation]. Miami University, Oxford, Ohio.
- Rydgren, K., Jørn-Frode, N., Ingvild, A., Inger, A., Einar, H., 2010. Recreating semi-natural grasslands: A comparison of four methods. *Ecological Engineering* 36, 1672–1679. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.07.005>
- Sackville Hamilton, N.R., 2001. Is local provenance important in habitat creation? A reply: *Local provenance and habitat creation*. *Journal of Applied Ecology* 38, 1374–1376. <https://doi.org/10.1046/j.0021-8901.2001.00670.x>
- Saltonstall, K., 2002. Cryptic invasion by a non-native genotype of the common reed, *Phragmites australis*, into North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, 2445–2449. <https://doi.org/10.1073/pnas.032477999>
- Sartz, R.S., 1972. Effect of topography on microclimate in southwestern Wisconsin. North Central Forest Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture. 74.
- Scharfy, D., Eggenschwiler, H., Olde Venterink, H., Edwards, P.J., Güsewell, S., 2009. The invasive alien plant species *Solidago gigantea* alters ecosystem properties across habitats with differing fertility. *J Vegetation Science* 20, 1072–1085. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01105.x>
- Scherer-Widmer, M., 2001. Dune Revegetation with Native Species of *Restinga* on the Southern Coast of Brazil. *JOURNAL OF COASTAL RESEARCH* 593–596.
- Schmidt, A., Kirmer, A., Hellwig, N., Kiehl, K., Tischew, S., 2022. Evaluating CAP wildflower strips: High-quality seed mixtures significantly improve plant diversity and related pollen and nectar resources. *Journal of Applied Ecology* 59, 860–871. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14102>
- Schmidt, A., Kirmer, A., Kiehl, K., Tischew, S., 2020. Seed mixture strongly affects species-richness and quality of perennial flower strips on fertile soil. *Basic and Applied Ecology* 42, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2019.11.005>
- Schoener, T.W., 1983. Field Experiments on Interspecific Competition. *The American Naturalist* 122, 240–285. <https://doi.org/10.1086/284133>
- Scotton, M., Andreatta, D., 2021. Anti-erosion rehabilitation: Effects of revegetation method and site traits on introduced and native plant cover and richness. *Science of The Total Environment* 776, 145915. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145915>
- Seiler, A., Rosell, C., Van Der Ree, R., Wagner, P.J., Grilo, C., Guinard, E., Van Der Grift, E., Cramer, P.C. [Eds.], 2019. Integrating Transport Infrastructures with Living Landscapes, *Frontiers Research Topics*. Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/978-2-88945-990-2>
- Sgrò, C.M., Lowe, A.J., Hoffmann, A.A., 2011. Building evolutionary resilience for conserving biodiversity under climate change. *Evolutionary Applications* 4, 326–337. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00157.x>
- Simon, A., Collison, A., 2001. Scientific basis for streambank stabilization using riparian vegetation, in: *Proceedings of the 7th Federal Interagency Sedimentation Conference*. pp. 47–54.
- Singh, A., Zeng, D., Chen, F., 2005. Heavy metal concentrations in redeveloping soil of mine spoil under plantations of certain native woody species in dry tropical environment, India. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES* 17, 168–174.
- Singh, S., 2018. Understanding the role of slope aspect in shaping the vegetation attributes and soil properties in Montane ecosystems.

## REFERENCES

- SKEW, 2009. Empfehlungen für den Anbau und die Verwendung von Pflanz- und Saatgut einheimischer Wildpflanzen.
- Smith, A.P., 1969. The effect of goldenrod and asters on germination and growth of oldfield herbs [M.Sc. Thesis]. Duke University, Durham, N.C.
- Soanes, K., Rytwinski, T., Fahrig, L., Huijser, M.P., Jaeger, J.A.G., Teixeira, F.Z., Van Der Ree, R., Van Der Grift, E.A., 2024. Do wildlife crossing structures mitigate the barrier effect of roads on animal movement? A global assessment. *Journal of Applied Ecology* 61, 417–430. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14582>
- Soper, J.M., 2019. Evaluating Composition and Conservation Value of Roadside Plant Communities in a Grassland Biome. *Environmental Management* 16. <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01154-x>
- Spooner, P.G., Lunt, I.D., 2004. The influence of land-use history on roadside conservation values in an Australian agricultural landscape. *Aust. J. Bot.* 52, 445. <https://doi.org/10.1071/BT04008>
- Staab, K., Yannelli, F.A., Lang, M., Kollmann, J., 2015. Bioengineering effectiveness of seed mixtures for road verges: Functional composition as a predictor of grassland diversity and invasion resistance. *Ecological Engineering* 84, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.07.016>
- Steinfeld, D., Kern, J., Gallant, G., Riley, S., 2011. Monitoring roadside revegetation projects. *Native Plants Journal* 12, 269–275. <https://doi.org/10.3368/npj.12.3.269>
- Stephan, A., Meyer, A.H., Schmid, B., 2000. Plant diversity affects culturable soil bacteria in experimental grassland communities. *Journal of Ecology* 88, 988–998. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00510.x>
- Sterzyńska, M., Shrubovych, J., Nicia, P., 2017. Impact of plant invasion (*Solidago gigantea* L.) on soil mesofauna in a riparian wet meadows. *Pedobiologia* 64, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2017.07.004>
- Sun, J.F., Liao, Y.L., Zhang, W.W., Zhang, H., Wang, X.Y., Chen, J.H., Huang, P., Dai, Z.C., Du, D.L., 2017. Allelopathic effects of *Solidago canadensis* L. between the leaf litter and green leaf. *ALLELOPATHY JOURNAL* 41, 189–200.
- Temple, D.M., 1982. Flow retardance of submerged grass channel linings. *Transactions of the ASAE* 25, 1300–1303. <https://doi.org/10.13031/2013.33717>
- Ten Kate, K., Von Hase, A., Maguire, P., 2018. Principles of the Business and Biodiversity Offsets Programme, in: Wende, W., Tucker, G.-M., Quétier, F., Rayment, M., Darbi, M. [Eds.], *Biodiversity Offsets*. Springer International Publishing, Cham, pp. 17–26. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72581-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72581-9_3)
- Tengbeh, G.T., 1993. The effect of grass roots on shear strength variations with moisture content. *Soil Technology* 6, 287–295. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(93\)90017-9](https://doi.org/10.1016/0933-3630(93)90017-9)
- Thomas, J., El-Sheikh, M.A., Alfarhan, A.H., Alatar, A.A., Sivadasan, M., Basahi, M., Al-Obaid, S., Rajakrishnan, R., 2016. Impact of alien invasive species on habitats and species richness in Saudi Arabia. *Journal of Arid Environments* 127, 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.10.009>
- Thomson, J.R., Moilanen, A.J., Vesik, P.A., Bennett, A.F., Mac Nally, R., 2009. Where and when to revegetate: a quantitative method for scheduling landscape reconstruction. *ECOLOGICAL APPLICATIONS* 19, 817–828. <https://doi.org/10.1890/08-0915.1>
- Thornes, J.B., 1985. The ecology of erosion. *Geography* 222–235. <https://doi.org/10.1177/0309133310367548>

## REFERENCES

- Tikka, P.M., Koski, P.S., Kivelä, R.A., Kuitunen, M.T., 2000. Can grassland plant communities be preserved on road and railway verges? *Applied Vegetation Science* 3, 25–32. <https://doi.org/10.2307/1478915>
- Tilman, D., 1994. Competition and Biodiversity in Spatially Structured Habitats. *Ecology* 75, 2–16. <https://doi.org/10.2307/1939377>
- Tilman, D., Clark, M., Williams, D.R., Kimmel, K., Polasky, S., Packer, C., 2017. Future threats to biodiversity and pathways to their prevention. *Nature* 546, 73–81. <https://doi.org/10.1038/nature22900>
- Tinsley, M.J., Simmons, M.T., Windhager, S., 2006. The establishment success of native versus non-native herbaceous seed mixes on a revegetated roadside in Central Texas. *Ecological Engineering* 26, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.10.004>
- Tormo, J., Bochet, E., García-Fayos, P., 2007. Roadfill Revegetation in Semiarid Mediterranean Environments. Part II: Topsoiling, Species Selection, and Hydroseeding. *Restoration Ecology* 15, 97–102. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00194.x>
- Tormo, J., García-Fayos, P., Bochet, E., 2008. Relative importance of plant traits and ecological filters in road embankment revegetation under semiarid Mediterranean conditions. *Ecological Engineering* 33, 258–264. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.05.002>
- Tourjansky-Cabart, L., Galtier, B., 2006. La biodiversité dans les projets d'aménagement. *Responsabilité et Environnement*.
- Tribunal administratif de Strasbourg, 2023. Communiqué de presse du 23 Février 2023.
- USDA Natural Resources Conservation Service, 2014. Pollinator biology and habitat. Illinois Biology Technical Note No. 23.
- Vander Mijnsbrugge, K., Bischoff, A., Smith, B., 2010. A question of origin: Where and how to collect seed for ecological restoration. *Basic and Applied Ecology* 11, 300–311. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2009.09.002>
- Vanpeene, S., 2018. Analyse de la gestion de la végétation des dépendances routières : revue systématique.
- Vaughn, K., Porensky, L., Doshi, M., Balachowski, J., Zefferman, E., Riginos, C., Young, T., 2010. Restoration Ecology. *Nature Education Knowledge* 1, 66.
- Végétal local, 2023a. Référentiel technique associé au règlement d'usage de la marque collective simple.
- Végétal local, 2023b. Règlementation sur la commercialisation des semences de plantes sauvages - Note technique.
- Végétal local, 2022. Règlement d'usage de la marque collective simple Végétal local.
- Végétal local, 2019. Une marque au service de la nature | Végétal local [WWW Document]. URL <https://www.vegetal-local.fr/> [accessed 8.9.24].
- Vinci, 2024. Ambition environnementale - Environnement - Développement durable [WWW Document]. URL <https://www.vinci.com/vinci.nsf/fr/item/decouvrir-ambition-environnementale-groupe.htm> [accessed 7.13.24].
- Vinci, 2023. Document d'enregistrement universel - Vinci.
- Vinci, 2021. Œuvrer pour un monde durable - Document d'enregistrement universel.
- Vinci, 2020. Lignes directrices environnementales.
- Vinci Autoroutes, 2024. Les sociétés de VINCI Autoroutes [WWW Document]. URL <https://corporate.vinci-autoroutes.com/fr/presentation/societes-vinci-autoroutes> [accessed 9.6.24].
- VL1, 2023. Entretien semi-directif - Acteur de la marque Végétal Local n°1. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d'Anaël Mayeur et Armelle Mazé.



## REFERENCES

- VL2, 2023. Entretien semi-directif - Acteur de la marque Végétal Local n°2. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d'Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- VL3, 2023. Entretien semi-directif - Acteur de la marque Végétal Local n°3. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d'Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- VL4, 2023. Entretien semi-directif - Acteur de la marque Végétal Local n°4. Mené par John Barckley Gabriel sous la supervision d'Anaël Mayeur et Armelle Mazé.
- Von Der Lippe, M., Kowarik, I., 2007. Long-Distance Dispersal of Plants by Vehicles as a Driver of Plant Invasions. *Conservation Biology* 21, 986–996. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00722.x>
- Von Holle, B., Simberloff, D., 2004. Testing Fox's assembly rule: does plant invasion depend on recipient community structure? *Oikos* 105, 551–563. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2004.12597.x>
- Walker, E.A., Hermann, J.-M., Kollmann, J., 2015. Grassland restoration by seeding: seed source and growth form matter more than density. *Appl Veg Sci* 18, 368–378. <https://doi.org/10.1111/avsc.12153>
- Walker, K., Hodder, K.H., Bullock, J.M., Pywell, R.F., 2004. A review of the potential effects of seed sowing for habitat re-creation on the | | | conservation of intraspecific biodiversity. Department for environment, food and rural affairs 94.
- Wang, B., Zhu, Y., Chen, X., Chen, D., Wu, Y., Wu, L., Liu, S., Yue, L., Wang, Y., Bai, Y., 2022. Even short-term revegetation complicates soil food webs and strengthens their links with ecosystem functions. *Journal of Applied Ecology* 59, 1721–1733. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14180>
- Wang, X., Liu, Y., Zeng, G., Chai, L., Xiao, X., Song, X., Min, Z., 2008. Pedological characteristics of Mn mine tailings and metal accumulation by native plants. *CHEMOSPHERE* 72, 1260–1266. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.05.001>
- Watson, C.D., Gardner, M.G., Hodgson, R.J., Liddicoat, C., Peddle, S.D., Breed, M.F., 2022. Global meta-analysis shows progress towards recovery of soil microbiota following revegetation. *Biological Conservation* 272, 109592. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109592>
- Watterlot, A., Levy, V., Buchet, J., Toussaint, B., 2015. Les solidages américains. CBNBL.
- Werner, P.A., Gross, R.S., Bradbury, I.K., 1980. The biology of canadian weeds: *Solidago canadensis* L. *Can. J. Plant Sci.* 60, 1393–1409. <https://doi.org/10.4141/cjps80-194>
- Whittaker, R.H., 1977. Evolution of species diversity in land communities. *Evolutionary Biology* 1–67.
- Whittaker, R.H., Sondheimer, E., Simeone, J.B., 1970. The biochemical ecology of higher plants. *Chemistry and Ecology* 43–70.
- Wigginton, S.K., Meyerson, L.A., 2018. Passive Roadside Restoration Reduces Management Costs and Fosters Native Habitat. *Ecological Rest.* 36, 41–51. <https://doi.org/10.3368/er.36.1.41>
- Wischmeier, W.H., 1975. Estimating the soil loss equation's cover and, in: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources: Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Miss., Agricultural Research Service, US Department of Agriculture. p. 118.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Department of Agriculture, Science and Education Administration.

## REFERENCES

- Yang, J., El-Kassaby, Y.A., Guan, W., 2020. The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountainous dry valley, Southwest China. *Sci Rep* 10, 16465. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73496-0>
- Young, S.L., Barney, J.N., Kyser, G.B., Jones, T.S., DiTomaso, J.M., 2009. Functionally Similar Species Confer Greater Resistance to Invasion: Implications for Grassland Restoration. *Restoration Ecology* 17, 884–892. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00448.x>



Illustration 18 : Anaël Mayeur – « *Après la pluie...* » – Crédits : Gaëtan Soerensen