



Tapis vert – végétalisation ciblée des banquettes et des abords de voies

Rapport final 2018-2024

Markus van der Meer¹, Patrice Prunier², Julie Steffen², Laurent Huber², Fabienne Mörch², Pierre-André Frossard², Serge Buholzer¹

¹ Agroscope, Zurich-Reckenholz

² HEPIA, Jussy

Mandant

SBB CFF FFS





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

Autres partenaires



Otto
Hauenstein
Samen



Impressum

Éditeur	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zurich www.agroscope.ch
Renseignements	Serge Buholzer, serge.buholzer@agroscope.admin.ch
Traduction	Service linguistique Agroscope
Photos	Sauf autre indication: Serge Buholzer, Markus van der Meer
Photo de couverture	Markus van der Meer
Téléchargement	www.agroscope.ch/science
Copyright	© Agroscope 2025
ISSN	AS: 2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as204f

Exclusion de responsabilité:

Les informations contenues dans cette publication sont destinées uniquement à l'information des lectrices et lecteurs. Agroscope s'efforce de fournir des informations correctes, actuelles et complètes, mais décline toute responsabilité à cet égard. Nous déclinons toute responsabilité pour d'éventuels dommages en lien avec la mise en œuvre des informations contenues dans les publications. Les lois et dispositions légales en vigueur en Suisse s'appliquent aux lectrices et lecteurs; la jurisprudence actuelle est applicable.

Table des matières

Résumé	5
Summary	6
Zusammenfassung	7
Riassunto	8
1 Introduction	9
1.1 Contexte	9
1.2 Hypothèses	9
1.3 Faisabilité et dispositif d'essai	10
1.4 Aperçu des mélanges	11
1.5 Aperçu des sites	12
2 Observations relatives aux paramètres des sites	14
2.1 Substrats utilisés aux abords des voies ferrées	14
2.2 La substance organique des substrats	14
2.3 Les températures du substrat	15
2.3.1 Résultats des mesures de la température de l'air et du sol	15
2.3.2 Discussion sur les mesures de température du sol	17
2.3.3 Conclusions relatives aux mesures de la température du sol	18
2.4 Répartition des précipitations	18
2.4.1 Évaluation des données climatiques	18
2.4.2 Conclusions relatives aux données climatiques	18
2.5 Bilan: un environnement hostile	19
3 Les essais de germination en chambre de culture	20
3.1 Objectif	20
3.2 Méthode expérimentale	20
3.2.1 Observations première partie – températures élevées 19 °C	21
3.2.2 Observations deuxième partie – températures basses 10 - 13 °C	21
3.3 Résultats de l'expression des mélanges	21
3.4 Discussion des résultats	23
3.5 Conclusion des essais en chambre de culture	23
4 Les essais des mélanges en plein air	25
4.1 Méthodes	25
4.1.1 Méthode de suivi de la végétation	25
4.1.2 Méthode d'analyse des données	25
4.1.3 Cas particulier: le design du site ex situ de Lullier	26
4.2 Résultats	28
4.2.1 La réaction des mélanges: l'expression sur les sites	28
4.2.2 La réaction des mélanges: analyses du recouvrement et de la composition floristique sur l'ensemble des sites	44
4.3 Bilan de l'expression	55
5 Extensions du projet	58
5.1 Nattes de sedum	58

5.2	Du relevé des bryophytes à Cousset et Le Landeron à leur intégration dans les semis ?	58
5.3	Essai de synergie à Seebach	60
6	Espèces problématiques: potentiel d'éviction des mélanges	62
6.1	Espèces problématiques	62
6.2	Situation in situ	63
6.3	Bilan du potentiel d'éviction	63
7	Sécurité au travail.....	64
7.1	Questions liées à la sécurité	64
8	Biodiversité et paysage	65
8.1	Promotion de la biodiversité	65
8.2	Effets sur le paysage	66
9	Conclusions	68
10	Perspectives – Mise en pratique.....	69
11	Bibliographie.....	71
12	Liste des figures	75
13	Liste des tableaux	76
14	Annexes.....	77

Résumé

Contexte: Le réseau ferroviaire suisse s'étend sur environ 5300 kilomètres et compte parmi les réseaux les plus denses au monde. Chaque jour, ce ne sont pas moins de 1,2 million de passagers et 1 million de tonnes de marchandises qui sont transportés par le train. Les exigences en matière de sécurité et de fonctionnement de l'infrastructure ferroviaire sont énormes, compte tenu de la densité de l'horaire et présupposent des normes élevées et des contrôles réguliers. Jusqu'à récemment, la plupart des voies ferrées étaient donc maintenues exemptes de toute végétation sur l'ensemble du réseau suisse grâce à des applications ciblées d'herbicides. Les préoccupations environnementales émergentes et en particulier les discussions sur les risques environnementaux et sanitaires de la substance active des herbicides utilisés, le «glyphosate», ont conduit les exploitants ferroviaires à adapter leurs pratiques. Les Chemins de Fer Fédéraux (CFF), la plus grande entreprise ferroviaire de Suisse, ont donc décidé de réduire la quantité d'herbicides utilisée grâce à une application différenciée par plante et, avec un plan d'action «NoHerbie – Alternatives aux herbicides», de mettre en place des mesures technico-structurelles et thermo-mécaniques permettant de renoncer aux herbicides chimiques de synthèse.

Méthodologie: En collaboration avec la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (Hepia), Agroscope a étudié dans le cadre du projet « Tapis vert » (2018-2024) dans quelle mesure la végétalisation ciblée des banquettes et des abords de voies pouvait remplacer les herbicides chimiques comme le glyphosate. L'objectif était d'implanter une couverture végétale qui évince les plantes problématiques, garantit la sécurité de l'infrastructure ferroviaire et favorise la biodiversité. Cinq mélanges de graines de plantes différents ont été testés sur six sites d'essai (des banquettes et des entre-voies) en Suisse et en France ainsi que sur un toit plat. Les mélanges ont été semés sur différents supports en gravier.

Résultats: L'essai a permis de montrer quelles espèces ou quels mélanges se prêtent le mieux à la végétalisation des entre-voies et des abords de voies. La teneur en matière organique, qui ne s'accumule que lentement au fil des ans sur les sols recouverts de gravier très pauvres, est importante pour la réussite de l'implantation. Deux mélanges, un mélange polyvalent (TV2) et un mélange rudéral (RR), ont atteint après cinq ans, sur un substrat de sol approprié, une couverture moyenne du sol de plus de 70% avec des espèces semées et spontanées. Les mélanges permettent d'augmenter la diversité des espèces de cinq espèces en moyenne. Le taux de couverture par des plantes problématiques est resté faible pendant la période d'essai. Il dépend fortement de l'environnement - des espèces grimpantes provenant des talus situés à proximité et des espèces dispersées par le vent ont notamment pu s'implanter. Les espèces présentes dans les mélanges utilisés ont satisfait aux exigences en matière de sécurité. Un « tapis vert » en bordure de voie peut certes être mis en place avec succès, mais il ne réduira guère les frais d'entretien.

Conclusion: La végétalisation des abords de voies est une alternative réaliste à l'utilisation d'herbicides. Les résultats obtenus constituent une base pour mettre en place des alternatives plus écologiques dans l'entretien des voies ferrées, mais ils nécessitent une optimisation à long terme et entraîneront également des coûts d'entretien. Les approches futures pourraient inclure la combinaison de stratégies à la fois mécaniques, chimiques et biologiques afin d'atteindre une durabilité optimale.

Summary

Background: The Swiss rail network covers 5,300 kilometres and is one of the densest rail networks in the world. It carries up to 1.2 million passengers and 1 million tonnes of freight each day. This tight scheduling places enormous demands on the rail infrastructure in terms of safety and functionality and requires high standards and regular inspections. Until recently, targeted herbicide applications were very extensively used to keep the railway tracks and surrounding areas free from vegetation. Growing environmental concerns and more specifically, discussions about the environmental and health risks associated with the herbicide active substance glyphosate, have caused rail operators to rethink their approach. As the largest rail operator in Switzerland, the Swiss Federal Railways (SBB) have decided to reduce the amount of herbicide used by targeting individual plants and to investigate mechanical and thermal measures to replace synthetic herbicides through the Alternatives to Herbicide Action Plan.

Methodology: Agroscope together with the *Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève* (HEPIA) launched the *Grüner Teppich* (Green Carpet) project (2019–2023) to investigate whether the targeted greening of verges and peripheral areas could replace the use of chemical herbicides like glyphosate. The aim was to establish a vegetation cover that suppressed problem plants, maintained the safety of rail infrastructure and promoted biodiversity. Five different plant seed mixes were tested on verges and areas between the tracks at six locations in France and Switzerland and one site on a flat roof. The seeds were sown on different gravel substrates.

Results: The trial was able to show which species and mixes are suitable for greening the verges and areas between the tracks. Critical to successful establishment is the organic matter content, which takes a number of years to accumulate in the very poor gravelly soils. After five years on a suitable soil substrate, two mixes – a polyvalent (TV2) and a ruderal mix (RR) – achieved an average soil cover of more than 70% comprising sown and spontaneously seeded species. Species diversity increased by five species on average after the sowings. The percentage cover of problem plants remained low throughout the study period. This is heavily dependent on environmental factors – with scrambling and trailing species from adjacent embankments and species dispersed by the wind able to become established. The species in the seed mixes met the requirements for safety. A 'green carpet' can be successfully created at the edges of the track but will do little to reduce track-side maintenance.

Conclusions: Track-side greening is a realistic alternative to the use of herbicides. The results provide a basis for greener track maintenance options. However, they need optimisation in the long term and will themselves require a certain level of upkeep. Future approaches could involve a combination of mechanical, chemical and biological strategies to ensure optimal sustainability.

Zusammenfassung

Hintergrund: Das Schweizer Schienennetz umfasst etwa 5'300 Kilometer und gehört zu den am dichtesten ausgebauten Schienennetzen der Welt. Täglich werden bis zu 1.2 Mio. Passagiere und 1 Mio. Tonnen Güter transportiert. Die Ansprüche an die Bahninfrastruktur bezüglich Sicherheit und Funktionsfähigkeit im dichten Fahrplan sind enorm und bedingen hohe Standards und regelmässige Kontrollen. Bis in die jüngere Vergangenheit wurden deshalb die Bahnanlagen mittels gezielter Herbizidanwendungen möglichst flächendeckend frei von jeglichen Pflanzen gehalten. Aufkommende Umweltbedenken und insbesondere die Diskussionen über die Umwelt- und Gesundheitsrisiken des eingesetzten Herbizid-Wirkstoffs 'Glyphosat' haben zu einer Praxisanpassung bei den Bahnbetreibern geführt. Die Schweizerische Bundesbahnen (SBB) haben als grösstes Bahnunternehmen in der Schweiz deshalb entschieden, die eingesetzte Herbizidmenge dank differenzierter Einzelpflanzenapplikation zu reduzieren und mit einem Aktionsplan «NoHerbie – Alternativen zu Herbiziden» nach technisch-baulichen und mechanisch-thermischen Massnahmen für einen Verzicht auf chemisch synthetische Herbizide zu suchen.

Methodik: Agroscope untersuchte zusammen mit der Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (HEPIA) im Projekt „Grüner Teppich“ (2019–2023), ob die gezielte Begrünung von Banketten und Gleisrandbereichen chemische Herbizide wie Glyphosat ersetzen können. Ziel war die Etablierung einer Vegetationsdecke, die Problempflanzen verdrängt, die Sicherheit der Bahninfrastruktur gewährleistet und die Biodiversität fördert. Es wurden 5 verschiedene Pflanzensamenmischungen an 6 Standorten auf Banketten und Zwischengleisbereichen in der Schweiz und in Frankreich und an einem Standort auf einem Flachdach getestet. Die Ansaaten erfolgten auf verschiedenen Kiesunterlagen.

Resultate: Im Versuch konnte gezeigt werden, welche Arten bzw. Mischungen sich für die Begrünung von Zwischen- und Gleisrandbereichsflächen eignen. Für die erfolgreiche Etablierung ist der Gehalt an organischer Substanz, die sich erst im Laufe der Jahre auf den sehr mageren Kiesböden ansammelt, von grosser Bedeutung. Zwei Mischungen, eine polyvalente (TV2) und eine ruderale Mischung (RR), erreichten nach fünf Jahren auf geeignetem Bodensubstrat eine mittlere Bodenbedeckung von mehr als 70 % mit gesäten und spontan aufkommenden Arten. Mit der Ansaat der Mischungen wird die Artenvielfalt durchschnittlich um 5 Arten erhöht. Der Deckungsanteil an Problempflanzen blieb während der Untersuchungsperiode gering. Er hängt stark von der Umgebung ab – insbesondere rankende Arten aus angrenzenden Böschungen und vom Wind verbreitende Arten konnten sich ansiedeln. Die Arten in den eingesetzten Samenmischungen erfüllten die Ansprüche an die Sicherheit. Ein 'Grüner Teppich' im Gleisrandbereich kann erfolgreich angelegt werden, aber er wird den Unterhaltsaufwand kaum reduzieren.

Schlussfolgerung: Die Begrünung im Gleisrandbereich ist eine realistische Alternative zur Herbizidanwendung. Die Ergebnisse bieten eine Grundlage für ökologischere Alternativen im Bahnunterhalt, sie erfordern jedoch eine langfristige Optimierung und werden auch Pflegeaufwand verursachen. Zukünftige Ansätze könnten die Kombination von mechanischen, chemischen und biologischen Strategien umfassen, um eine optimale Nachhaltigkeit zu erreichen.

Es liegt eine deutschsprachige Vollversion dieser Publikation vor.

Riassunto

Contesto: La rete ferroviaria svizzera si estende per circa 5300 chilometri ed è una delle più sviluppate del mondo. Ogni giorno trasporta fino a 1,2 milioni di passeggeri e un milione di tonnellate di merci. I requisiti di sicurezza e funzionalità dell'infrastruttura ferroviaria, in presenza di una tabella oraria intensa, sono enormi e richiedono standard elevati e controlli regolari. Per questo motivo, fino a poco tempo fa, si faceva ricorso a trattamenti mirati con erbicidi per mantenere l'infrastruttura ferroviaria libera dalla vegetazione. Di fronte alle crescenti preoccupazioni ambientali e in particolare alle discussioni sui rischi ambientali e sanitari legati al glifosato, un principio attivo erbicida, gli operatori ferroviari hanno rivisto le loro pratiche. Le Ferrovie federali svizzere (FFS), la più compagna ferroviaria del Paese, hanno quindi deciso di ridurre l'uso di erbicidi tramite un impiego selettivo sulle singole specie vegetali e, con il piano d'azione «NoHerbie – alternative agli erbicidi», di ricorrere a misure tecniche/strutturali e meccaniche/termiche per evitare l'uso di erbicidi chimici di sintesi.

Metodologia: Nell'ambito del progetto «Grüner Teppich» (2019–2023), condotto in collaborazione con l'Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (HEPIA), Agroscope ha analizzato se il rinverdimento mirato dei bordi delle massicciate e delle fasce laterali dei binari potesse costituire un'alternativa efficace agli erbicidi chimici come il glifosato. L'obiettivo era creare una copertura vegetale capace di eliminare le piante problematiche, garantire la sicurezza dell'infrastruttura ferroviaria e favorire la biodiversità. In 6 località in Svizzera e Francia sono state testate 5 diverse miscele di sementi di piante sui bordi delle massicciate e sulle intervie dei binari, mentre in una località il test è stato eseguito su un tetto piano. La semina è avvenuta su diversi substrati in ghiaia.

Risultati: Il test ha permesso di individuare quali specie e miscele di sementi risultano più adatte per il rinverdimento delle intervie e dei bordi delle massicciate. Perché il rinverdimento abbia successo, è fondamentale il contenuto di sostanza organica, che nei terreni ghiaiosi molto poveri si accumula solo nel corso di più anni. Due miscele, una polivalente (TV2) e una ruderale (RR), hanno raggiunto una copertura media del suolo di oltre il 70 % dopo cinque anni, includendo sia le specie seminate che quelle spontanee, su un substrato adatto. La semina delle miscele consente in media un incremento della biodiversità pari a cinque specie. Durante il periodo del test, la copertura da parte di piante infestanti è rimasta bassa. Tuttavia, essa dipende molto dall'ambiente circostante: in particolare, sono riuscite a insediarsi specie rampicanti provenienti dai terrapieni vicini e specie trasportate dal vento. Le specie contenute nelle miscele di sementi utilizzate rispettavano i requisiti di sicurezza. Realizzare un «tappeto verde» nell'area adiacente ai binari è possibile, ma difficilmente questo potrà ridurre in modo significativo gli oneri di manutenzione.

Conclusioni: L'inverdimento delle aree adiacenti ai binari rappresenta una valida alternativa all'impiego di erbicidi. I risultati ottenuti offrono una base per sviluppare soluzioni più ecologiche nella manutenzione ferroviaria, ma richiedono ottimizzazioni a lungo termine e comportano oneri di manutenzione. Gli approcci futuri potrebbero includere una combinazione di strategie meccaniche, chimiche e biologiche per ottenere una sostenibilità ottimale.

1 Introduction

1.1 Contexte

Dans le domaine du transport ferroviaire, une stratégie « zéro végétation » aux abords des voies a été suivie pendant des décennies, en premier lieu pour ne pas réduire la durée d'utilisation des voies, ne pas augmenter les coûts d'entretien et pour garantir la sécurité de l'exploitation ferroviaire. Il convient notamment de maintenir la stabilité des voies et le fonctionnement sans restriction de l'infrastructure ferroviaire (p. ex. aiguillages, signaux ou caténaires) et de garantir la sécurité du personnel ferroviaire et des passagers.

Au fil des décennies, les produits utilisés pour lutter contre la végétation sont passés des herbicides du sol à large spectre à des herbicides foliaires plus sélectifs et la quantité totale d'herbicides utilisés a globalement diminué ou est en baisse [1-4]. Le glyphosate est l'herbicide le plus utilisé au monde depuis le début des années 1990. Il est aujourd'hui, après l'interdiction de l'atrazine, le seul herbicide autorisé en Suisse sur les voies ferrées. Il a toutefois été soupçonné d'être cancérigène, ce qui a généré un vaste débat public, politique et scientifique sur le danger du glyphosate pour l'homme et l'environnement [5-7]. En novembre 2023, la Commission européenne a autorisé la poursuite de l'utilisation de cet herbicide à action systémique jusqu'en 2033, mais à certaines conditions [8].

De nombreuses entreprises ferroviaires dans le monde comptent parmi les plus grands consommateurs d'herbicides dans leur pays respectif. Elles sont donc intéressées par la recherche de méthodes de contrôle et d'entretien durables [9-15]. Dans le cadre de la controverse sur le glyphosate, la SNCF a par exemple volontairement renoncé à son utilisation dès le 1^{er} janvier 2022 et la Deutsche Bahn à partir de 2023 [16-19]. En 2018, les CFF ont lancé le plan d'action « Alternatives aux herbicides (NoHerbie) ». Dans le cadre de ce plan d'action, ils déploient de nombreux efforts pour promouvoir des alternatives et limiter au strict minimum l'utilisation de produits chimiques. Le glyphosate ne doit être si possible utilisé que dans des cas exceptionnels, par exemple pour des traitements ciblés sur certaines plantes. Dans la région «Centre», un projet pilote a été mené en 2023 et 2024 pour renoncer à l'utilisation d'herbicides et recourir à des mesures mécaniques de contrôle de la végétation. En outre, il est prévu de tolérer davantage de plantes le long des voies ferrées.

Tant les CFF que la SNCF ont mené des études et des essais sur le terrain pour tester des méthodes technico-structurelles, thermo-mécaniques et thermiques [20] ainsi que des herbicides alternatifs [21]. Dans le domaine des voies de rangement et des talus situés à proximité des voies, la SNCF utilise également avec succès la pâture par des moutons, des chèvres et des poneys [22, 23]. Fidèles à la devise «Prévenir plutôt que guérir», les deux entreprises ont également envisagé la végétalisation [24] au moins de certaines parties des voies. À notre connaissance, il s'agit des premiers essais de végétalisation menés par des entreprises ferroviaires aux abords des voies.

1.2 Hypothèses

Les objectifs suivants ont été définis:

Succès d'implantation du mélange d'espèces développé pour le projet: les espèces végétales indigènes semées en mélange s'implantent-elles avec succès sur les sites particuliers des abords des voies, spécialement des entre-voies et des banquettes ?

Question 1: Le semis a-t-il une influence sur le taux de couverture végétale ?

Hypothèse 1: Le semis a une influence significative sur le taux de couverture végétale.

Question 2: Parmi les mélanges semés, certains sont-ils plus recouvrant que d'autres dans le laps de temps du projet ?

Hypothèse 2: Le mélange TV2 composé d'un grand nombre d'espèces et issu d'une première série de test est le plus adapté.

Question 3: Quelle est la vitesse d'implantation des mélanges ?

Hypothèse 3: Le taux de couverture atteint au moins 50% en 5 ans, soit une progression d'environ 10% par an.

Question 4: Le semis a-t-il une influence sur la richesse en espèces florales ?

Hypothèse 4: Le semis a une influence sur la richesse spécifique d'espèces florales.

Question 5: Quelles sont les espèces semées et spontanées - problématiques ou non - qui se développent majoritairement ?

Hypothèse 5: Au vu d'expériences conduites sur les toitures végétalisées, les espèces ubiquistes telles que *Achillea millefolium*, *Anthyllis carpatica*, *Lotus corniculatus* et xérotolérantes telles que *Bromus erectus*, *Dianthus carthusianorum*, *Sedum* spp. se développent majoritairement.

Succès d'éviction des espèces problématiques généré par le mélange d'espèces développé pour le projet: en cas d'implantation réussie, les plantes indigènes inhibent-elles/suppriment-elles avec succès le développement de la végétation spontanée, en particulier des espèces indésirables et des néophytes envahissantes ?

Question 6: Quelles sont les incidences des semis sur le développement des espèces problématiques ?

Hypothèse 6: Le semis a une influence significative sur le recouvrement des espèces problématiques.

Question 7: Quelles espèces problématiques se développent le cas échéant ?

Hypothèse 7: Au vu des réactions sur les toitures et des observations directes, des espèces comme *Lactuca serriola*, *Chenopodium album*, *Erigeron annuus*, *Equisetum* spp, *Rubus* spp., s'implantent facilement le long des voies.

Question 8: Quels modes d'entretien sont à privilégier le cas échéant ?

Hypothèse 8: Il convient de faucher/broyer régulièrement.

Conditions de croissance du tapis végétal sur les banquettes CFF: les substratums frais et riches en matière organique sont-ils davantage favorables à l'implantation des végétaux ?

Question 9: Quelle est l'influence des facteurs environnementaux sur le recouvrement ?

Hypothèse 9: Les substratums épais et riches en matière organique et les pluies régulières sont davantage favorables à l'implantation des végétaux quels que soit leur origine.

Aspects de sécurité qui doivent être remplis pour un service ferroviaire sécurisé:

Question 10: Les aspects de sécurité sont-ils garantis en cas d'implantation réussie des mélanges d'espèces ?

Hypothèse 10: Les critères de sécurité de l'exploitation (bonne praticabilité, faible hauteur de croissance et profondeur des racines, pas de risque de trébucher, pas de restriction de la visibilité des signaux, garantie d'un drainage des voies) seront remplis si l'implantation des mélanges d'espèces est réussie.

1.3 Faisabilité et dispositif d'essai

Le projet de tester la végétalisation a été précédé par une étude de faisabilité réalisée par Agroscope pour le compte des CFF. Cette étude a permis de définir les conditions-cadre, les exigences en matière de végétalisation et le concept expérimental. Le rapport de l'étude de faisabilité [25] décrit ce processus en détail et contient une galerie de photos de différents sites (banquettes et abords de voies).

Les banquettes, les entre-voies, les chemins d'entretien et les zones périphériques ont été définis comme des zones potentielles pour la mise en œuvre d'une végétalisation en Suisse, car on y tolère davantage de végétation. Les voies et les zones de ballast doivent impérativement rester exemptes de végétation (fig. 1).

Afin de prévenir d'éventuels problèmes de sécurité pouvant rapidement survenir, une évaluation intermédiaire a été réalisée et publiée après les deux premières années d'essai [26]; cette évaluation décrit en détail la méthodologie du dispositif d'essai, les mélanges développés, les méthodes d'échantillonnage ainsi que les résultats des analyses de substrat, raison pour laquelle ces éléments ne sont décrits que sommairement dans ce rapport. En outre, certains compléments au projet ont été proposés et mis en œuvre au cours de son déroulement.

Dans le présent rapport, les résultats de l'ensemble de la période d'essai de 2019 à 2023 sont discutés et comparés aux résultats intermédiaires. Les résultats du complément de projet «Nattes de sedum» ne sont abordés que sommairement et publiés séparément [27]. Les essais ont eu lieu sur huit sites au total (voir paragraphe 1.4) dans différentes zones de voies. Les critères décisifs pour le choix des sites étaient la situation sur le Plateau, car c'est là que le réseau ferroviaire est le plus dense, l'accessibilité, la sécurité pour les personnes qui réalisent l'étude ainsi que des dimensions appropriées et un substrat de sol aussi homogène que possible.

Pendant l'essai, aucune mesure d'entretien n'était prévue, ni avec du glyphosate ni par fauchage ou sarclage. L'objectif était de pouvoir saisir l'évolution des mélanges semés et leur effet sur la végétation spontanée sans perturbation, ce qui a été possible à deux exceptions près. Sur un site, les mélanges semés ont été partiellement perturbés par des travaux de rénovation des voies ferrées et du ballast et, au cours de la dernière année d'essai, les parcelles d'essai ont été fauchées sur deux sites, contrairement aux accords passés avec le service d'entretien.

L'annexe 1 A-H donne un aperçu des procédés testés sur chaque site, des paramètres relevés et des incidents particuliers. Le tableau 1 résume le dispositif d'essai.

La stratégie d'essai a été développée et mise en œuvre en collaboration avec les CFF et plusieurs partenaires [Hepia, Info Flora, Coopérative fenaco (UFA Semences), Otto Hauenstein Semences (OHS)] [25, 28].

1.4 Aperçu des mélanges

Des espèces indigènes, répondant apparemment aux exigences en matière de sécurité et d'écologie, ont été identifiées [25]. Après avoir vérifié la disponibilité des semences, quatre mélanges ont été composés à partir d'écotypes indigènes de ces espèces. Tous les mélanges ont été semés à la volée (annexe 1 F). L'annexe 2 présente toutes les espèces utilisées et la composition des mélanges. Les relevés de végétation (densité et occurrence) ont été effectués chaque fois au printemps et/ou en automne. Les mélanges sont caractérisés et attribués, selon le modèle de Grime [29], à trois types de stratégie (c, r et s; fig. 2):

1. **RR:** Mélange composé de 21 espèces rudérales pionnières. Ce mélange s'inspire des associations végétales pionnières *Bromo-Erigeretum canadensis* (Knapp) Gutte 1961 et *Vulpietum myuri* Philippi 1973, qui se développent spontanément, mais de manière éphémère, sur des substrats fortement anthropisés. / Test sur cinq sites.
2. **SS:** Mélange de 23 espèces tolérant la sécheresse. Le modèle pour ce mélange est le *Xerobrometum erecti* Br.-Bl. 1915 em. 1931. Il s'agit d'une association semi-naturelle de pelouse sèche qui croît volontiers sur des substrats pierreux et filtrants. / Test sur cinq sites.

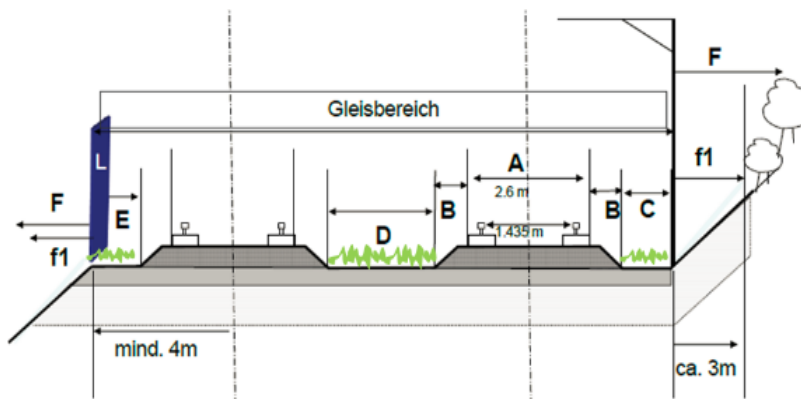


Figure 1: Abords des voies sur lesquels une végétalisation est possible.

A et B: ballast

C: Banquette / chemin d'accès pour le personnel (60 cm à > 100 cm)

D: Entre-voie / chemin d'accès

E: Banquette le long des murs anti-bruit (L) / voie de fuite pour les passagers

F: Talus

3. **CSR**: Mélange polyvalent composé de 36 espèces avec un large spectre écologique complété par des espèces pionnières dynamiques et tolérant le stress. Le modèle pour ce mélange est le *Mesobromion* Zoller 1954, qui forme une association de prairies moyennement sèches au pied du Jura et des Alpes. / Test sur 5 sites.
4. **CC**: Mélange de 22 espèces à haute compétitivité. Ce mélange s'inspire d'une association pour prairie très répandue sur le Plateau suisse, le *Trifolio-Lolion* Dietl 1983 ; toutefois, il pousse plutôt sur des sols bruns riches en éléments nutritifs. / Test sur cinq sites.
5. **TV2**, «Tapis vert 2^e génération»: Ce mélange a été créé en 2021 à partir des 46 espèces les plus performantes à ce jour parmi les quatre mélanges ci-dessus [26]. Sur le plan écologique, elle possède des propriétés ubiquistes qui lui permettent de s'adapter aux caractéristiques environnementales les plus diverses et de se développer rapidement; elle réagit donc avec souplesse aux conditions locales les plus variées. / Test sur sept sites.
6. **KT**: Placettes de contrôle non semées, sur lesquelles une végétation spontanée s'est établie.

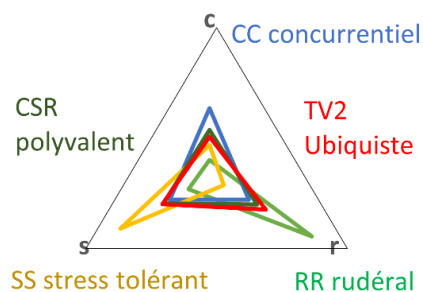


Figure 2: Triangle des stratégies écologiques primaires (d'après Grime et al.)

1.5 Aperçu des sites

Le projet global des CFF «Alternatives aux herbicides» a fixé un calendrier très serré pour les essais de végétalisation sur le terrain. Dans des conditions naturelles, le développement des communautés végétales visées avec les mélanges définis peut prendre plusieurs années jusqu'à leur établissement durable et concurrentiel sur des substrats qui se dessèchent et se réchauffent fortement. La durée de vie des abords de voies est de plusieurs dizaines d'années, pendant lesquelles les végétalisations devraient satisfaire aux exigences prescrites. La durée des essais sur le terrain était donc plutôt limitée avec cinq ans (2019 - 2023). Au début du projet, l'idée était de végétaliser des banquettes le long du réseau ferroviaire des CFF. Comme il était difficile de trouver des banquettes d'une longueur suffisante pour les essais, on a choisi des entre-voies dans des aires de gare.

Six sites in situ appropriés ont été choisis parmi une série de gares et de voies ferrées en Suisse (conditions hétérogènes) et des essais ont également été menés sur une toiture ex situ (conditions semi-contrôlées) ainsi que dans une chambre de culture (conditions contrôlées). En complément, un mélange de plantes a été semé en France sur le site d'essai de la SNCF (fig. 3).

Toutes les placettes en plein air avaient une surface de 15 m², sauf à Seebach où une surface de 5 m² par placette semblait suffisante pour l'essai par tâtonnement et à Dole où le concept expérimental de la SNCF a été repris avec une surface de placette de 80 m². Sur chaque site, plusieurs répétitions ont été mises en place, en nombre variable selon les sites et avec des dimensions de base différentes. L'annexe 1

A-G donne un aperçu du dispositif d'essai et des paramètres relevés sur les différents sites.

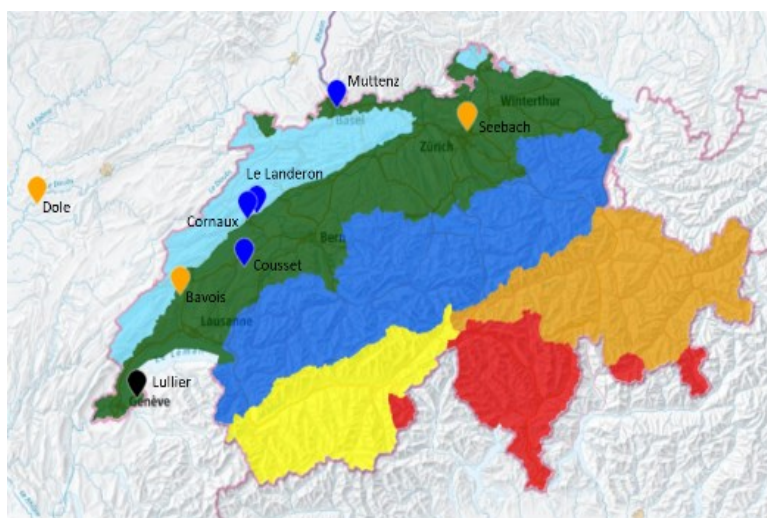


Figure 3: Localisation des sites d'essai sur le plateau suisse (zone biogéographique verte):
Bleu: sites principaux; orange: sites secondaires; noir: études ex situ

Étude principale à partir de 2019

- Un site in situ sur un entre-voie «E» (fig. 1): **Cousset**, 4 mélanges, 8 répétitions
- Deux sites in situ sur une large banquette (>100 cm):
 - **Muttenz** sur un entre-voie «C» (fig. 1), 4 mélanges, 8 répétitions et
 - **Le Landeron** sur un entre-voie «E» (fig. 1), 4 mélanges, 8 répétitions
- Un site in situ sur un entre-voie «D» et sur la voie «A» (fig. 1): **Dole (F)**, SNCF, 1 mélange, 3 répétitions
- Un site in situ sur une banquette étroite «E» (fig. 1) (< 60 cm): **Bavois**, 2 mélanges, 5 répétitions
- Un site ex situ sur une toiture plate en conditions semi-contrôlées: **Lullier**, 5 mélanges, 3 répétitions
- Une chambre de culture ex situ en conditions contrôlées: Lullier

Compléments au projet

- 2021: Un site in situ sur un entre-voie «D» (Abb. 1): **Cornaux**, 1 mélange, 6 répétitions
- 2021: Essai par tâtonnement avec des nattes de sedum sur un entre-voie «A, C et D» (fig. 1) sur les sites de **Muttenz, Cousset, Cornaux**
- 2022: Un site in situ sur un entre-voie «D» (fig. 1): réussite de la germination sur de la mousse: Seebach, 1 mélange, 3 répétitions

Tableau 1: Aperçu des dispositifs d'essai

Lieu	Site	Abords des voies	Nombre de répétitions	Nombre de mélanges, type de mélange, année du semis et durée d'observation						Relevés de végétation				
				KT	RR	SS	CSR	CC	TV2	2019	2020	2021	2022	2023
Cousset	in situ	D	8	19-23	19-23	19-23	19-23		21-23	qt/ql	qt/ql	qt/ql	qt/ql	qt/ql
Le Landeron	in situ	D	8	19-23	19-23	19-23	19-23		21-23	qt/ql	qt/ql	qt/ql	qt/ql	qt/ql
Muttenz	in situ	C	8	19-23	19-23	19-23	19-23	19-20	21-23	qt/ql	qt/ql	qt/ql	ql	ql
Cornaux	in situ	D	6	21-23					21-23			qt/ql	qt/ql	qt/ql
Bavois	in situ	E	5	19-22				19-20	21	qt/ql	qt/ql	qt/ql	ql	
Dole (F)	in situ	A-E	3					19-23					qt/ql	
Lullier	ex situ	EXP	3	20-23	20-23	20-23	20-23	20-23	21-23		ql	qt/ql	qt/ql	qt/ql

Abréviations: abords des voies - A&B ballast, C&E banquette, D entre-voie, F talus, EXP Toiture plate; *Mélanges* – KT contrôle, RR rudéral, SS tolérant le stress, CSR polyvalent, CC compétitif, TV2 ubiquiste; relevés de végétation: qt quantitatif, ql qualitatif. *Champs gris*: pas d'essai, respectivement aucun relevé effectué.

2 Observations relatives aux paramètres des sites

Dans le présent essai, seules des espèces végétales indigènes, qui supportent bien les basses températures, ont été utilisées. C'est pourquoi l'aspect du froid hivernal n'est pas approfondi dans la discussion qui suit, car il ne se manifesterait guère que par une élévation des jeunes pousses automnales par la glace hors de leur position effective. L'évaluation suivante ne porte que sur les températures journalières maximales et sur l'effet de la chaleur sur les organismes du sol et donc sur les plantes.

La période de végétation [30, 31] s'est sensiblement allongée au cours des dernières décennies en raison du réchauffement climatique [32-34] et s'étend désormais sur les sites étudiés d'environ début mars à fin novembre (annexe 3), avec seulement de légères différences selon le site et l'année (source: [35]).

2.1 Substrats utilisés aux abords des voies ferrées

Aux abords des voies ferrées (fig. 1), différents matériaux (ballast, gravier, gravillons, sable) de taille variable sont utilisés. Nous les regroupons sous le terme de substrat. Dans les zones des voies secondaires et dans les entre-voies qui nous intéressent (fig. 1: zones C, D et E), on utilise principalement du gravier de petite taille: le gravier concassé [26], également appelé groise dans l'industrie, est un matériau résistant et qui peut être fortement sollicité, composé de pierres broyées et de limon calcaire ; il est généralement mieux connu sous ses noms commerciaux de «Netstaler» [36] ou «gravier Enney». Dans la suite du texte, le terme «groise» est utilisé. En séchant, cet assemblage, très pauvre en éléments nutritifs, se cimente et se réchauffe fortement sous l'effet du rayonnement solaire. À quelques exceptions près, les plantes ne s'installent que lentement sur ces surfaces. Ce n'est qu'au cours d'une succession de plusieurs années que la teneur en C_{org} du substrat augmente, ce qui permet aux plantes de s'implanter davantage. En raison de ces propriétés, la groise et les substrats similaires sont utilisés par les entreprises ferroviaires comme couche de couverture des chemins d'entretien et d'accès le long des voies, ce qui réduit fortement les besoins d'entretien (fig. 4).



Figure 4: Substrat typique utilisé sur les chemins d'accès aux abords des voies.

Sur les chemins d'entretien, on épand une couche de groise de 10 cm d'épaisseur sur une couche de ballast d'épaisseur variable (30/60+) [37, 38], ce qui favorise le drainage (fig. 4). Les précipitations lessivent les matériaux fins de la surface, donnant une impression de gravier. Au fil du temps, les matériaux s'enrichissent en carbone organique sous l'effet d'apports extérieurs et se couvrent de poussières sous l'action des intempéries. Alors que le ballast des voies ferrées doit être renouvelé tous les 20 à 30 ans environ, les chemins d'entretien ont une durée de vie d'environ 50 ans. Durant cette période, des petits travaux de réparation sont effectués localement avec les matériaux les plus divers.

2.2 La substance organique des substrats

Des échantillons composites de substrat ont été prélevés sur chaque placette à partir de 13 sondages afin d'en déterminer la matière organique [26]. La teneur en carbone organique (C_{org}) a ensuite été déterminée en laboratoire: les pierres de > 5 mm (70%, à droite sur la photo, fig. 4) ont été retirées de l'échantillon, car elles ne pouvaient pas être broyées. Les pierres restantes plus petites (20%) et les matériaux fins (10%) ont été broyés. La poudre obtenue a été séchée puis calcinée. La valeur mesurée qui en résulte correspond à la teneur en carbone organique (C_{org}).

Les substrats de tous les sites ne contiennent que de très faibles quantités de matière organique. Si l'on considère que le substrat est composé à 90% de pierres, les teneurs en C_{org} des substrats sont proches de celles des sols désertiques.

La comparaison des sites révèle des teneurs en C_{org} significativement différentes. Avec une probabilité d'erreur (alpha) de 0,05, le site de Muttentz se distingue significativement de tous les sites, mais Le Landeron se distingue également de Bavois (fig. 5A).

En revanche, les teneurs en C_{org} par mélange sont réparties de manière aléatoire à la fois sur l'ensemble des sites (fig. 5B) et dans les répétitions sur chaque site (annexe 1 A-E). Autrement dit, les conclusions suivantes sur l'évolution de la végétation sont représentatives, car les teneurs en C_{org} ne créent pas de biais.

Les teneurs en matière organique du substrat sont réparties de manière très hétérogène sur tous les sites (annexe 1 A-H). La dispersion des teneurs en C_{org} sur les répétitions des mélanges ne présente cependant pas de différences significatives entre les mélanges, même sur les différents sites (Anova, analyse de variance à un facteur, valeur $P = 0,52$). L'apport en eau par les précipitations ainsi que les températures de l'air présentent des différences annuelles (annexe 3). Comme ces facteurs sont en principe très similaires sur tous les sites, ils ne sont pas présentés en détail dans la suite du rapport.

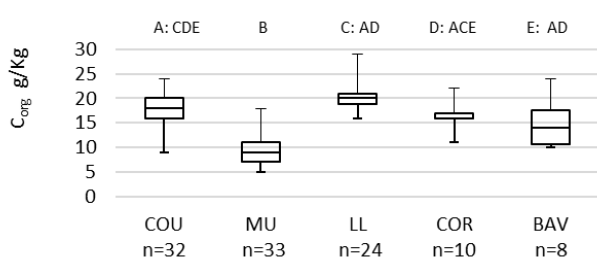


Figure 5A: Comparaison des teneurs en C_{org} dans le substrat des sites.

Pertinence statistique: Anova: analyse de variance à un facteur; valeur $P = 1,03E-18$. Les lettres indiquent des différences significatives entre les groupes. // COU = Cousset; MU = Muttentz; LL = Le Landeron; COR = Cornaux; BAV = Bavois

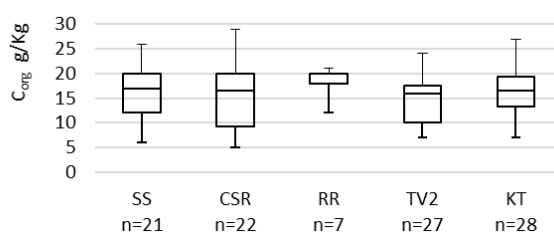


Figure 5B: Comparaison des teneurs en C_{org} dans le substrat des répétitions des procédés.

Pertinence statistique: Anova: analyse de variance à un facteur; valeur $P = 0,53$. Il n'y a pas de différences significatives. // SS = espèces tolérant la sécheresse et le stress; CSR = espèces polyvalentes; RR = espèces rudérales pionnières; TV2 = mélange ubiquiste; KT = contrôle sans semis

2.3 Les températures du substrat

En complément a posteriori, la température du sol à une profondeur de 5 cm sous la surface du substrat a été mesurée d'avril à novembre sur les sites de Cousset, de Cornaux et de Muttentz à l'aide de sondes de température (HOBO 64K). Une deuxième série de mesures a eu lieu en 2021 et en 2022 ex situ sur un toit plat à Lullier. Les températures y ont été enregistrées à la surface (S-TMB-M00x).

2.3.1 Résultats des mesures de la température de l'air et du sol

En moyenne, l'évolution annuelle des températures sur chaque site s'avère très similaire. Les différences entre les années apparaissent surtout du printemps au milieu de l'été, tandis que les températures diminuent progressivement de la même manière chaque année à la fin de l'été et en automne (annexe 4). Les différences les plus importantes au cours de la période considérée sont les suivantes: a) les pluies de juillet 2021 (annexe 5), qui ont entraîné une baisse des températures du sol, et b) les vagues de chaleur [39] qui se sont produites en 2019, 2022 et 2023, mais à des dates différentes (annexe 6), ce qui a entraîné un réchauffement du substrat d'une durée correspondante plus longue. Les températures journalières maximales du substrat dépassent régulièrement 35 °C, parfois même 40 °C. À Cousset, une température journalière maximale de 47,6 °C a été atteinte. Les amplitudes extrêmes sont étonnantes et sans doute spécifiques à la groise: entre l'air (mesure standard à 2 m au-dessus du sol) et le sol (à 5 cm de profondeur), il y a parfois des différences proches de 20 °C. La différence journalière la plus élevée dans le sol est de 24,8 °C (tabl. 2).

Le dispositif d'essai isolé sur le toit plat à Lullier n'a subi aucune influence due à l'ombrage. Pendant la période de mesure, plusieurs épisodes de très fort réchauffement de la surface du sol ont eu lieu au cours des deux années, du

début de l'été au début de l'automne. Les températures ont dépassé 40 °C pendant 124 jours au total, dont 32 jours où elles ont dépassé 50 °C, avec un maximum de 58,2 °C (tabl. 3).

Tableau 2: Nombre de jours avec des températures du sol (-5 cm) supérieures à 35 °C, voire 40 °C, et température annuelle maximale enregistrée par site et par an

Site	Cousset			MuttENZ			Cornaux		
Année	2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023
Jours > 35 °C	42	76	72	6	20	5	11	45	16
dont > 40 °C	11	35	36	0	2	0	0	14	0
Valeur maximale	45,8	47,6	46,1	37,9	41,9	38,9	38,8	44,5	39,1
Amplitude journalière maximale	23,8	24,8	24,6	24,3	19,2	20,7	20,1	21,3	17,8

Tableau 3: Températures à la surface du sol sur la toiture plate à Lullier: nombre de jours avec des températures supérieures à 40 °C, voire 50 °C, valeurs maximales.

Mois / Année	>40 °C	>50 °C	Max
Juillet 2021	15	1	51,8
Août 2021	13	0	48,6
Septembre 2021	6	0	43,3
Mai 2022	19	1	50,7
Juin 2022	22	7	55,6
Juillet 2022	29	19	58,0
Août 2022	19	4	58,2
Septembre 2022	1	0	40,8

2.3.2 Discussion sur les mesures de température du sol

Le soleil est de loin le plus important fournisseur d'énergie thermique [43]. C'est pourquoi la température du sol suit la variation journalière et annuelle du rayonnement solaire. Les sols clairs se réchauffent moins fortement que les sols sombres. Les sols secs se réchauffent plus rapidement que les sols humides. Quant aux sols recouverts de végétation, le réchauffement et le refroidissement sont tous deux retardés [31].

Avec l'augmentation de la température du sol, de nombreux processus dans le sol, comme l'humification et la minéralisation, se déroulent plus rapidement. Pour les organismes vivant dans le sol, l'augmentation de la température doit toutefois rester dans la plage de tolérance respective [44]. Pour la plupart de ces organismes, l'optimum de température se situe entre 10 et 35 °C [45]. La limite supérieure pour le maintien de ces processus est de 40 à 50 °C [46, 47], au-delà, les membranes se détériorent et les protéines se dénaturent. Le tableau 2 montre que tant la limite des 35 °C que celle des 40 °C sont régulièrement dépassées, notamment à Cousset, même à 5 cm de profondeur. Seules les espèces hautement spécialisées peuvent survivre dans ces habitats hostiles.

Lorsque la température dépasse 45 °C, seules quelques plantes sont encore viables [48]; elles se protègent toutefois par la transpiration tant que de l'eau est disponible. La «mort par dessèchement» survient chez de nombreuses espèces annuelles autour de 50 °C. Les germes et les plantules sont déjà brûlés à des températures plus basses. La mesure de la température de surface montre que les plantules meurent régulièrement sur les substrats étudiés, parfois dès le début de l'été. Des températures de surface maximales de près de 60 °C représentent, même pour les plantes plus développées, des conditions extrêmes que seules peu d'espèces tolèrent [49]. Pour l'établissement de plantules, la phase de germination et les premiers stades de croissance sont les plus critiques, car les racines atteignent peu de profondeur et les périodes de chaleur et de sécheresse peuvent endommager les plantules. Les valeurs mesurées dans les essais nécessitent de s'adapter, comme le font les thérophytes ou les espèces xérophiles (encadré 1).

La comparaison des sites de Cousset et de Cornaux en 2023 met en évidence l'influence de l'ombrage sur les températures du sol (fig. 6, à gauche). Sur les deux sites, l'évolution de la température de l'air est quasiment la même. À Cousset, la différence entre la température du sol et celle de l'air est telle que prévue. Cependant, à Cornaux, un épilobe à feuilles de romarin (*Epilobium dodonaei*) d'une hauteur de 50 cm s'est installé en 2023 juste au-dessus de la sonde de température et lui a fait de l'ombre.

(fig. 6, à droite). En conséquence, à Cornaux, l'amplitude entre la température de l'air et celle du sol diminue dès le printemps et, au début de l'été, le substrat est à peine plus chaud que l'air et est même moins chaud à la fin de l'été. Avec l'apparition des premières espèces pionnières, les conditions s'améliorent immédiatement pour d'autres plantes. Ces processus se déroulent très lentement.

Encadré : Définitions botaniques [40-42]

Thérophytes Espèce végétales herbacées de courte durée de vie qui survivent à une saison défavorable (hiver ou saison sèche) sous forme de graines dans le sol. Les thérophytes sont soit des plantes annuelles ou bisannuelles. Les graines sont très résistantes au froid en raison de leur très faible teneur en eau.

Xérophilie Préférence de certains organismes vivant pour les milieux secs. Les organismes présentant cette caractéristique sont appelés xérophiles, tandis que ceux qui préfèrent les milieux chauds et secs sont appelés xérophiles.

Stratification Traitement des semences apte à stimuler leur germination dans un milieu tamponné.

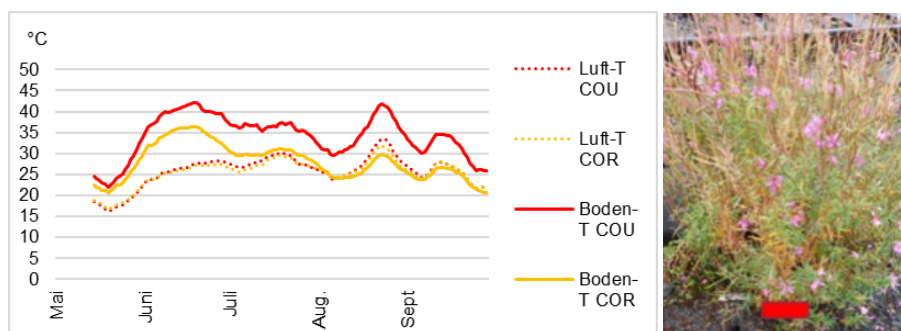


Figure 6: Courbe des températures (air, sol) à Cousset (COU) et à Cornaux (COR) 2023 (moyenne lissée 14j).

Barre rouge sur la photo: emplacement de la sonde de température.

2.3.3 Conclusions relatives aux mesures de la température du sol

Pour les substrats étudiés sur les voies ferrées, cela signifie que la groise fraîchement épanchée est certes relativement clair, mais aussi rugueuse et composée à 90% de petits cailloux; elle est perméable à l'eau et dénuée de végétation. Elle absorbe donc beaucoup de chaleur et ne la stocke qu'à court terme. Ce n'est qu'au fil du temps que la matière organique se forme et assombrit le sol, lui permettant d'absorber davantage de chaleur et de stocker de l'eau. Par ailleurs, ce n'est que lorsqu'il y a suffisamment de matière organique que la végétation peut se former en surface et faire de l'ombre, ce qui entraîne une absorption de chaleur nettement plus faible et un dégagement de chaleur plus lent. Seules les espèces spécialisées sont adaptées à la germination et à l'établissement de jeunes plantes. Celles-ci dépendent de conditions météorologiques favorables, ce qui n'est pas le cas chaque année.

Cependant, au fur et à mesure de la colonisation, l'ombre et l'accumulation de matière organique augmentent avec le temps, ce qui favorise la colonisation: en effet, plus un substrat est «âgé», plus il a eu le temps de s'enrichir en diaspores et en matière organique - principalement avec les cycles de végétation (croissance/décomposition) qui s'y opèrent – et accumule des feuilles et autres débris végétaux en provenance de l'environnement proche. On observe l'apparition progressive d'un plus grand nombre d'espèces dans la succession végétale, jusqu'à ce qu'un couvert végétal continu s'établisse après plusieurs années.

2.4 Répartition des précipitations

Les données climatiques des années 2000 à 2023 (précipitations, température de l'air, durée d'ensoleillement) relevées par les stations météorologiques situées à proximité de chaque site ont été obtenues auprès de Meteosuisse et d'Agometeo (annexe 1).

2.4.1 Évaluation des données climatiques

L'observation des précipitations totales pendant les années d'essai montre de nettes différences annuelles et régionales. Au cours de la période d'observation 2000-2023, les précipitations annuelles moyennes ont montré des différences locales avec de légères tendances à la hausse ou à la baisse (annexe 7). L'évolution annuelle des températures ainsi que la durée d'ensoleillement étaient très similaires sur tous les sites; la tendance des températures maximales et minimales ainsi que du rayonnement solaire a augmenté sur tous les sites (annexe 7).

Contrairement aux sols naturels, le substrat des abords des voies étudiés ne peut guère stocker d'eau. Afin de qualifier l'impact de la répartition des précipitations sur le développement de la végétation dans ces conditions particulières, les quantités de précipitations ont été regroupées en quatre catégories (annexe 3). Cette répartition montre qu'entre 2019 et 2022 le début de la période de végétation au printemps a été nettement marqué par des phases sèches. En 2019, année des semis, cela n'a pas eu d'effet sur la germination, car la sécheresse a précédé les semis et les précipitations ont été régulières et suffisantes au cours des mois suivants.

Durant les étés des années d'essai, il est généralement tombé suffisamment d'eau pour alimenter les plantes en continu, même si des phases sans pluie d'une à deux semaines se sont intercalées. Il convient de souligner en particulier les fortes précipitations de juillet 2021, qui ont provoqué le débordement de nombreux lacs dans toute la Suisse pour la première fois depuis les corrections des eaux [50].

Il en va autrement pour l'année d'essai finale 2023: cette année-là, la sécheresse a précédé le début de la période de végétation. Le printemps a offert des conditions favorables, tandis que l'été a été particulièrement sec jusqu'à l'automne; seuls quelques épisodes de pluie ont fourni de l'eau de manière sporadique. Les fortes pluies ne se sont produites qu'à partir d'octobre. Les pluies de la fin de l'automne et de l'hiver n'ont cependant pas d'importance, car l'eau n'est pas ou peu stockée dans le substrat.

2.4.2 Conclusions relatives aux données climatiques

Des phases prolongées de fort ensoleillement entraînent une augmentation constante de la température de l'air et donc du sol. Les précipitations entraînent un refroidissement immédiat et radical, mais celui-ci ne dure que si plusieurs épisodes pluvieux se produisent au cours d'une période donnée. Dès qu'il n'y a plus de pluie, les températures remontent très rapidement, ce qui s'accompagne d'une évapotranspiration accrue et d'une présence encore plus faible d'eau disponible pour les plantes dans le substrat perméable des chemins d'entretien et des banquettes. En l'absence d'études comparatives détaillées sur les sites, il est difficile d'appréhender l'influence des

précipitations sur le développement des mélanges étudiés; on peut toutefois supposer que les périodes de sécheresse durant la phase de germination, qui suit immédiatement les semis, sont un obstacle à l'établissement des plantes (voir les résultats concernant Lullier).

- La météo est semblable sur tous les sites.
- La météo n'a pas d'effet fondamentalement négatif sur le développement des plantes sur les sites d'essai.
- La chaleur et la sécheresse peuvent être préjudiciables à la germination et au développement précoce des plantes.

2.5 Bilan: un environnement hostile

Les études menées sur le substrat des sites en plein air du projet confirment qu'en plus de sa pauvreté en éléments nutritifs, ses propriétés thermiques créent un environnement généralement hostile aux plantes, dans lequel seules les espèces résistantes à la sécheresse et à la chaleur peuvent survivre durablement.

Les températures très élevées atteintes dans les couches supérieures du sol représentent un stress énorme pour toutes les plantes non tolérantes à la chaleur. Pour de nombreux organismes du sol et de nombreuses plantes, les amplitudes journalières très élevées dans le substrat représentent également un facteur de stress supplémentaire intense. La germination et le développement des plantes semées sont ainsi fortement limités, en particulier sur les couches de groise les plus récentes. La tendance à l'augmentation des températures maximales de l'air ne fera qu'accentuer ce phénomène. Ces effets sont atténués par des précipitations régulières.

3 Les essais de germination en chambre de culture

3.1 Objectif

L'objectif de cette expérience conduite en chambre de culture était de tester le potentiel de germination des mélanges en conditions environnementales contrôlées (température, humidité relative, photopériode, intensité du flux de photons photosynthétiquement actifs). Cette approche ex situ permet d'obtenir une indication de l'expression de chacun des mélanges, qui peut être comparée aux essais effectués sur des parcelles en plein air (in situ), confrontées aux aléas climatiques et à l'influence anthropique.

3.2 Méthode expérimentale

L'expérience a été conduite en deux temps (tabl. 4). Une première partie réalisée à la fin de l'année 2020 a permis de tester le potentiel de germination des mélanges CC, SS, RR et CSR à une température de germination élevée (19 °C jour et nuit). La deuxième partie effectuée en 2022 a permis de tester les mélanges SS, RR, CSR et TV2 dans des conditions de basses températures (13 °C le jour et 10 °C la nuit). Il est important de préciser que pour la deuxième partie, le mélange compétitif « CC » a été remplacé par le mélange TV2 dont la composition est issue des deux premières années d'observations sur les sites in situ.

Tableau 4: Conditions du test et procédés testés dans les essais en chambre de culture.

*in/en PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density

Conditions climatiques	Températures chaudes	Températures froides
Période d'essai	03.11.2020 – 26.03.2021 (143 jours)	21.01.2022 – 30.06.2022 (160 jours)
Mélanges testés	SS, RR, CSR, et CC	SS, RR, CSR et TV2
Température de jour	19 °C	13 °C
Température de nuit	19 °C	10 °C
Photopériode	12h jour / 12h nuit	12h jour / 12h nuit
Humidité relative	50%	64,5%
Intensité lumineuse moyenne*	135 μmol de photons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$	135 μmol de photons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Le développement des plantes a été suivi une à deux fois par semaine avec un arrosage effectué par-dessous. Des séances d'identification effectuées tous les mois nous ont permis de relever la présence ou l'absence des taxons. Face à la difficulté d'identification de certaines espèces au stade plantule, c'est le dernier relevé qui a été pris en compte pour l'analyse des résultats.

Plusieurs limites à la méthode utilisée peuvent être avancées:

- Chaque mélange a été testé en 3 répétitions dans des terrines à 0,16 m² (= 0,48 m²), chaque terrine étant bien en dessous d'une surface minimale pour que toutes les semences puissent s'exprimer.
- Seulement 8 grammes de semis (graines + matériau porteur) ont été semées par terrine ; il est donc aléatoire d'obtenir un mélange de graines hétérogène représentatif, même après avoir brassé les sacs de semences au préalable.
- Les semis n'ont pas été spécifiquement traités par le froid, l'humidité, la lumière, l'acide ou mécaniquement (stratification, boîte 1) pour favoriser la germination.

3.2.1 Observations première partie – températures élevées 19 °C

Lors de la première partie de test en température élevée, les mélanges RR, SS et CSR se sont rapidement exprimés. Le mélange CC a nécessité plus de temps pour germer et les rares plantules présentaient des signes de carence. Il a donc été décidé d'ajouter en fin d'essai de l'engrais à l'eau d'arrosage durant le mois de janvier (engrais universel de Wuxal 2 ml/litre), soit 2 ml/semaine pendant 5 semaines, ce qui équivaut à 12,375 kg d'azote par hectare et par semaine pendant 5 semaines ou 62 kg d'azote par ha au total (annexe 8 A). Durant le mois de février, ce sont les autres mélanges qui ont présenté des signes de carence et qui ont reçu en tout 8 ml d'engrais (12,375 kg d'azote par hectare et par semaines durant 4 semaines). Cela correspond à une quantité totale de 112 kg N par ha.

3.2.2 Observations deuxième partie – températures basses 10 - 13 °C

Lors de la deuxième partie l'expérience, le maintien de basses températures a eu des répercussions sur l'hygrométrie de la chambre de culture. Pour des raisons techniques, le système n'est pas arrivé à maintenir l'humidité relative à 50% mais plutôt autour de 64,5%. Ceci a eu pour conséquence l'apparition de moisissures à la surface des terrines. Ces basses températures ont surtout eu un impact sur la vitesse de développement des plantes ayant ainsi du mal à s'exprimer. Au bout de 5 mois d'expérience, il a été décidé, de « booster » leur croissance avec 3 ml d'engrais (Wuxal) ce qui équivaut à 118,56 kg d'azote par hectare, en augmentant la température à 22 °C le jour et 19 °C la nuit, afin de faciliter l'identification des espèces.

3.3 Résultats de l'expression des mélanges

Ce chapitre présente donc le plan quantitatif des essais en chambre de culture complété d'observations des essais en plein air qui seront présentés et discutés dans le chapitre 4. Le plan qualitatif des essais en chambre de culture est présenté en détail dans l'annexe 8 B.

La figure 7A montre l'ensemble des résultats en termes de nombre d'espèces exprimées pour chaque mélange pour les essais en conditions de température haute (rouge), température basse (bleu) et en compilant les deux températures (jaune). Le nombre d'espèces contenu dans chaque mélange est indiqué en gris. Le mélange concurrentiel CC a été testé uniquement en condition de température haute. C'est ensuite le mélange ubiquiste TV2 qui a été testé en condition de température basse.

- Le mélange CC s'est exprimé à températures hautes avec 18 espèces sur les 22 espèces du mélange (Tableau 4). Il a dû être stimulé par l'apport d'engrais.
- Le mélange RR s'est exprimé avec 12 espèces pour les deux températures, soit 16 espèces au total ayant germé sur les 21 espèces du mélange.
- Le mélange SS s'est exprimé avec 17 espèces en températures hautes, et avec 12 espèces en basses températures, soit 18 espèces au total sur les 23 présentes.
- Le mélange CSR s'est exprimé avec 15 espèces en températures hautes, et avec 12 espèces en températures basses soit 18 espèces sur les 31 présentes.
- Le mélange TV2 a été testé uniquement à des basses températures. Il s'est exprimé avec 21 espèces présentes sur 46.

Certaines espèces ne se sont pas exprimées en chambre de culture, mais une partie d'entre elles a tout de même été observée sur les sites extérieurs, ce qui pourrait être attribué à l'absence de stratification (tabl. 5). Si nous ajoutons les espèces observées en extérieur dans la comptabilisation des espèces exprimées en chambre de culture, nous pouvons constater que les mélanges s'expriment avec un taux très élevé variant de 80 à 95%, plus élevé qu'en seule chambre de culture (fig. 7B, en vert). Ainsi, les mélanges contenant beaucoup d'espèces - et donc disposant d'une forte plasticité environnementale - comme le mélange polyvalent CRS et le mélange ubiquiste TV2 - passent respectivement de 18 à 27 espèces exprimées sur 31 et de 21 à 42 espèces exprimées sur 46.

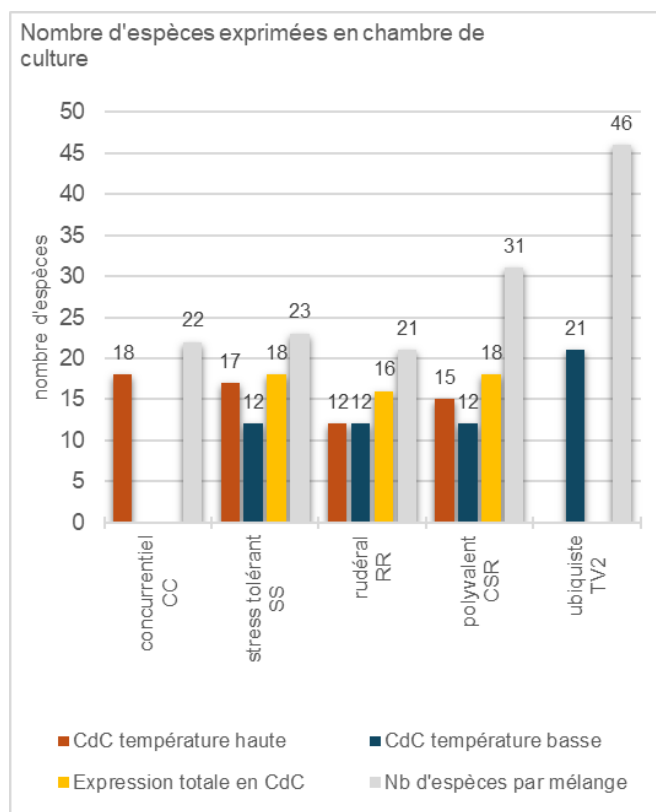


Figure 7A: Résultats obtenus en chambre de culture en terme de nombre d'espèces exprimées par mélange.

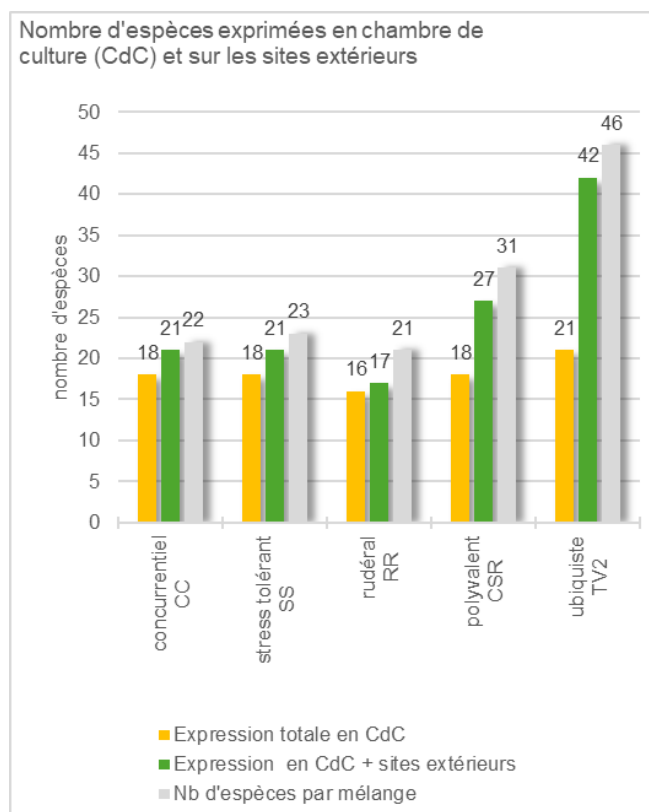


Figure 7B: Expression des mélanges complétée par les recensements sur les sites expérimentaux.

Tableau 5: Espèces ne s'étant pas exprimées en chambre de culture, comparées à leur présence dans les conditions en plein air sur les sites extérieurs des CFF et dans le dispositif installé sur la toiture de Lullier (nombre de comptages pendant toute la période d'essai).

Espèce absente en chambre de culture	Sites ext. CFF	ex situ Lullier	Espèce absente en chambre de culture	Sites ext. CFF	ex situ Lullier
<i>Arabis hirsuta</i>	0	2	<i>Salvia pratensis</i>	20	2
<i>Glechoma hederacea</i> subsp. <i>Hederacea</i>	0	0	<i>Koeleria pyramidata</i>	23	30
<i>Pimpinella saxifraga</i>	0	0	<i>Picris hieracioides</i>	47	0
<i>Ajuga reptans</i>	1	0	<i>Galeopsis angustifolia</i>	84	0
<i>Campanula rotundifolia</i>	1	0	<i>Lotus corniculatus</i>	92	2
<i>Fragaria vesca</i>	3	0	<i>Sedum acre</i>	128	45
<i>Viola tricolor</i>	3	12	<i>Poa compressa</i>	262	56
<i>Poa pratensis</i>	7	1			
<i>Geranium pyrenaicum</i>	7	3			

3.4 Discussion des résultats

Les résultats obtenus en termes de nombre d'espèces exprimées par mélange (fig. 7A&B) montrent que dans l'ensemble, les mélanges se sont bien développés. Il faut préciser que le mélange concurrentiel CC a été favorisé par l'ajout d'engrais. Certaines espèces se sont exprimées uniquement en haute température ou uniquement en basse température, ou encore aux deux températures. Ainsi, les mélanges présentent une variation tant qualitative que parfois quantitative dans leur expression et de manière directement liée à la température au sol. Ils peuvent donc répondre à une demande de végétalisation à différentes saisons.

Plusieurs hypothèses de cette différence d'expression peuvent être évoquées:

- Une surface de culture restreinte en chambre de culture ($3 \times 0,16 \text{ m}^2 = 0,48 \text{ m}^2$) limitant l'expression de tous les taxons des mélanges.
- Seulement 8 g. de graines ont été semées par terrine afin de respecter la densité de semi effectuée en extérieur ; il est donc aléatoire d'obtenir un mélange de graines hétérogène représentatif, même après avoir mélangé les sacs de semences au préalable.
- Des conditions thermiques de germination différentes en extérieur de celles testées en chambre de culture.
- Un effet d'allélopathie ou de compétition directe entre espèces, renforcé par la proximité sur une petite surface. Par exemple *Bromus tectorum*, normalement présent dans tous les mélange, ne s'est pas exprimé dans les mélanges concurrentiel CC et polyvalent CSR.
- L'absence d'éléments extérieurs (en chambre de culture) favorisant la germination, comme les micro-organismes ou la micro-faune du sol et d'autres méthodes de stratification comme la lumière, le froid, le gel, des facteurs chimiques ou mécaniques. Par exemple *Lotus corniculatus* germe plus facilement si ses graines sont scarifiées.
- Le manque d'apport allogène d'espèces présentes dans l'environnement. Des espèces comme *Picris hieracioides* sont très présentes dans l'environnement anthropophile perturbés.
- La plus grande variabilité de la texture du substrat sur les sites in situ, non présente en chambre de culture ou encore sur le site ex situ de Lullier, où le substrat a été disposé de manière homogène. Ainsi: 1. sur les sites in situ, certaines espèces comme *Galeopsis angustifolia* se développent dans les particules grossières des ballasts des voies et essaient à partir de ces populations sur le bord des zones test, ce qui n'est pas le cas en chambre de culture ou sur un site ex situ. 2. *Picris hieracioides*, qui présente un optimum sur sols à particules relativement fines, bénéficie de la plus grande hétérogénéité de la granulométrie des substrat in situ.

3.5 Conclusion des essais en chambre de culture

En conclusion, nous pouvons dire que les mélanges se sont bien exprimés en chambre de culture et qu'ils présentent une variation d'expression tant qualitative que parfois quantitative en fonction de la température ; certaines espèces s'exprimant à des températures élevées (ex. *Medicago minima*), d'autres à des températures basses (ex. *Trifolium montanum*), d'autres étant indifférentes (ex. *Bromus erectus*). Ceci permet de répondre aux besoins d'une végétalisation selon la fluctuation des températures tout au long de l'année. Il y a cependant une exception pour le mélange concurrentiel CC, riche en espèces eutrophiles, qui a eu besoin d'un effet « starter » pour faciliter son implantation par l'apport d'engrais (2ml/l de Wuxal par semaine pendant 5 semaines, ce qui équivaut à 12,375 kg d'azote par hectare et par semaine pendant 5 semaines).

Les mélanges s'expriment davantage en conditions extérieures (de 80 à 95%) où ils bénéficient:

- De plus d'espace pour s'exprimer.
- D'une diminution des effets d'allélopathie et de compétition directe entre les espèces.
- D'interactions possibles avec d'autres organismes vivants (microorganismes, microfaune) ou d'autres facteurs de stratification.

- D'un apport allogène de semences d'espèces du mélange qui sont également présentes dans l'environnement extérieur.
- D'une plus grande variabilité dans la texture du substrat, qui favorisera des niches spécifiques à l'installation de certaines espèces.

L'absence de certains taxons autant en chambre de culture que sur les sites extérieurs nous a conduit à écarter 9 espèces des mélanges: *Poa pratensis*, *Ajuga reptans*, *Arabis hirsuta*, *Campanula rotundifolia*, *Fragaria vesca*, *Geranium pyrenaicum*, *Glechoma hederacea* subsp. *hederacea*, *Pimpinella saxifraga*, *Viola tricolor*.

4 Les essais des mélanges en plein air

Ce chapitre répond aux hypothèses formulées dans l'introduction que l'on peut regrouper en 4 thèmes:

- Taux de couverture végétale
- Diversité de la flore
- Espèces problématiques
- Facteurs déterminants

4.1 Méthodes

4.1.1 Méthode de suivi de la végétation

Les relevés des espèces vasculaires au sein des placettes préalablement délimitées ont été effectués selon la méthode de relevé « points-quadrat » [51] qui permet une observation standardisée et reproductible de la végétation en place. Cela consiste à dérouler un décamètre sur une longueur définie, de pointer une baïonnette tous les 10 cm et de répertorier les espèces qui touchent sa tranche extérieure (fig. 8). Sur chaque placette, de 70 à 100 points ont été recensés (fig. 9). Cette méthode permet d'avoir une mesure précise du recouvrement des surfaces testées par les plantes vasculaires et les mousses.

Dans une seconde phase, une liste complémentaire des espèces, non touchées sur le transect, a été effectuée pour chacune des placettes. Ceci permet de recenser toutes les espèces ayant germé sur les parcelles test.



Figure 8: Méthode de relevé « points-quadrat »
© Julie Steffen

4.1.2 Méthode d'analyse des données

Afin d'évaluer l'efficacité des différents mélanges sur chacun des sites, soit leur expression (recouvrement des espèces semées sur les parcelles test) et leur aptitude à concurrencer la flore indésirable le long des voies ferrées (recouvrement des espèces problématiques), les espèces ont été regroupées dans six catégories correspondant aux exigences des CFF en matière de végétalisation des entre-voies et des banquettes. La rubrique suivante fournit le détail de l'assignement des espèces recensées aux catégories suivantes.

1. **Sol nu:** sol dépourvu de végétation vasculaire et muscinale.
2. **Mousses:** mousses poussant seules, sans contact avec les plantes vasculaires. Les mousses au contact des plantes vasculaires ont été relevées, mais ne sont pas prises en compte dans les graphiques des évaluations. Le recouvrement muscinal réel est ainsi sous-évalué afin d'avoir une meilleure vision de l'occupation du sol par la flore vasculaire.
3. **Plantes vasculaires:**
 - a. **Espèces semées:** espèces provenant des mélanges grainiers. La composition des mélanges est listée dans l'annexe 2.
 - b. **Espèces spontanées non problématiques:** espèces non semées et non problématiques, appelées « spontanées » dans le texte.
 - c. **Espèces spontanées problématiques:** espèces néophytes invasives en Suisse [52] (OFEV, 2022); espèces ligneuses, espèces au système racinaire pouvant endommager le ballast des voies, ainsi que les espèces de taille trop haute, rampantes ou grimpantes pouvant perturber le cheminement du personnel CFF, appelées « problématiques » dans le texte.

- **Espèces indéterminées:** espèces ne pouvant être identifiées au niveau du genre ou de l'espèce en raison de la jeunesse de leur stade de développement ou de leur sénescence.

Le taux de recouvrement du sol par les plantes vasculaires et les mousses a ensuite été calculé pour chacune de ces catégories, sur chaque site et pour chaque année de suivi. Des tests statistiques ont ensuite permis de mettre en évidence les différences significatives.

4.1.3 Cas particulier: le design du site ex situ de Lullier

L'objectif de cette expérience était de tester le potentiel de développement des mélanges en conditions environnementales semi-contrôlées. Ces essais étaient ainsi confrontés aux aléas climatiques et aux imports d'une végétation spontanée des environs, mais soustraits à l'influence anthropique tels que piétinements par le personnel de passage, des mesures de contrôle de végétation non-planifiées (herbicides, fauche, élagage) ou des chantiers d'entretien des voies.

Douze blocs, encadrés de planches de bois, ont été installés en décembre 2019 et ensemencés en février 2020 (fig. 10, 11). Afin de répliquer au mieux les substrats rencontrés en situation réelle, le fond a été rempli d'un ballast semi-grossier sur une épaisseur de 20 cm puis couvert de groise concassé sur une épaisseur de 10 cm. Le ballast était aéré et drainé afin d'éviter une rétention trop importante d'eau, en analogie aux sites expérimentaux in-situ. Aucun apport d'engrais ou d'eau n'a été réalisé. Chaque block comportait une partie de 15 m² semés et 5 m² non-semés (côté mur ; fig. 9, 10, 11) faisant guise de témoin. Ceci afin d'harmoniser les surfaces testées ex et in situ.

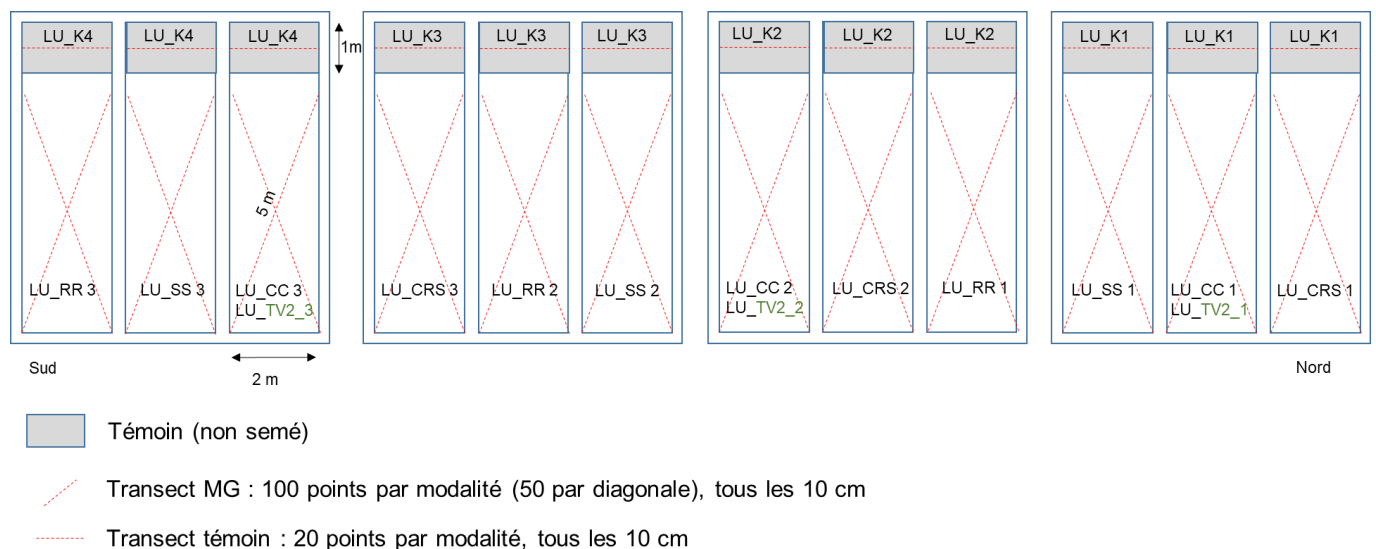


Figure 9: Schéma expérimental de Lullier.

Les parcelles préalablement semées avec le mélange CC ont été ressemées avec le mélange TV2 en 2020.

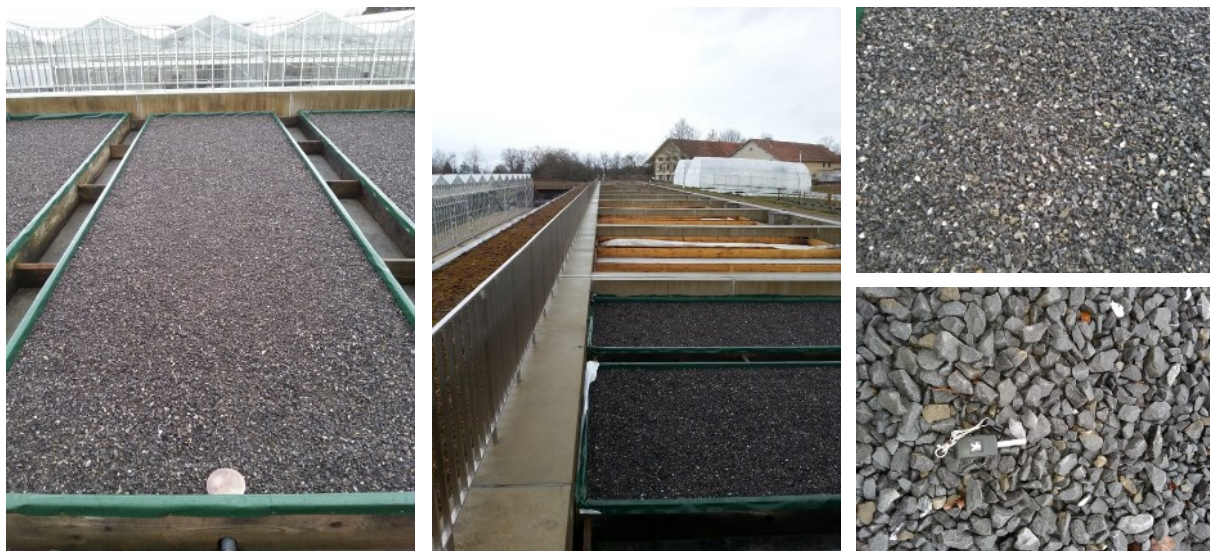


Figure 10: Toiture de Lullier (janvier 2020).

À gauche: placette installée avant les semis. Au milieu: succession de différents essais. En haut à droite: matériau de recouvrement. En bas à droite: matériau de recouvrement, vue agrandie



Figure 11: Développement de la végétation

(CSR 3, RR 2, SS 2) sur le toit plat en mai 2022 (à gauche) et en mai 2023 (à droite)

4.2 Résultats

4.2.1 La réaction des mélanges: l'expression sur les sites

Ce chapitre présente les expressions de la végétation quantitative sur tous les sites (4.2.1.1) et qualitative à l'échelle du site de Cousset (4.2.1.2) selon les mélanges semés en regard d'une situation témoin (non semée).

4.2.1.1 Analyse de l'évolution du recouvrement de la végétation sur les sites suivis

L'analyse quantitative de l'expression des mélanges se concentre sur l'évolution du recouvrement de la végétation, dont la part des espèces semées et spontanées (problématiques ou non). Cette analyse permet ainsi de répondre à la question de la vitesse d'implantation de la végétation par modalité.

Cousset

Le recouvrement des espèces vasculaires, des espèces semées et des mousses augmente avec le temps pour tous les mélanges (fig. 12). La part d'espèces problématiques est faible (~1%) et fluctuante dans le temps pour les différents mélanges. Cette proportion est légèrement plus élevée sur le témoin (> 5% en 2022), mais cette différence n'est pas statistiquement significative (annexe 9). Les mousses sont généralement plus abondantes (20-30%) sur ce site qu'au Landeron.

La contribution des espèces vasculaires semées au recouvrement permet d'identifier « l'effet de levier » des semis. Après cinq années, c'est le mélange rudéral « RR » qui s'est le mieux installé avec un recouvrement de 48%, et ensuite, de manière régressive, les mélanges tolérant le stress « SS » (37%), polyvalent « CSR » (31%) et la zone témoin « KT » (30%). Au terme de 3 années, le mélange ubiquiste « TV2 » présente un taux de recouvrement (41%) supérieur au mélange rudéral RR (28%) (fig. 13).

En analysant l'ensemble des données entre 2020 et 2023, la comparaison des zones semées avec les zones témoins non semées montre une différence significative de recouvrement des espèces semées par rapport aux espèces spontanées et problématiques (Kruskal-Wallis $p = 0,009$). La différence n'est plus significative en prenant uniquement les données de 2023 (Kruskal-Wallis $p = 0,814$) car les zones témoins se sont enrichies d'espèces provenant des zones semées. Pour valider ce dernier constat nous avons réalisé les mêmes analyses sans prendre en compte les zones témoin et nous avons obtenu une différence non significative (Kruskal-Wallis $p > 0,05$). Nous pouvons donc en déduire qu'il y a bien un effet du semis par rapport au témoin ; ce dernier étant colonisé avec le temps par les espèces semées à proximité.

Perturbations

À Cousset (annexe 1 A), fin 2020, le long de la parcelle d'essai, le ballast a été remis en tas des deux côtés de la voie sur une largeur de 30 à 40 cm. En mai et en septembre 2023, les surfaces ont été fauchées, contrairement à ce que avait été prévu dans le projet. Comme les travaux de renouvellement du ballast ont eu lieu en 2020 en bordure des surfaces d'essai, ils n'ont pas eu d'impact sur le développement de la végétation. L'influence de la fauche non-planifiée au printemps 2023, ayant eu lieu peu avant le relevé de végétation, ne peut guère être saisie, car il n'est pas possible de chiffrer l'impact qu'elle a eu sur le développement de la végétation en été et en automne. En raison de la fauche d'automne, le relevé de végétation a dû être reporté en octobre, ce qui a eu une influence à peine mesurable sur le résultat.

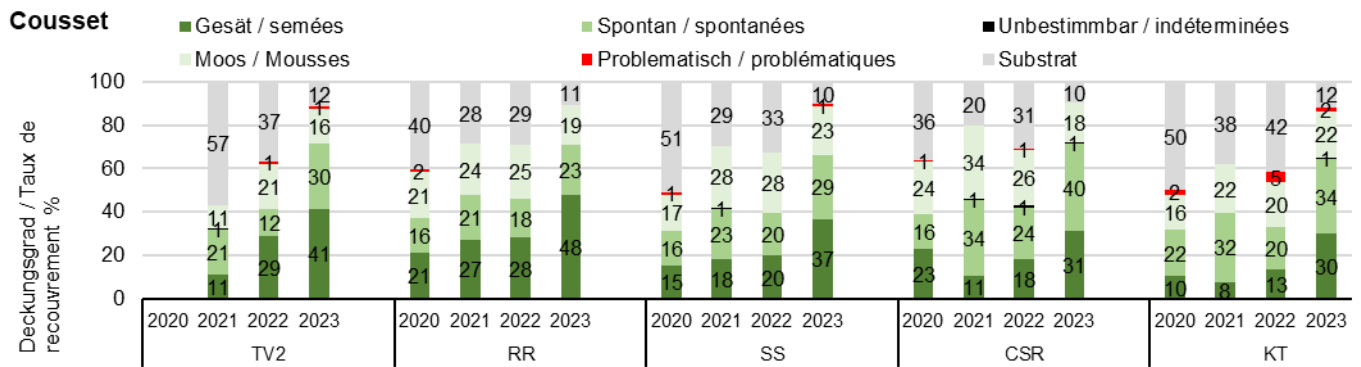


Figure 12: Evolution du taux de recouvrement végétal par mélange et catégorie au fil des années sur le site de Cousset.

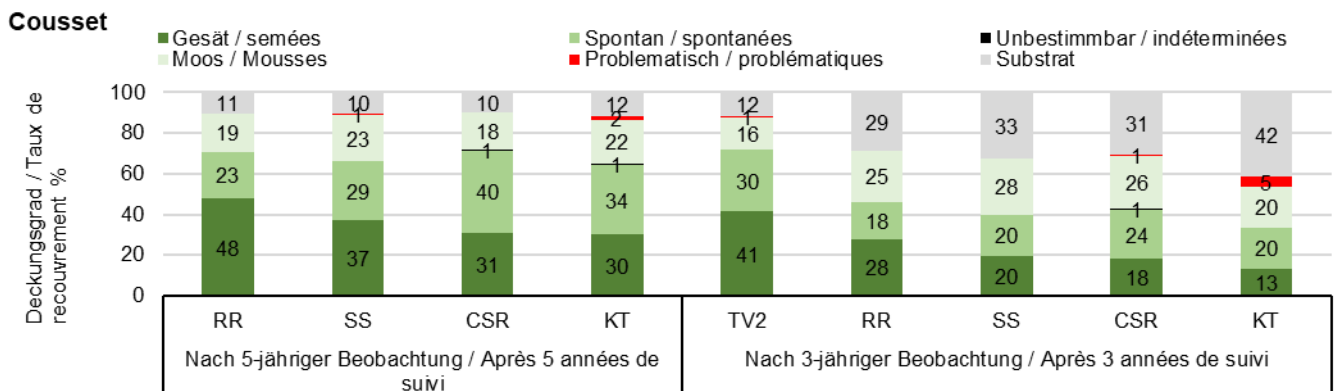


Figure 13: Taux de recouvrement végétal par mélange et catégorie au terme de cinq et trois années de suivi du site de Cousset.

Le Landeron

Comme à Cousset, le recouvrement des espèces vasculaires, des espèces semées et des mousses augmente avec le temps. Cependant, la part de sol nu reste plus importante (fig. 14). Bien que très faible (1-2%), la part d'espèces problématiques augmente également pour les mélanges RR, SS et TV2. Le recouvrement muscinal est de l'ordre de 5% pour les mélanges CSR, RR et le témoin; 10% pour le mélange SS. Très faible sur le mélange TV2 (5%). En 2021, il augmente fortement et atteint 18% en 2023.

Comme à Cousset, après cinq années, c'est le mélange rudéral « RR » qui présente le recouvrement moyen le plus élevé (41%) des espèces semées (fig. 13). Viennent ensuite de manière régressive, les mélanges tolérant le stress « SS » (32%), polyvalent « CSR » (29%) et la zone témoin « KT » (20%). Le mélange ubiquiste « TV2 » s'est également mieux exprimé à 25% que le mélange rudéral « RR » (17%) après 3 années de suivi (fig. 6).

En analysant l'ensemble des données entre 2020 et 2023 se dessine la même image qu'à Cousset. La comparaison des zones semées par les différents mélanges avec les zones témoins non semées montre une différence significative de recouvrement des espèces semées par rapport aux espèces spontanées et problématiques (Kruskal-Wallis $p = 0,006$). La différence n'est plus significative en prenant uniquement les données de 2023 (Kruskal-Wallis $p = 0,184$) car les zones témoins se sont également enrichies avec le temps d'espèces provenant des mélanges. Pour valider ce dernier constat, nous avons réalisé les mêmes analyses sans prendre en compte les zones témoin et nous avons obtenu une différence non significative (Kruskal-Wallis $p > 0,05$). Il y a donc bien un effet du semis par rapport au témoin ; ce dernier étant colonisé avec le temps par les espèces semées à proximité.

Perturbations

Au Landeron (annexe 1 B), la végétation qui s'est établie a été en grande partie détruite en juin 2020 par un piétinement excessif lors de travaux de renouvellement de la voie ferrée qui ont duré 2 semaines. En raison de ces travaux sur les voies, la moitié nord des placettes a dû être entièrement ressemée, tandis que l'autre moitié a été laissée en l'état afin de vérifier comment la végétation restante se développait. En 2023, une couverture végétale s'était à nouveau formée (fig. 16).

En août 2021, des traverses ont été déposées sur les placettes 23 et 24; on ne sait cependant pas combien de temps elles sont restées sur place. Elles ont été enlevées sur demande. Il n'est pas possible de déterminer dans quelle mesure les traverses déposées ont eu un impact sur le développement de la végétation.

Afin d'identifier une possible différence entre l'évolution des espèces semées d'une placette « perturbée » par rapport à une placette ressemée, les relevés de deux placettes ont été comparés. Dans les deux cas, la couverture de la végétation augmente et l'analyse confirme que le développement des espèces semées est plus régulier et leur croissance plus rapide que celle des espèces spontanées. Après trois ans, il n'y a pas de différence marquée entre la placette perturbée non ressemée (SS-1) et la placette détruite ressemée (SS-4), les espèces semées dominant sur les deux placettes. Ceci indique une capacité élevée de régénération des mélanges employés, leur permettant ainsi de résister à long terme aux piétinements (fig. 17).

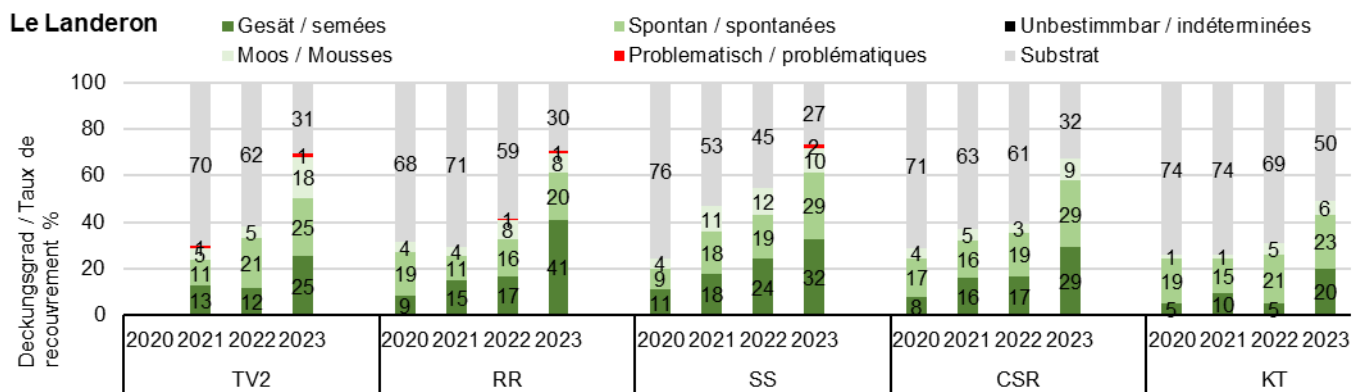


Figure 14: Evolution du taux de recouvrement végétal par catégorie au fil des années sur le site du Landeron.

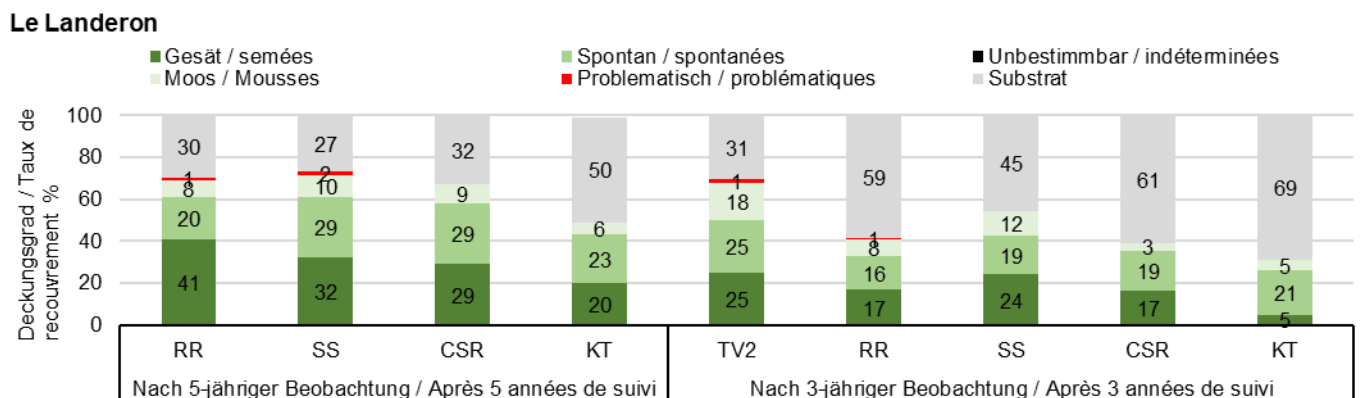


Figure 15: Taux de recouvrement végétal par catégorie au terme de cinq et trois années de suivi du site du Landeron.



16.06.2020 15.05.2023 =>

Figure 16: Le Landeron, 16.06.2020: renouvellement des voies. Aperçu des surfaces d'essai sud. 15.05.2023 de gauche à droite: placettes 9-11 (KT, CSR, RR) et placette 12 (SS) avec aperçu de la moitié nord du site.



31.08.2021

27.04.2022

15.05.2023

24.10.2023

Le Landeron

■ Gesät / semées ◆ Spontan / spontanées ● Unbestimmbar / indéterminées ● Problematisch / problématiques

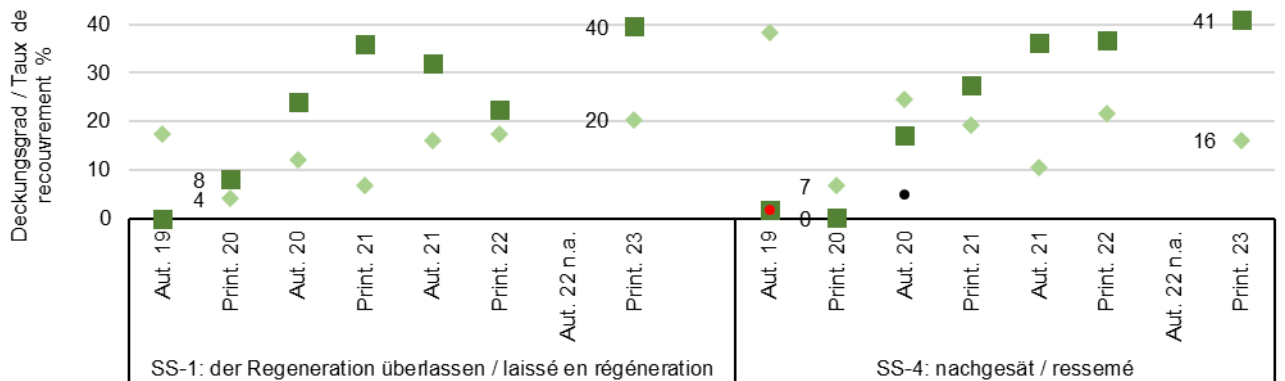


Figure 17: Le Landeron. Régénération de la végétation de la répétition SS-1 partiellement détruite (photos et figure de droite) comparée à la répétition SS-4 entièrement détruite et ressemée (figure de droite).

Cornaux

Sur les placettes test ensemencées, le recouvrement de la végétation vasculaire et muscinale est plus important (50-60%), par rapport aux placettes témoins (max 33% en 2021). La contribution des espèces semées est fluctuante au cours du temps. Un maximum de 13% d'espèces semées est atteint en 2022 (fig. 18). Les espèces problématiques sont légèrement plus présentes sur le témoin en 2020 (5%), elles diminuent avec le temps et se stabilisent à 1-2%, comme pour les placettes ensemencées en 2022 et 2023. La proportion de mousses est plus élevée sur les placettes ensemencées (~15%) que sur les placettes témoins (~10%).

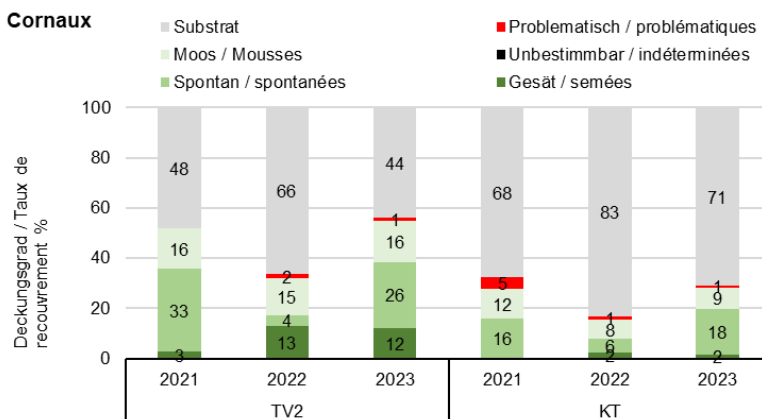


Figure 18: Evolution du taux de recouvrement de 2021 à 2023 sur le site de Cornaux

Perturbations

À Cornaux (annexe 1 C), aucune perturbation grave n'a été constatée.

Muttenz

A Muttenz, le recouvrement total de la végétation reste globalement très faible (fig. 19). Sur les parcelles ensemencées, il double entre 2020 (~10%) et 2021 (~20%) pour atteindre un maximum de 40% sur les placettes du mélange SS avec 24% d'espèces vasculaires. Les placettes RR, sursemées avec le mélange TV2 montrent une augmentation du recouvrement par les mousses, ainsi que des espèces semées et spontanées. Cette augmentation est nettement plus faible dans les placettes non-ensemencées. Au contraire des sites décrits précédemment, la part des espèces semées reste modeste encore en 2^{ème} année expérimentale.

La proportion d'espèces problématiques est élevée en 2020. Sur l'ensemble des placettes, elles composent la strate herbacée à environ 50%. Cette proportion disparaît presque complètement en 2021 alors que la proportion d'espèces spontanées et de mousses augmente fortement.

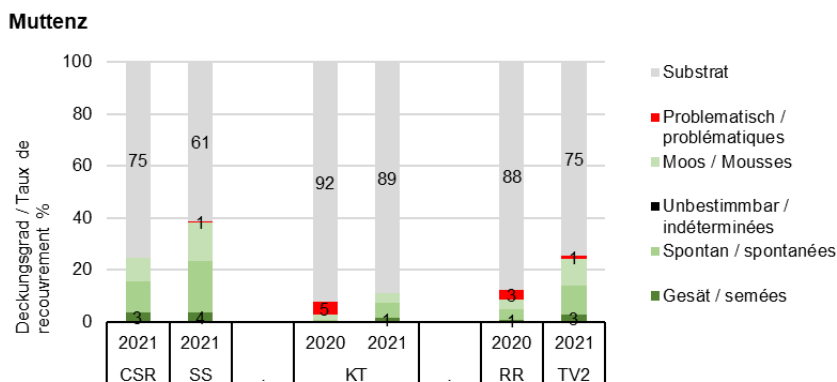


Figure 19: Taux de recouvrement sur le site de Muttenz. Après deux années d'observation pour les mélanges polyvalent (CSR) et tolérant au stress (SS) ainsi que le contrôle (KT); après une année d'observation pour les mélanges rudéral (RR) et ubiquiste (TV2).

Perturbations

La raison de l'échec quasi-total de tous les semis, mais aussi d'une faible présence d'espèces spontanées, demeurent à clarifier. Une différence par rapport aux autres sites est le piétinement prononcé par le personnel de passage ou entretenant les talus (annexe 1 D). L'établissement des plantes sur ce site ayant dû être considéré comme un échec dès la deuxième année d'essai, seuls des relevés de végétation qualitatifs - et non quantitatifs - ont été effectués après 2021.

En automne 2023, un pont a été rénové en amont de quelques placettes et des machines sur voie ont été utilisées. Celles-ci ont parfois fortement sollicité le substrat. Ces travaux n'ont certes pas d'impact sur les résultats, cependant

En automne 2023, un pont a été rénové en amont de quelques placettes et des machines sur voie ont été utilisées. Celles-ci ont parfois fortement sollicité le substrat. Ces travaux n'ont certes pas d'impact sur les résultats, cependant

ils mettent aussi en évidence, comme au Landeron en 2020, que les substrats de groisse concassé sont très vite remués sur les premiers centimètres détruisant ainsi la végétation qui s'y est établie, surtout les plantons.

Bavois

Si le recouvrement vasculaire est moyen et relativement constant dans le temps à Bavois, la proportion des espèces varie fortement en l'espace d'une année sur le témoin (fig. 20).

Comme à Muttenz, la part des espèces semées reste insignifiante en 2^{ème} année expérimentale, raison pour laquelle les relevés n'ont pas été poursuivis.

Également comme à Muttenz, la part d'espèces problématiques est élevée en 2020 et diminue nettement en 2021. Sur les parcelles ensemencées d'abord avec le mélange CC, puis avec le mélange TV2, elle diminue de 90%. Cette réduction est aussi très marquée sur les placettes témoins où on observe une diminution de 85% des espèces problématiques et de 56% des mousses en faveur des espèces spontanées qui augmentent de l'ordre de 190%. Les espèces semées voient leur modeste part même tripler.

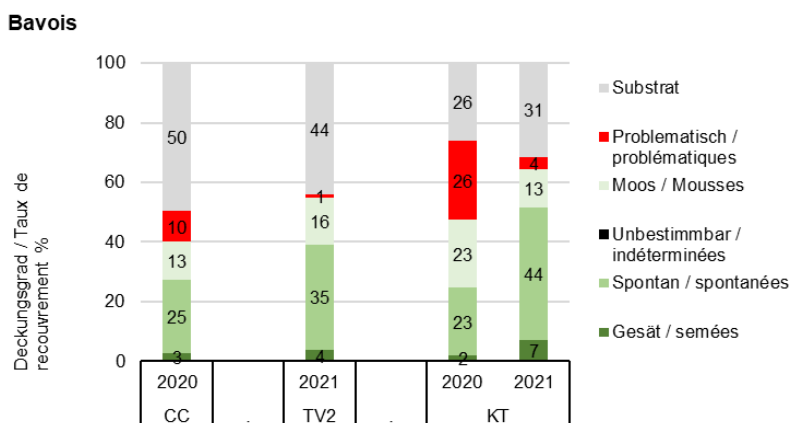


Figure 20: Taux de recouvrement sur le site de Bavois.

Après deux années d'observation pour le contrôle (KT) ; après une année d'observation pour les mélanges concurrentiel (CC) et ubiquiste (TV2).

Perturbations

Dans le cas du site de Bavois (annexe 1 E), une « vraie » banquette devait être intégrée dans l'essai. Il s'agissait de la banquette la mieux adaptée à l'essai en raison de son accessibilité, mais les conditions d'implantation des plantes ont été là aussi difficiles dès le départ: certaines zones ont été très intensément colonisées par la végétation spontanée, tandis que d'autres étaient quasiment dépourvues de végétation, où l'on a ensuite procédé aux semis.

La capacité concurrentielle ne s'est pas exprimée, probablement parce que les placettes n'avaient pas été sarclées avant les semis. Les travaux ayant eu lieu après les semis du mélange CC en 2019 auraient pu être interprétés comme entrave à l'établissement de ce mélange. Cependant, le mélange TV2, semé en 2020, n'a pas eu plus de succès. Il est aussi possible que les graines semées aient été emportées dans le talus par les courants d'air des trains passant à 160 km/h ou par des précipitations violentes avant de germer. Les parcelles expérimentales étant très étroites et disposées sur une banquette le long de tronçons ferroviaires, il est cependant plutôt probable que l'influence de bordure et de la végétation préétablie ait été trop forte.

Dole

La SNCF a abandonné le site de Villeneuve-Saint-Georges, décrit dans l'étude de faisabilité [25], au profit du site de Dole (département du Jura). Il s'agit d'une grande gare de triage et de rangement moyennement utilisée. Elle est située à environ 105 km à vol d'oiseau de Neuchâtel.

Avant la mise en place de l'essai, la gare de triage était fortement envahie par une végétation spontanée haute jusqu'à la taille, notamment par des plantes et de nombreuses espèces néophytes. Dans l'essai de la SNCF [24], 16 mélanges différents ont été testés sur 80 m², avec trois répétitions chacun, dont des mélanges vendus dans le commerce international. L'ensemencement s'est fait par hydroseeding (méthode de semis par projection hydraulique) aussi bien dans l'entre-voie que sur la voie.

Jusqu'au milieu du 20^e siècle, on utilisait des scories dans les voies ferrées, puis du ballast qui, entre-temps, s'est fortement arénisé et forme en partie des zones sableuses. Dans l'entre-voie, la structure du substrat est différente.

Aucune analyse du C_{org} n'a été effectuée, mais on peut supposer, en raison d'une accumulation au fil des ans, que leur teneur est très élevée par rapport aux sites suisses (annexe 1 G).

Sur la base d'une observation visuelle, on peut constater que de nombreux mélanges s'imposent par rapport à la végétation spontanée, dont le mélange suisse CC (fig. 21). Le relevé de végétation effectué à ce moment-là a montré que toutes les espèces contenues dans le mélange CC ont levé sur les surfaces d'essai. Néanmoins, il est difficile d'évaluer et de comparer l'efficacité des mélanges en termes d'expression de recouvrement. Les conditions expérimentales sur ce site sont en effet trop hétérogènes au niveau de la nature et de l'épaisseur des substrats.

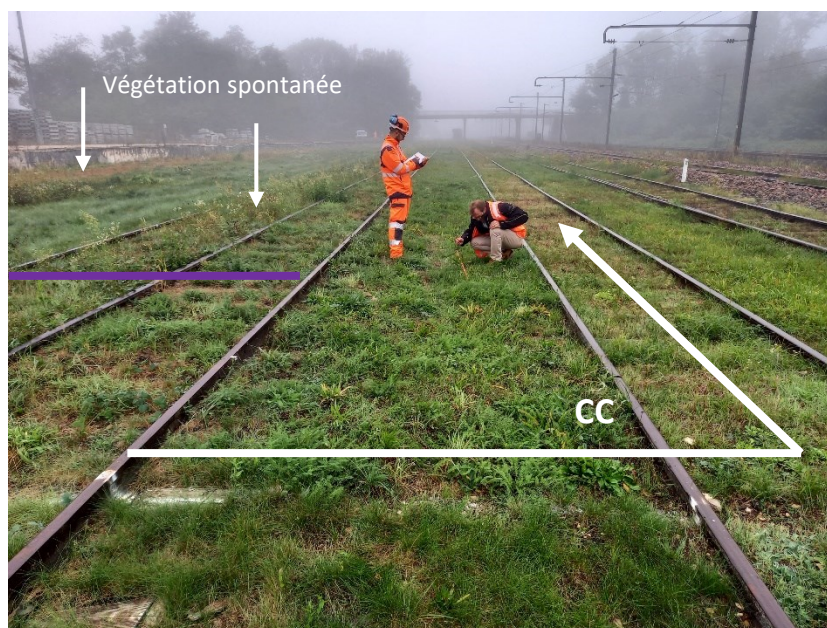


Figure 21: Divers mélanges comparés à la végétation spontanée

Le site aménagé de Lullier

Le premier semis du février 2020 a échoué. En effet, ce semis a été suivi d'une longue sécheresse en début de la période de végétation (annexe 3). Puis, les plantules ayant réussi à lever en mai ont été grillés par les chaleurs estivales. Seules quelques espèces présentes dans le relevé exhaustif ont été observées. En décembre 2020, tous les mélanges ont donc été ressemés.

Malgré cela, le recouvrement global de la végétation est resté faible sur le site de Lullier (fig. 22). De l'ordre de 10-20% au maximum pour les mélanges CSR et SS, il atteint 30% avec le mélange TV2 en 2023 et 44% avec le RR en 2023. La proportion d'espèces problématiques est globalement très faible et variable dans le temps. Par contre, la proportion d'espèces semées sur l'ensemble du recouvrement végétal est élevée et dépasse les trois quarts, dans la plupart des cas, pour tous les mélanges et le témoin. Sur le témoin, les taux de recouvrement sont similaires aux mélanges CSR et SS. La part d'espèces spontanées augmente fortement au printemps 2023 pour les mélanges CSR, SS et le témoin (12-14% d'augmentation).

A la différence des substrats des sites expérimentaux in situ, le substrat de Lullier a été livré directement depuis la carrière et était donc « stérile », ne contenant pas de banque grainière d'une flore préétablie. Toute flore spontanée était importée des environs au cours de l'essai. La matière organique du substrat de Lullier n'avait donc pas été analysée individuellement par placette. Cependant un premier échantillon mixte pris « sur le tas » avant l'installation des placettes avait révélé des teneurs de 17 mg/kg de C_{org} , donc similaires à Cornaux et Bavois. Un second échantillon mixte de toutes les placettes a été pris en mars 2023, révélant une teneur de 11 mg/kg de C_{org} , donc très pauvre et similaire à Muttenz. Si la différence entre les deux échantillonnages n'est pas due au hasard, elle pourrait s'expliquer par un lessivage qui en fait paraît probable eu égard au drainage de l'installation qui est plus important que sous conditions in-situ (annexe 1 G). Ces deux facteurs peuvent expliquer le faible recouvrement général.

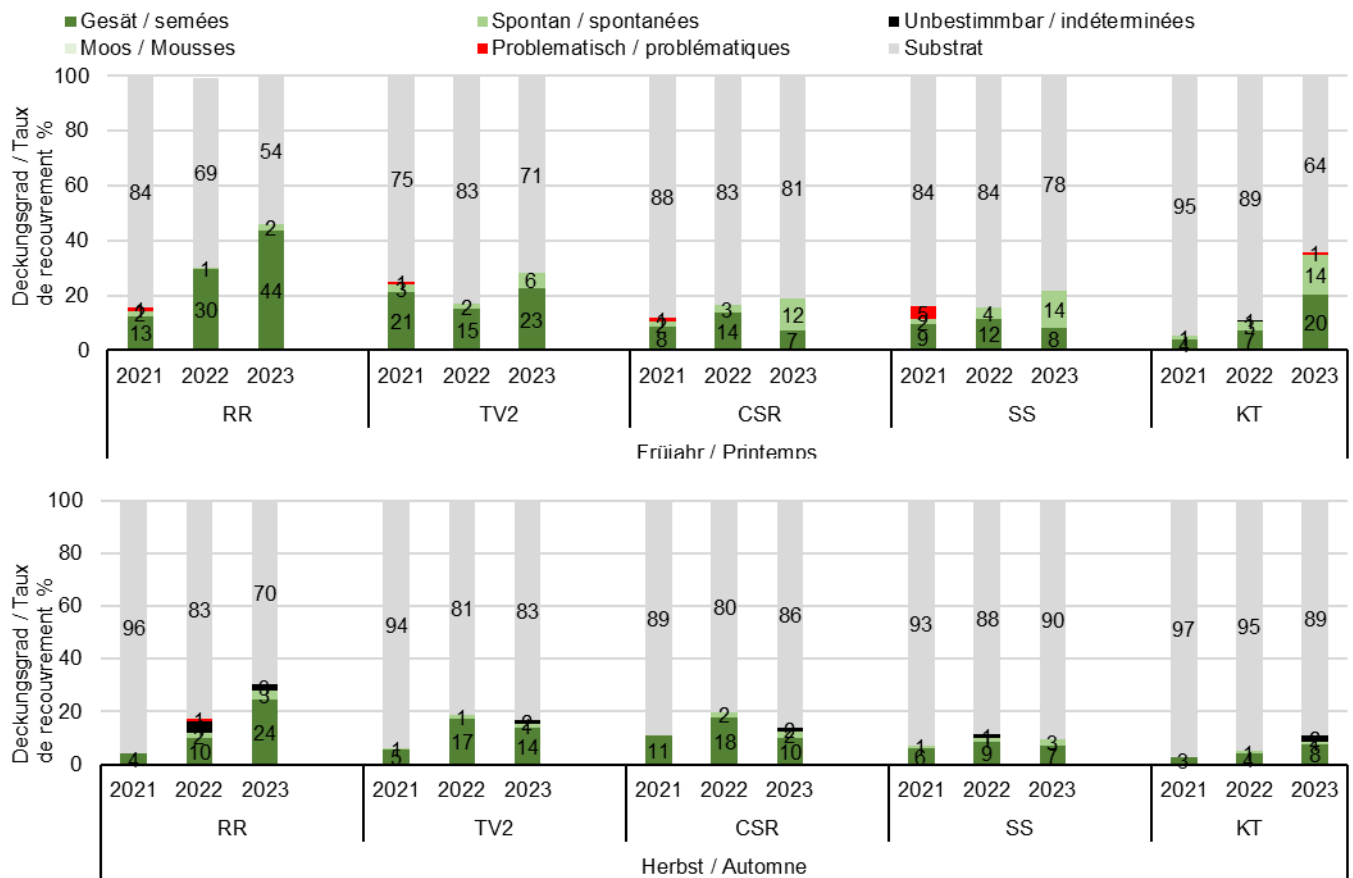
Lullier: ex situ Anlage auf Dach/ site aménagé sur toiture

Figure 22: Evolution du taux de recouvrement par mélange de 2021 à 2023 au printemps (en haut) et en automne (en bas) sur le site aménagé de Lullier.

4.2.1.2 Analyse qualitative de la composition spécifique: l'exemple du site de Cousset

L'analyse qualitative de l'expression des mélanges sur les sites se concentre sur l'analyse de la composition en espèces, de leur type biologique (annuel, vivace) et de la richesse spécifique observés après 5 ans de suivi, à l'exception du mélange ubiquiste « TV2 » (3 ans). Cette analyse permet ainsi de cerner la nature, la pérennité et la diversité du tapis végétal par modalité. Malheureusement, la présence de situations pédologiques très limitantes pour la croissance des végétaux (p.ex. Muttenz et Bavois – cf. chapitre précédent) et des perturbations imprévues en dépit des accords passés avec les gestionnaires des sites (piétinements, travaux, fauches précoces - cf. chapitre précédent) ne permettent pas une interprétation instructive sur ce point pour la majorité de sites. Seule la situation de Cousset, qui a subi de moindres perturbations (cf. chapitre précédent), est riche d'enseignement. C'est ainsi cette situation qui sera présentée et analysée de manière détaillée. L'évolution temporelle de la richesse spécifique (fig. 23), soit le nombre d'espèces par placette, est discutée par mélange ci-dessous, à l'exception du mélange compétitif CC qui n'a pas été semé à Cousset, mais à Muttenz, Bavois et Dole (F).

Mélange rudéral « RR »

Cinq ans après le semis, le cortège végétal issu du mélange rudéral « RR » (fig. 24) se caractérise par une très forte proportion d'espèces annuelles dont la contribution spécifique dépasse 60% (contribution spécifique cs = 61,8%) pour les 20 espèces les plus fréquentes. Parmi elles, cinq espèces à germination automno-hivernales: *Medicago minima*, *Arenaria serpyllifolia*, *Geranium robertianum* subsp. *purpureum*, *Saxifraga tridactylites* et *Bromus tectorum* représentent près de 40% (cs = 38,2%) de la biomasse du tapis végétal. Ce cortège d'espèces annuelles dominantes

est le même que celui du mélange ubiquiste « TV2 » et se différencie positivement des autres mélanges et des placettes témoins, par la présence de *Medicago minima* et *Bromus tectorum*.

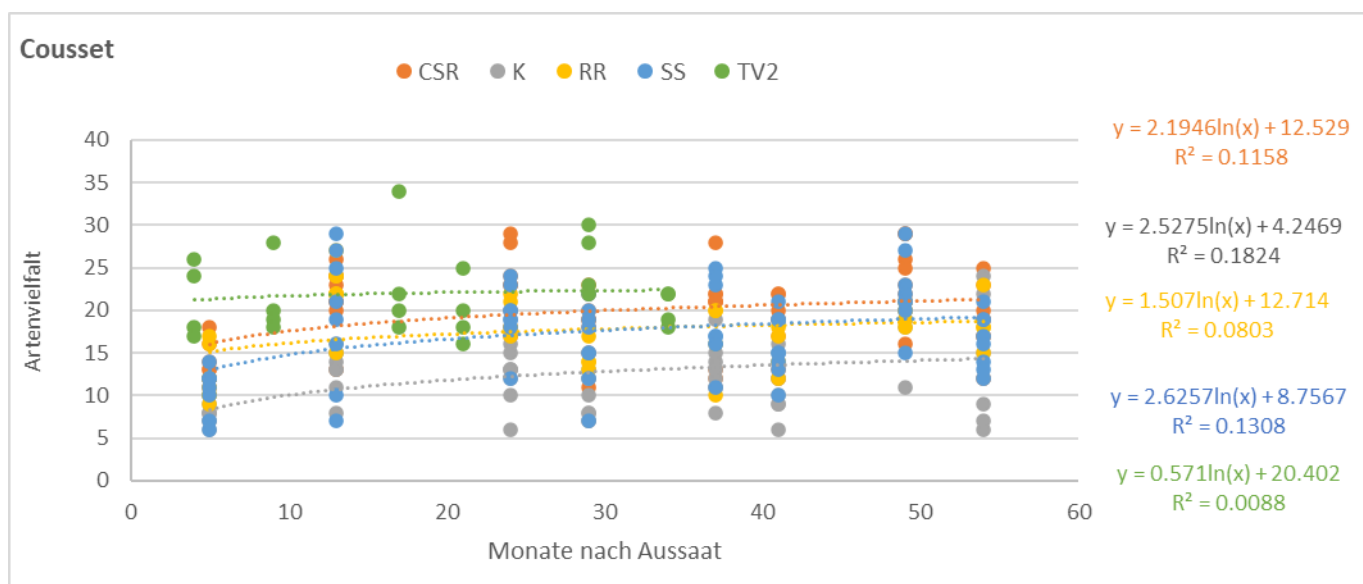


Figure 23: Evolution de la richesse spécifique des plantes du tapis herbacé selon les mélanges semés (n = 8 par modalité) sur le site de Cousset.

(● CSR = Mélange polyvalent, ● K = contrôle; ● RR = Mélange rudéral; ● SS = Mélange tolérant le stress; ● TV2 = Mélange ubiquiste)

Concernant les espèces vivaces, on compte 7 espèces parmi celles contribuant significativement à la biomasse du tapis végétal (cs = 28,8%). Les espèces les plus abondantes (*Lotus corniculatus*, *Anthyllis carpatica*, *Sanguisorba minor*...) sont des espèces polyvalentes à fort pouvoir de colonisation (stratégie CRS dominante) présentant une large distribution géographique. *Festuca laevigata* et *Sedum album* sont issues des placettes semées à proximité. Ce cortège d'espèces vivaces est assez similaire à celui du mélange ubiquiste « TV2 ».

Le nombre d'espèces par placette augmente progressivement de 16 en moyenne la première année à 19 au terme des 5 ans (fig. 23). Ce nombre est hiérarchiquement au quatrième rang des modalités suivies.

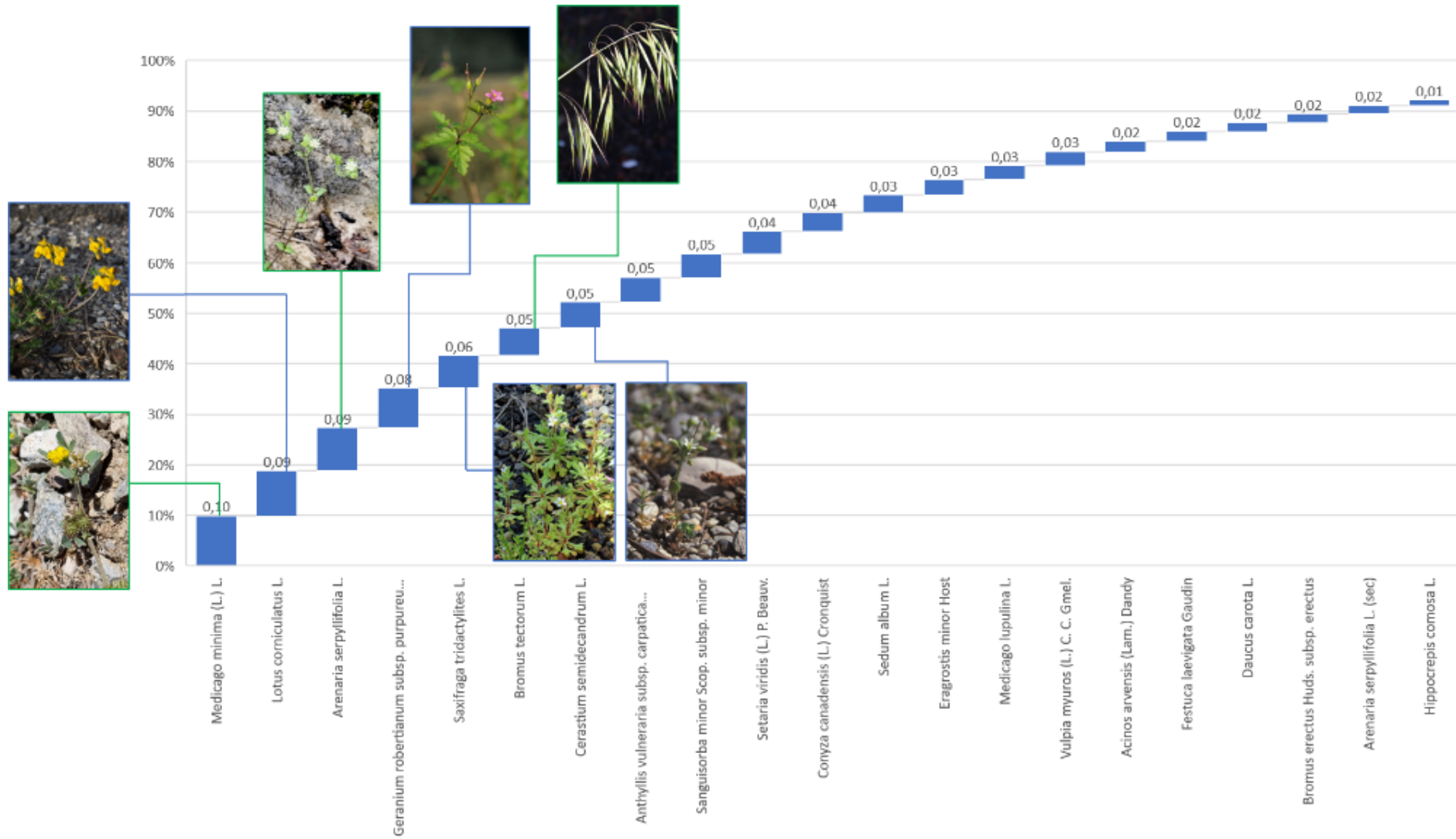


Figure 24: Contribution spécifique (cs) cumulée (> 1%) des espèces vasculaires relevées pour le mélange rudéral « RR » à la biomasse totale sur le site de Cousset (2023).

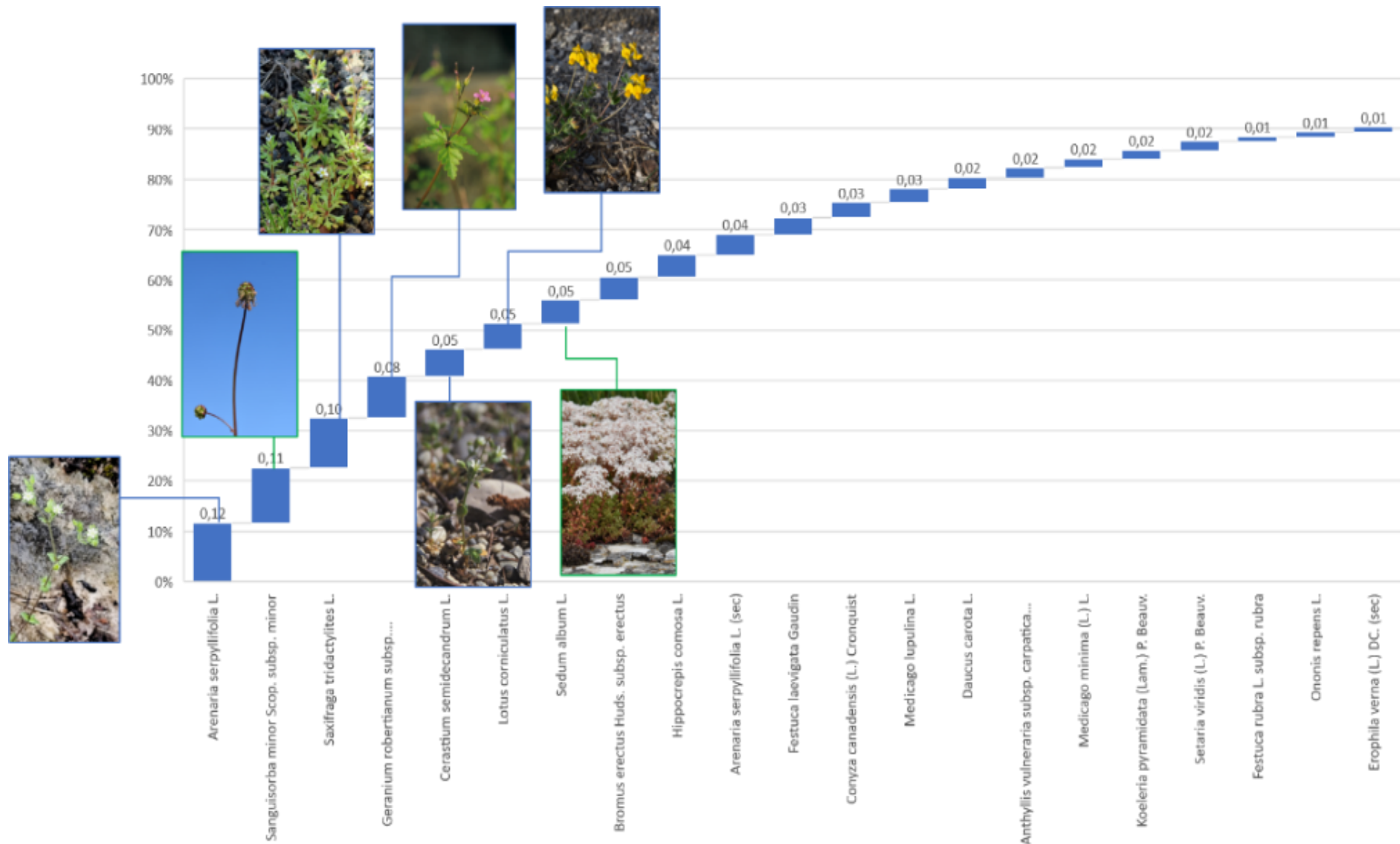


Figure 25: Contribution spécifique (cs) cumulée (> 1%) des espèces vasculaires relevées pour le mélange tolérant le stress « SS » à la biomasse totale sur le site de Cousset (2023).

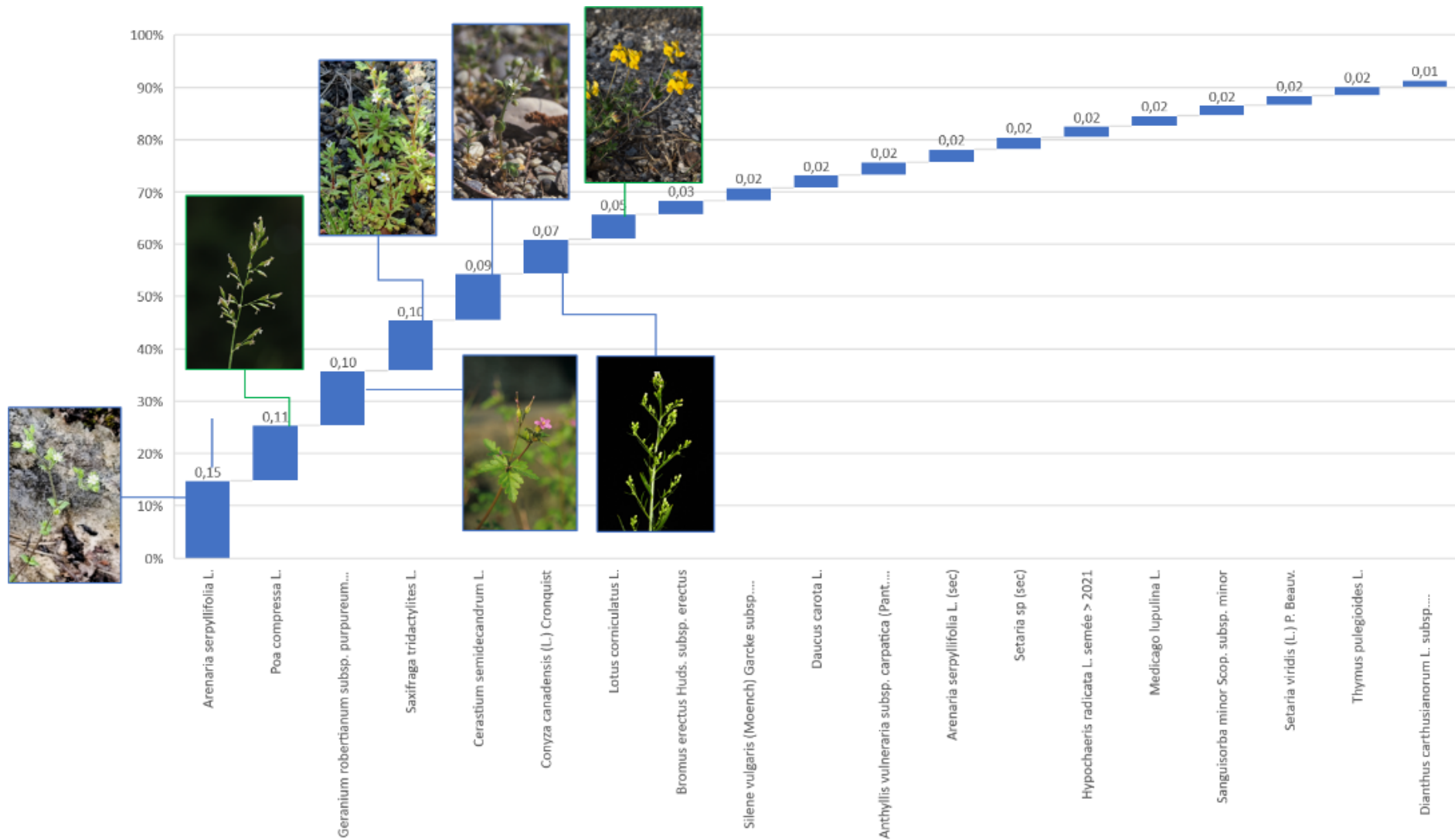


Figure 26: Contribution spécifique (cs) cumulée (> 1%) des espèces vasculaires relevées pour le mélange polyvalent « CSR » à la biomasse totale sur le site de Cousset (2023).

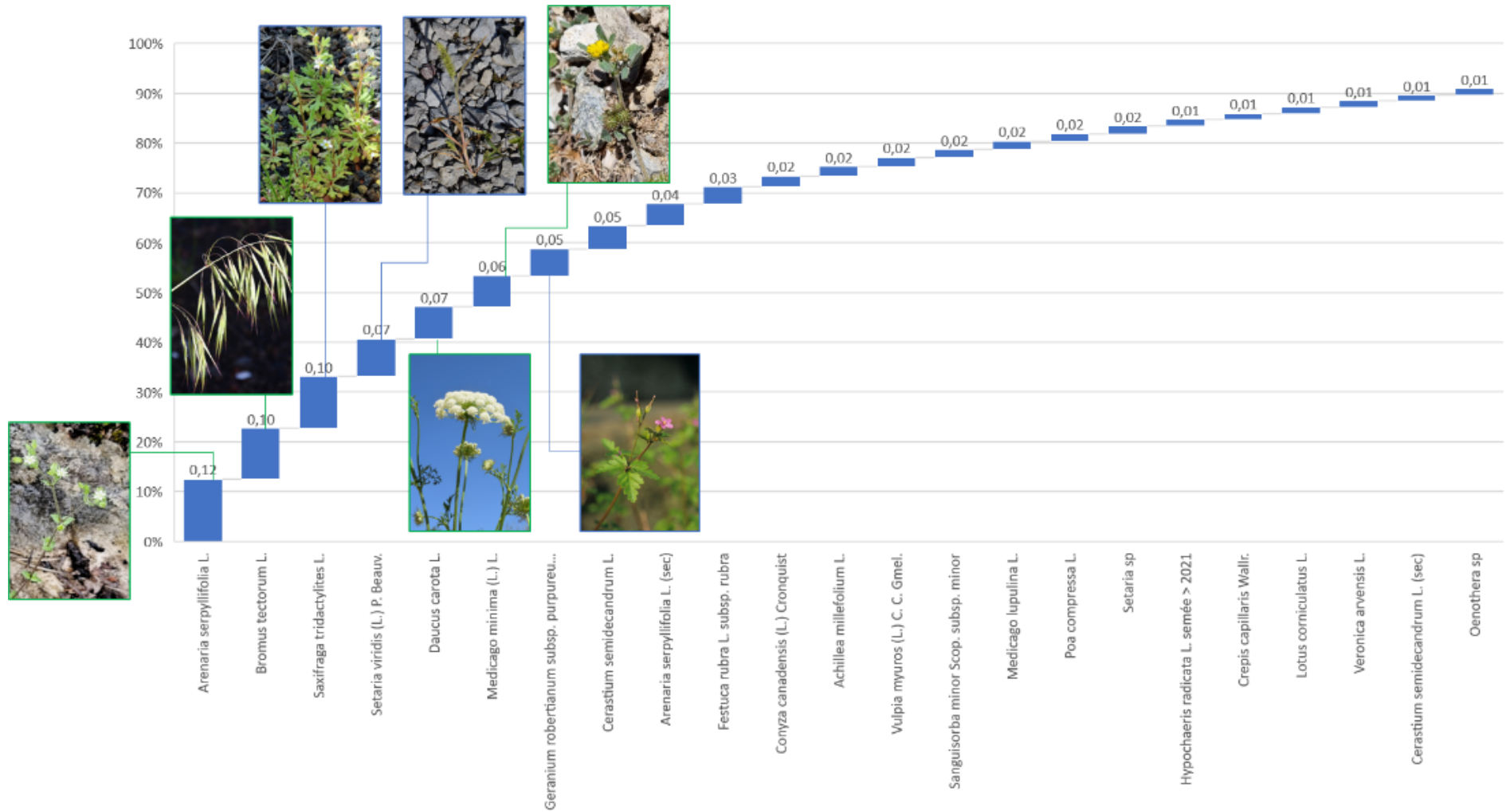


Figure 27: Contribution spécifique (cs) cumulée (> 1%) des espèces vasculaires relevées pour le mélange ubiquiste « TV2 » à la biomasse totale sur le site de Cousset (2023)

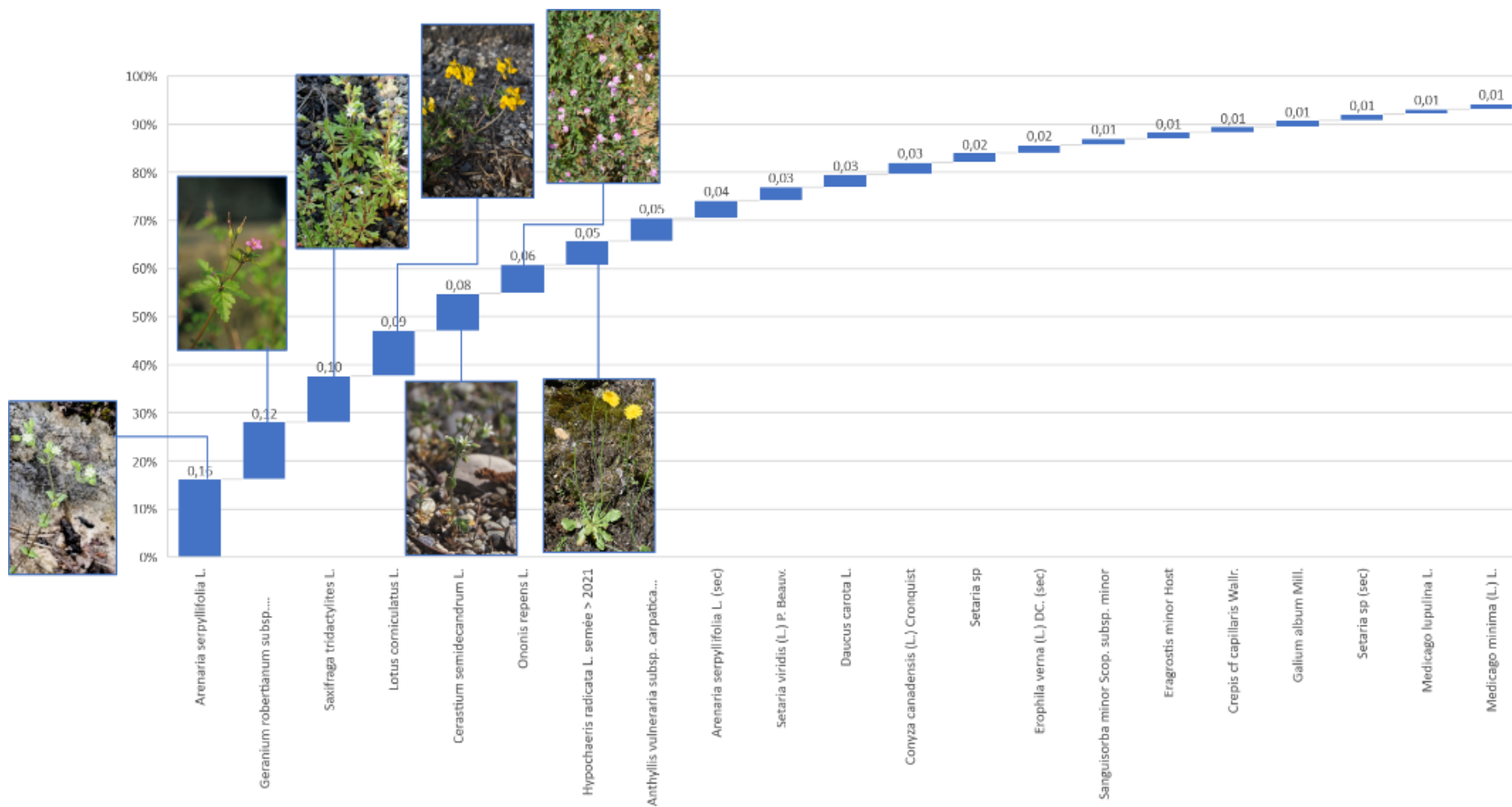


Figure 28: Contribution spécifique (cs) cumulée (> 1%) des espèces vasculaires relevées pour les placettes non ensemencées à la biomasse totale sur le site de Cousset (2023).

Mélange tolérant au stress « SS »

Cinq ans après le semis, le cortège végétal issu du mélange tolérant le stress « SS » (fig. 25) se caractérise par une proportion moyenne d'espèces annuelles dont la contribution spécifique atteint un peu plus de 50% (cs = 50,4%) pour les 20 espèces les plus fréquentes. Ces espèces annuelles sont essentiellement à germination automno-hivernales. Cinq espèces: *Arenaria serpyllifolia*, *Saxifraga tridactylites*, *Geranium robertianum* subsp. *purpureum*, *Cerastium semidecandrum* et *Medicago minima* représentant environ 40% (cs = 41,0%) de la biomasse du tapis végétal. Hormis *Bromus tectorum*, ce cortège est quasiment identique à celui du mélange ubiquiste « TV2 ».

Concernant les espèces vivaces, on compte 12 espèces parmi celles contribuant significativement à la biomasse du tapis végétale (cs = 42,1%). En regard des mélanges « TV2 » et « RR », ce mélange se différencie par une plus forte proportion de graminées xérophiles vivaces (cs = 12,3%) comme *Bromus erectus*, *Festuca laevigata*, *Koeleria pyramidata*, d'orpins, notamment *Sedum album*, *Sedum acre*, et de légumineuses telles que *Hippocrepis comosa*, *Ononis repens*.

Le nombre d'espèces par placette augmente progressivement de 15 en moyenne la première année à 19 au terme des 5 ans (fig. 23). Ce nombre est hiérarchiquement au troisième rang des modalités suivies.

Mélange polyvalent « CSR »

Cinq ans après le semis, le cortège végétal issu du mélange polyvalent « CSR » (fig. 26) se caractérise par une forte proportion d'espèces annuelles dont la contribution spécifique atteint près de 60% (cs = 59,4%) pour les 20 espèces les plus fréquentes. Parmi elles, quatre espèces à germination automno-hivernales: *Arenaria serpyllifolia*, *Geranium robertianum* subsp. *purpureum*, *Saxifraga tridactylites*, *Cerastium semidecandrum* représentent un peu plus de 45% (cs = 46,2%) de la biomasse du tapis végétal. Ce cortège d'annuelles se différencie du mélange ubiquiste « TV2 » par l'absence de *Bromus tectorum* et *Medicago minima*.

Concernant les espèces vivaces, on compte 10 espèces parmi celles contribuant significativement à la biomasse du tapis végétal (cs = 32,4%). En regard des mélanges « TV2 » et « RR », ce mélange se différencie par une plus forte proportion de graminées xérophiles vivaces (cs = 15,1%) comme *Poa compressa* et *Bromus erectus*, ainsi que des espèces de pelouses sèches telles que *Dianthus carthusianorum*, *Thymus pulegioides*.

Le nombre d'espèces par placette augmente progressivement de 18 en moyenne la première année, à 21 au terme des 5 ans (fig. 23). Ce nombre est hiérarchiquement au second rang des modalités suivies.

Mélange ubiquiste « TV2 »

Trois ans après le semis, le cortège végétal issu du mélange ubiquiste « TV2 » (fig. 27) se caractérise par une très forte proportion d'espèces annuelles dont la contribution spécifique dépasse 70% (cs = 71,9%) au sein des 20 espèces les plus abondantes. Parmi elles, cinq espèces à germination automno-hivernales: *Arenaria serpyllifolia*, *Bromus tectorum*, *Saxifraga tridactylites*, *Medicago minima* et *Geranium robertianum* subsp. *purpureum* représentent environ 50% (cs = 49,4%) de la biomasse du tapis végétal.

Les espèces vivaces contribuant significativement à la biomasse du tapis végétale sont peu nombreuses: *Achillea millefolium*, *Sanguisorba minor*, *Festuca rubra*, *Lotus corniculatus*. Elles présentent toutes une grande plasticité écologique (stratégie écologique CRS majoritaire). La contribution de ces espèces au tapis végétal est faible puisqu'elle dépasse à peine 10% (cs = 12,5%).

Le nombre d'espèces par placette est relativement stable et élevé dès la première année (fig. 23): 21 à 22 espèces en moyenne ont été recensées durant les 3 années de suivi, avec un maximum à 34. Ce chiffre est le plus élevé de l'ensemble des modalités.

Placettes témoins nonensemencées « KT »

Cinq ans après le semis, le cortège végétal des placettes témoins non semées (fig. 28) se caractérise par une très forte proportion d'espèces annuelles dont la contribution spécifique dépasse 60% (cs = 63,5%) pour les 20 espèces les plus fréquentes. Parmi elles, quatre espèces à germination automno-hivernales: *Arenaria serpyllifolia*, *Geranium robertianum* subsp. *purpureum*, *Saxifraga tridactylites*, *Cerastium semidecandrum* représentent un peu plus de 45% (cs = 45,4%) de la biomasse du tapis végétal. Ce cortège d'espèces annuelles dominantes est le même que celui

du mélange polyvalent « CSR » et se différencie par l'absence de *Bromus tectorum* et *Medicago minima* du mélange ubiquiste « TV2 ».

Concernant les espèces vivaces, on compte 7 espèces parmi celles contribuant significativement à la biomasse du tapis végétal (cs = 28,8%). Ces espèces (*Lotus corniculatus*, *Hypochaeris radicata*, *Anthyllis carpatica*, *Sanguisorba minor*, ...) sont des espèces polyvalentes à fort pouvoir de colonisation (stratégies à dominante CRS) présentant une large distribution géographique. Elles sont issues des placettes semées à proximité (cf. chapitre précédent) et probablement de l'environnement proche. Ce cortège d'espèces vivaces est assez similaire à celui du mélange « TV2 » et possède logiquement une stratégie écologique similaire.

Le nombre d'espèces par placette augmente progressivement (fig. 23) de 10 en moyenne la première année à 15 au terme des 5 ans. Ce nombre est significativement inférieur aux placettes semées.

Conclusion: L'influence de la nature du mélange sur la composition végétale – les enseignements du site de Cousset

➤ **Similarité des mélanges: une composition en espèces annuelles majoritaire et relativement homogène**

La part des espèces annuelles dans le tapis végétal est majoritaire et hiérarchiquement la suivante: mélange SS (cs = 50,4%), CSR (cs = 59,4%), RR (cs = 61,8%), K (cs = 63,5%) et TV2 (cs = 71,9%). Indépendamment des mélanges, certaines espèces sont régulières et abondantes quelle que soit la situation (semis ou non, nature du mélange).

Parmi les espèces semées, les plus fréquentes et régulières au printemps sont les espèces annuelles à germination automno-hivernale comme *Arenaria serpyllifolia*, *Cerastium semidecandrum*. Elles sont également abondantes et régulières sur les placettes témoins non semées, ce qui suppose un apport spontané complémentaire à ces populations ; la part des plantes semées vs non semées au sein d'une même espèce n'étant pas quantifiable sur la base d'une simple observation morphologique. Les mélanges ubiquiste « TV2 » et rudéral « RR » se différencient par l'abondance de *Bromus tectorum* et *Medicago minima*.

Parmi les espèces strictement spontanées, *Geranium robertianum* subsp. *purpureum* est la plus régulièrement présente et abondante. Cette espèce sud-européenne est recensée dans différents pays de la région méditerranéenne le long des voies de chemin de fer où elle trouve des conditions microclimatiques équivalentes à celles de la région méditerranéenne [53]. *Saxifraga tridactylites* est également très abondante au printemps (mars-avril), mais sa fructification précoce engendre une disparition rapide des populations.

➤ **Spécificité des mélanges: une composition en espèces vivaces le plus souvent minoritaire, mais différenciée**

La part des espèces vivaces dans le tapis végétal est hiérarchiquement la suivante: mélange TV2 (cs = 12,5%), RR (cs = 27,6%), K (cs = 28,8%), CSR (cs = 32,4%) et SS (cs = 42,1%).

La spécificité du tapis herbacé issu des mélanges testés s'exprime essentiellement par leur composition en espèces vivaces, même si leur part dans le tapis végétal est plus faible.

1. Les mélanges tolérant le stress « SS » et polyvalent « CSR » se différencient par le développement d'espèces vivaces xérotolérantes à capacité de dispersion faible ou limitée, pas ou peu présente dans l'environnement géographique proche. Le mélange « CSR » se singularise par l'apport d'espèces vivaces mésoxérophiles de pelouses mi-sèches (*Mesobromion*) telles que *Dianthus carthusianorum* ou *Thymus pulegioides*. Le mélange « SS » se singularise par l'apport d'espèces vivaces xérophiles de familles diversifiées propres aux pelouses très sèches (*Xerobromion*), comme celle des graminées (*Festuca laevigata*, *Koeleria pyramidata*), des crassulacées (*Sedum album*, *Sedum acre*) ou encore des légumineuses (*Hippocrepis comosa*).
2. Les mélanges ubiquiste « TV2 », rudéral « RR » et les placettes témoins non semées présentent une flore vivace moins spécialisée (abondance de *Achillea millefolium*, *Lotus corniculatus*, *Hypochaeris radicata*, *Anthyllis carpatica*, *Sanguisorba minor*...) souvent initiatrice de successions écologiques dans de nombreux contextes (prairies fleuries, pistes de ski, berges de cours d'eau...). Ces espèces polyvalentes à fort pouvoir de colonisation présentent une large distribution géographique. Cette grande polyvalence et

cette forte capacité de dispersion à conduite les spécialistes du génie végétale à les qualifier d'espèces « roue de secours ». Elles peuvent le cas échéant être renforcées par des populations issues de l'environnement géographique proche.

➤ Un semis qui augmente la richesse des communautés végétales

Du point de vue de la richesse spécifique, le fait de semer augmente significativement la richesse en espèces au sein de la communauté avec un écart moyen de 5 espèces par placette en regard d'une situation semée (hors mélange ubiquiste « TV2 »). Cet écart est de surcroît atténué avec le temps dans le cadre de cet essai par un effet de diffusion de proximité (la présence proximale de placettes semées induit la présence de taxon comme *Festuca laevigata*, régionalement absent, au sein des placettes témoins). Le semis comble donc un déficit de dispersion notamment pour les espèces spécialistes xérotolérantes des pelouses sèches.

Le temps permet une augmentation progressive de la diversité des communautés qui augmentent en moyenne de 3 à 5 espèces en 5 ans, à l'exception du mélange ubiquiste « TV2 » dont la grande richesse spécifique initiale du mélange semble « saturer » l'ensemble des niches écologiques.

4.2.2 La réaction des mélanges: analyses du recouvrement et de la composition floristique sur l'ensemble des sites

Ce chapitre présente les expressions de la végétation et de la flore sur l'ensemble des sites, indépendamment des modalités considérées dans un premier temps (4.2.2.1), puis selon les mélanges semés en regard d'une situation témoin (non semée) dans un second temps (4.2.2.2), en intégrant une analyse des facteurs environnementaux (4.2.2.3). L'ensemble de ces analyses se concentre sur l'évolution du recouvrement de la végétation, dont la part des espèces semées et spontanées (problématiques ou non), ce qui permet de déterminer la vitesse d'implantation de la végétation par modalité, et d'identifier des causalités. Le chapitre 4.2.2.4 présente en synthèse les enseignements généraux de ces analyses.

4.2.2.1 Analyse générale du recouvrement et de la composition floristique

L'analyse des valeurs moyennes de recouvrement, quel que soit le mélange considéré et la saison, montre une grande variabilité la première année puisqu'elle fluctue de 9% (Muttentz) à près de 47% (Cousset) (fig. 29). Elle présente ensuite une évolution progressive d'environ 10% par an sur deux sites favorables (de 47 à 87% à Cousset, de 25 à 67% au Landeron suivis durant 4 années). Muttentz et Bavois (suivis seulement sur 2 ans) et Cornaux (suivi durant 3 ans) présentent une progression du recouvrement limitée, réduite à environ 10% sur toute la période de suivi.

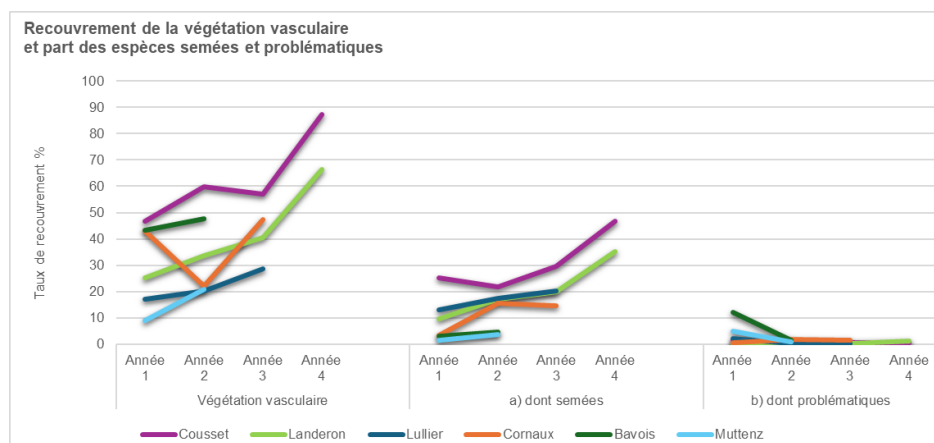


Figure 29: Evolution du recouvrement moyen de la végétation vasculaire (gauche) et part des espèces semées (milieu) et problématiques (droite) sur les six sites ; tous mélanges confondus, sans les témoins.

Les espèces semées

La contribution des espèces semées au recouvrement total est significativement plus élevée que celles des espèces spontanées à la même période sur tous les sites (Kruskal-Wallis $p < 0,05$). Elle montre une progression régulière au recouvrement, d'environ 5% par an, au long des 4 années de suivi sur les sites favorables à la croissance végétale comme à Cousset – de 25 à 47%, au Landeron – de 10 à 35%, mais également sur le site ex situ de Lullier – de 13 à 20%. L'augmentation de ces valeurs indiquent que les espèces semées sont adaptées et se reproduisent sur ces sites au point de coloniser les placettes non semées (cf. chap. 4.3.1.2). Sur les trois sites globalement défavorables à la croissance végétale, les valeurs de recouvrement de ces espèces sont très faibles la première année (Muttentz et Bavois - $< 5\%$) et stagnent.

L'analyse de la composition spécifique de tous les mélanges confondus et sur l'ensemble des sites (en intégrant les données printanières et automnales), montre que les 10 espèces semées les plus recensées en 5 années sont *Daucus carota*, *Bromus erectus*, *Sedum album*, *Sanguisorba minor*, *Poa compressa*, *Arenaria serpyllifolia*, *Crepis capillaris*, *Medicago lupulina*, *Plantago lanceolata* et *Anthyllis carpatica* (tabl. 6, fig. 30 et annexe 2). Il s'agit logiquement d'espèces mésoxéro- à xérophiles plutôt pionnières, communes en stations sèches.

Tableau 6: Nombre d'occurrences des 10 espèces semées les plus fréquemment recensées (printemps & automne confondus) sur l'ensemble des sites suivis.

Taxon	Occurrence
<i>Daucus carota</i> L.	326
<i>Bromus erectus</i> Huds. subsp. <i>erectus</i>	308
<i>Sedum album</i> L.	287
<i>Sanguisorba minor</i> Scop. subsp. <i>minor</i>	285
<i>Poa compressa</i> L.	258
<i>Arenaria serpyllifolia</i> L.	225
<i>Crepis capillaris</i> Wallr.	224
<i>Medicago lupulina</i> L.	207
<i>Plantago lanceolata</i> L.	178
<i>Anthyllis vulneraria</i> subsp. <i>carpatica</i> (Pant.) Nyman	177



Figure 30: Illustration des espèces semées les plus fréquentes sur l'ensemble des sites, tous mélanges confondus.
© Patrice Prunier

Les espèces spontanées

Sur l'ensemble des sites (en intégrant les données printanières et automnales), les 10 espèces spontanées les plus recensées en 5 années sont *Geranium robertianum* subsp. *purpureum*, *Arrhenatherum elatius*, *Conyza canadensis*, *Erophila verna*, *Setaria viridis*, *Echium vulgare*, *Saxifraga tridactylites*, *Galium album*, *Senecio jacobaea*, *Eragrostis minor* (tabl. 7, fig. 31 et annexe 10 A). Il s'agit aussi d'espèces mésoxéro- à xérophiles plutôt pionnières communes en stations sèches.

Les espèces spontanées pionnières annuelles ou bisannuelles sont majoritairement des espèces indigènes (*Echium vulgare*, *Melilotus albus*) ou néophytes européennes (*Geranium robertianum* subsp. *purpureum*) ou nord-américaines (*Conyza canadensis*, *Erigeron annuus*) structurant ordinairement des communautés végétales anthropophiles thermophiles de sols secs à très secs (*Echio-Meliloletum*, *Bromo-Erigeretum*), voir plus frais (*Dauco-Picridetum*) [54]. Le haut degré de fréquence d'*Arrhenatherum elatius* et de *Galium album* est plus inattendu. Il s'explique par une colonisation proximale sur le site de Bavois en provenance du talus situé à proximité.

Tableau 7: Nombre d'occurrences des 10 espèces spontanées les plus fréquemment recensées (printemps & automne confondus) sur l'ensemble des sites suivis.

Taxon	Occurrence
<i>Geranium robertianum</i> subsp. <i>purpureum</i> (Vill.) Nyman	287
<i>Arrhenatherum elatius</i> (L.) J. Presl & C. Presl	222
<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronquist	200
<i>Erophila verna</i> (L.) DC. (sec)	186
<i>Setaria viridis</i> (L.) P. Beauv.	183
<i>Echium vulgare</i> L.	173
<i>Saxifraga tridactylites</i> L.	162
<i>Galium album</i> Mill.	148
<i>Senecio jacobaea</i> L.	98
<i>Eragrostis minor</i> Host	95

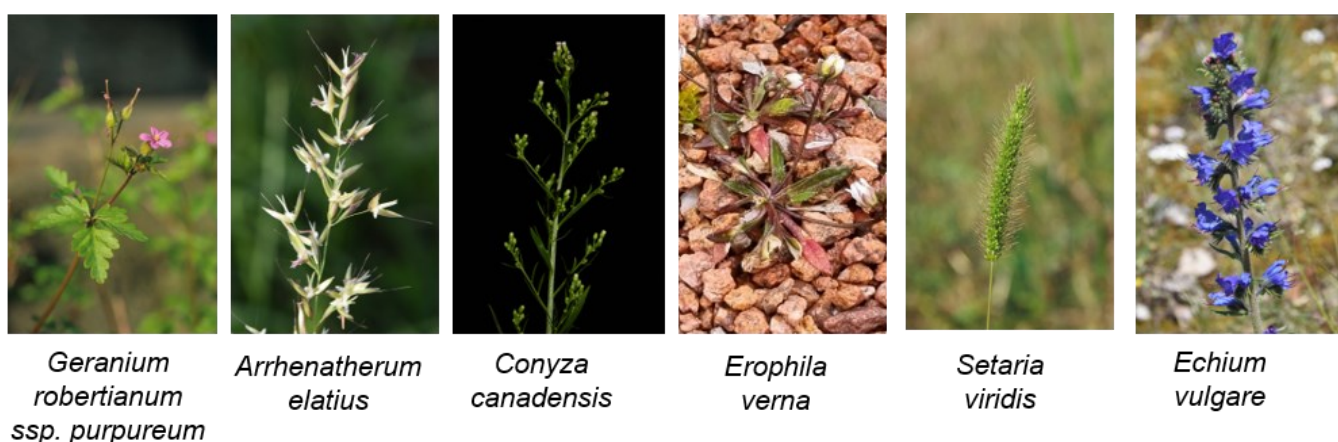


Figure 31: Illustration des espèces spontanées les plus fréquentes sur l'ensemble des sites.

© Patrice Prunier

Les espèces problématiques

La part des espèces problématiques contribuant au recouvrement est réduite et statistiquement significativement plus faible que la part des espèces semées et autres espèces spontanées (annexe 9). Globalement elle présente un recouvrement inférieur à 12% la première année, puis se stabilise dès la deuxième année à un niveau très faible ($R < 2\%$). Cette part est néanmoins plus importante sur les placettes témoins des sites où la croissance végétale est limitée comme Muttentz, Bavois et Cornaux. Elle peut ainsi atteindre un recouvrement de 26% à Bavois en 2020. Sur ces 3 sites, 8 placettes sur dix présentent une part d'espèces problématiques non significativement plus faible que celles des espèces semées et autres espèces spontanées, ce qui signifie que les espèces problématiques s'expriment davantage sur les zones non semées de sites peu favorables à la croissance végétale ; l'effet de concurrence des espèces semées et autres espèces spontanées étant limité.

Sur l'ensemble des sites (en intégrant les données printanières et automnales), les 10 espèces problématiques les plus recensées en 5 années sont *Lactuca serriola*, *Oenothera biennis*, *Pastinaca sativa*, *Rubus fruticosus* aggr., *Hedera helix*, *Epilobium dodonaei*, *Vicia nigra*, *Convolvulus arvensis*, *Potentilla reptans* et *Rubus caesius* (tabl. 8, fig. 32 et annexe 10 B). Il s'agit d'espèces pionnières méso- à xérophiles majoritairement anthropophiles à très forte aptitude à la dispersion, soit à longue distance par le vent (*Lactuca serriola*, *Epilobium*...) ou les oiseaux granivores (*Oenothera*, *Pastinaca*), soit de manière proximale et végétative par marcottage (*Rubus*, *Potentilla*).

Les genres dispersés par le vent ou les oiseaux (*Lactuca*, *Oenothera*, *Pastinaca*, *Epilobium*, *Cirsium*, *Verbascum*) sont implantés sur les entre-voies et les banquettes. Ils y sont indésirables en raison de leur grande tige (plusieurs pour *Epilobium*) qui s'indure en séchant à la fin du cycle biologique, augmentant encore leur rigidité. L'intervention sur ces espèces, présentant un optimum de germination sur substrat « neuf » récemment mis en place, est à effectuer dès leur implantation.

Les genres à forte multiplication végétative (*Rubus*, *Potentilla*, *Hedera*, *Clematis*, *Calystegia*) s'implantent sur les banquettes à partir de populations sources situées à proximité des banquettes sur les talus au sol plus épais et frais. Le traitement de ces populations implique un broyage régulier de ces zones périphériques. Seul le genre *Equisetum* s'implante directement sur les banquettes. Quelques ligneux (*Populus*, *Prunus*, *Ligustrum*) sont également présents ponctuellement.

Tableau 8: Nombre d'occurrences des 10 espèces problématiques les plus fréquemment recensées (printemps & automne confondus) sur l'ensemble des sites suivis.

Taxon	Occurrence
<i>Lactuca serriola</i> L.	181
<i>Oenothera biennis</i> L.	44
<i>Pastinaca sativa</i> L.	40
<i>Rubus fruticosus</i> aggr.	36
<i>Hedera helix</i> L. (ex)	33
<i>Epilobium dodonaei</i> Vill.	28
<i>Vicia sativa</i> subsp. <i>nigra</i> (L.) Ehrh.	22
<i>Convolvulus arvensis</i> L.	20
<i>Potentilla reptans</i> L.	19
<i>Rubus caesius</i> L.	19

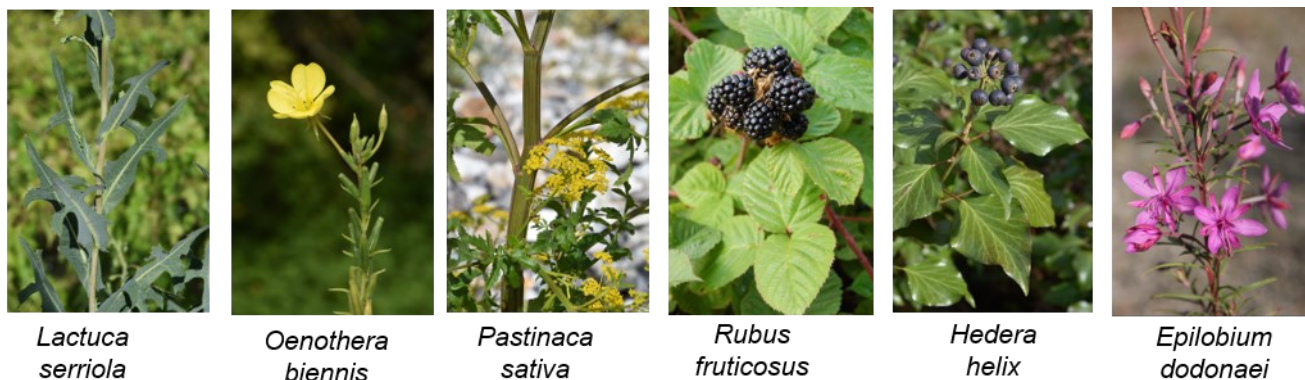


Figure 32: Illustration des espèces problématiques les plus fréquentes sur l'ensemble des sites.

© Patrice Prunier

4.2.2.2 Analyse du recouvrement et de la composition floristique par type de mélanges

Recouvrement

L'analyse des valeurs brutes de recouvrement selon le type de mélange quelle que soit la saison montre la grande variabilité des données et une faible tendance à l'augmentation avec le temps (fig. 33). Globalement, sur l'ensemble des valeurs considérées, le recouvrement initial et la progression sont les plus élevés pour les mélanges TV2 et RR, moyenne pour les mélanges SS et CSR, et plus faibles pour le mélange CC et le témoin (K).

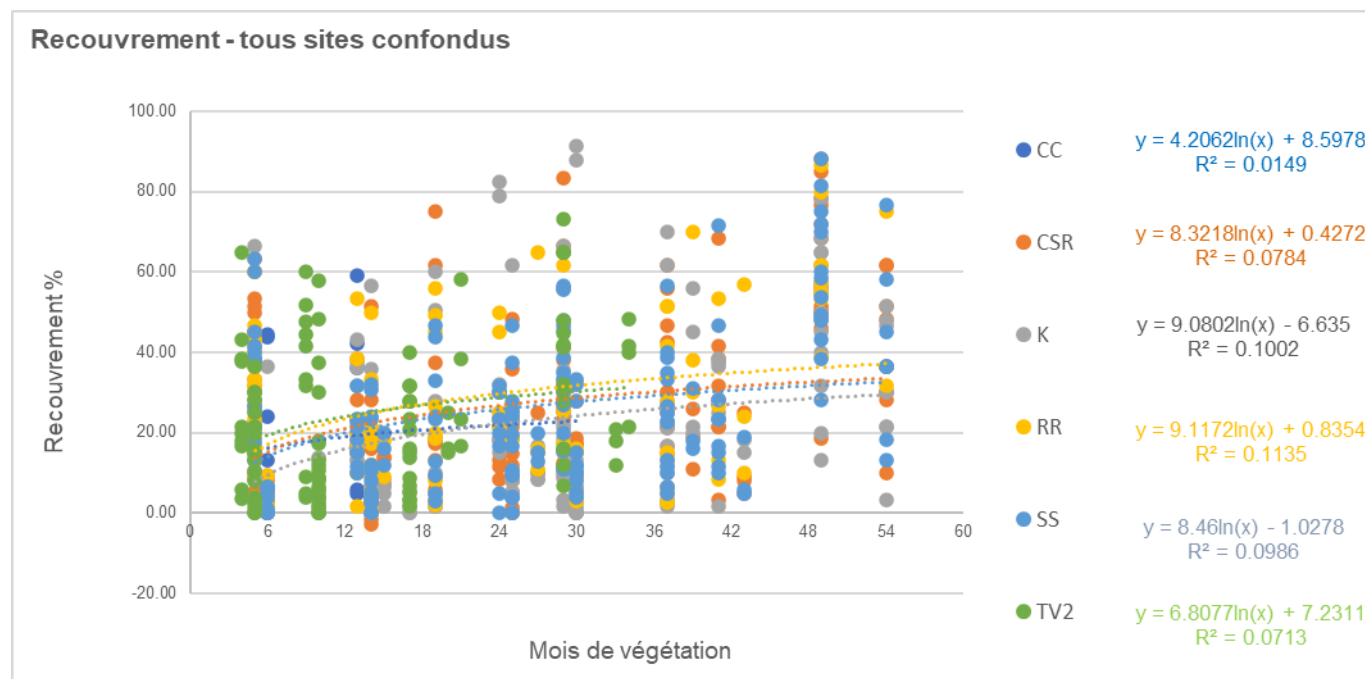


Figure 33: Evolution des valeurs brutes de recouvrement selon le type de mélange pour l'ensemble des placettes suivies.

L'évolution du recouvrement total du mélange RR est majoritairement supporté par l'évolution de la contribution des espèces semées sur les sites de Cousset et du Landeron, qui évoluent respectivement de 21 à 48% et de 9 à 41% (fig. 34) entre 2020 et 2023 (cette part d'espèces semées dans le tapis végétal n'étant statistiquement pas nécessairement plus importante que celles des autres mélanges – annexe 11). La progression est notable également sur la situation ex situ (site de Lullier – de 4 à 24% entre 2021 et 2024). L'augmentation de ces valeurs indiquent que les espèces semées sont adaptées et se reproduisent sur les sites, tandis que la part des espèces spontanées fluctue entre 16 et 23% à Cousset et 19 et 20% au Landeron, sans présenter une tendance évolutive nette. Ce mélange se développe de manière synchrone avec la flore spontanée.

L'évolution du recouvrement total du mélange TV2 est statistiquement supporté par l'évolution de la contribution des espèces semées sur les sites de Cousset et de Lullier, qui évoluent respectivement de 11 à 41% et de 5 à 14% (fig. 35) entre 2021 et 2023 (cette part d'espèces semées dans le tapis végétal étant souvent statistiquement plus importante que celles des autres mélanges – annexe 9). La progression du recouvrement est également notable au Landeron, mais avec une part équilibrée entre les espèces semées et spontanées (R moyen = 25% pour ces deux catégories). Le recouvrement moyen est plus important à Cousset, qu'au Landeron (R moyen = 88% vs 69% en 2023 après 3 ans). Les placettes de ce second site ont néanmoins été perturbées. L'augmentation des valeurs de recouvrement indique que les espèces semées sont adaptées et se reproduisent sur ces 3 sites. Cette augmentation est synchrone d'une augmentation du recouvrement des espèces spontanées (de 21 et 30% à Cousset et de 11 et 25% au Landeron), sauf sur le site de Lullier où le recouvrement de la flore spontanée demeure très faible (R moyen = 4%). La fluctuation des données sur le site de Cornaux les rend plus difficilement interprétables. La part majoritaire d'espèces spontanées en 2021 (R moyen = 33%) et en 2023 (R moyen = 26%) indique que ce mélange ne s'est pas correctement développé sur ce site. Il en va de même à Muttenz et Bavois.

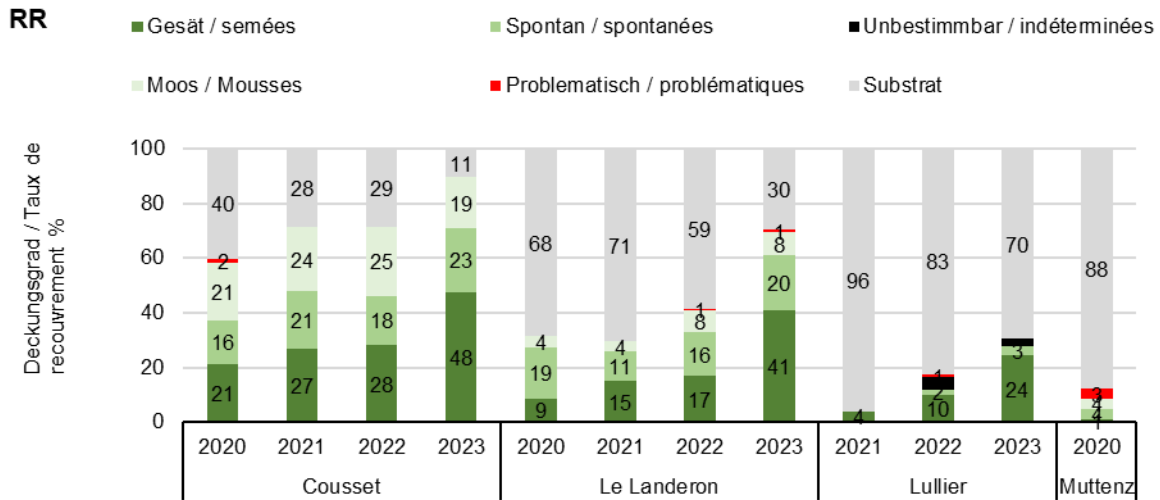


Figure 34: Evolution du recouvrement pour le mélange rudéral « RR » selon les sites.

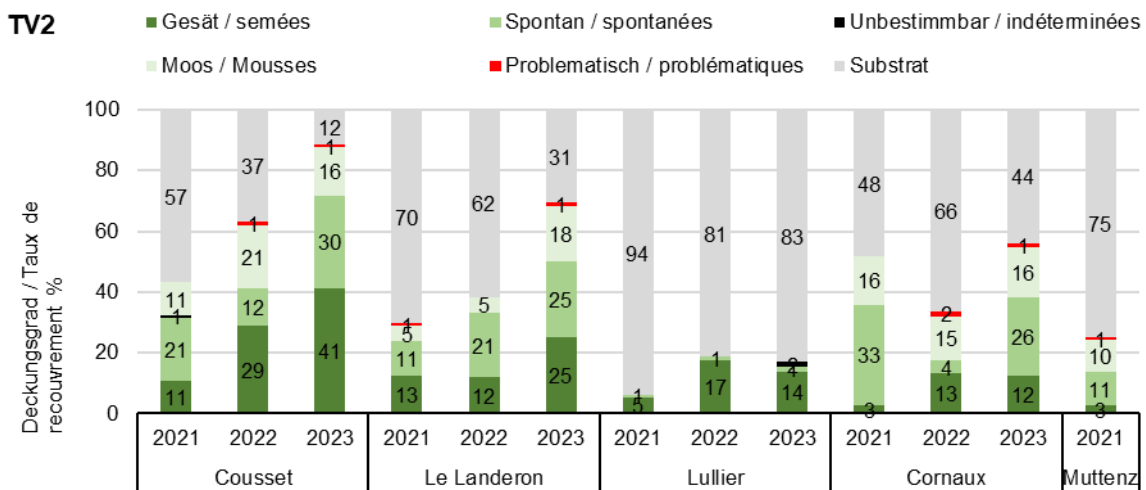


Figure 35: Evolution du recouvrement pour le mélange ubiquiste « TV2 » selon les sites.

Richesse spécifique

L'analyse des valeurs brutes de richesse spécifique selon le type de mélange quelle que soit la saison montre, là encore, la grande variabilité des données et une tendance à l'augmentation avec le temps (fig. 36). Globalement, sur l'ensemble des valeurs considérées, le nombre initial de taxons et la progression sont les plus élevés pour le mélange TV2, moyenne et similaire pour les mélanges RR, SS et CSR, et significativement plus faibles sur le témoin (K). Cette tendance globale est à l'image de celle observée sur les sites de Cousset et du Landeron, dont les 5 courbes montrent une tendance similaire (fig. 37 et 38).

Concernant le mélange TV2, la valeur moyenne évolue de 13 espèces, 6 mois après le semis, à 20 espèces après 3 ans. La très grande fluctuation observée 6 mois après le semis (de 4 à 38 espèces, soit un facteur 10) s'explique par la grande diversité des situations considérées: des placettes « quasi-stériles » du site de Bavois (n= 4), à une situation très diversifiée à Lullier, qui se situe dans un environnement agraire riche en espèces agricoles adventices expliquant la diversité de la banque de semences locales.

Concernant les mélanges SS, CSR et RR, la valeur moyenne évolue de 10 espèces, 6 mois après le semis, à 20 espèces 4 ans après le semis. Cette valeur est atteinte en 3 ans sur les placettes ensemencées pour le mélange TV2. Là encore, la très grande fluctuation des valeurs, qui est observée 6 mois après le semis (de 1 à 21 espèces, soit un facteur 21 pour le mélange RR), s'explique par la grande diversité des situations considérées: des placettes « quasi-stériles » et piétinées du site de Muttenz (n= 1), à une situation diversifiée au Landeron, qui a bénéficié d'une importante banque de semences locales.

Concernant les témoins, la valeur moyenne évolue de 6 espèces, 6 mois après le semis, à 15 espèces après 4,5 ans. La fluctuation des valeurs observée 6 mois après le semis est plus faible (de 0 à Muttenz et Lullier à 10 espèces à Bavois).

Le retrait du suivi des sites « n'ayant pas fonctionné » augmente probablement indirectement la valeur de cette richesse spécifique au-delà de 36 mois.

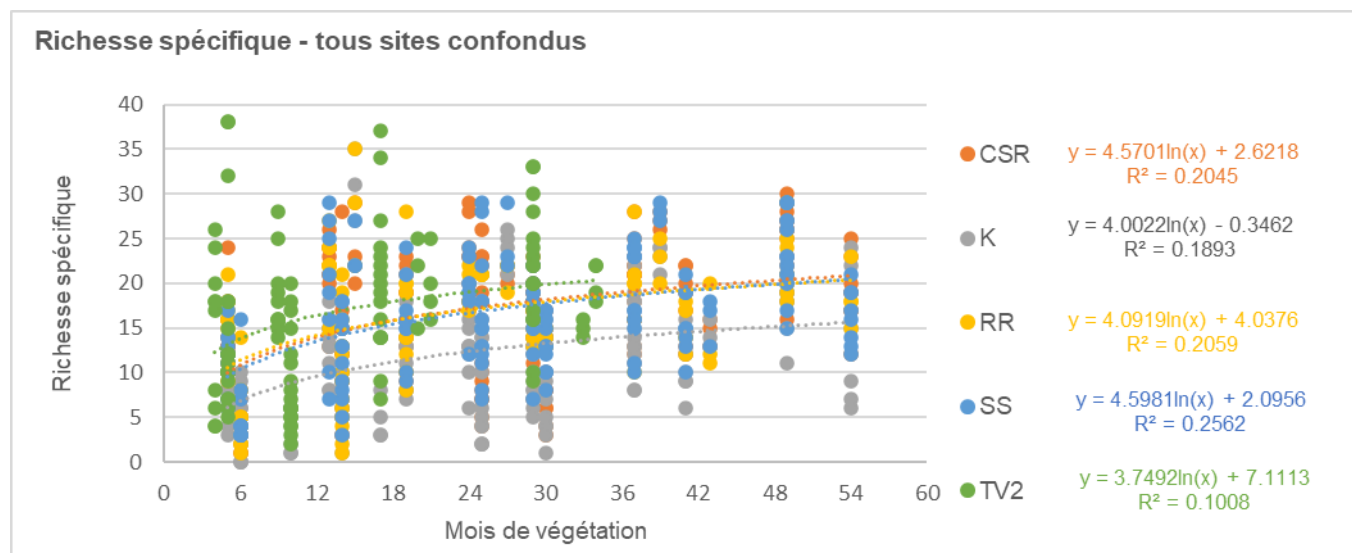


Figure 36: Evolution des valeurs brutes de richesse spécifique selon le type de mélange pour l'ensemble des placettes suivies.

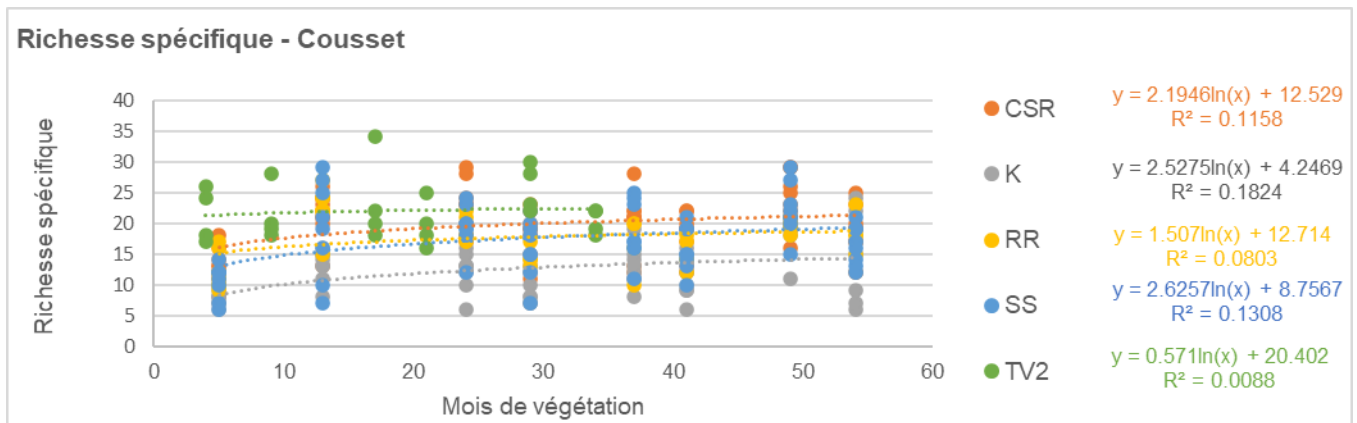


Figure 37: Evolution de la richesse spécifique selon le type de mélange pour le site de Cousset.

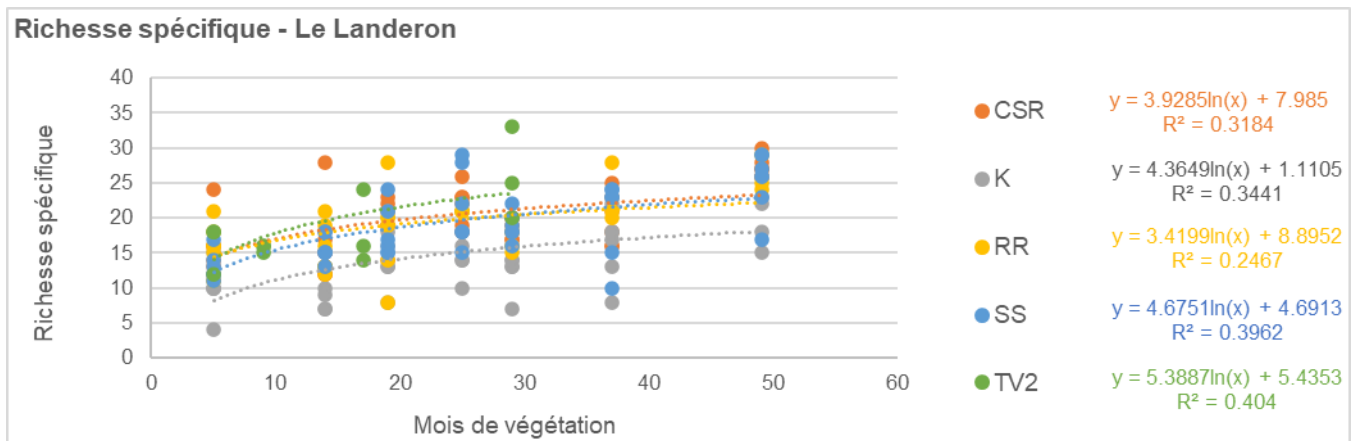


Figure 38: Evolution de la richesse spécifique selon le type de mélange pour le site du Landeron.

4.2.2.3 L'influence de la fertilité et notamment du taux de matière organique du substrat sur le recouvrement

La teneur en matière organique du substrat semble être le principal facteur explicatif de ces modalités d'établissement (fig. 39), même si les valeurs de R^2 (coefficient explicatif de la variabilité des données) sont faibles. Elles sont systématiquement plus élevées la première année que les années suivantes, lors desquelles elles régressent progressivement.

Il y a néanmoins une fluctuation de la valeur explicative en fonction du mélange d'espèces semées. Une teneur en matière organique plus élevée est plus favorable à l'établissement des mélanges CRS ($R^2 = 0,46$ année 1 ; $R^2 = 0,43$ année 2) (fig. 40), tandis qu'il ne semble pas y avoir de lien entre le recouvrement et la teneur en matière organique du substrat dans le cas de l'implantation du mélange RR (fig. 41). Néanmoins, il faut considérer que les placettes du mélange CRS présentes des valeurs variables de 10 à 20 g de C_{org} / kg, tandis que les 7 placettes du mélange RR comportent majoritairement des valeurs de 18 à 20 g de C_{org} / kg de sol (cf. chap 2.2).

Globalement, les sites ou les semis n'ont pas engendré une croissance végétale importante (Muttentz, Cornaux et Bavois) comportent des substrats à plus faible teneur en matière organique, inférieure à 18 g de C_{org} / kg de sol (cf. chap. 2.2). En revanche, les sites de Cousset et du Landeron présentent des valeurs majoritairement supérieures à 18 g de C_{org} / kg de sol.

L'ANOVA réalisée sur ces valeurs échantillonnées en début de projet (cf. chapitre 2.2, fig. 5 et annexe 1 A-G) avait montré une différence significative des teneurs en C_{org} entre les sites mais que la variabilité de ces teneurs était répartie équitablement sur tous les mélanges, ne défavorisant aucun d'eux. L'analyse en fin de projet, comparant le recouvrement végétal de chaque parcelle avec sa teneur en C_{org} , semble indiquer des effets de seuils comme vu lors des essais en chambre de culture. Cependant, la définition de ces seuils demanderait une recherche approfondie et ciblée.

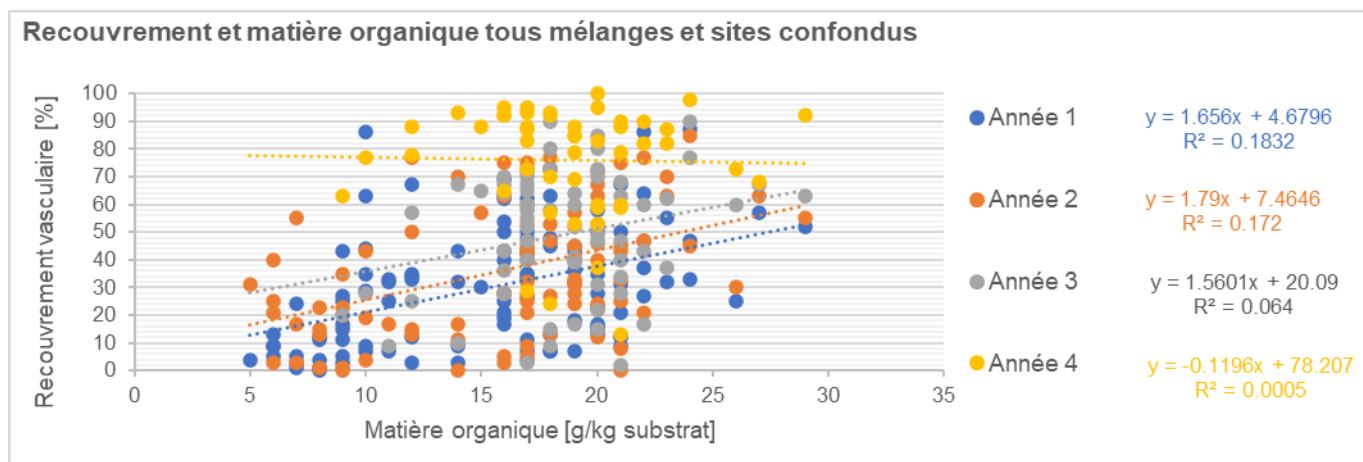


Figure 39: Recouvrement vasculaire en fonction de la matière organique tous mélanges et sites confondus.

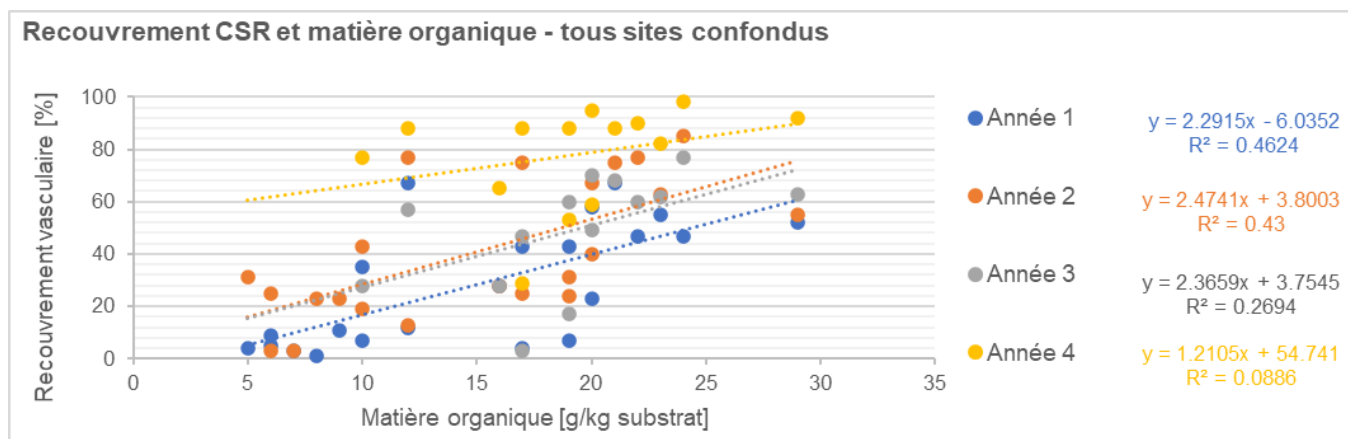


Figure 40: Recouvrement vasculaire en fonction de la matière organique pour le mélange polyvalent « CSR » tous sites confondus.

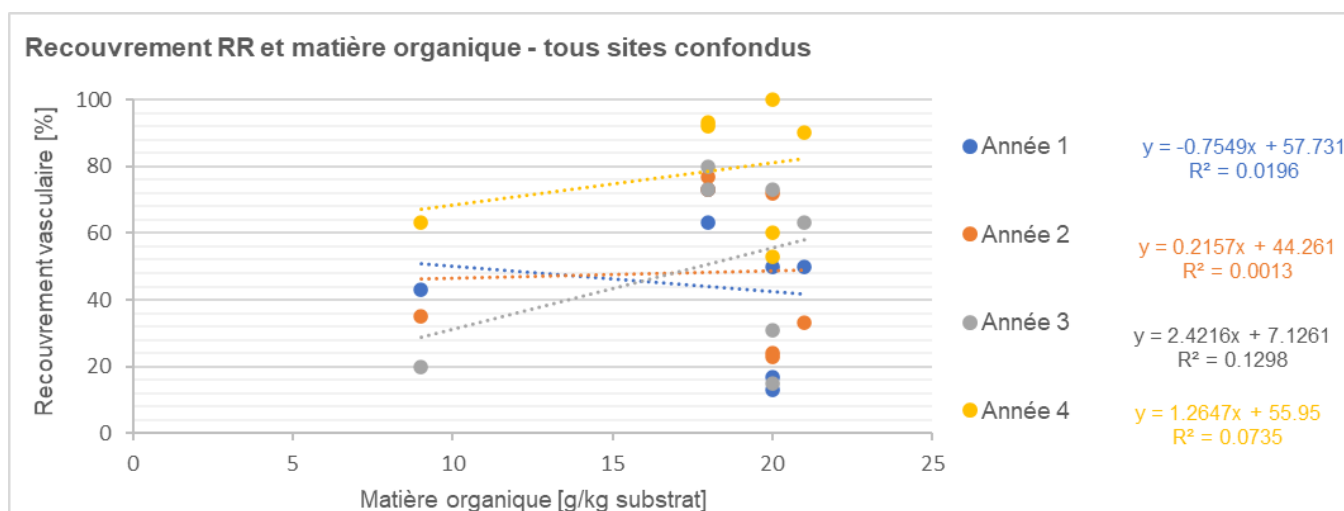


Figure 41: Recouvrement vasculaire en fonction de la matière organique pour le mélange rudéral « RR » tous sites confondus.

4.2.2.4 Les enseignements de l'analyse du recouvrement et de la composition floristique par type de mélanges

- Des valeurs élevées de recouvrement pour les mélanges rudéraux (RR) et ubiquiste (TV2) augmentant avec le temps

L'analyse des valeurs de recouvrement selon le type de mélange montre la grande variabilité des données et une faible tendance à l'augmentation avec le temps (environ 10% par an sur les sites favorables). Sur l'ensemble des valeurs considérées, le recouvrement initial et la progression sont les plus élevés pour les mélanges TV2 et RR, moyenne pour les mélanges SS et CSR, et plus faibles pour le mélange CC et le témoin.

Au-delà de ce principal constat:

- La contribution des espèces semées au recouvrement total est significativement plus élevée que celles des espèces spontanées à la même période sur tous les sites, notamment les deux premières années sur les sites favorables à la croissance végétale. Elle montre une progression régulière, à l'exemple des mélanges RR et TV2, même s'il y a une grande variabilité entre les sites pour un même mélange. Il s'agit d'espèces annuelles/bisannuelles comme la Sabline à feuilles de Serpollet ou la Carotte sauvage ou vivaces comme le Brome érigé ou l'Orpin blanc.
 - La contribution des espèces spontanées présente également une tendance croissante avec le temps, même s'il y a là encore une grande variabilité entre les sites pour un même mélange. Il s'agit majoritairement d'espèces annuelles, comme le Géranium pourpre, espèce annuelle spontanée la plus fréquente sur l'ensemble des sites.
- Une richesse floristique plus élevée sur les placettes semées et optimale pour le mélange ubiquiste (TV2)

Concernant la richesse spécifique, l'analyse des valeurs selon le type de mélange quelle que soit la saison montre également une grande variabilité des données et une tendance à l'augmentation avec le temps. Le nombre d'espèces initial et la progression sont les plus élevés pour le mélange TV2, moyenne et similaire pour les mélanges RR, SS et CSR, et significativement plus faibles pour le témoin. Cette tendance globale est à l'image de celles observées sur les sites de Cousset et du Landeron.

- Un recouvrement réduit des espèces problématiques, surtout visibles la première année

Les espèces problématiques (ex. laitue sauvage, onagre bisannuelle, panais cultivé, etc.) contribuent faiblement au recouvrement quel que soit le mélange. Inférieure à 12% du recouvrement la première année, cette part se stabilise dès la deuxième année à un niveau très faible (R moyen < 2%) quel que soit le mélange. La part de ces espèces étant plus importante sur les substrats peu favorables à la croissance végétale. La phase d'implantation du tapis végétal est donc décisive pour le développement de ces espèces sur certains sites (cf. point ci-après). Même si aucun développement important n'a été observé quel que soit les modalités, il conviendra d'assurer une surveillance accrue lors de la première année suivant le semis.

- Une teneur en matière organique et une ancienneté du substrat favorables au développement du tapis végétal

La teneur en matière organique du substrat semble être le principal facteur explicatif de ces modalités d'établissement, même s'il y a une variabilité d'influence selon le type de mélange ; celle-ci étant marquée pour le mélange polyvalent (CSR) et nulle pour le mélange rudéral (RR). L'ancienneté d'un substrat, qui a accumulé de la matière organique (par ex. issu de plantes et mousses s'étant développées préalablement, de débris de feuilles d'arbres présentes à proximité) et des semences avec le temps, constituera un facteur favorable à l'implantation du tapis végétal. Ainsi, les substrats « neufs » et pauvres en matière organique comme à Muttenz et Lullier, n'ont permis qu'une expression végétale très réduite inférieure à 30%, tandis que les substrats remobilisés plus riches en matière organique ont présenté des recouvrements moyens atteignant 70% au Landeron et 80% à Cousset.

4.3 Bilan de l'expression

La diversité des sites et des conditions d'implantation a rendu parfois délicate l'analyse et l'interprétation des tests effectués. Néanmoins, cette diversité de situations a aussi constitué une opportunité pour identifier les facteurs favorables, limitants, voire des échecs de l'implantation de flore et de la végétation. Par ailleurs, malgré des accords clairs avec les responsables de l'entretien, les essais ont subi des perturbations parfois importantes sur différents sites. Il a fallu en tenir compte pour l'analyse et l'interprétation des résultats. Entre succès et échecs, ces essais différenciés présentent ainsi un gradient de situations riches d'enseignements faisant intervenir des influences quantitativement peu ou pas saisissables. Ces enseignements sont présentés ci-dessous en fonction des problématiques 1-9 posées en introduction. La question 10 au sujet de la sécurité des installations ferroviaires est traitée au chapitre 7. Les incidences sur les choix des mélanges seront ensuite discutées.

➤ Taux de couverture végétale

Le semis a-t-il une influence sur le taux de couverture végétale ? (introduction question 1)

Oui. La contribution des espèces semées au recouvrement total est significativement plus élevée que celles des espèces spontanées à la même période sur tous les sites, notamment les deux premières années sur les sites favorables à la croissance végétale (taux de $C_{org} > 15$ g/kg – cf. point 4 ci-dessous).

Certains mélanges sont-ils plus recouvrant que d'autres dans le laps de temps du projet ? (introduction question 2)

Oui. Sur l'ensemble des valeurs considérées pour les sites présentant un substrat favorable à la croissance végétale, le recouvrement initial et la progression sont régulières et plus élevés pour les mélanges TV2 et RR, moyenne pour les mélanges SS et CSR, et plus faibles pour le mélange CC et le témoin non semé ; même s'il y a une grande variabilité entre les sites et les saisons pour un même mélange.

Quelle est la vitesse d'implantation du tapis végétal sur les différentes placettes semées et non semées durant ce même délai ? (introduction question 3)

L'analyse de l'évolution des valeurs moyennes de recouvrement par type de mélange montre la grande variabilité des données et une faible tendance à l'augmentation avec le temps (environ 10% par an sur les sites favorables). Sur les sites les plus pauvres en matière organique (taux de $C_{org} \leq 15$ g/kg – cf. point 4 ci-dessous), la couverture végétale est demeurée réduite ($R < 20\%$) lors des 2 premières années de suivi.

➤ Diversité de la flore

Le semis a-t-il une influence sur la richesse en espèces florales ? (introduction question 4)

Oui. Du point de vue de la richesse spécifique, le fait de semer augmente significativement la richesse en espèces au sein de la communauté avec un écart moyen de 5 espèces par placette en regard d'une situation non semée (hors mélange ubiquiste « TV2 »).

L'analyse des valeurs selon le type de mélange, quelle que soit la saison, montre une grande variabilité des données et une tendance à l'augmentation avec le temps. Le nombre initial d'espèces et la progression sont les plus élevés pour le mélange TV2 (évolution de 13 à 20 espèces en moyenne par placette en 3 ans), moyenne et similaire pour les mélanges RR, SS et CSR (évolution de 10 à 20 espèces en moyenne par placette en 4,5 ans), et significativement plus faibles pour le témoin (K) (évolution de 6 à 15 espèces en moyenne par placette en 4,5 ans). Le temps permet une augmentation progressive de la diversité des communautés de 3 à 5 espèces en 4,5 ans, à l'exception du mélange ubiquiste « TV2 » dont la grande richesse spécifique initiale du mélange semble « saturer » l'ensemble des niches écologiques.

L'écart de composition s'est atténué avec le temps dans le cadre de cet essai par un effet de diffusion de proximité (la présence proximale de placettes semées induit la présence de taxons comme *Festuca laevigata*, régionalement absent, au sein des placettes témoins). Le semis comble donc un déficit de dispersion notamment pour les espèces spécialistes xérotolérantes des pelouses sèches.

Quelles sont les espèces semées et spontanées - problématiques ou non - qui se développent majoritairement ? Certaines espèces s'expriment-elles davantage selon le type de mélanges ? (introduction question 5)

Au printemps, les espèces observées sont majoritairement annuelles et leur part dans le tapis végétal est hiérarchiquement la suivante: mélange SS (cs = 50,4%), CSR (cs = 59,4%), RR (cs = 61,8%), K (cs = 63,5%) et TV2

(cs = 71,9%). Indépendamment des mélanges, certaines espèces sont régulières et abondantes quelle que soit la situation (semis ou non, nature du mélange) comme *Arenaria serpyllifolia*, *Cerastium semidecandrum* (espèces à germination automno-hivernale). Parmi les espèces spontanées, *Geranium robertianum* subsp. *purpureum* et *Saxifraga tridactylites* sont les plus régulièrement présentes.

Le cortège d'espèces vivaces (davantage pérennes) est plus spécifique à chaque mélange. Les mélanges tolérant le stress « SS » et polyvalent « CSR » se différencient par le développement d'espèces xérotolérantes des pelouses mi-sèches à très sèches à capacité de dispersion faible ou limitée, comme *Dianthus carthusianorum*, *Festuca laevigata*, *Koeleria pyramidata*, *Thymus pulegioides*, *Sedum* spp. Les mélanges ubiquiste « TV2 », rudéral « RR » et les placettes témoins non semées présentent une flore vivace moins spécialisée telle que *Achillea millefolium*, *Lotus corniculatus*, *Hypochaeris radicata*, *Anthyllis carpatica*, *Sanguisorba minor*.

➤ Espèces problématiques

Quelles sont les incidences des semis sur le développement des espèces problématiques ? (introduction question 6)

La part des espèces problématiques contribuant au recouvrement est réduite et significativement plus faible que la part des espèces semées et autres espèces spontanées. Elle présente globalement un recouvrement inférieur à 12% la première année, puis se stabilise dès la deuxième année à un niveau très faible ($R < 2\%$). Cette part est néanmoins plus importante sur les placettes témoins des sites où la croissance végétale est limitée, ce qui signifie que les espèces problématiques s'expriment davantage sur les zones non semées de sites peu favorables à la croissance végétale. En conséquence, l'effet de concurrence des espèces semées limite leur implantation sur les substrats les plus pauvres (taux de $C_{org} \leq 15$ g/kg).

Quelles espèces problématiques se développent le cas échéant ? (introduction question 7)

Les 5 espèces problématiques les plus recensées sont *Lactuca serriola*, *Oenothera biennis*, *Pastinaca sativa*, *Rubus fruticosus* aggr. et *Hedera helix*. Il s'agit d'espèces pionnières méso- à xérophiles majoritairement anthropophiles à très fortes aptitudes à la dispersion, soit à longue distance par le vent (*Lactuca serriola*, *Epilobium*...) ou les oiseaux granivores (*Oenothera*, *Pastinaca*), soit de manière proximale et végétative par marcottage (*Rubus*, *Potentilla*...).

Quels modes d'entretien sont à privilégier le cas échéant ? (introduction question 8)

Les genres dispersés par le vent ou les oiseaux (*Lactuca*, *Oenothera*, *Pastinaca*, *Epilobium*, *Cirsium*, *Verbascum*) sont implantés sur les entre-voies et les banquettes. Ils y sont indésirables en raison de leur grande tige (plusieurs pour *Epilobium*) qui s'indure en séchant à la fin du cycle biologique, augmentant encore leur rigidité. L'intervention sur ces espèces, présentant un optimum de germination sur substrat « neuf » récemment mis en place, est à effectuer dès leur implantation.

Les genres à forte multiplication végétative (*Rubus*, *Potentilla*, *Hedera*, *Clematis*, *Calystegia*) s'implantent sur les banquettes à partir de populations sources situées à proximité des banquettes sur les talus au sol plus épais et frais. Le traitement de ces populations implique un broyage régulier de ces zones périphériques. Seul le genre *Equisetum* s'implante directement sur les banquettes.

➤ Facteurs déterminants

Quelle est l'influence des facteurs environnementaux sur le recouvrement ? (introduction question 9)

L'alimentation en eau et les niveaux des températures de l'air étaient similaires sur tous les sites chaque année et n'expliquent pas les différences d'établissement. L'influence du manque d'eau en début de période de végétation s'est seulement exprimée à Lullier en 2020 ; il n'est malheureusement pas possible d'évaluer cet effet de sécheresse pour le développement végétal sur les autres sites. Une deuxième période sèche de mars à juin en 2022, combinée à de fortes chaleurs, semble s'exprimer par une baisse ou un ralentissement du recouvrement durant cette année. À long terme cependant, l'approvisionnement en eau semble suffire sur tous les sites, une fois que les semis ont établis leur propre banque grainière dans le substrat.

La teneur en matière organique du substrat semble être le principal facteur explicatif conditionnant l'établissement des semis, même s'il y a une variabilité d'influence selon le type de mélange, selon les exigences des espèces. L'ancienneté d'un substrat, qui a accumulé de la matière organique (par ex. issu de plantes et mousses s'étant

développées préalablement, de débris de feuilles d'arbres présentes à proximité) et des semences avec le temps, constituera un facteur favorable à l'implantation du tapis végétal.

Ainsi, les substrats « neufs » et pauvres en matière organique comme à Muttenz et Lullier (teneur inférieure à 15 g de Corg / kg de sol sur ces sites), n'ont permis qu'une expression végétale très réduite inférieure à 30%, tandis que les substrats remobilisés plus riches en matière organique (teneur supérieure à 18 g de Corg / kg de sol sur ces sites), ont présentés des recouvrements moyens atteignant 70% au Landeron et 80% à Cousset. Cet effet de site a été démontré en chambre de culture sur les tests du mélange compétitif (CC), qui a fortement réagi à l'ajout d'une faible dose d'engrais en fin d'essai.

Enfin, la saisonnalité joue un rôle (semis au printemps ou en automne, à plus ou moins haute température). En chambre de culture, certaines espèces se sont exprimées uniquement en haute température ou uniquement en basse température, voire dans ces deux situations. Ainsi, les mélanges présentent une variation tant qualitative que parfois quantitative dans leur expression et de manière directement liée à la température au sol. Ils peuvent donc répondre à une demande de végétalisation à différentes saisons.

➤ Incidences sur le choix des mélanges

Le mélange TV2, semé en décembre 2020, a pu s'établir nettement plus rapidement, dès sa première année d'essai, que les mélanges CSR, RR et SS, semés au printemps 2019. La date de semis hivernale a sans doute eu un effet positif sur les levées, en particulier sur les espèces à germination fini-estivale à automnale tolérant/évitant les phases sèches estivales (qui sont majoritaires dans ces mélanges). Il est aussi plus riche en espèces.

Si le mélange TV2 répond le mieux aux attentes en termes de végétalisation, le mélange RR apparaît au second rang. Le succès de ces deux mélanges est lié à leur richesse en espèces annuelles et en espèces vivaces polyvalentes. Les mélanges CSR et SS développent une composante floristique plus spécifique aux pelouses sèches. L'importance des espèces annuelles renforce l'hypothèse que la période de semis joue un rôle important dans l'expression du mélange.

Il faut par ailleurs considérer que les mélanges SS, CSR, TV2 comportant une plus grande part d'espèces vivaces présentent une plus grande permanence de la couverture végétale au sol tout au long de l'année. En effet, par leur stratégie opportuniste les espèces du mélange RR sont pour la plupart des espèces annuelles ou bisannuelles, dont une partie du cycle estival s'effectue sous forme de graines notamment en période de fin de printemps début d'été ; ces espèces étant pour la plupart des espèces annuelles à germinations automnales.

Concrètement, au vu de ces essais *in* et *ex situ* les mélanges de semences testés présentent un haut taux de germination (> 80%) et une certaine plasticité et variabilité à l'emploi, qui conduira à des expressions spécifiques d'autant plus diversifiées que le nombre d'espèces potentiellement adaptées à la nature du substrat sera important (cas du mélange TV2, qui dans les essais en chambre de culture peut engendrer la germination de 21 espèces différentes alors que les autres mélanges ne pouvaient que 12 espèces en moyenne) ; une richesse liée à la diversité des stratégies écologiques en présence qui apparaît comme « une assurance » face à la variabilité des conditions environnementales et aux inattendus de l'implantation.

➤ Considérations diverses et limites

Sur la seule banquette de largeur typique (0,6-1 mètre) à Bavois, aucune végétalisation n'a pu être établie. Sur les surfaces de la gare (entre-voies), les résultats étaient très hétérogènes. Il était donc certainement préférable de tester plusieurs sites d'essai, car ce sont finalement les conditions du site, en premier lieu la teneur en matière organique du substrat, qui déterminent le succès de l'implantation.

Toutes les placettes des sites expérimentaux *in situ*, sauf Bavois, avaient été sarclées avant les semis. Elles contenaient donc encore une banque de graines de la végétation établie préalablement, ce qui explique la forte présence d'espèces spontanées sur les sites.

Cinq ans après le semis, sur les sites de Cousset et du Landeron, les mélanges testés prouvent leur efficacité de concurrencer et finalement dominer cette végétation préétablie et même de coloniser les témoins. A Cornaux, ces deux indicateurs sont plus fluctuants.

Malgré des taux de recouvrement bas, le site de Lullier présente une proportion élevée d'espèces herbacées semées. Les espèces spontanées et les mousses sont quasiment absentes.

5 Extensions du projet

5.1 Nattes de sedum

Compte tenu de l'utilisation réussie de nattes garnies de sedum pour la végétalisation des toits et des voies de tramway, il s'agissait de déterminer si une variante nécessitant peu d'entretien pouvait également être utilisée pour la végétalisation des entre-voies et des banquettes sur les sites des gares. À cet effet, un essai a été réalisé sur trois sites. Les nattes de sedum ont été testées sur différents substrats et avec différentes fréquences de passage. En raison de son ampleur, cette partie du projet a fait l'objet d'une publication séparée [27]; les principaux résultats sont brièvement présentés ci-dessous :

- La résistance des espèces de sedum était très faible dans les conditions données. Ainsi, le recouvrement des espèces de sedum, qui était initialement de 100%, est tombé à 30% en moyenne après trois ans. Parallèlement, les nattes ont été colonisées par une végétation spontanée (fig. 42). La colonisation s'est faite de différentes manières : i) envahissement par des plantes grimpantes provenant de talus adjacents, ii) apport de graines des environs et iii) transperçement des nattes à partir du substrat sous-jacent.
- Les espèces de sedum sont très sensibles au piétinement. Même avec un piétinement moyen, quelques nattes de sedum étaient complètement détruites peu de mois après leur installation.
- Parmi les espèces de sedum utilisées, l'orpin blanc (*Sedum album*) était l'espèce la plus dominante, tandis que les autres espèces indigènes présentaient toutes un recouvrement inférieur à 1% à la fin de l'essai 2023. L'orpin bâtard (*Sedum spurium*), un néophyte envahissant, était la seule espèce à gagner en couverture sur certaines nattes.

Les nattes de végétation recouvertes de sedum ne sont pas adaptées, dans la forme d'application choisie – à savoir sans autre intervention technique lors de la pose et sans entretien - à une utilisation sur les voies, le ballast et les banquettes des CFF.

5.2 Du relevé des bryophytes à Cousset et Le Landeron à leur intégration dans les semis ?

Les sols squelettiques, pauvres en matière organique tels que ceux qui longent les voies CFF représentent un habitat favorable pour les bryophytes. En effet, ces dernières ne possédant pas de véritables racines et dotées d'une grande capacité de résistance à la sécheresse, sont parfaitement adaptées à ces milieux.

Afin d'identifier les communautés de bryophytes liées aux abords des voies, spécialement des entre-voies et des banquettes, des relevés ont été réalisés en parallèle à ceux des végétaux vasculaires. Ces communautés évoluant relativement lentement, les relevés ont été effectués uniquement la première année du semis. Sur chacun des sites tests, les bryophytes ont été relevées de manière exhaustive par types de mélanges et pour chacun des réplicas, ainsi que pour les zones témoin non ensemencées. Les espèces ont été récoltées dans des enveloppes et identifiées a posteriori à l'aide d'instruments optiques et de diverses flores européennes. Au Landeron, les bryophytes ont été relevées de manière qualitative sur chaque placette en 2019. À Cousset, les bryophytes ont été relevées en 2020 et le coefficient d'abondance-dominance de Braun-Blanquet leur a été assigné.

Les résultats de ces inventaires sont les suivants :

- Dix espèces ont été relevées au total (fig. 43) à Cousset. Les placettes témoin abritent un total de trois espèces, le mélange stress-tolérant SS quatre, le mélange rudéral RR cinq et enfin le mélange polyvalent CSR en abrite le plus, avec un total de sept espèces.
- On relève 14 espèces sur l'ensemble du site du Landeron. A nouveau, la placette témoin possède la diversité la plus faible avec au total trois espèces relevées. La même valeur est observée sur le mélange SS, tandis que les mélanges CSR et RR abritent un total de 11 espèces.

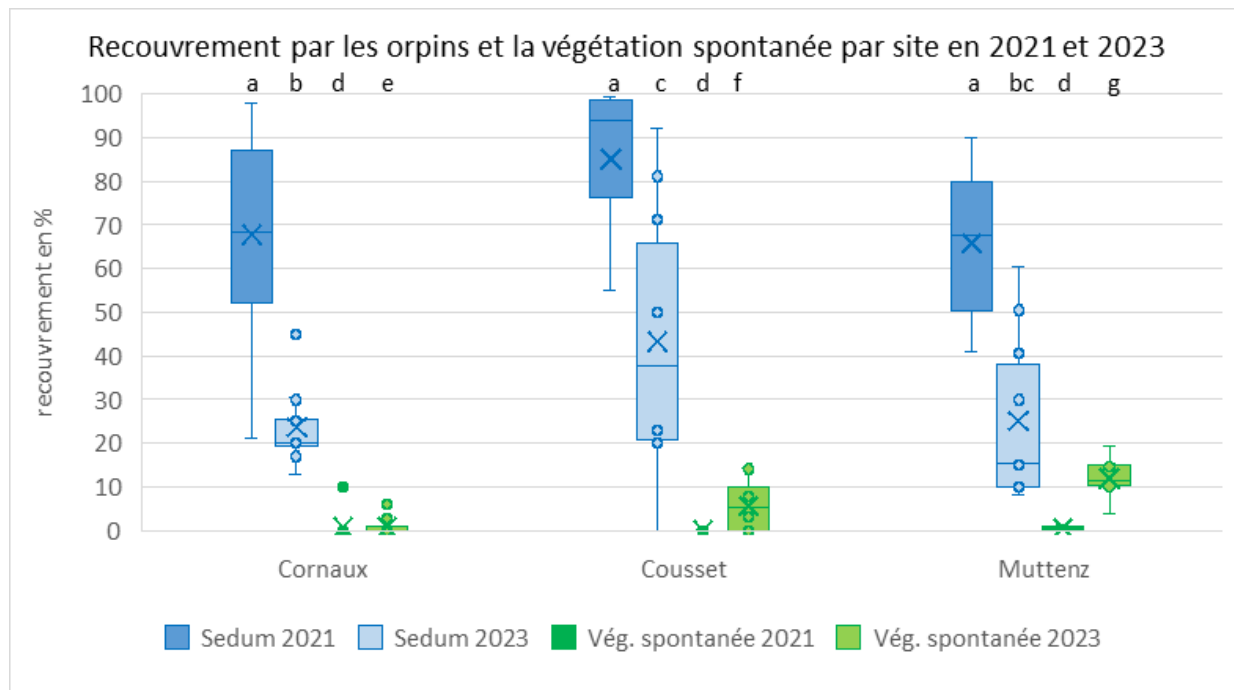


Figure 42: Comparaison du recouvrement par les orpins et la végétation spontanée par site en 2021 et 2023.

Couverture des espèces de sedum: box bleu; couverture de la végétation spontanée: box vert

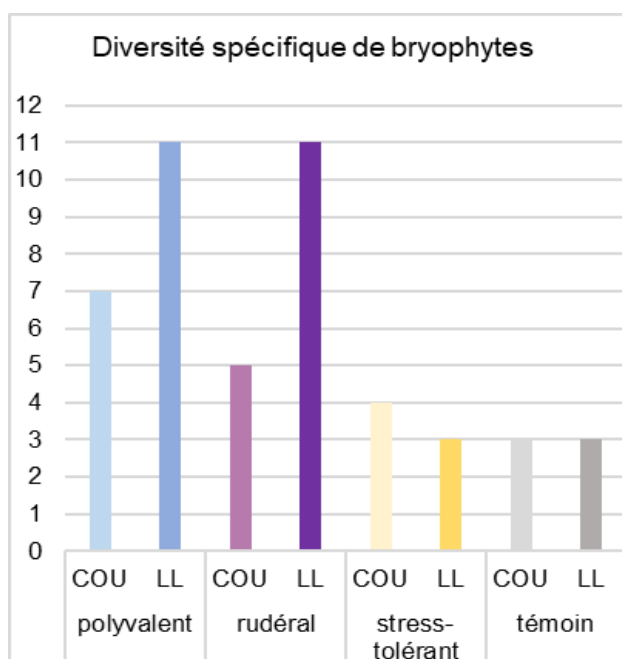


Figure 43: Diversité spécifique de bryophytes par mélange au Landeron (LL) et à Cousset (COU)

5.3 Essai de synergie à Seebach

➤ Démarche

Au cours du projet, on a supposé que les mousses pourraient éventuellement avoir un effet positif sur le succès de germination des semences en raison de leur équilibre hydrique. Pour étudier cette question, Agroscope a réalisé un essai de germination simplifié in situ. L'hypothèse a été émise que les mousses favorisent la germination et l'établissement des espèces du mélange et qu'il en résulte une plus grande couverture de végétation spontanée.

À la gare de Zurich Seebach, une surface d'essai de 30 m² fortement recouverte de mousse a été délimitée en novembre 2021 et marquée aux coins par des dalles. Deux approches ont été définies : sans mousses et avec mousses. À cet effet, six placettes de 5 m² (2 m x 2,5 m) ont été subdivisées et, à tour de rôle, une placette sur deux a été débarrassée autant que possible de la mousse à l'aide d'une binette à lame oscillante et d'un râteau (fig. 44, annexe 1 H). Ensuite, la même quantité de semences (g/m²) du mélange TV2 que sur les autres sites a été semée sur toutes les placettes.

Pour le relevé des données, une photo d'ensemble et une photo détaillée du centre de chaque placette ont été prises avec un smartphone avant et après l'élimination de la mousse. Ces prises de vue ont été répétées une fois par mois pendant la période de végétation, de mars à novembre, jusqu'à l'automne 2023.

Pour les estimations du recouvrement des mousses et de la végétation spontanée, un cadre de 40 x 40 cm a été placé au centre de la placette et photographié. À l'écran, une grille de 10 x 10 cm a été placée dans le plan détaillé de manière à pouvoir estimer le recouvrement des mousses, des herbacées et des graminées par surface de 5 m² (fig. 45 en bas à droite).

➤ Observations

Les semis n'ont pas bien levé sur ce site. Seules quelques plantes, probablement issues du mélange de semences, ont germé au cours du deuxième printemps (2023). Mais la plupart d'entre elles sont mortes lors de la première période de sécheresse en 2023. Ainsi, le recouvrement total de la végétation spontanée est resté inférieur à 1%. Parmi les herbacées, l'espèce la plus fréquente était la drave printanière (*Erophila verna*). Celle-ci a également été recensée à l'état desséché. Dans les deux approches, le recouvrement des mousses a augmenté au fil du temps de resp. 2,5% et 3,9% par rapport au premier relevé avant l'élimination des mousses, ce qui n'était toutefois pas un changement significatif. Sur la même période, le recouvrement de la végétation spontanée a légèrement augmenté dans les deux procédures au premier printemps (2022) et de manière significative au deuxième printemps (2023), mais cela n'a pas pu être confirmé à la fin de l'année 2023. Dans le procédé sans mousse, le recouvrement de la végétation spontanée a globalement diminué de manière significative malgré le pic intermédiaire du printemps 2023, alors que la végétation spontanée n'a pas diminué de manière significative dans les témoins avec mousse (fig. 45). L'évolution différente du recouvrement de la végétation spontanée entre les deux procédés s'explique par le fait que la drave printanière, en tant que thérophyte, est une plante annuelle et éphémère qui dépend d'un ensemencement annuel. Il est probable que lors de l'élimination des mousses, une partie des graines a été supprimée.

➤ Discussion et conclusion

Il existe de nombreuses études qui traitent des relations entre la germination/l'établissement des plantes vasculaires et des mousses. Des effets aussi bien positifs que négatifs de la couche de mousse sur l'établissement des plantes vasculaires ont été observés selon l'espèce, l'épaisseur de la couche de mousse, de même que parfois des effets dus aux espèces de mousses elles-mêmes, qui sont liés aux conditions environnementales (sec/humide) dans le micro-habitat des mousses. Par exemple, l'humidité reste plus longtemps sous les mousses, alors qu'en cas de sécheresse persistante, les mousses absorbent d'abord toutes les précipitations jusqu'à ce qu'elles soient saturées. Dans les épais coussins de mousse, la germination ou l'établissement de plantes peut être empêché si le coussin de mousse se dessèche avant que les racines n'aient atteint le sol. Par ailleurs, une épaisse couche de mousse peut aussi protéger quelque peu contre des conditions extrêmes. Il est difficile de généraliser, car cela dépend de très nombreux facteurs et les effets peuvent être différents lors d'une année humide ou d'une année sèche.

Le test par tâtonnement n'a pas permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle les mousses favorisent la germination et l'établissement du mélange semé, ce qui est confirmé par les études susmentionnées.

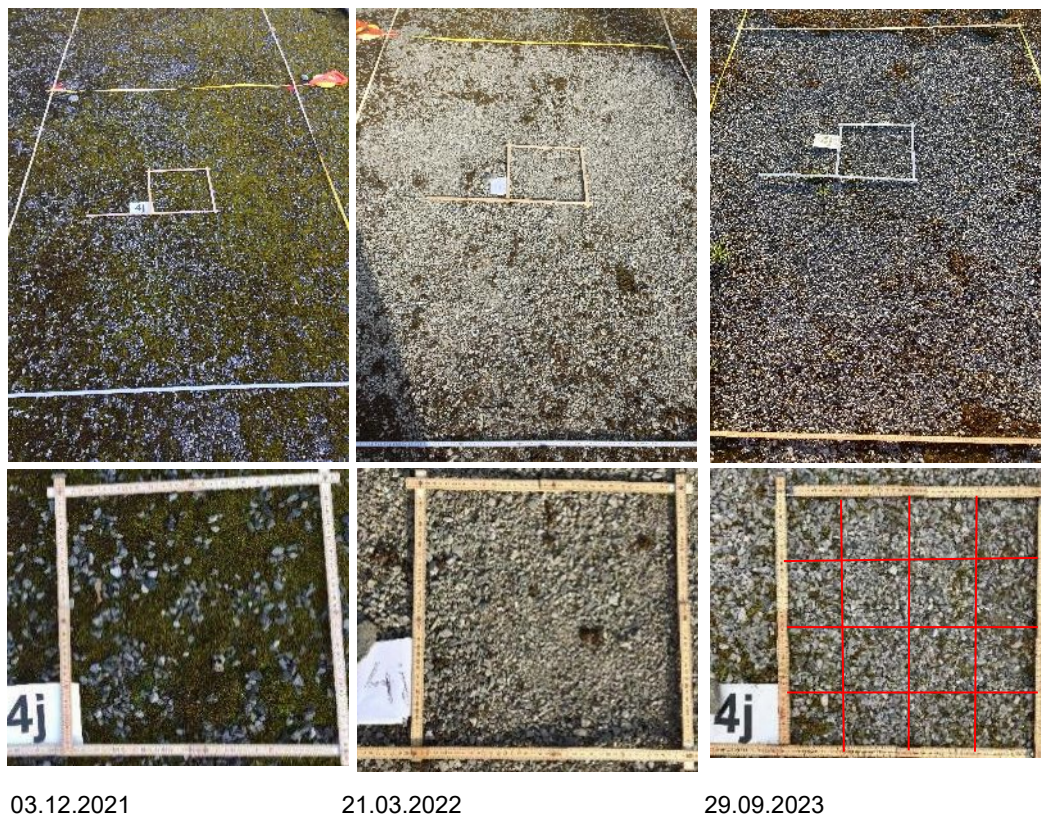


Figure 44: Photos du développement de la germination sur une surface d'essai de 5 m² (2 m x 2,5 m):

A gauche, vue d'ensemble et photo détaillée avant l'élimination des mousses ; au milieu, vue d'ensemble et photo détaillée au printemps après l'élimination des mousses ; à droite, vue d'ensemble et photo détaillée avec une grille de 10 cm à la fin du projet

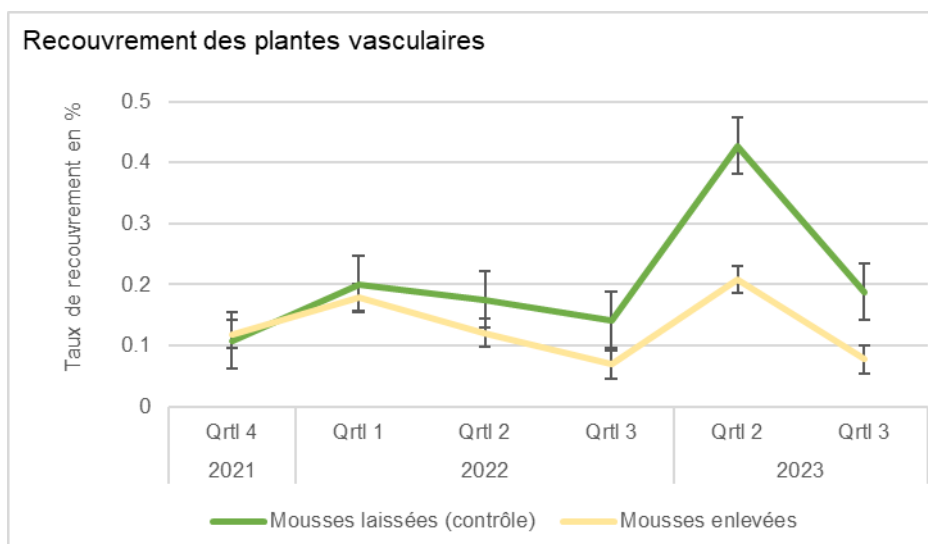


Figure 45: Recouvrement par des plantes vasculaires dans un essai de synergie dans les deux procédés avec de la mousse (ligne jaune) et sans mousse (= contrôle, ligne verte), de décembre 2021 à septembre 2023

6 Espèces problématiques: potentiel d'éviction des mélanges

6.1 Espèces problématiques

La structure linéaire des voies ferrées est un vecteur idéal de propagation de la végétation et les gares, des centres d'établissement et de dispersion. Cette caractéristique entraîne un risque de prolifération d'espèces indésirables, notamment de néophytes envahissantes propagées par le vent [55-61], qui peuvent devenir de plus en plus problématiques et pas seulement dans les infrastructures ferroviaires. En Suisse, on compte environ 730 plantes vasculaires exotiques répandues dans la nature [52]. La plupart de ces espèces s'intègrent discrètement dans nos écosystèmes. Elles ne devraient cependant pas être disséminées ni favorisées. En l'état



Senecio inaequidens

Erigeron annuus

Rubus armeniacus

Figure 46: Néophytes envahissantes présentes sur les sites - voir la liste «Espèces exotiques en Suisse».

(© *Senecio inaequidens*, *Rubus armeniacus*: Wikipedia; *Erigeron annuus*: Info Flora)

actuel des choses, 56 espèces, dont il est prouvé qu'elles causent des dommages à l'écologie, à la santé ou aux infrastructures, sont considérées comme envahissantes; 32 autres espèces sont considérées comme potentiellement envahissantes, car on peut s'attendre à ce qu'elles causent des dommages. Pendant la période d'essai, trois espèces envahissantes (fig. 46) ont été relevées sur les sites. Si la lutte n'est pas menée correctement, les espèces envahissantes sont favorisées. Pour les endiguer, une stratégie de lutte adaptée est nécessaire [62].

***Rubus armeniacus*:** La ronce d'Arménie est une espèce très compétitive qui forme de grands peuplements denses et monospécifiques [63], faisant de l'ombre au sol et entravant ainsi la croissance des espèces indigènes, notamment des espèces pionnières. Aux abords des voies, les lianes, y compris celles des espèces de ronces indigènes, constituent des obstacles pouvant faire trébucher.

***Senecio inaequidens*:** Le séneçon sud-africain à feuilles étroites est une espèce pionnière très robuste, toxique pour le bétail et donc très problématique pour l'agriculture [64]. Comme il présente des résistances partielles aux herbicides, il entraîne une augmentation des coûts d'entretien, notamment dans le cas du ballast des voies.

***Erigeron annuus*:** La vergerette annuelle est en forte expansion ces dernières années et représente un risque pour de nombreuses espèces végétales indigènes et protégées [65]: elle forme rapidement des populations denses et, en tant qu'intrus dans l'agriculture, elle domine les prairies et les pâturages extensifs.

Certaines espèces indigènes susceptibles de causer des dégâts sont également indésirables aux abords des voies. Il s'agit de plantes qui présentent un mode de vie inadapté: certaines espèces grimpantes (p. ex. *Hedera helix*, *Clematis vitalba*, *Rubus caesius*), des espèces ligneuses comme les buissons (p. ex. *Prunus spinosa*) et des arbres (*Populus nigra* et *P. tremula*; arbres pionniers) ainsi que certaines espèces qui ont des racines plutôt profondes (p. ex. *Taraxacum officinale*, *Pastinaca sativa*). Celles-ci doivent être surveillées en raison du risque de trébuchement qu'elles présentent et d'une éventuelle déstabilisation de la voie.

6.2 Situation in situ

Dans l'essai actuel, il est difficile d'évaluer l'aptitude des mélanges à concurrencer les espèces problématiques car ces dernières sont très peu présentes sur l'ensemble des sites. L'abondance des espèces problématiques semble être plus liée aux sites plutôt qu'au type de mélanges semés ou encore au temps écoulé depuis le semis. À Bavois, on observe les taux les plus importants en 2020 sur les placettes ensemencées et plus encore sur le témoin. La proportion des espèces problématiques est similaire mais plus faible sur les autres sites.

À Muttenz en 2020, malgré un recouvrement général très faible de la végétation, on observe de fortes proportions d'espèces problématiques. Ces dernières disparaissent en 2021 au profit des espèces spontanées et des mousses.

Le même phénomène est observé à Bavois, où les espèces problématiques, abondantes en 2020, disparaissent l'année d'après, alors que le recouvrement des espèces spontanées et des mousses augmente. À Bavois, les taux d'espèces problématiques sont élevés en 2020 principalement en raison des prêles (*Equisetum arvense* et hybrides d'*E. hyemale*). Ces espèces sont indésirables les longs des voies ferrées à cause de leur tige rhizomateuse perturbant le sol et leur permettant de composer rapidement des populations denses, ainsi que de leur taille et leur structure élevée et rigide. Considérée comme plante indicatrice de colmatage et d'humidité stagnante, la prêle des champs pose un problème majeur dans les ballasts des voies ferrées, mais n'est généralement pas restée longtemps sur les placettes observées au sein du projet et a disparu naturellement avec la concurrence des autres espèces.

6.3 Bilan du potentiel d'éviction

La colonisation des espèces problématiques, comme de toutes les espèces spontanées, est fortement dépendante: 1. de l'environnement directement en contact avec les sites concernés pour les espèces à forte multiplication végétative ; 2. de la faible teneur en nutriments du substrat en situation non semée pour les espèces anémophiles (dispersées par le vent).

Dans le premier cas, un talus longeant les voies ferrées, récemment perturbé, sur lequel se sont installées des ronces représente un foyer idéal d'espèces problématiques qui se répandront sur les entre-voies et les banquettes. Ceci, en raison de leurs racines implantées en dehors du ballast dans des sols plus favorables à la croissance végétale. Il est donc important de soigner la nature et l'entretien des talus et autres éléments structurants longeant les voies. Les sols perturbés, particulièrement vulnérables, devraient être végétalisés avec des mélanges adéquats. Plus largement, les foyers d'espèces indésirables identifiés pourraient être cartographiés afin de faire l'objets de traitements ciblés.

Dans le second cas, à Muttenz et à Bavois, les espèces problématiques ont été limitées dans leur développement par le semis et supplantées l'année suivante par les espèces semées, spontanées et les mousses. Ce constat invite au semis sur les substrats les plus pauvres pour limiter le développement des espèces indésirables qui sont régulièrement légèrement plus abondantes sur les parcelles témoins (cf. 4.2.1 Analyse par site).

Partant du constat qu'un semis crée un effet de concurrence, il rend plus improbable l'établissement et la propagation des espèces néophytes envahissantes et problématiques, voire un éventuel pic de développement la première année, mais il ne peut pas les empêcher complètement. Le coût de la lutte contre ces espèces reste inchangé par rapport à la pratique actuelle.

7 Sécurité au travail

Le projet de végétalisation ciblée des abords de voies se trouve à la croisée d'intérêts divergents entre, d'une part, la réduction souhaitée des herbicides chimiques, la promotion des espèces indigènes, l'embellissement du paysage et l'amélioration des fonctions écologiques et, d'autre part, l'exigence d'éviter les perturbations de l'exploitation et de garantir la sécurité des personnes et la pérennité des installations. Ce chapitre répond à la question 10 de l'introduction.

7.1 Questions liées à la sécurité

➤ Propriétés des espèces semées

Dans l'étude de faisabilité, certains aspects de sécurité ont été énumérés comme conditions à la végétalisation. Certains points - pas d'envahissement des surfaces agricoles par des adventices et pas de restriction de la sécurité d'exploitation, comme la visibilité des signaux, le maintien de l'accessibilité et de la praticabilité des installations de même que pas de risques de trébuchement - ont déjà été pris en compte dans la sélection d'espèces végétales appropriées.

Au cours de l'essai, les espèces contenues dans les mélanges se sont comportées comme prévu et n'ont présenté aucun risque pour la sécurité. Aucune intrusion de ces espèces dans le lit de ballast n'a pu être observée. Les exigences en matière de sécurité ont été donc remplies.

➤ La fonction des voies, y compris le drainage des zones de ballast, n'est pas affectée

L'étude ciblée d'une autre condition formulée, à savoir l'absence d'atteinte à la perméabilité du sol à l'eau, autrement dit le drainage par la biomasse / les matériaux fins, n'a pas pu être réalisée dans les essais pour des raisons de capacité. Comme aucune plante ne s'est établie dans la zone de ballast, on peut supposer qu'il n'y a pas eu d'atteinte à la perméabilité du sol à l'eau. Sur les substrats perméables des banquettes et aux abords des voies, cela n'est guère à craindre non plus. Au cours de la courte période d'observation de 5 ans, aucun signe de stagnation de l'eau n'a été observé.

➤ Besoin d'entretien en cas d'intrusion de plantes problématiques

Certaines plantes problématiques pourront toujours s'installer ou pousser hors des talus. Dans le présent essai, cela s'est produit de manière isolée. L'implantation ponctuelle d'une végétation plus haute et plus dense n'a été que rarement observée. Sur les sites où les talus étaient envahis par les mauvaises herbes, des plantes grimpantes ont parfois débordé sur les chemins d'entretien (annexe 1 D). Dans le cas de présence d'espèces problématiques à forte multiplication végétative (lianes, ronces, etc.), les traitements mécaniques des rhizomes et stolons doivent être réalisés sur les foyers situés sur les talus. L'entretien ciblé des surfaces adjacentes permet de prévenir l'envahissement des zones ferroviaires par les mauvaises herbes. Ce phénomène doit être résolu par les CFF indépendamment du plan d'action « NoHerbie - Alternatives aux herbicides ».

➤ Bilan des aspects de sécurité

Les aspects de sécurité sont-ils respectés en cas d'introduction réussie des mélanges d'espèces ? (Introduction, question 10).

Oui, en cas d'implantation réussie, les espèces végétales répondent aux critères de sécurité en termes d'exploitation (bonne praticabilité, faible hauteur de croissance et faible profondeur des racines, pas de risque de trébuchement, pas de restriction de la visibilité des signaux, garantie d'un drainage illimité des voies). En outre, la proportion élevée d'espèces souhaitées réduit le risque d'envahissement par des adventices provenant des prairies et champs agricoles voisins.

Une végétalisation ciblée peut fonctionner durablement tout en respectant les aspects de sécurité si elle est complétée par des mesures d'entretien. Il est recommandé de procéder de manière sélective, manuellement, ou de manière automatisée. Il est important d'empêcher la propagation des graines de plantes problématiques et de favoriser celle des plantes dont l'implantation est souhaitée. L'entretien ciblé des talus adjacents peut réduire la pression sur les surfaces végétalisées. Là où la visibilité des signaux, en particulier des signaux nains, doit rester garantie, la végétalisation doit être tenue sous contrôle.

8 Biodiversité et paysage

8.1 Promotion de la biodiversité

La « Stratégie Biodiversité Suisse » [66] a pour objectif de promouvoir la biodiversité dans les zones urbaines. Sa mise en œuvre est résumée dans le « Plan d'action Stratégie Biodiversité Suisse » [67]. Les zones urbaines dotées d'espaces verts semi-naturels peuvent présenter une biodiversité étonnamment élevée [68, 69].

Les voies ferrées offrent des habitats et des refuges pour des espèces précieuses [70-74]. Elles contribuent ainsi à la diversité des espèces et à la promotion de la biodiversité. Cette caractéristique peut en outre être favorisée par une végétalisation ciblée des abords de voies et des entre-voies.

Dans l'étude de faisabilité [25], deux thèmes ont été mentionnés pour l'évaluation d'une végétalisation visant à promouvoir la biodiversité : A) Optimisation de la valeur pour l'entomofaune (pollinisateurs) et B) Ne pas être attractive pour les grands mammifères (lièvres, chevreuils, etc.) afin d'éviter qu'ils ne soient percutés par les trains. Une étude ciblée de l'impact sur la faune n'était pas prévue en raison du dispositif d'essai et pour des raisons de coûts. Il en va de même pour l'étude de l'impact sur les aspects écologiques (urbains) importants, comme l'amélioration de la rétention des eaux de pluie, la fixation des polluants ainsi que les émissions acoustiques et vibratoires. Ces aspects, qui sont également rentables sur le plan économique, sont suffisamment connus grâce à des études sur la végétalisation des toits et sur l'utilisation des voies vertes dans les transports de proximité [75, 76].

C'est dans ce contexte que la température du sol a été étudié. Les observations décrites plus haut indiquent clairement une réduction de la température du substrat grâce à l'ombre dispensée par la végétation (fig. 6), qui empêche ainsi la formation d'îlots de chaleur [77], ce qui se répercute positivement sur le climat local.

Les banquettes le long des voies ferrées peuvent également servir d'étroits corridors de mise en réseau et de propagation. On sait que les néophytes en particulier se développent [78] le long de ces corridors. Malheureusement, aucune végétalisation n'a pu être installée avec succès sur une telle banquette de 50-60 cm de large. On peut donc supposer qu'il n'y a pas d'effet de corridor à grande échelle pour la flore et la faune indigènes à préserver.

L'effet de l'attractivité n'a pas été pris en compte dans cette étude, néanmoins d'autres études [79, 80] ont pu démontrer (sur des sites situés dans le canton de Vaud non loin de Bavois) l'influence de la richesse en dicotylédones des mélanges semés sur leur expression, comme sur la diversité des invertébrés, notamment les abeilles sauvages. En cas d'implantation réussie, on peut donc supposer que l'entomofaune (pollinisateurs) sera favorisée [81]: des abeilles (sauvages), des bourdons, des sauterelles, des chenilles, des papillons ainsi que des araignées, des escargots et des lézards ont été régulièrement observés (fig. 47).



Figure 47: Implantation de fleurs colorées ; habitat pour les insectes et les escargots

8.2 Effets sur le paysage

Le caractère paysager [82] est l'impression visuellement perceptible qui émane d'un paysage et qui contient également des critères de valeur subjectifs et esthétiques de l'observateur. Il a un effet émotionnel et identitaire [83] et revêt donc une très grande importance pour le bien-être général et la qualité de vie de la population.

En raison de cette importance globale du paysage, le législateur suisse a réglementé la promotion des qualités paysagères [84]. Dans sa « Stratégie pour le développement durable », le Conseil fédéral a fixé comme objectif de la politique du paysage le développement de celui-ci tout en préservant son caractère authentique, l'engagement en faveur d'une biodiversité riche et capable de réagir aux changements ainsi que la reconnaissance et la garantie des services écosystémiques et du paysage [85].

Un paysage écologiquement intact et diversifié est perçu comme attrayant par une grande partie de la population et constitue le principal atout pour les loisirs de proximité [86]. Une conception raisonnée du paysage augmente son attractivité, par exemple par des éléments de compensation écologique à effet esthétique tels que les jachères florales, la végétalisation des toits ou des façades, les surfaces restantes avec une végétation naturelle, les ourlets herbeux en bordure et une plantation adaptée au site [87]. Certains cantons suisses travaillent à la promotion concrète de la qualité du paysage [88].



Figure 48: Développement de la végétation au cours de l'année 2021 sur la placette 23 à Cousset, mélange xérophyle «SS»

Contrairement aux entre-voies pauvres et sans végétation, tels qu'ils étaient envisagés jusqu'à présent par les entreprises ferroviaires, une végétalisation ciblée avec des espèces indigènes appropriées (p. ex. *Anthyllis carpatica*, *Dianthus carthusianorum*) offre des tableaux colorés et agréables pour l'œil humain, dont la végétation s'adapte au fil des saisons et assure une perception diversifiée (fig. 48). À Cousset, on constate la formation progressive d'un tapis végétal, composé en particulier d'*Hippocrepis comosa*. Cette communauté végétale a nécessité trois ans pour se mettre en place et a atteint des dimensions impressionnantes après cinq et sept ans (fig. 49 et 50).



Figure 49: Cousset. Formation progressive d'un tapis végétal sur la placette 19 (SS-5) par *Hippocrepis comosa*.



Figure 50: Cousset. Extension du tapis végétal d'*Hippocrepis comosa* en fleur sur la placette 19 (SS-5) le 1^{er} mai 2025.

9 Conclusions

La contribution des espèces semées au recouvrement total est significativement plus élevée que celles des espèces spontanées à la même période sur tous les sites. Sur l'ensemble des valeurs considérées pour les sites présentant un substrat favorable à la croissance végétale, le recouvrement initial et la progression sont régulières et plus élevés pour les mélanges TV2 et RR. L'évolution du recouvrement par type de mélange montre la grande variabilité des données et une faible tendance à l'augmentation avec le temps, d'environ 10% par an sur les sites favorables. Sur les sites au substrat les plus pauvres (taux de $C_{org} \leq 15$ g/kg), la couverture végétale est demeurée réduite.

Du point de vue de la richesse spécifique, le fait de semer augmente significativement la richesse en espèces au sein de la communauté. L'écart de composition s'est atténué avec le temps dans le cadre de cet essai par un effet de diffusion de proximité. Le semis comble donc un déficit de dispersion notamment pour les espèces spécialistes xérotolérantes des pelouses sèches. Au printemps, les espèces observées sont majoritairement annuelles. Le cortège d'espèces vivaces (davantage pérennes) est plus spécifique à chaque mélange. Les mélanges tolérant le stress « SS » et polyvalent « CSR » se différencient par le développement d'espèces xérotolérantes des pelouses mi-sèches à très sèches à capacité de dispersion faible ou limitée. Les mélanges ubiquiste « TV2 », rudéral « RR » et les placettes témoins non semées présentent une flore vivace moins spécialisée.

La part des espèces problématiques contribuant au recouvrement est réduite et significativement plus faible que la part des espèces semées et autres espèces spontanées. Les 5 espèces problématiques les plus recensées sont des espèces pionnières méso à xérophiles majoritairement anthropophiles à très fortes aptitudes à la dispersion, soit à longue distance par le vent ou les oiseaux granivores, soit de manière proximale et végétative par marcottage. Les espèces grimpantes comme le lierre et les espèces de ronces, en particulier, qui poussent depuis les talus adjacents peuvent devenir problématiques et envahir les signaux. Trois espèces sont indésirables en raison de leur hauteur de croissance (la laitue sauvage, l'onagre bisannuelle, le panais) et deux autres en raison de leur caractère invasif (le séneçon commun et la vergerette annuelle).

Les genres dispersés par le vent ou les oiseaux sont implantés sur les banquettes à proximité des voies. L'intervention sur ces espèces, présentant un optimum de germination sur substrat « neuf » récemment mis en place, est à effectuer dès leur implantation. Les genres à forte multiplication végétative s'implantent sur les banquettes à partir de populations sources situées à proximité des banquettes sur les talus au sol plus épais et frais. Le traitement de ces populations implique un broyage régulier de ces zones périphériques.

À long terme, l'approvisionnement en eau semble suffire sur tous les sites, une fois que les semis ont établis leur propre banque granière dans le substrat. La teneur en matière organique du substrat semble être le principal facteur explicatif conditionnant l'établissement des semis, même s'il y a une variabilité d'influence selon le type de mélange, selon les exigences des espèces. L'ancienneté d'un substrat constituera un facteur favorable à l'implantation du tapis végétal.

Les nattes de végétation recouvertes de sedum ne conviennent pas, dans la forme d'application choisie – à savoir sans autre intervention technique lors de la pose et sans entretien - à une utilisation sur les voies ferrées, le ballast et sur les banquettes des voies ferrées, notamment en raison de leur sensibilité au piétinement.

En cas d'implantation réussie, les espèces végétales des mélanges semés remplissent les critères de sécurité en termes d'exploitation (bonne praticabilité, faible hauteur de croissance et faible profondeur des racines, pas de risque de trébuchement, pas de limitation de la visibilité des signaux, garantie d'un drainage illimité des voies). La proportion élevée d'espèces semées réduit le risque de propagation d'espèces indésirables dans les surfaces agricoles voisines. Différentes mesures d'entretien peuvent s'avérer nécessaires en fonction du site.

L'essai de plusieurs années avec 5 mélanges de semences sur 5 sites a montré qu'une végétalisation réussie dans les entre-voies et aux abords des voies est possible avec des espèces sélectionnées. Nous avons pu montrer que la diversité des espèces augmente, qu'une couverture végétale bien établie réduit l'établissement de néophytes et abaisse la température du sol, ce qui peut également avoir un effet sur la température ambiante.

10 Perspectives – Mise en pratique

Les directives d'entretien révisées permettent de tolérer davantage de végétation aux abords des voies qu'auparavant. Celle-ci doit toutefois continuer à garantir la sécurité et l'accessibilité et ne doit pas réduire la durée d'utilisation des infrastructures ferroviaires. Cet objectif peut être atteint avec le mélange ubiquiste TV2. Il s'adapte de manière flexible aux conditions les plus diverses sur les différents sites et peut donc être utilisé en de nombreux endroits. Le nombre d'espèces contenues dans le mélange peut être adapté en fonction des besoins, des objectifs ou du site d'implantation. Ce mélange permet d'envisager une mise en œuvre dans la pratique.

Les substrats plus anciens, déjà enrichis en matière organique, qu'il s'agisse de groise ou d'autres substrats, sont dans tous les cas colonisés par la végétation ou le sont déjà, ce qui augmente les efforts nécessaires pour le contrôle de la végétation. Il serait donc tout à fait indiqué de végétaliser les entre-voies. Cela permet de contrôler de manière ciblée les espèces végétales que l'on souhaite voir s'établir, d'augmenter la diversité des espèces, de diminuer la température du sol et d'enrichir la qualité du paysage. Le mélange de semences développés pour le présent essai a démontré son potentiel.

En cas de construction ou de rénovation des voies, les trois possibilités suivantes sont envisageables:

- Si l'objectif est de maintenir le plus longtemps possible les jeunes substrats de groise exempts de végétation, il est possible de conserver à long terme leurs propriétés défavorables à la végétation, en rendant les surfaces régulièrement rugueuses et en les sarclant, comme l'ont montré nos observations à MuttENZ. Les plantes éliminées doivent toutefois être évacuées.
- Si l'on veut obtenir une végétalisation rapide sur de jeunes substrats de groise, il est recommandé de procéder à des semis par hydroseeding (méthode de semis par projection hydraulique complétée par de la matière organique comme engrais de démarrage) comme le fait la SNCF, ce qui permet un meilleur démarrage.
- Comme alternative et par analogie avec la végétalisation des voies de tramways et des toitures, une colonisation rapide est possible en utilisant d'autres substrats, comme du gravier mural non lavé ou des matériaux de construction recyclés [89, 90].

La présente étude a été menée sur des placettes (15 m²) à des fins de confirmation statistique. Les résultats discutés ci-dessus montrent que les espèces des mélanges testés colonisent également les surfaces d'essai voisines. Il semble donc important de vérifier comment se comporte un ensemencement sur de grandes surfaces en atténuant de tels effets de bordure. De larges zones d'entre-voies et en abord des voies sont des surfaces appropriées pour une mise en œuvre. Certaines surfaces présentant un bon potentiel ont fait l'objet de discussions au cours du projet:

- À Dielsdorf ZH, où une bande de 300 m de long et de 3 m de large à l'est de la voie ferrée présente aujourd'hui déjà quelques plantes apparues spontanément, ce qui indique que le taux de matière organique est suffisant pour la germination.
- Dans le cadre du projet Léman 2030 sur le site de la gare de rangement à Lausanne
- À Fribourg, à l'occasion de la construction de nouvelles voies.

Les besoins en entretien n'ont pas été étudiés de manière approfondie. Compte tenu de la durée relativement courte du projet et de la lenteur des processus d'établissement des plantes, seules des conclusions générales peuvent être tirées. Par ailleurs, l'équipe de projet n'avait pas prévu de mesures d'entretien. Cet aspect mériterait certainement d'être approfondi.

La valeur écologique des surfaces ensemencées n'a pas non plus pu être suffisamment étudiée au cours du projet. Dans la pratique agricole, des mélanges standardisés sont utilisés pour les surfaces de promotion de la biodiversité dans les grandes cultures et la viticulture sur des sols ouverts et sont indemnisés par des paiements directs. Les mélanges d'espèces indigènes testés peuvent être considérés comme une valorisation écologique par rapport aux surfaces sans végétation et n'ont rien à envier aux mélanges destinés aux surfaces de promotion de la biodiversité en termes de variété et d'importance pour la biodiversité. Les espèces choisies offrent de la nourriture et un habitat à de nombreux organismes. La question est de savoir quel nombre de points une telle surface pourrait atteindre en tant que surface de remplacement écologique, par exemple selon la «Bewertungsmethode für Eingriffe in

schutzwürdige Lebensräume» (Méthode d'évaluation des interventions dans les habitats dignes de protection) [91]. Les critères d'évaluation sont les suivants : durée de développement, rareté du type d'habitat et importance pour la biodiversité.

Tous les thèmes abordés ci-dessus se résument à l'aspect des coûts. Une analyse des coûts n'était pas prévue dans le cadre du projet. Cet aspect est du ressort des CFF. Pour le remplacement des herbicides, il s'agit d'estimer comment les différentes méthodes se compenseront entre elles à long terme (sur des décennies):

- Pas de mesures alternatives : les coûts d'installation et d'entretien restent inchangés.
- Renoncement aux herbicides : les coûts d'installation restent inchangés, les coûts d'entretien augmenteront probablement.
- Végétalisation : coûts d'installation réduits, mais coûts d'entretien plus élevés
- Mesures de construction : coûts d'installation élevés avec des coûts d'entretien faibles.

Le meilleur moyen de calculer ces aspects est de prendre un exemple concret. Il faudrait à cet effet un site modèle afin de pouvoir définir les travaux préparatoires nécessaires et la surface à ensemercer. Avec ces données, il serait possible de s'adresser aux producteurs de semences et aux techniciens pour obtenir un devis.

11 Bibliographie

1. SNCF infra (2009): **Les traitements chimiques de la végétation des voies ferrées par la SNCF**. Vortrag Phyt'Eaux Propres Île de France 17 juin 2009; URL: http://www.cadeb.org/wp-content/uploads/2012/06/pratiques_sncf.pdf; last visit 26.01.2024.
2. BLW (Hrsg.) (2024): **Verkaufsmengen der Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe**. Bundesamt für Landwirtschaft; URL: <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe.html>; last visit 26.01.2024.
3. LfL Bayern (Hrsg.) (2018): **Einsatzumfang von Glyphosat**. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft; URL: <https://www.lfl.bayern.de/ips/unkraut/192703/index.php>; last visit 26.01.2024.
4. Gunter Adolph (2017): **Vegetationskontrolle SBB - Auffrischkurs FABE PSM**. Vortrag, Olten; 8.11.2017.
5. Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz (AefU) (2018): **BAFU-Grenzwerte ohne Wert für gefährlichste Pestizide?** URL: <http://www.aefu.ch/themen/chemikalien/pestizide/>; last visit 26.01.2024(16.01.2019).
6. Konsumentenschutz Schweiz (2018): **Kein Persilschein für Glyphosat**. URL: <https://www.konsumentenschutz.ch/tag/glyphosat/>; last visit 26.01.2024.
7. BauernZeitung online (2018): **Glyphosat: Umstrittene Mutter aller Herbizide**. URL: <https://www.bauernzeitung.ch/news-archiv/2018/glyphosat-umstrittene-mutter-aller-herbizide>; last visit 26.01.2024.
8. Maximilian von Klenze (2023): **EU-Kommission verlängert Glyphosat-Zulassung um zehn Jahre**. URL: <https://www.nzz.ch/wirtschaft/eu-kommission-verlaengert-glyphosat-zulassung-um-zehn-jahre-ld.1766142>; last visit 26.01.2024.
9. Pietras-Couffignal K., Klein E., Van Driessche S. and Pelletier A. (2021): **Future vegetation control of European Railways-State-of-the-art report (TRISTRAM Final Report)**. UIC-ETF. International Union of Railways (UIC). Edition Techniques Ferroviaires. Paris.
10. Robert Sattelberger (2001): **Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Biozid-Produkten im nicht-land- und forstwirtschaftlichen Bereich**. MONOGRAPHIEN Band 146; Umweltbundesamt GmbH, Wien (Vienna), Austria.
11. Rask A.M. and Kristoffersen P. (2007): **A review of non-chemical weed control on hard surfaces**. Weed Research 45:5, p. 370-380.
12. Lennart Torstensson (2001): **Use of herbicides on railway tracks in Sweden**. Pesticide outlook 12:1, p. 16-21.
13. Roger G. Nyberg (2016): **Automating condition monitoring of vegetation on railway trackbeds and embankments**. Thesis at Edinburgh Napier University.
14. British Columbia Railway Company (2007): **Integrated Vegetation Management Plan 2008-2013**. URL: <https://bcrco.com/IVMPLAN2007.pdf>; last visit 26.01.2024.
15. British Columbia Railway Company (2012): **Integrated Vegetation Management Plan 2013-2017**. URL: https://www.bcrco.com/veg_mgmt_plan.pdf; last visit 26.01.2024.
16. SNCF Réseau (2021): **Charte d'engagements relative à l'utilisation des produits phytoparmaceutiques**. URL: https://www.sncf-reseau.com/medias-publics/2023-11/sncf_reseau_-_egalim_-_charte_d_engagements_vf.pdf; last visit 26.01.2024.
17. Lukas Tanner, Gunter Adolph and Werner Kurfess (2021): **Erfahrungen mit dem Heisswasser-Unkraut-Spritzzug im praktischen Einsatz: Die SBB entwickelt und testet Alternativen zu Glyphosat**. Kurfess; Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) Nr. 3 2021.
18. Lukas Tanner, Gunter Adolph and Werner Kurfess (2021): **Heißwasser als Alternative zur chemischen Vegetationsbekämpfung bei der SBB - Erfahrungen nach zwei Jahren mit dem Heißwasser-Spritzzug im praktischen Einsatz**. Verkehr und Technik (VuT) Nr. 5 2021.
19. HSLU (Hrsg.) (2024): **Roboter anstelle Herbizid**. Hochschule Luzern; URL: <https://www.hslu.ch/de-ch/technik-architektur/ueber-uns/organisation/kompetenzzentren-und-forschungsgruppen/technik/mechanische-systeme/mobile-und-industrielle-robotik/robo-roboter-anstelle-herbizid/>; last visit 26.01.2024.
20. Aurélie Gfeller, Frédéric Tschuy, Lukas Tanner, Gunter Adolph and Judith Wirth (2023): **Heisswasser-Applikation, eine effektive Methode zur Vegetationskontrolle im Gleisbereich**. Agrarforschung Schweiz 14: 76–85, 2023.
21. Ignaz J. Buerge, Pavlina Pavlova, Irene Hanke, Astrid Bächli and Thomas Poiger (2020): **Degradation and sorption of the herbicides 2,4-D and quizalofop-P-ethyl and their metabolites in soils from railway tracks**. Environmental Sciences Europe volume 32, Article number: 150.
22. SNCF Réseau (2024): **L'éco-pâturage: économique et respectueux de l'environnement**. URL: <https://www.sncf.com/fr/reseau-expertises/reseau-ferroviaire/sncf-reseau/ecopaturage-on-peut-compter-sur-les-moutons>; last visit 01.11.2024.
23. Marine Lelay, Caroline Dechaume-Moncharmont, Manon Vion and Mélanie Douchet (2019): **L'éco-pâturage pratiqué par SNCF Réseau**. Sciences Eaux & Territoires n°27 – 2019.
24. SNCF Réseau (2023): **« Choisir la végétation plutôt que la subir »**. URL: <https://www.sncf.com/fr/groupe/profil-et-chiffres-cles/qui-sommes-nous/sncf-reseau/ensemencement-choisi-technique-respectueuse-environnement>; last visit 03.11.2024.

25. Markus van der Meer and Serge Buholzer (2019): **Vorprojekt «Begrünung von Geleise-Banquettes und Vegetationskontrolle ohne Herbizide» - Bericht zur Machbarkeitsstudie 2018**. Agroscope Science | Nr. 90 / 2019.
26. Markus van der Meer, Patrice Prunier, Julie Steffen, Muriel Ehmig, Pierre-André Frossard and Serge Buholzer (2021): **Grüner Teppich – gezielte Begrünung von Banquettes und Randbereichen - 2020 – Zwischenevaluation / Évaluation intermédiaire**. Agroscope Science | Nr. 119 / 2021.
27. Markus van der Meer, Julie Steffen, Patrice Prunier and Serge Buholzer (2024): **Einsatz von Sedum-Matten zur Begrünung von Schottern, Gleisen und Gehwegen in SBB Arealen - Tastversuche (2021–2023)**; . Agroscope Science | Nr. 195 / 2024.
28. Agroscope (2021): **Webseite des Projektes: Grüner Teppich – gezielte Begrünung von Banquettes und Randbereichen; UPDATE in March 2024 to "Alternativen zum Einsatz von Glyphosat an Bahnhöfen und im Schienennetz der SBB"**. URL: <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/umwelt-ressourcen/biodiversitaet-landschaft/oekologischer-ausgleich/tapisvert.html>.
29. Grime J. (1974): **Vegetation classification by reference to strategies**. Nature, vol. 250, no 5461, p. 26-31.
30. Wikipedia (2023): **Vegetationsperiode**. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Vegetationsperiode>; last visit 26.01.2024.
31. BEL (Hrsg.) (2020): **Der Boden aus Sicht der Agrarmeteorologie - Bodentemperatur und -wasserhaushalt**. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; URL: <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/agrarmeteorologie.html>; last visit 26.01.2024.
32. Pierluigi Calanca, Annelie Holzkämper and Francesco A. Isotta (2023): **Die thermische Vegetationszeit im Wandel des Klimas**. Agrarforschung Schweiz 14: 150–158, 2023.
33. MeteoSchweiz (Hrsg) (2023): **Klimareport 2022**. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich. 104 S.
34. MeteoSchweiz (Hrsg) (2024): **Klimabulletin Jahr 2023**. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich.
35. Meteotest AG (2021): **BODENMESSNETZ; Webauftritt der Kantonalen Fachstellen Bodenschutz**. UR:: <https://www.bodenmessnetz.ch/messwerte/datenabfrage>; last visit 26.01.2024.
36. Kalkfabrik Netstal (2024): **KFN Netstaler® 0–15 mm geschlammt, der Deckbelag für Naturstrassen, Wanderwege und Landschaftsbau**. URL: <https://www.kfn.ch/kies/kfn-netstaler> (last visited: 01.11.2024).
37. swisstopo (2017): **Rapport au sujet de l'approvisionnement de la Suisse en matières premières minérales non énergétiques (Rapport sur les matières premières minérales)**. URL: <https://shop.swisstopo.admin.ch/fr/livres-et-publications/service-geologique-national/rapports-geologiques/rapports-du-service-geologique-national-pdf>; last visit 03.11.2024.
38. swisstopo (2021): **Besoins et état de l'approvisionnement en granulats issus de roches dures en Suisse**. URL: <https://shop.swisstopo.admin.ch/fr/livres-et-publications/service-geologique-national/rapports-geologiques/rapports-du-service-geologique-national-pdf>; last visit 03.11.2024.
39. Wikipedia (2023): **Hitzewelle**. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Hitzewelle>; last visit 26.01.2024.
40. Wikipedia (2021): **Therophyt**. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Therophyt>; last visit 03.11.2024.
41. Wikipedia (2022): **Xerophilie**. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Xerophilie>; last visit 03.11.2024.
42. Wikipedia (2024): **Stratifikation (Botanik)**. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Stratifikation_\(Botanik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Stratifikation_(Botanik)); last visit 02.12.2024.
43. Scheffer/Schachtschabel (1998): **Lehrbuch der Bodenkunde**. 14. Auflage, Ferdinand Enke Verlag 1998.
44. Alexander Stahr (2014): **Bodentemperatur**. URL: <http://www.ahabc.de/bodeneigenschaften/bodentemperatur/#>; last visit 26.01.2024.
45. Andreas Bohner (2014): **Faktoren der Nährstoffverfügbarkeit im Boden des Dauergrünlandes**. Fachtagung für biologische Landwirtschaft 2014, 15 – 22.
46. Gesine Hellberg-Rode (2002): **Wärmehaushalt des Bodens**. Westfälische Wilhelms-Universität Münster; URL: <https://hypersoil.uni-muenster.de/0/05/05.htm>; last visit 26.01.2024.
47. Diedrich Schroeder (1992): **Bodenkunde in Stichworten**. 5. revidierte und erweiterte Auflage von Winfried E. H. Blum. Hirt in Gebrüder Borntraeger, Berlin; Stuttgart, 1992; 175 Seiten.
48. Spektrum.de (2001): **Hitzeresistenz**. Kompaktlexikon der Biologie.; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg; URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/hitzeresistenz/5543> ; last visit 03.11.2024.
49. Wikipedia (2023): **Temperaturresistenz**. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Temperaturresistenz>; last visit 03.11.2024.
50. BAFU (Hrsg.) (2021): **Hochwasser Juli 2021: Intensive Niederschläge führten verbreitet zu Überschwemmungen**. Bundesamt für Umwelt; URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/dossiers/hochwasser-juli-2021-intensive-niederschlaegefuehrten-verbreitet-zu-ueberschwemmungen.html>; last visit 01.11.2024.
51. Daget P. and Poissonet J. (1971): **Une méthode d'analyse phytologique des prairies: critères d'application**. Annales Agronomiques, 22 (1): pp. 5-41.
52. BAFU (Hrsg.) (2022): **Gebietsfremde Arten in der Schweiz**. Bundesamt für Umwelt; 1. aktualisierte Auflage 2022. Erstausgabe 2006.; URL: www.bafu.admin.ch/uw-2220-d last visit 01.11.2024.
53. Verloove F. (2011): **Geranium purpureum**. On: Manual of the Alien Plants of Belgium. Botanic Garden Meise, Belgium; URL: <https://alienplantsbelgium.myspecies.info/content/geranium-purpureum>; last visit 03.11.2024.

54. Prunier P., Boissezon A., Duvoisin J. and Steffen J. (2020): **Associations végétales du canton de Genève - Clé d'identification illustrée**. Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève, Office cantonale de l'agriculture et de la nature, Genève, 246 p.
55. Ursula Tinner and Hanspeter Schumacher (2004): **Flora auf Bahnhöfen der Nordostschweiz**. Botanica Helvetica 114 Heft 2, p. 109-126.
56. Boguslaw Wilkomirski, Halina Galera, Barbara Sudnik-Wójcikowska, Tomasz Staszewski and Malgorzata Malawska (2012): **Railway tracks-habitat conditions, contamination, floristic settlement - a review**. Environment and Natural Resources Research Vol. 2, No. 1.
57. Dan Wolkowycki and Piotr Banaszuk (2016): **Railway routes as corridors for invasive plant species. The case of NE Poland**. In: Materials of The International Academic Conference on The New Silk Road Connectivity: NSRC 2016. 162–169. Chongqing Jiaotong University, Opole Technical University, Chongqing.
58. Caterina Penone, Nathalie Machon, Romain Julliard and Isabelle Le Viol (2012): **Do railway edges provide functional connectivity for plant communities in an urban context?** Biological Conservation 148 (2012) 126–133.
59. Barbara Lattrell (2015): **PA-haltige Pflanzen auf nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen**. Vortrag, URL: <https://bfr.bund.de/cm/343/pa-haltige-pflanzen-auf-nicht-landwirtschaftlich-genutzten-flaechen.pdf> last visit 01.11.2024.
60. Wolfgang Bischoff, Josephine Cueni, Yolande Peisl-Gaillet and Delphine Kolly (2014): **Bekämpfung invasiver Neophyten: beschränkte Mittel zielgerichtet einsetzen (Essay)**. Schweiz Z Forstwes 165 (2014) 6: 132–139.
61. Heinz Mueller-Schaerer and Suzanne Lommen (2014): **Ambrosia in Germany - Can the Invasion Be Halted?** Julius-Kuhn-Archiv 445 p. 148-155.
62. Cercle exotique (2020): **Bekämpfungsempfehlung - Schmalblättriges Greiskraut (Senecio inaequidens)**. Merkblatt. URL: <https://www.kvu.ch/de/arbeitsgruppen?id=138>; last visit 29.01.2024.
63. InfoFlora (2022): **Rubus armeniacus Focke (Rosaceae)**. Factsheet. URL: <https://www.infoflora.ch/de/flora/rubus-armeniacus.html>; last visit 01.11.2024.
64. InfoFlora (2021): **Senecio inaequidens DC. (Asteraceae)** Factsheet. URL: <https://www.infoflora.ch/de/flora/senecio-inaequidens.html>; last visit 01.11.2024.
65. InfoFlora (2019): **Erigeron annuus (L.) Desf. (Asteraceae)**. Factsheet. URL: <https://www.infoflora.ch/de/flora/erigeron-annuus.html>; last visit 01.11.2024.
66. BAFU (Hrsg.) (2012): **Strategie Biodiversität Schweiz**. Bundesamt für Umwelt; URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/publikationen-studien/publikationen/strategie-biodiversitaet-schweiz.html>; last visit 01.11.2024.
67. BAFU (Hrsg.) (2017): **Aktionsplan Strategie Biodiversität Schweiz**. Bundesamt für Umwelt; URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/fachinformationen/biodiversitaetspolitik/strategie-biodiversitaet-schweiz-und-aktionsplan.html>; last visit: 01.11.2024.
68. BAFU (Hrsg.) (2023): **Lebensräume in der Schweiz**. Bundesamt für Umwelt; URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/fachinformationen/zustand-der-biodiversitaet-in-der-schweiz/zustand-der-lebensraeume-in-der-schweiz.html#-1959529279>; last visit 01.11.2024.
69. Ewa Renaud, Patrice Prunier, Marie Fournier, Téo Lemaitre, Martin Secretan, Julie Steffen and Pascal Boivin (2023): **Toitures végétalisées à Genève - Questions pratiques et état des connaissances**. Etat de Genève; Programme Nature en ville; URL: <https://www.1001sitesnatureenville.ch/wp-content/uploads/Toitures-vegetalisees-Etat-des-connaissances.pdf>; last visit 03.11.2024.
70. Sargent C. (1984): **Britain's Railway Vegetation; Environmental Conservation 12:2 p. 193-194**. Cambridge University Press.
71. Lenka Jandová, Petr Sklenář and Pavel Kovář (2009): **Changes of Grassland Vegetation in Surroundings of New Railway Flyover (Eastern Bohemia, Czech Republic)**. Part I: Plant Communities and Permanent Habitat Plots; Journal of Landscape Ecology VOLUME 2 (2009): ISSUE 1 (JANUARY 2009). 2(1): p. 35.
72. Åke Niemi (1969): **On the railway vegetation and flora between Esbo and Inga, S. Finland**. Acta botanica fennica 83, May 1969.
73. John Aubert, Antoine Burri and Jean-Yves Le Baron (2004): **La valorisation des talus ferroviaires**. Tracés: bulletin technique de la Suisse romande 130:23.
74. Lachat T., Pauli D., Gonseth Y., Klaus G., Scheidegger C., Vittoz P. and Walter T. (Red) (2010): **Wandel der Biodiversität in der Schweiz seit 1900. Ist die Talsohle erreicht?** Forum Biodiversität Schweiz, (Hrsg.); Bristol-Stiftung, Zürich. Haupt Verlag, Bern. Bezug: www.haupt.ch.
75. Christel Kappis, Hendrikje Schreiter and Karsten Reichenbacher (2014): **Handbuch Gleisbegrünung - Planung, Ausführung, Pflege**. Grüngleisnetzwerk (Hrsg.), PMC Media House; Trackmedia; 1. Auflage, 164 S.
76. Sophie Rochefort, Patrice Prunier, Pascal Boivin, Reto Camponovo and David Consuegra (2018): **Rapport final du projet "Toitures végétalisées" (TVEG) dans l'agglomération genevoise**. URL: <https://plante-et-cite.ch/rapport-final-du-projet-toitures-vegetalisees-tveg/>; last visit 03.11.2024.
77. Yoshito Tamai, Humika Satou, Rijal Hom Bahadur, Shiro Wakui and Kentaro Iijima (2020): **Environmental Heat Relaxation Effect by Railroad Track Greening with Non-Irrigation System**. Journal of Japanese Society of Turfgrass Science Vol 48 Nr 2 p. 149-155.

78. Anonymus (2010): **Neophyten - Bahnstrecken als Ausbreitungskorridore**. Natur und Land (vormals Blätter für Naturkunde und Naturschutz) 96. JG. - Heft 2-2010.
79. Heiniger C., Rochefort S. and Prunier P. (2023): **Floral resources used by bees in urban areas: the case of Geneva, Switzerland**. *Frontiers in Ecology and Evolution* 11: 1199438.
80. Heiniger C., Steffen J. and Prunier P. (2020): **Suivi biologique – Ruisseau de la Sadaz**. Rapport d'étude, Etat de Vaud – DES-DGE, 20 p. (non-accessible, not published).
81. BAFU (Hrsg.) (2018): **Biodiversität im Stadtzentrum**. Bundesamt für Umwelt; URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/dossiers/biodiversitaet-im-stadtzentrum.html>; last visit 01.11.2024.
82. Spektrum.de (2000): **Landschaftsbild**. Lexikon der Geowissenschaften; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg; URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/landschaftsbild/9192>; last visit 29.01.2024.
83. IG Landschaft (2024): **Landschaftsbild - Das Landschaftsbild - wichtiger Baustein für die Lebensqualität des Menschen**. URL: https://www.ig-landschaft.ch/de/natur_landschaft/landschaftsbild.php; last visit 29.01.2024.
84. BAFU (Hrsg.) (2020): **Landschaftskonzept Schweiz - Landschaft und Natur in den Politikbereichen des Bundes**. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Info Nr. 2011: 52 S.
85. Schweizerischer Bundesrat (Hrsg.) (2021): **Strategie Nachhaltige Entwicklung 2030**. Schweizerischer Bundesrat Bern, 23. Juni 2021; URL: www.are.admin.ch/sne; last visit 29.01.2024.
86. IG Landschaft (2024): **Siedlungsökologie- mehr Natur im Arbeits- und Wohnumfeld**. URL: <https://www.ig-landschaft.ch/de/siedlungssoekologie/index.php>; last visit 29.01.2024.
87. Anne Scheidegger, Daniel Béguin and Patrice Prunier (2021): **Analyse phytosociologique des pelouses et prairies extensives en Ville de Genève**. *Saussurea* 50, p. 129-146, Journal de la Société botanique de Genève.
88. Département du territoire (Genève) (2024): **Conception cantonale du paysage - cahier 2 - objectifs de qualité paysagère**. URL: <https://www.ge.ch/document/conception-cantonale-du-paysage>; last visit 01.11.2024.
89. B. Grard (2017): **Des Technosols construits à partir de produits résiduels urbains: services écosystémiques fournis et évolution**. *Ecologie, Environnement*. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. Français. NNT: 2017SACLA043; HAL Id: tel-01779723.
90. Prunier P., Steffen J., Boivin P., Frossard P., Guiné V., Mörch F., Renaud E., Rochefort S. and Amos E. (2023): **Des technosols pour des toitures extensives durables**. Dans: *Agir pour les sols urbains*. *Plante & Cité* 9: 32-34.
91. Christoph Bühler, Kathrin Wunderle and Stefan Birrer (2017): **Bewertungsmethode für Eingriffe in schutzwürdige Lebensräume**. Hintermann & Weber AG, Austrasse 2a CH-4153 Reinach; URL: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=49595&Load=true>; last visit: 09.12.2024.

12 Liste des figures

Figure 1: Abords des voies sur lesquels une végétalisation est possible.	11
Figure 2: Triangle des stratégies écologiques primaires	12
Figure 3: Localisation des sites d'essai sur le plateau suisse (zone biogéographique verte):.....	12
Figure 4: Substrat typique utilisé sur les chemins d'accès aux abords des voies.....	14
Figure 5A: Comparaison des teneurs en C_{org} dans le substrat des sites.....	15
Figure 5B: Comparaison des teneurs en C_{org} dans le substrat des répétitions des procédés.....	15
Figure 6: Courbe des températures (air, sol) à Cousset (COU) et à Cornaux (COR) 2023 (moyenne lissée 14j). ...	17
Figure 7A: Résultats obtenus en chambre de culture en terme de nombre d'espèces exprimées par mélange.	22
Figure 7B: Expression des mélanges complétée par les recensements sur les sites expérimentaux.	22
Figure 8: Méthode de relevé « points-quadrat ».....	25
Figure 9: Schéma expérimental de Lullier.	26
Figure 10: Toiture de Lullier (janvier 2020).....	27
Figure 11: Développement de la végétation.....	27
Figure 12: Evolution du taux de recouvrement végétal par mélange et catégorie au fil des années sur le site de Cousset.....	29
Figure 13: Taux de recouvrement végétal par mélange et catégorie au terme de cinq et trois années de suivi du site de Cousset.	29
Figure 14: Evolution du taux de recouvrement végétal par catégorie au fil des années sur le site du Landeron.....	30
Figure 15: Taux de recouvrement végétal par catégorie au terme de cinq et trois années de suivi du site du Landeron.....	30
Figure 16: Le Landeron, 16.06.2020: renouvellement des voies.	31
Figure 17: Le Landeron. Régénération de la végétation de la répétition SS-1 partiellement détruite (photos et figure de droite) comparée à la répétition SS-4 entièrement détruite et ressemée (figure de droite).	31
Figure 18: Evolution du taux de recouvrement de 2021 à 2023 sur le site de Cornaux	32
Figure 19: Taux de recouvrement sur le site de Muttentz.	32
Figure 20: Taux de recouvrement sur le site de Bavois.	33
Figure 21: Divers mélanges comparés à la végétation spontanée	34
Figure 22: Evolution du taux de recouvrement par mélange de 2021 à 2023 au printemps (en haut) et en automne (en bas) sur le site aménagé de Lullier.	35
Figure 23: Evolution de la richesse spécifique des plantes du tapis herbacé selon les mélanges semés (n = 8 par modalité) sur le site de Cousset.....	36
Figure 24: Contribution spécifique (cs) cumulée (> 1%) des espèces vasculaires relevées pour le mélange rudéral « RR » à la biomasse totale sur le site de Cousset (2023).	37
Figure 25: Contribution spécifique (cs) cumulée (> 1%) des espèces vasculaires relevées pour le mélange tolérant le stress « SS » à la biomasse totale sur le site de Cousset (2023).	38
Figure 26: Contribution spécifique (cs) cumulée (> 1%) des espèces vasculaires relevées pour le mélange polyvalent « CSR » à la biomasse totale sur le site de Cousset (2023).	39
Figure 27: Contribution spécifique (cs) cumulée (> 1%) des espèces vasculaires relevées pour le mélange ubiquiste « TV2 » à la biomasse totale sur le site de Cousset (2023)	40
Figure 28: Contribution spécifique (cs) cumulée (> 1%) des espèces vasculaires relevées pour les placettes non ensemencées à la biomasse totale sur le site de Cousset (2023).	41
Figure 29: Evolution du recouvrement moyen de la végétation vasculaire (gauche) et part des espèces semées (milieu) et problématiques (droite) sur les six sites ; tous mélanges confondus, sans les témoins.	44
Figure 30: Illustration des espèces semées les plus fréquentes sur l'ensemble des sites, tous mélanges confondus.	45
Figure 31: Illustration des espèces spontanées les plus fréquentes sur l'ensemble des sites.	46
Figure 32: Illustration des espèces problématiques les plus fréquentes sur l'ensemble des sites.	47
Figure 33: Evolution des valeurs brutes de recouvrement selon le type de mélange pour l'ensemble des placettes suivies.....	48

Figure 34: Evolution du recouvrement pour le mélange rudéral « RR » selon les sites.	49
Figure 35: Evolution du recouvrement pour le mélange ubiquiste « TV2 » selon les sites.	49
Figure 36: Evolution des valeurs brutes de richesse spécifique selon le type de mélange pour l'ensemble des placettes suivies.	50
Figure 37: Evolution de la richesse spécifique selon le type de mélange pour le site de Cousset.	51
Figure 38: Evolution de la richesse spécifique selon le type de mélange pour le site du Landeron.	51
Figure 39: Recouvrement vasculaire en fonction de la matière organique tous mélanges et sites confondus.	52
Figure 40: Recouvrement vasculaire en fonction de la matière organique pour le mélange polyvalent « CSR » tous sites confondus.	53
Figure 41: Recouvrement vasculaire en fonction de la matière organique pour le mélange rudéral « RR » tous sites confondus.	53
Figure 42: Comparaison du recouvrement par les orpins et la végétation spontanée par site en 2021 et 2023.	59
Figure 43: Diversité spécifique de bryophytes par mélange au Landeron (LL) et à Cousset (COU).....	59
Figure 44: Photos du développement de la germination sur une surface d'essai de 5 m ² (2 m x 2,5 m):.....	61
Figure 45: Recouvrement par des plantes vasculaires dans un essai de synergie	61
Figure 46: Néophytes envahissantes présentes sur les sites - voir la liste «Espèces exotiques en Suisse».	62
Figure 47: Implantation de fleurs colorées ; habitat pour les insectes et les escargots	65
Figure 48: Développement de la végétation au cours de l'année 2021 sur la placette 23 à Cousset, mélange xérophyle «SS».....	66
Figure 49: Cousset. Formation progressive d'un tapis végétal sur la placette 19 (SS-5) par Hippocrepis comosa.	67
Figure 50: Cousset. Extension du tapis végétal d'Hippocrepis comosa en fleur sur la placette 19 (SS-5) le 1 ^{er} mai 2025.	67

13 Liste des tableaux

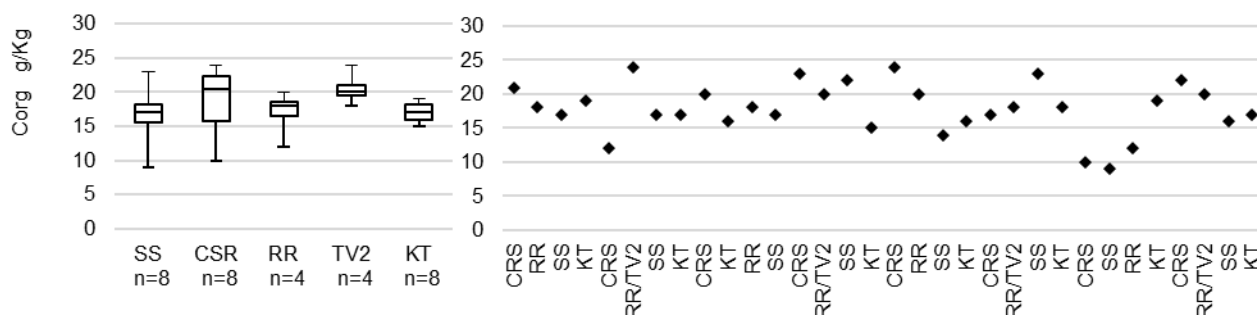
Tableau 1: Aperçu des dispositifs d'essai.....	13
Tableau 2: Nombre de jours avec des températures du sol (-5 cm) supérieures à 35 °C, voire 40 °C, et température annuelle maximale enregistrée par site et par an	16
Tableau 3: Températures à la surface du sol sur la toiture plate à Lullier: nombre de jours avec des températures supérieures à 40 °C, voire 50 °C, valeurs maximales.....	16
Tableau 4: Conditions du test et procédés testés dans les essais en chambre de culture.	20
Tableau 5: Espèces ne s'étant pas exprimées en chambre de culture, comparées à leur présence dans les conditions en plein air sur les sites extérieurs des CFF et dans le dispositif installé sur la toiture de Lullier (nombre de comptages pendant toute la période d'essai).	22
Tableau 6: Nombre d'occurrences des 10 espèces semées les plus fréquemment recensées (printemps & automne confondus) sur l'ensemble des sites suivis.....	45
Tableau 7: Nombre d'occurrences des 10 espèces spontanées les plus fréquemment recensées (printemps & automne confondus) sur l'ensemble des sites suivis.....	46
Tableau 8: Nombre d'occurrences des 10 espèces problématiques les plus fréquemment recensées (printemps & automne confondus) sur l'ensemble des sites suivis.....	47

14 Annexes

Annexe 1 A): Cousset: Procédés testés sur le site et paramètres relevés.	78
Annexe 1 B): Le Landeron: Procédés testés sur le site et paramètres relevés.	79
Annexe 1 C): Cornaux: Procédés testés sur le site et paramètres relevés.	80
Annexe 1 D): Muttenz: Procédés testés sur le site et paramètres relevés.	81
Annexe 1 E): Bavois: Procédés testés sur le site et paramètres relevés.	82
Annexe 1 F): Dole: Procédés testés sur le site et paramètres relevés.	83
Annexe 1 G): Lullier: Procédés testés sur le site et paramètres relevés.	84
Annexe 1 H): Seebach: Procédés testés sur le site et paramètres relevés.	85
Annexe 2: Composition des mélanges et occurrence des espèces semées sur les sites extérieurs.	86
Annexe 3: Répartition des précipitations [mm/m ²] par site pendant les années d'essai, avec les deux dates de semis et la durée de végétation.	87
Annexe 4: Comparaison des températures journalières maximales dans le sol par site et par an.	88
Annexe 5: Sommes lissées des précipitations en mm par jour pendant les années d'essai en moyenne mobile de 60 jours sur les sept sites suisses.	89
Annexe 7: Tendances linéaires de l'évolution météorologique de 2000 à 2023 sur la base des valeurs journalières de la station de MétéoSuisse la plus proche du site. Nota bene: Les valeurs indiquent une tendance et non une mesure absolue.	90
Annexe 8 A: Développement des mélanges dans les essais en chambre de culture. À gauche: CC en conditions chaudes; à droite: TV2 en conditions froides (© Fabienne Mörch).	91
Annexe 8 B: Evolution des mélanges dans les essais en chambre de culture - Discussion qualitative des espèces.	92
Annexe 9 (1^{re} partie): Statistiques comparant le recouvrement des espèces semées, spontanées et problématiques selon les types de mélange, les sites et années (Le Landeron et Cousset).	93
Annexe 9 (2^e partie): Statistiques comparant le recouvrement des espèces semées, spontanées et problématiques selon les types de mélange, les sites et années (Muttenz, Bavois et Lullier).	94
Annexe 10 A): Occurrence & fréquence des espèces spontanées sur les sites extérieurs.	95
Annexe 10 B): Occurrence & fréquence des espèces problématiques sur les sites extérieurs.	96
Annexe 11 (1^{re} partie): Statistiques comparant les différences de recouvrement par mélange selon différentes catégories d'espèces: semées, spontanées et problématiques, en fonction des sites et années (Le Landeron, Cousset, Lullier).	97
Annexe 11 (2^e partie): Statistiques comparant les différences de recouvrement par mélange selon différentes catégories d'espèces: semées, spontanées et problématiques, en fonction des sites et années (Muttenz, Bavois, Cornaux).	98

Annexe 1 A): Cousset: Procédés testés sur le site et paramètres relevés.

Mélanges	Semis le 25.04.2019: SS, CSR, RR, KT Semis le 07.12.2020: TV2 (remplace la moitié des répétitions RR)
Répétitions	8 répétitions de 15 m ² chacune; (après les nouveaux semis en 2020, 4 répétitions pour RR et TV2)
Préparation et entretien	Avant les semis, les parcelles d'essai ont été désherbées à la main et les plantes évacuées. Aucune autre mesure d'entretien n'a été effectuée
Analyse du substrat	Détermination de la teneur en humus; prélèvement d'échantillons octobre 2019
Température du sol	Relevée à -5 cm de profondeur; 2021 – 2023 mesure pendant la période de végétation
Données climatiques	Données de la station météorologique de Payerne de 2000 à 2023
Relevés de végétation	Relevés quantitatifs et qualitatifs au printemps et en automne, chaque année de 2019 à 2023 Documentation photographique supplémentaire: de 2021 à 2023 chaque mois

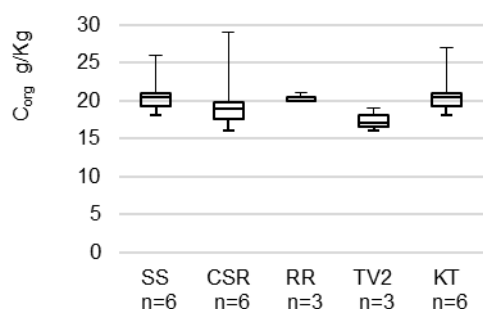


Dispersion des teneurs en C_{org} sur les répétitions des mélanges; Valeur P = 0.524844277

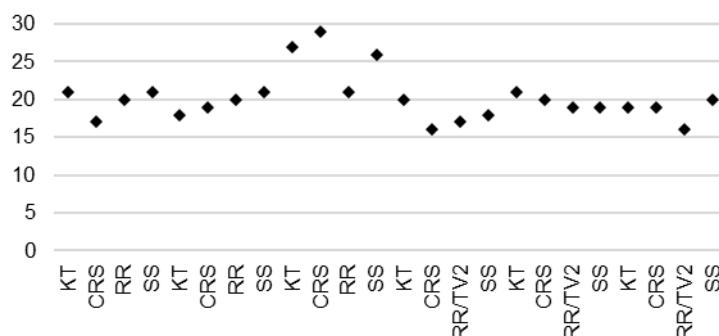
Répartition spatiale des teneurs en C_{org} des diverses répétitions sur le site dans l'ordre des placettes.

Annexe 1 B): Le Landeron: Procédés testés sur le site et paramètres relevés.

Mélanges	Semis le 25.04.2019: SS, CSR, RR, KT Semis & semis de réparation le 02.12.2020: SS, CSR, RR, TV2 (remplace la moitié des répétitions RR)
Répétitions	6 répétitions de 15 m ² chacune; (après les nouveaux semis 2020, 3 répétitions pour RR et TV2)
Préparation et entretien	Avant les semis, les parcelles d'essai ont été désherbées à la main et les plantes évacuées Aucune autre mesure d'entretien n'a été effectuée; seules les ronces présentes sur les côtés ont été coupées. Nouveaux semis sur les placettes 13-24: CSR, SS ont été ressemés. RR a été remplacé par TV2. Les placettes TV2 et la placette 22 ont été désherbées avant les semis, les autres sursemées.
Analyse du substrat	Détermination de la teneur en humus; prélèvement des échantillons octobre 2019
Données climatiques	Données de la station météorologique de Cressier de 2011 à 2023
Relevés de végétation	Relevés quantitatifs et qualitatifs au printemps et en automne de 2019 à 2021 Relevés quantitatifs et qualitatifs au printemps 2022 et 2023



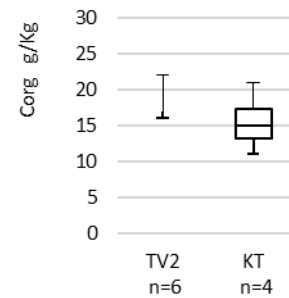
Dispersion des teneurs en C_{org} sur les répétitions des mélanges; valeur P = 0.524844277



Répartition spatiale des teneurs en C_{org} des diverses répétitions sur le site dans l'ordre des placettes.

Annexe 1 C): Cornaux: Procédés testés sur le site et paramètres relevés.

Mélanges	Semis le 02.12.2020: TV2
Répétitions	TV2: 6 répétitions et KT: 4 répétition de 15 m ²
Préparation et entretien	Avant les premiers semis, les surfaces d'essai ont été désherbées à la main et les plantes évacuées Aucune autre mesure d'entretien n'a été effectuée
Analyse du substrat	Détermination de la teneur en humus; prélèvement d'échantillons décembre 2020
Données climatiques	Données de la station météorologique de Cressier de 2011 à 2023
Température du sol	Relevée à -5 cm de profondeur; de 2021 à 2023, mesures pendant la période de végétation
Relevés de végétation	Relevés quantitatifs et qualitatifs au printemps et en automne 2021 ainsi qu'à l'automne 2022 et 2023.



Dispersion des teneurs en C_{org} sur les répétitions des mélanges; valeur $P = 0.524844277$



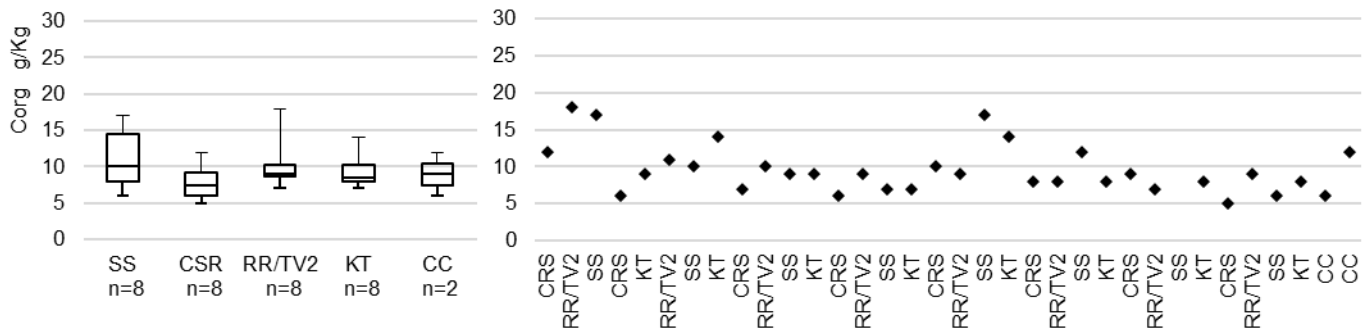
Placettes 2-5 Implantation sur le site le 02.12.2020 et développement jusqu'au 24.10.2023. Au premier plan, TV2 suivi de 2 contrôles et à nouveau une répétition de TV2.



Placette 1 à gauche & 10 à droite (TV2), resp. le 31.08.2021 et le 15.05.2023 (semis TV2)

Annexe 1 D): Muttentz: Procédés testés sur le site et paramètres relevés

Mélanges	Semis le 25.04.2019: SS, CSR, RR, KT Semis & sursemis le 07.12.2020: SS, CSR, TV2 (remplace toutes les répétitions RR)
Répétitions	8 répétitions de 15 m ² chacune; en plus CC: 2 répétitions x 10 m ²
Préparation et entretien	Avant les premiers semis, les surfaces d'essai ont été désherbées à la main et les plantes évacuées Aucune autre mesure d'entretien n'a été effectuée; seuls les ronces et le lierre présents sur les côtés ont été coupés
Analyse du substrat	Détermination de la teneur en humus; prélèvement d'échantillons octobre 2019
Données climatiques	Données de la station météorologique Basel-Binningen de 2000 à 2023
Température du sol	Relevée à -5 cm de profondeur; de 2021 à 2023, mesures pendant la période de végétation
Relevés de végétation	Relevés quantitatifs et qualitatifs au printemps et en automne 2019 - 2021 Relevés qualitatifs au printemps 2022 et 2023



Dispersion des teneurs en C_{org} sur les répétitions des mélanges; valeur $P = 0.524844277$

Répartition spatiale des teneurs en C_{org} des diverses répétitions sur le site dans l'ordre des placettes.



Le 01.09.2021: Placette 1 avec vue d'ensemble vers l'ouest

Et le 11.10.2023 Placettes 1-3 (CSR, TV2, SS)



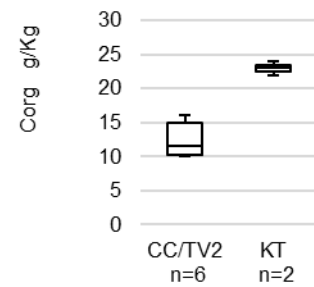
Placette 33 (CC) le 01.09.2021 et le 11.10.2023

Placette 23 (SS) le 11.10.2023

Placette 13 (détruite) le 11.10.2023

Annexe 1 E): Bavois: Procédés testés sur le site et paramètres relevés

Mélanges	Semis le 29.04.2019: CC, KT Semis le 07.12.2020: TV2 (remplace le CC)
Répétitions	6 répétitions et 2 contrôles de 15 m ²
Préparation et entretien	Les parcelles d'essai n'ont pas été désherbées Aucune autre mesure d'entretien n'a été effectuée
Analyse du substrat	Déterminaiton de la teneur en humus; prélèvement d'échantillons octobre 2019
Données climatiques	Données de la station de météorologie de Method de 2000 à 2023
Relevés de végétation	Relevés quantitatifs et qualitatifs au printemps et en automne 2019 - 2021 Relevés qualitatifs au printemps 2022, stoppés ensuite



Dispersion des teneurs en C_{org} sur les répétitions des mélanges; valeur P = 0.524844277



Placette 1 le 29.04.2019 (semences CC), le 07.12.2020 (semences TV2) et état le 23.10.2023 (sans relevé de végétation; le matériel au premier plan est du maïs haché)



Placette 4 (CC) le 22.07.2019 et le 21.09.2020 dominée par la végétation spontanée provenant des talus voisins ainsi que le 23.10.2023 (sans prélèvement d'échantillons).

Annexe 1 F); Dole: Procédés testés sur le site et paramètres relevés

Mélanges	Semis le 21 et 22 octobre 2019: CC, KT
Répétitions	3 répétitions CC de 80 m ² ; KT a été mis en place par la SNCF
Préparation et entretien	Avant: débroussaillage mécanique, pulvérisation de glyphosate et nouveau débroussaillage, puis fauche Semis par hydroseeding Les années suivantes, deux fauches ont été effectuées
Analyse du substrat	Aucune analyse du substrat n'a été effectuée
Données climatiques	Données de la station météorologique de Dole de 2003 à 2022 (température et précipitations)
Relevés de végétation	Relevés quantitatifs et qualitatifs par l'Hepia de leur propre mélange le 12.10.2022



Végétation spontanée et néophytes



Substrat à Dole



Mélange CC, semé ici dans l'entre-voie et sur les voies

Annexe 1 G): Lullier: Procédés testés sur le site et paramètres relevés

Mélanges	Premiers semis, le 13 février 2020: SS, CSR, RR, CC, KT Semis & sursemis à l'automne 2020: SS, CSR, RR, TV2 (remplace toutes les répétitions CC)
Répétitions	Semis, 3 répétitions de 15 m ² chacune; KT: 12 répétitions de 2 m ²
Préparation et entretien	Les parcelles d'essai ont été mises en place sur le toit de l'Hepia. Des chemins d'entretien ont été reproduits : 12 caissons de 2 x 8,5 m ont été installés. Une couche de gravier de drainage de 20 cm d'épaisseur a été posée sur la surface du toit. Celle-ci a été recouverte d'une couche de groise (gravier Enney) de 10 cm d'épaisseur. Dans chaque caisson, une surface de 2 x 1 m a été laissée pour le contrôle Aucun entretien n'a été effectué
Analyse du substrat	Déterminaiton de la teneur en humus; prélèvement d'échantillons janvier 2020
Données climatiques	Données de la station météorologique de Lullier (Agrometeo) de 2006 à 2023
Température du sol	Relevée à la surface en 2021 et 2022
Relevés de végétation	Relevés quantitatifs et qualitatifs au printemps et en automne 2019 - 2023



Drainage des placettes sur la toiture et semis à la volée © Patrice Prunier



Ce n'est qu'à l'ombre, en bordure du caisson, que quelques plantes ont pu survivre au printemps et à l'été 2020.

© Patrice Prunier

Annexe 1 H): Seebach: Procédés testés sur le site et paramètres relevés

Mélange	Semis le 29 avril 2021: TV2
Répétitions	3 parcelles sarclées resp. débarrassées de la mousse et 3 parcelles laissées telles quelles avec la mousse, chacune de 5 m ²
Préparation et entretien	Aucune autre mesure d'entretien n'a été effectuée
Données climatiques	Données de la station météorologique d'Affoltern de 2000 à 2018 comparées avec celles des années 2019 à 2023
Relevés de végétation	Documentation photographique mensuelle pendant la période de végétation 2022 et 2023



Essai par tâtonnement à Seebach: mise en place le 3.12.2021 à la gare de Seebach

Photo de gauche: suppression de la couche de mousse avec binette à lame oscillante; photo du milieu: semis à la volée du mélange TV2; photo de droite: aperçu des 6 petites parcelles (2 x 2.5 m) avec chacune 3 répétitions.

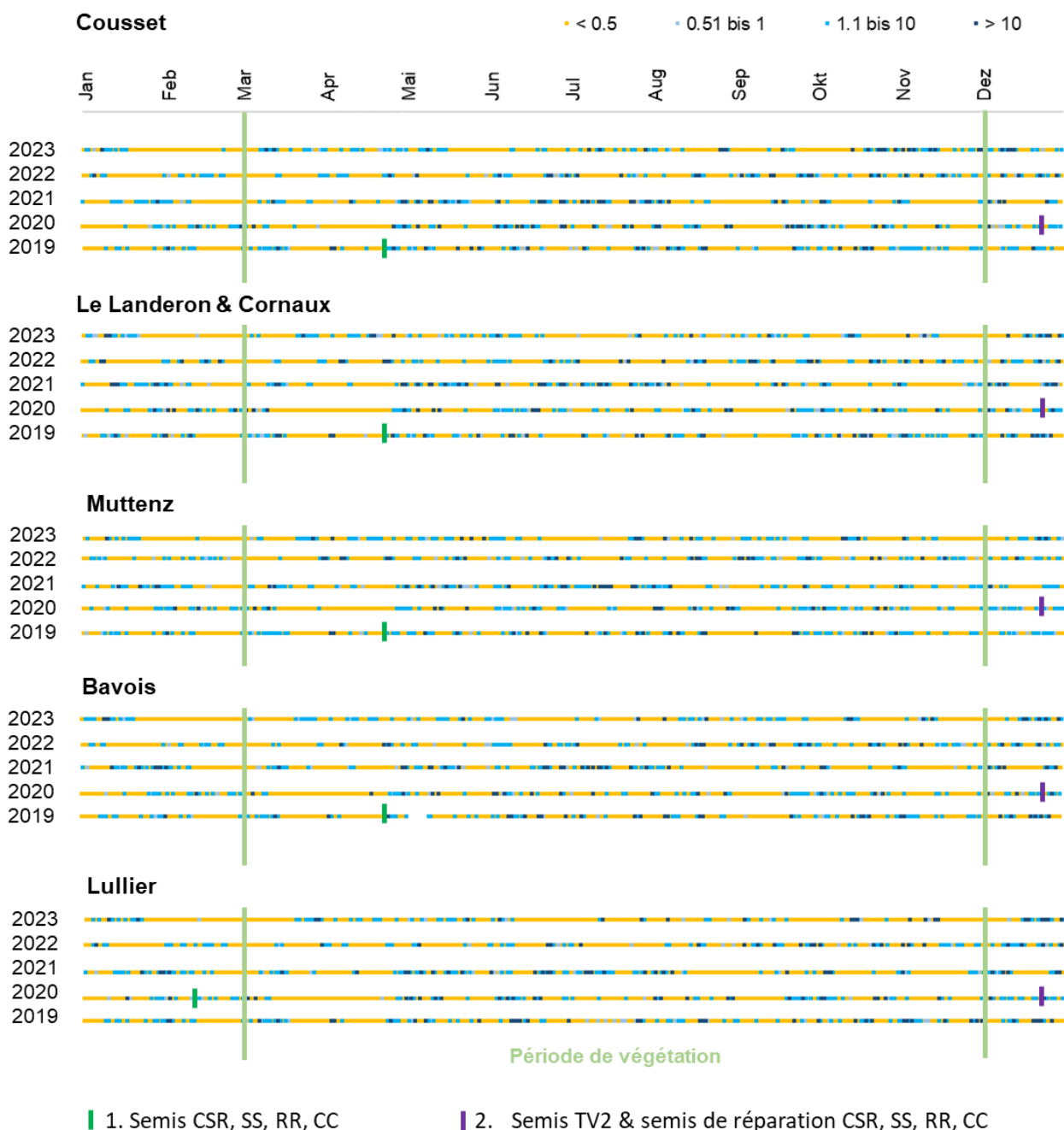
Annexe 2: Composition des mélanges et occurrence des espèces semées sur les sites extérieurs

Composition des mélanges: Espèces semées	Mélanges					Occurrences			Composition des mélanges Espèces semées (suite)	Mélanges					Occurrences		
	RR	SS	CC	CRS	TV2	In Situ	ex Situ	Lullier		Total	RR	SS	CC	CRS	TV2	In Situ	ex Situ
<i>Achillea millefolium</i> L.			X	X	X	135	19	154	<i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.				X	X	71	11	82
<i>Acinos arvensis</i> (Lam.) Dandy	X				X	47	36	83	<i>Lolium perenne</i> L.			X		X	26	6	32
<i>Ajuga reptans</i> L.				X		1	0	1	<i>Lotus corniculatus</i> L.				X	X	92	2	94
<i>Anthyllis vulneraria</i> subsp. <i>carpatica</i> (Pant.) Nymán			X	X	X	177	63	240	<i>Medicago lupulina</i> L.	X		X	X	X	207	34	241
<i>Aphanes arvensis</i> L.	X				X	1	17	18	<i>Medicago minima</i> (L.) L.	X				X	87	11	98
<i>Arabis hirsuta</i> (L.) Scop.		X				0	2	2	<i>Origanum vulgare</i> L.			X		X	17	3	20
<i>Arenaria serpyllifolia</i> L.	X				X	225	51	276	<i>Picris hieracioides</i> L. semé > 2021					X	46	0	46
<i>Bellis perennis</i> L.				X		6	3	9	<i>Pimpinella saxifraga</i> L.		X				0	0	0
<i>Bromus erectus</i> Huds. subsp. <i>erectus</i>		X		X	X	308	52	360	<i>Plantago lanceolata</i> L.			X	X	X	178	27	205
<i>Bromus hordeaceus</i> L.	X		X	X	X	28	0	28	<i>Plantago media</i> L.			X	X		6	5	11
<i>Bromus tectorum</i> L.	X	X	X	X	X	143	45	188	<i>Poa angustifolia</i> L.		X		X	X	0	0	0
<i>Campanula rotundifolia</i> L.				X		1	0	1	<i>Poa compressa</i> L.				X	X	258	56	314
<i>Chaenorrhinum minus</i> (L.) Lange	X					68	8	76	<i>Poa pratensis</i> L.			X			7	1	8
<i>Clinopodium vulgare</i> L.			X			0	0	0	<i>Prunella vulgaris</i> L.			X	X	X	17	2	19
<i>Crepis capillaris</i> Wallr.	X				X	224	3	227	<i>Sagina procumbens</i> L.	X					0	7	7
<i>Daucus carota</i> L.		X			X	326	42	368	<i>Salvia pratensis</i> L.				X	X	20	2	22
<i>Dianthus armeria</i> L.	X					2	0	2	<i>Sanguisorba minor</i> Scop. subsp. <i>minor</i>		X	X	X	X	285	47	332
<i>Dianthus carthusianorum</i> L. subsp. <i>carthusianorum</i>		X		X	X	83	42	125	<i>Saponaria ocymoides</i> L.		X				0	1	1
<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'Hér.	X			X	X	144	40	184	<i>Scabiosa columbaria</i> L. subsp. <i>columbaria</i>		X		X	X	29	1	30
<i>Festuca laevigata</i> Gaudin		X				82	9	91	<i>Sedum acre</i> L.		X			X	127	45	172
<i>Festuca nigrescens</i> Lam.			X			9	0	9	<i>Sedum album</i> L.		X			X	287	107	394
<i>Festuca ovina</i> aggr.						43	3	46	<i>Sedum rubens</i> L.						73	11	84
<i>Festuca rubra</i> L. subsp. <i>rubra</i>				X	X	124	32	156	<i>Sedum rupestre</i> L.		X			X	23	83	106
<i>Fragaria vesca</i> L.				X		3	0	3	<i>Sedum sexangulare</i> L.		X			X	26	12	38
<i>Galeopsis angustifolia</i> Hoffm.	X				X	84	0	84	<i>Silene nutans</i> L.			X			41	46	87
<i>Geranium molle</i> L.	X				X	11	4	15	<i>Silene vulgaris</i> (Moench) Garcke subsp. <i>vulgaris</i>				X	X	82	51	133
<i>Geranium pusillum</i> L.	X				X	0	6	6	<i>Stachys recta</i> L.		X			X	75	19	94
<i>Geranium pyrenaicum</i> Burm. f.	X					7	3	10	<i>Teucrium chamaedrys</i> L.		X				24	11	35
<i>Geranium rotundifolium</i> L.	X				X	20	31	51	<i>Thymus praecox</i> Opiz						3	1	4
<i>Glechoma hederacea</i> L. subsp. <i>hederacea</i>			X			0	0	0	<i>Thymus pulegioides</i> L.			X	X	X	26	3	29
<i>Hieracium pilosella</i> L.		X		X	X	78	4	82	<i>Trifolium campestre</i> Schreb.	X	X	X	X	X	15	9	24
<i>Hippocrepis comosa</i> L.		X			X	52	8	60	<i>Trifolium montanum</i> L.		X				0	0	0
<i>Hypochaeris radicata</i> L. semé > 2021					X	176	0	176	<i>Trifolium repens</i> L. subsp. <i>repens</i>			X	X	X	40	2	42
<i>Koeleria pyramidata</i> (Lam.) P. Beauv.		X			X	23	30	53	<i>Veronica chamaedrys</i> L.			X	X		1	15	16
<i>Leontodon autumnalis</i> L.	X		X			0	0	0	<i>Viola tricolor</i> L.		X				3	12	15
<i>Leontodon hispidus</i> aggr.			X			3	0	3	<i>Vulpia myuros</i> (L.) C. C. Gmel.	X					60	35	95
<i>Leontodon hispidus</i> L.				X		9	0	9									

Annexe 3: Répartition des précipitations [mm/m²] par site pendant les années d’essai, avec les deux dates de semis et la durée de végétation.

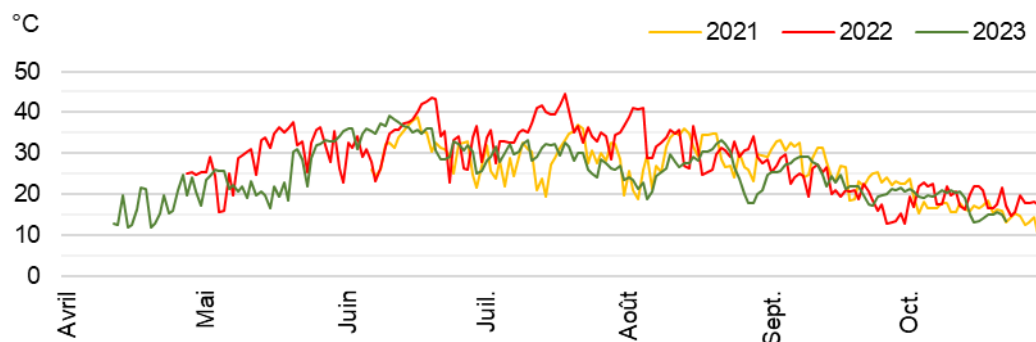
Contrairement aux sols naturels, le substrat des abords de voies étudiés ne peut guère stocker d’eau. Afin de déterminer l’impact de la répartition des précipitations sur le développement de la végétation dans ces conditions particulières, les précipitations ont été regroupées en quatre catégories.

- **Disponibilité insuffisante en eau:** la première catégorie fournit de 0 à 0,5 litre/m²: manque d’approvisionnement en eau, peu d’eau atteint l’espace racinaire et la germination n’est guère possible.
- **Disponibilité minimale en eau:** la deuxième catégorie fournit de 0,6 à 1 litre/m²: un peu d’eau atteint l’espace racinaire, notamment par écoulement via les tiges et les feuilles. Dans ces conditions, ce sont surtout les espèces xérophytes qui subsistent.
- **Disponibilité moyenne en eau:** la troisième catégorie fournit de 1,1 à 10 litre/m²: suffisamment d’eau atteint l’espace racinaire de la plupart des plantes vasculaires terrestres.
- **Disponibilité élevée en eau:** la quatrième catégorie fournit plus de 10 litre/m²: quantité d’eau suffisante; cependant, si celle-ci est fournie par des averses courtes et violentes, il y a un risque de ruissellement superficiel et d’érosion, autrement dit, les graines, la matière organique et la terre fine peuvent être emportés en cas de pente suffisante.

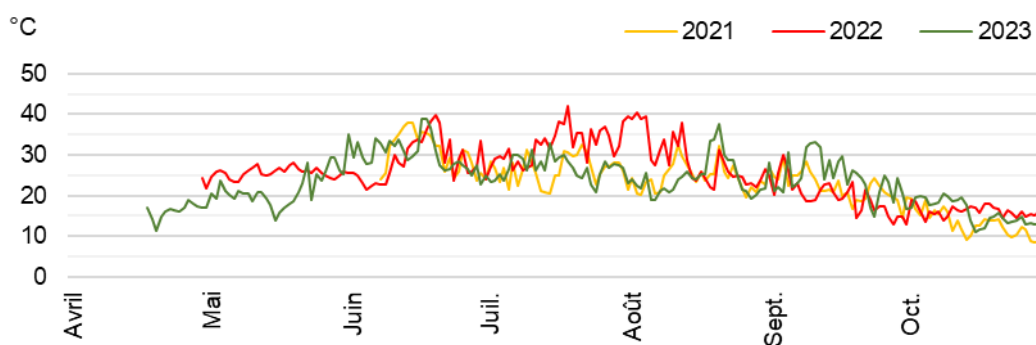


Annexe 4: Comparaison des températures journalières maximales dans le sol par site et par an

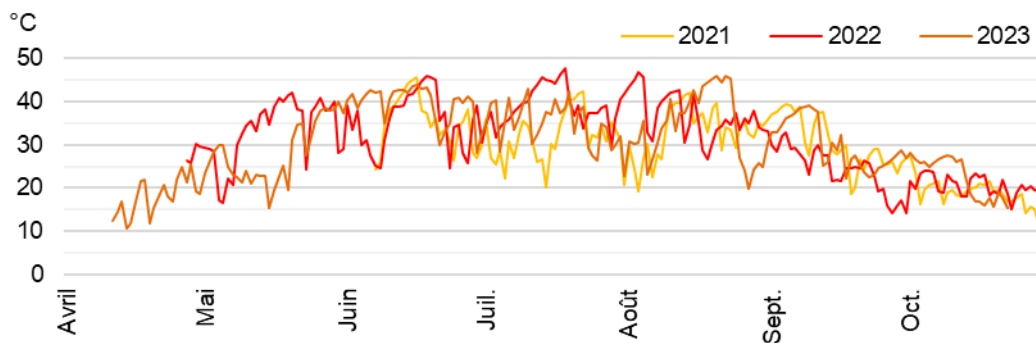
Cornaux



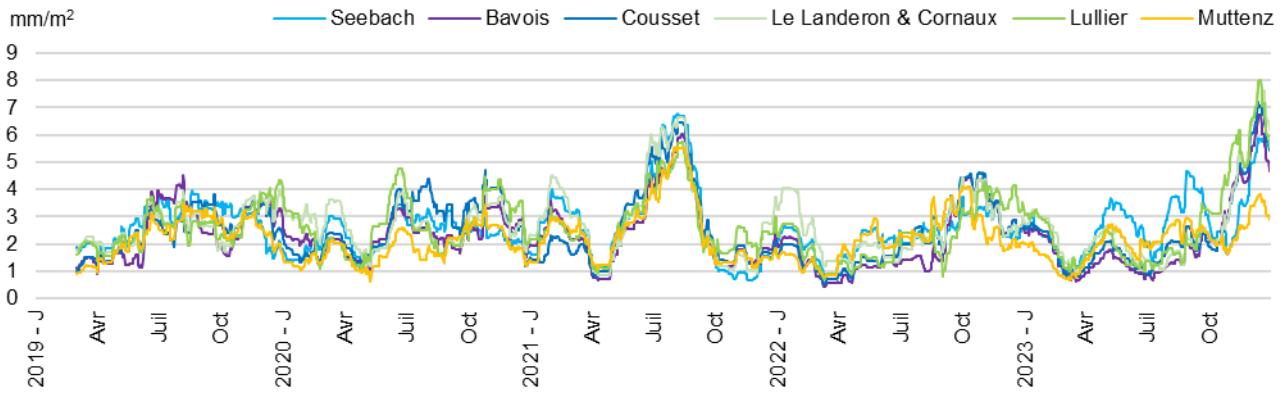
Muttenz



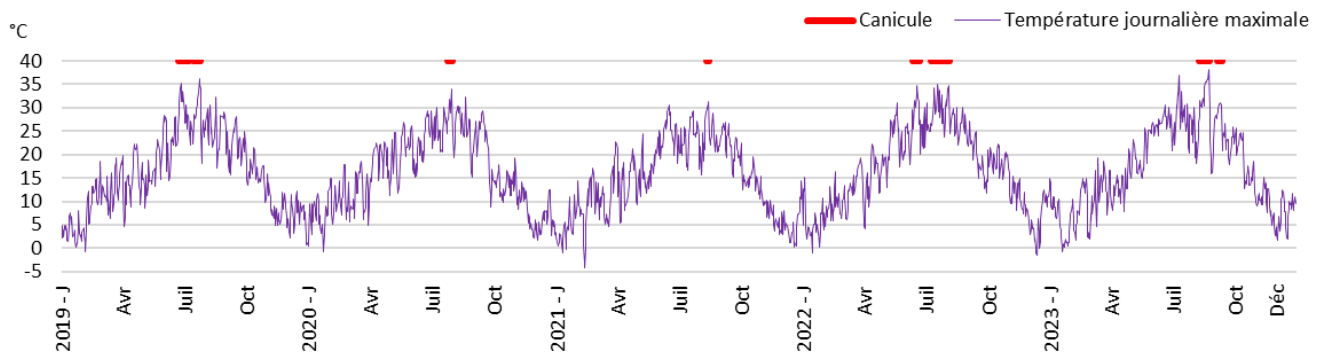
Cousset



Annexe 5: Sommes lissées des précipitations en mm par jour pendant les années d'essai en moyenne mobile de 60 jours sur les sept sites suisses.

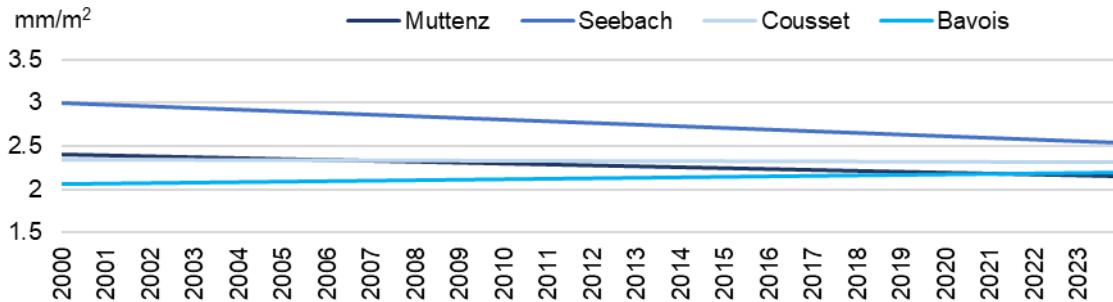


Annexe 6: Evolution des températures de l'air maximales pendant les années d'essai sur le site de Bavois, avec représentation des vagues de chaleur.

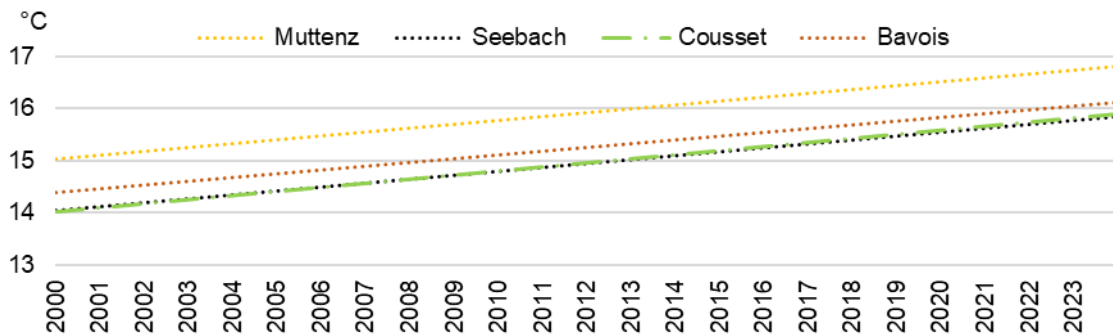


Annexe 7: Tendances linéaires de l'évolution météorologique de 2000 à 2023 sur la base des valeurs journalières de la station de MétéoSuisse la plus proche du site. Nota bene: Les valeurs indiquent une tendance et non une mesure absolue.

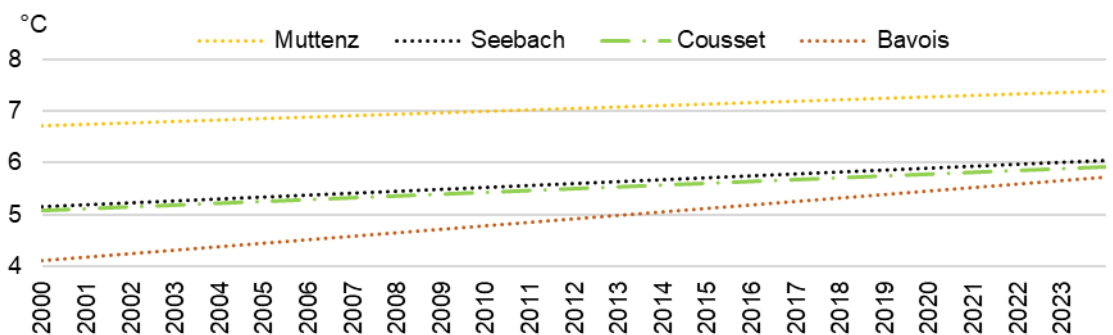
Tendance des précipitations annuelles en moyenne journalière



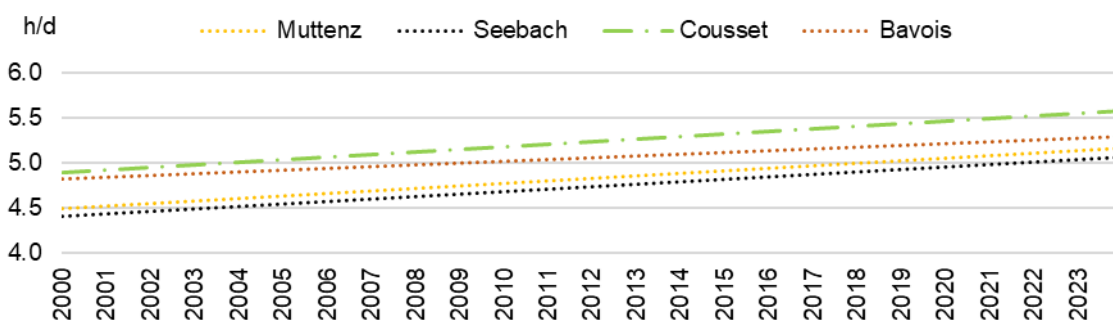
Tendance des températures de l'air maximales journalières



Tendance des températures de l'air minimales journalières

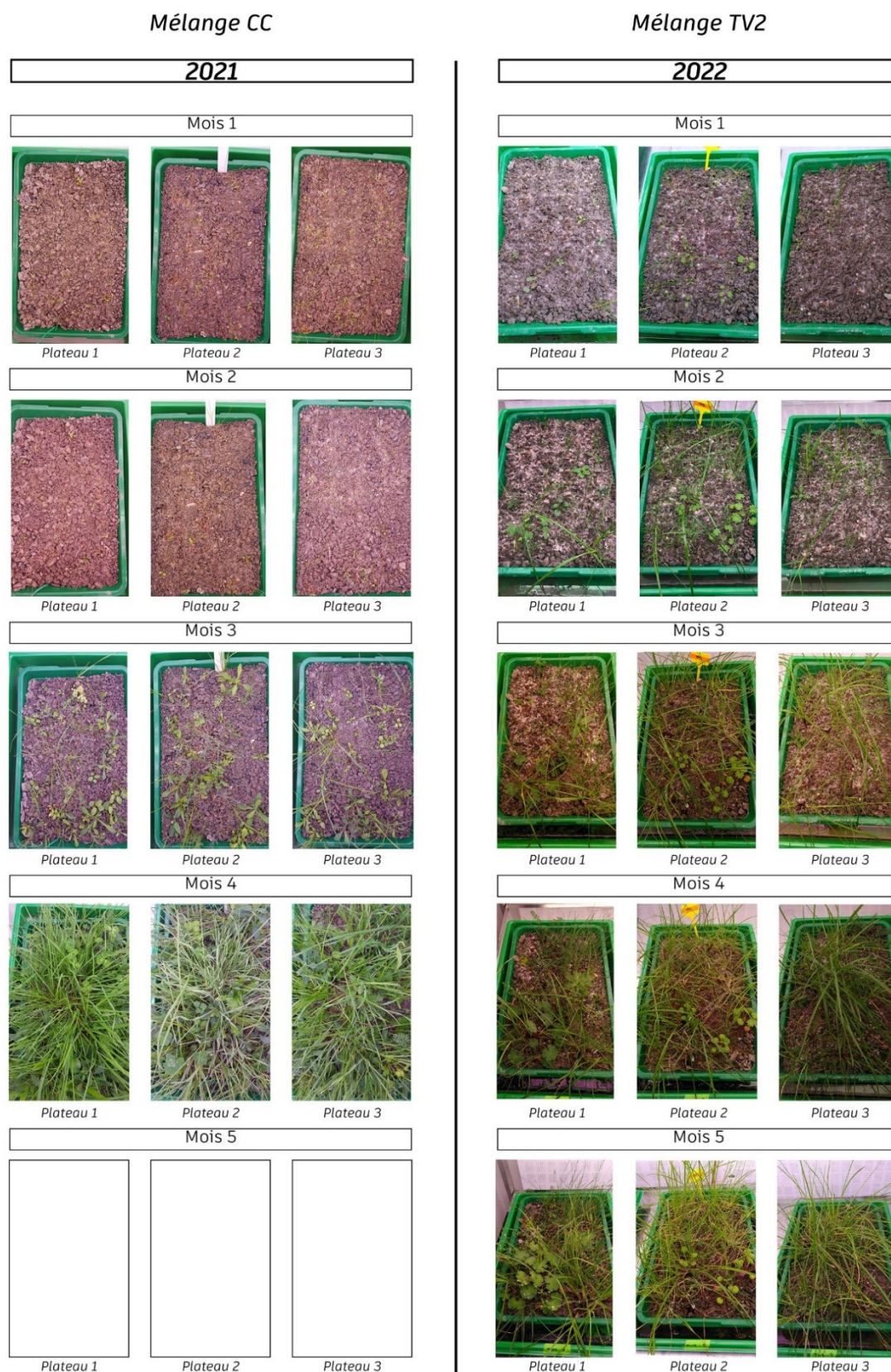


Tendance de la durée d'ensoleillement journalière



Annexe 8 A: Développement des mélanges dans les essais en chambre de culture. À gauche: CC en conditions chaudes; à droite: TV2 en conditions froides (© Fabienne Mörch)

Tapis Vert



Annexe 8 B: Evolution des mélanges dans les essais en chambre de culture - Discussion qualitative des espèces**Mélange Compétitif CC**

En ce qui concerne la famille des Poacées, *Bromus hordeaceus*, *Festuca nigrescens* et *Lolium perenne* se sont développés, tandis que *Bromus tectorum* et *Poa pratensis* n'ont pas germé. Pour les Fabacées, toutes les espèces ont germé à l'exception de *Trifolium campestre*. Les autres familles se sont également exprimées sauf les Lamiacés (*Glechoma hederacea*).

Mélange rudéral RR

Toutes les poacées du mélange, soit *Bromus hordeaceus*, *Bromus tectorum* et *Vulpia myuros*, ont germé lors des deux essais. Pour les Fabacées, toutes les espèces du mélange se sont exprimées. Nous avons observé *Medicago minima* uniquement en hautes températures, et *Medicago lupulina* et *Trifolium campestre* uniquement en températures basses. En ce qui concerne les autres familles, *Acinos arvensis*, *Chaenorrhinum minus* et *Crepis capillaris* ont germés uniquement en températures hautes, tandis que *Dianthus armeria*, *Geranium rotundifolium* et *G. molle* n'ont germé qu'en températures basses. Pour la famille des Géraniacées, une plantule seulement a germé en températures hautes, mais n'a pas pu être identifiée à l'espèce car trop peu développée. Pour finir, les espèces n'ayant pas germé sont les suivantes: *Galeopsis angustifolia*, *Geranium pusillum*, *Geranium pyrenaicum*, *Leontodon autumnalis* et *Viola tricolor*.

Mélange stress tolérant SS

Dans la famille des Poacées, toutes les espèces ont germé lors des deux essais à l'exception de *Koeleria pyramidata*. Pour les Fabacées, toutes les espèces se sont exprimées. *Trifolium campestre* a germé les deux années, *Anthyllis vulneraria* et *Hippocrepis comosa* ont germé uniquement en températures hautes, tandis que *Trifolium montanum* n'a germé qu'en températures basses. Pour la famille des Crassulacées: *Sedum album*, *S. rupestre* et *S. sexangulare* ont germé lors des deux essais, tandis que *S. acre* n'a pas germé. Dans les autres familles, *Daucus carota*, *Dianthus carthusianorum* subsp. *carthusianorum*, *Scabiosa columbaria* subsp. *columbaria* et *Stachys recta* ont germé uniquement en températures hautes. *Sanguisorba minor* subsp. *minor*, *Saponaria ocymoides* et *Teucrium chamaedrys* ont germé lors des deux essais, tandis que *Arabis hirsuta*, *Hieracium pilosella* et *Pimpinella saxifraga* n'ont pas germé.

Mélange polyvalent CSR

Dans la famille des Poacées, les résultats sont similaires lors des deux années avec la représentation de *Bromus erectus* subsp. *erectus*, *Festuca rubra* subsp. *rubra* et *Poa angustifolia*. *Bromus hordeaceus*, *Bromus tectorum* et *Poa compressa* manque lors de ces deux années. Dans la famille des Fabacées, les résultats sont également similaires lors des deux essais avec la présence de *Trifolium campestre* et *Trifolium repens* subsp. *repens* et l'absence de *Anthyllis vulneraria* subsp. *carpatica*, *Lotus corniculatus* et *Medicago lupulina*. En ce qui concerne les autres familles, *Achillea millefolium*, *Bellis perennis*, *Dianthus carthusianorum* subsp. *carthusianorum* et *Leucanthemum vulgare* s.l. ont germé lors des deux essais. Les espèces qui ont germé uniquement en températures hautes sont *Erodium cicutarium*, *Hieracium pilosella*, *Origanum vulgare*, *Plantago lanceolata*, *Plantago media* et *Prunella vulgaris*. Celles qui n'ont germé qu'à basses températures sont *Leontodon hispidus*, *Sanguisorba minor* subsp. *minor* et *Silene vulgaris* subsp. *vulgaris*. Celles qui n'ont pas germé sont *Ajuga reptans*, *Campanula rotundifolia*, *Fragaria vesca*, *Salvia pratensis*, *Scabiosa columbaria* subsp. *columbaria*, *Thymus pulegioides* et *Veronica chamaedrys*.

Mélange ubiquiste TV2

Toutes les poacées du mélange se sont exprimées à l'exception de *Vulpia myuros*. Seulement trois espèces sur six de la famille des fabacées ont germés (*Anthyllis vulneraria* subsp. *carpatica*, *Medicago lupulina* et *Trifolium repens* subsp. *repens*). Dans la famille des Crassulacées, seul *Sedum acre* n'a pas germé. En ce qui concerne les autres familles, 20 espèces sur 31 n'ont pas germé: *Acinos arvensis*, *Campanula rotundifolia*, *Clinopodium vulgare*, *Crepis capillaris*, *Dianthus carthusianorum* subsp. *carthusianorum*, *Galeopsis angustifolia*, *Geranium pyrenaicum*, *Hieracium pilosella*, *Hypericum perforatum*, *Leontodon autumnalis*, *Origanum vulgare*, *Picris hieracioides*, *Plantago lanceolata*, *Plantago media*, *Salvia pratensis*, *Sanguisorba minor* subsp. *minor*, *Scabiosa columbaria* subsp. *columbaria*, *Stachys recta*, *Teucrium chamaedrys* et *Thymus pulegioides*.

Anexe 9 (1^{re} partie): Statistiques comparant le recouvrement des espèces semées, spontanées et problématiques selon les types de mélange, les sites et années (Le Landeron et Cousset).

Lieu	Année	Mélange	Test	p value	Groupes statistiques			Moyennes		
					Espèces problématiques	Espèces semées	Espèces spontanées	Espèces problématiques	Espèces semées	Espèces spontanées
Le Landeron	0	K	Kruskall-Wallis	0.076	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	0	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.003	a	b	b	0.0	11.1	23.8
Le Landeron	0	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.003	a	b	b	0.2	4.0	26.5
Le Landeron	0	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.004	a	ab	b	1.4	5.4	26.6
Le Landeron	0	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.003	a	b	b	0.4	13.9	24.6
Le Landeron	1	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	c	0.0	5.5	21.6
Le Landeron	1	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.4	11.6	21.0
Le Landeron	1	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.3	10.1	22.3
Le Landeron	1	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.6	14.3	14.4
Le Landeron	1	TV2	Kruskall-Wallis	0.051	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	2	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.4	8.7	19.9
Le Landeron	2	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.1	20.7	19.7
Le Landeron	2	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.008	a	b	b	1.1	16.7	15.3
Le Landeron	2	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.9	23.3	19.8
Le Landeron	2	TV2	Kruskall-Wallis	0.065	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	3	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.002	a	ab	b	0.2	5.1	22.4
Le Landeron	3	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.003	a	b	b	0.0	17.2	19.7
Le Landeron	3	RR	Kruskall-Wallis	0.118	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	3	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.003	a	b	b	0.4	27.4	21.0
Le Landeron	4	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.005	a	b	b	0.4	21.4	24.4
Le Landeron	4	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.003	a	b	b	0.4	32.0	31.9
Le Landeron	4	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.027	a	b	ab	1.2	44.7	21.9
Le Landeron	4	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.003	a	b	b	1.8	36.2	32.1
Cousset	0	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	a	b	1.2	4.0	19.8
Cousset	0	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	c	0.2	7.4	41.3
Cousset	0	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	c	0.2	6.7	38.2
Cousset	0	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	c	0.0	3.8	36.6
Cousset	0	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.5	25.4	20.2
Cousset	1	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.002	a	ab	b	2.4	12.3	25.7
Cousset	1	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	1.0	30.2	21.1
Cousset	1	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.001	a	b	b	2.0	27.2	19.8
Cousset	1	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.001	a	b	b	0.9	18.4	19.2
Cousset	1	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	1.9	30.5	24.7
Cousset	2	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	c	2.2	12.9	32.2
Cousset	2	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.3	28.7	35.5
Cousset	2	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.001	a	b	b	0.6	32.4	30.8
Cousset	2	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.7	30.3	27.3
Cousset	2	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	1.9	44.8	26.5
Cousset	3	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	5.7	18.2	28.0
Cousset	3	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	1.4	28.8	32.1
Cousset	3	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.2	39.5	19.9
Cousset	3	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	1.0	28.7	27.8
Cousset	4	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	3.4	35.8	29.1
Cousset	4	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.4	42.9	34.9
Cousset	4	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.0	51.8	24.7
Cousset	4	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	c	1.6	50.4	23.6

Annexe 9 (2^e partie): Statistiques comparant le recouvrement des espèces semées, spontanées et problématiques selon les types de mélange, les sites et années (MuttENZ, Bavois et Lullier).

Lieu	Année	Mélange	Test	p value	Espèces problématiques	Espèces semées	Espèces spontanées	Groupes statistiques		
								Moyennes		
MuttENZ	0	K	Kruskall-Wallis	0.402	na	na	na	na	na	na
MuttENZ	0	CSR	Kruskall-Wallis	0.959	na	na	na	na	na	na
MuttENZ	0	RR	Kruskall-Wallis	0.345	na	na	na	na	na	na
MuttENZ	0	SS	Kruskall-Wallis	0.831	na	na	na	na	na	na
MuttENZ	0	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.005	a	b	b	1.1	3.6	7.3
MuttENZ	0	CC	Kruskall-Wallis	0.368	na	na	na	na	na	na
MuttENZ	1	K	Kruskall-Wallis	0.053	na	na	na	na	na	na
MuttENZ	1	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.007	a	b	b	4.4	0.6	1.5
MuttENZ	1	RR	Kruskall-Wallis	0.113	na	na	na	na	na	na
MuttENZ	1	SS	Kruskall-Wallis	0.237	na	na	na	na	na	na
MuttENZ	1	CC	Kruskall-Wallis	0.368	na	na	na	na	na	na
MuttENZ	2	K	Kruskall-Wallis	0.082	na	na	na	na	na	na
MuttENZ	2	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.0	3.9	7.3
MuttENZ	2	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.8	6.4	13.5
MuttENZ	2	CC	Kruskall-Wallis	0.180	na	na	na	na	na	na
Bavois	0	K	Kruskall-Wallis	0.368	na	na	na	na	na	na
Bavois	0	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	a	b	7.4	6.0	38.3
Bavois	0	CC	Kruskall-Wallis + Dunn	0.030	a	b	a	15.1	2.0	16.0
Bavois	1	K	Kruskall-Wallis	0.180	na	na	na	na	na	na
Bavois	1	CC	Kruskall-Wallis + Dunn	0.005	ab	a	b	11.9	3.0	28.2
Bavois	2	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.015	ab	a	b	18.3	9.2	62.4
Comaux	0	K	Kruskall-Wallis	0.075	na	na	na	na	na	na
Comaux	0	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.009	a	b	b	1.1	6.6	20.9
Comaux	1	K	Kruskall-Wallis	0.261	na	na	na	na	na	na
Comaux	1	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.032	a	b	ab	1.8	15.4	4.9
Comaux	2	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.018	a	ab	b	0.9	1.9	19.6
Comaux	2	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.005	a	ab	b	1.5	14.7	31.2
Lullier	0	K	Kruskall-Wallis	na	na	na	na	na	na	na
Lullier	0	CSR	Kruskall-Wallis	0.954	na	na	na	na	na	na
Lullier	0	RR	Kruskall-Wallis	0.077	na	na	na	na	na	na
Lullier	0	SS	Kruskall-Wallis	0.939	na	na	na	na	na	na
Lullier	0	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.003	a	b	a	0.5	13.2	1.8
Lullier	0	CC	Kruskall-Wallis	na	na	na	na	na	na	na
Lullier	1	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	a	0.0	3.5	0.6
Lullier	1	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.002	a	b	a	0.6	9.7	1.1
Lullier	1	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.005	a	b	a	0.6	8.3	1.1
Lullier	1	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.010	a	b	a	2.4	7.9	1.2
Lullier	1	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.001	a	b	ab	0.0	16.2	1.6
Lullier	2	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.000	a	b	b	0.0	5.7	1.9
Lullier	2	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.001	a	b	a	0.3	15.9	2.1
Lullier	2	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.002	a	b	a	0.6	19.7	1.3
Lullier	2	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.002	a	b	ab	0.3	10.1	2.7
Lullier	2	TV2	Kruskall-Wallis + Dunn	0.001	a	b	ab	0.1	18.2	3.6
Lullier	3	K	Kruskall-Wallis + Dunn	0.002	a	b	b	0.4	14.1	7.6
Lullier	3	CSR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.003	a	b	b	0.0	8.5	7.0
Lullier	3	RR	Kruskall-Wallis + Dunn	0.001	a	b	ab	0.0	34.0	2.7
Lullier	3	SS	Kruskall-Wallis + Dunn	0.003	a	b	b	0.0	7.5	8.2

Annexe 10 A): Occurrence & fréquence des espèces spontanées sur les sites extérieurs

Espèces spontanées	Occurrences		
	in Situ	ex Situ Lullier	Total
<i>Agrostis capillaris</i> L.	5	0	5
<i>Agrostis stolonifera</i> L.	1	0	1
<i>Alopecurus myosuroides</i> Huds.	1	0	1
<i>Alyssum alyssoides</i> (L.) L.	0	12	12
<i>Amaranthus hybridus</i> L.	2	0	2
<i>Arabidopsis thaliana</i> (L.) Heynh.	0	4	4
<i>Arrhenatherum elatius</i> (L.) J. Presl & C. Presl	222	7	229
<i>Brassica napus</i> L.	14	0	14
<i>Bromus sterilis</i> L.	6	3	9
<i>Cardamine hirsuta</i> L.	11	23	34
<i>Carex hirta</i> L.	1	0	1
<i>Carpinus betulus</i> L.	2	0	2
<i>Catapodium rigidum</i> (L.) C. E. Hubb.	10	0	10
<i>Cerastium brachypetalum</i> Pers.	21	0	21
<i>Cerastium glomeratum</i> Thuill.	12	28	40
<i>Cerastium semidecandrum</i> L.	91	0	91
<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronquist	200	28	228
<i>Crepis pulchra</i> L.	5	6	11
<i>Crepis vesicaria</i> L.	7	0	7
<i>Crepis vesicaria</i> ssp <i>taraxacifolia</i>	6	0	6
<i>Dactylis glomerata</i> L.	20	3	23
<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop.	0	5	5
<i>Draba muralis</i> L.	2	0	2
<i>Echinochloa crus-galli</i> (L.) P. Beauv.	2	1	1
<i>Echium vulgare</i> L.	173	28	201
<i>Elymus repens</i> (L.) Gould	2	0	2
<i>Epilobium tetragonum</i> L.	17	0	17
<i>Eragrostis minor</i> Host	95	0	95
<i>Erigeron acris</i> L.	51	0	51
<i>Erigeron acris</i> L. subsp. <i>acris</i>	13	0	13
<i>Erigeron acris</i> subsp. <i>serotinus</i> (Weihe) Greuter	8	0	8
<i>Erophila verna</i> (L.) DC.	39	19	58
<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	15	0	15
<i>Festuca pratensis</i> Huds.	1	1	2
<i>Galeopsis tetrahit</i> L.	2	0	2
<i>Galium album</i> Mill.	148	0	148
<i>Geranium dissectum</i> L.	0	13	13
<i>Geranium robertianum</i> subsp. <i>purpureum</i> (Vill.) Nyman	287	1	288
<i>Holcus lanatus</i> L.	2	2	4
<i>Hordeum murinum</i> L.	1	0	1
<i>Hypericum maculatum</i> Crantz	2	0	2
<i>Hypericum perforatum</i> L.	12	7	19
<i>Hypochaeris radicata</i> L. spontané < 2021	45	5	50
<i>Knautia arvensis</i> L.	1	0	1
<i>Lapsana communis</i> L. subsp. <i>communis</i>	28	1	29
<i>Lathyrus pratensis</i> L.	7	0	7
<i>Lepidium densiflorum</i> Schrad.	12	0	12
<i>Lepidium virginicum</i> L.	17	0	17

Espèces spontanées (suite)	Occurrences		
	in Situ	ex Situ Lullier	Total
<i>Linaria vulgaris</i> Mill.	1	1	2
<i>Medicago sativa</i> L.	8	15	23
<i>Melilotus albus</i> Medik.	72	0	72
<i>Minuartia hybrida</i> (Vill.) Schischk.	13	0	13
<i>Myosotis arvensis</i> Hill	0	6	6
<i>Onobrychis viciifolia</i> Scop.	0	1	1
<i>Orobanche caryophyllacea</i> Sm.	5	0	5
<i>Panicum capillare</i> L.	30	5	35
<i>Papaver dubium</i> L.	22	0	22
<i>Papaver rhoeas</i> L.	24	51	75
<i>Petrorhagia prolifera</i> (L.) P. W. Ball & Heywood	6	16	22
<i>Petrorhagia saxifraga</i> (L.) Link	0	27	27
<i>Picris hieracioides</i> L. spontané < 2021	19	36	55
<i>Pisum sativum</i> L. cf subsp. <i>sativum</i>	9	0	9
<i>Plantago major</i> L.	1	0	1
<i>Poa annua</i> L.	16	7	23
<i>Poa bulbosa</i> L.	30	0	30
<i>Polygonum aviculare</i> L.	1	1	2
<i>Polygonum mite</i> Schrank	2	0	2
<i>Portulaca oleracea</i> L.	0	4	4
<i>Reseda lutea</i> L.	5	0	5
<i>Rumex acetosa</i> L.	2	0	2
<i>Sagina apetala</i> Ard.	0	1	1
<i>Saponaria officinalis</i> L.	3	0	3
<i>Saxifraga tridactylites</i> L.	162	23	185
<i>Scabiosa lucida</i> Vill.	1	0	1
<i>Securigera varia</i> (L.) Lassen	3	0	3
<i>Senecio jacobaea</i> L.	98	0	98
<i>Senecio viscosus</i> L.	42	0	42
<i>Senecio vulgaris</i> L.	53	10	63
<i>Setaria viridis</i> (L.) P. Beauv.	183	1	184
<i>Silene noctiflora</i> L.	1	0	1
<i>Silene pratensis</i> (Rafn) Godr.	1	0	1
<i>Sonchus asper</i> Hill	39	16	55
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	14	11	25
<i>Stellaria media</i> (L.) Vill.	0	1	1
<i>Taraxacum officinale</i> aggr.	66	1	67
<i>Teucrium botrys</i> L.	8	0	8
<i>Tragopogon dubius</i> Scop.	2	0	2
<i>Tragopogon pratensis</i> L.	2	0	2
<i>Tragopogon pratensis</i> subsp. <i>orientalis</i> (L.) Čelak.	10	0	10
<i>Trifolium pratense</i> L.	4	0	4
<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch. Bip.	0	1	1
<i>Valerianella carinata</i> Loisel.	15	0	15
<i>Verbena officinalis</i> L.	2	0	2
<i>Veronica arvensis</i> L.	35	27	62
<i>Veronica persica</i> Poir.	0	14	14
<i>Vulpia ciliata</i> Dumort.	2	0	2

Annexe 10 B): Occurrence & fréquence des espèces problématiques sur les sites extérieurs

Espèces spontanées problématiques	Occurrences			Espèces spontanées problématiques (s	Occurrences		
	in Situ	ex Situ Lullier	Total		in Situ	ex Situ Lullier	Total
<i>Acer campestre</i>	0	1	1	<i>Ononis repens L.</i>	14	0	14
<i>Calystegia sepium (L.) R. Br.</i>	18	0	18	<i>Pastinaca sativa L. subsp. sativa</i>	40	0	40
<i>Chenopodium album L.</i>	2	4	6	<i>Phragmites australis (Cav.) Steud.</i>	1	0	1
<i>Cirsium eriophorum (L.) Scop.</i>	1	0	1	<i>Populus nigra L.</i>	3	0	3
<i>Cirsium vulgare (Savi) Ten.</i>	6	0	6	<i>Populus tremula L.</i>	1	0	1
<i>Clematis vitalba L.</i>	8	0	8	<i>Potentilla reptans L.</i>	19	0	19
<i>Convolvulus arvensis L.</i>	20	0	20	<i>Prunus spinosa L.</i>	1	0	1
<i>Cornus cf sanguinea L.</i>	0	0	0	<i>Rubus caesius L.</i>	19	0	19
<i>Cornus sanguinea L.</i>	1	0	1	<i>Rubus fruticosus aggr.</i>	36	0	36
<i>Epilobium dodonaei Vill.</i>	28	0	28	<i>Senecio inaequidens DC.</i>	6	0	6
<i>Equisetum arvense L.</i>	10	0	10	<i>Urtica dioica L.</i>	1	0	1
<i>Equisetum hyemale L. et hybrides</i>	4	0	4	<i>Verbascum lychnitis L.</i>	1	0	1
<i>Erigeron annuus (L.) Desf.</i>	14	14	28	<i>Verbascum nigrum L.</i>	3	0	3
<i>Hedera helix L.</i>	3	0	3	<i>Verbascum thapsus L.</i>	9	0	9
<i>Lactuca serriola L.</i>	181	46	227	<i>Vicia sativa L.</i>	5	0	5
<i>Oenothera biennis L.</i>	44	0	44	<i>Vicia sativa subsp. nigra (L.) Ehrh.</i>	22	0	22

Annexe 11 (1^{re} partie): Statistiques comparant les différences de recouvrement par mélange selon différentes catégories d'espèces: semées, spontanées et problématiques, en fonction des sites et années (Le Landeron, Cousset, Lullier).

Lieu	Année	Catégorie	Test	p_value	CC	CSR	KT	RR	SS	TV2
Le Landeron	0	Espèces semées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.040	na	ab	a	ab	ab	b
Le Landeron	0	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.954	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	0	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.393	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	1	Espèces semées	Kruskall-Wallis	0.113	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	1	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.546	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	1	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.419	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	2	Espèces semées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.006	na	a	b	ab	a	a
Le Landeron	2	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.461	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	2	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.682	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	3	Espèces semées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.030	na	ab	a	ab	b	na
Le Landeron	3	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.976	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	3	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.573	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	4	Espèces semées	Kruskall-Wallis	0.132	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	4	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.294	na	na	na	na	na	na
Le Landeron	4	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.199	na	na	na	na	na	na
Cousset	0	Espèces semées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.001	na	ab	a	a	a	b
Cousset	0	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.005	na	a	b	ab	ab	b
Cousset	0	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.621	na	na	na	na	na	na
Cousset	1	Espèces semées	Kruskall-Wallis	0.052	na	na	na	na	na	na
Cousset	1	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.846	na	na	na	na	na	na
Cousset	1	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.687	na	na	na	na	na	na
Cousset	2	Espèces semées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.001	na	a	b	a	a	a
Cousset	2	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.642	na	na	na	na	na	na
Cousset	2	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.793	na	na	na	na	na	na
Cousset	3	Espèces semées	Kruskall-Wallis	0.070	na	na	na	na	na	na
Cousset	3	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.570	na	na	na	na	na	na
Cousset	3	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.521	na	na	na	na	na	na
Cousset	4	Espèces semées	Kruskall-Wallis	0.091	na	na	na	na	na	na
Cousset	4	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.421	na	na	na	na	na	na
Cousset	4	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.663	na	na	na	na	na	na
Lullier	0	Espèces semées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.003	a	a	a	ab	a	b
Lullier	0	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.014	a	ab	a	ab	ab	b
Lullier	0	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis + Dunn	0.027	a	ab	ab	ab	ab	b
Lullier	1	Espèces semées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.005	na	ab	a	ab	ab	b
Lullier	1	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.774	na	na	na	na	na	na
Lullier	1	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.708	na	na	na	na	na	na
Lullier	2	Espèces semées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.016	na	a	b	ab	ab	a
Lullier	2	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.901	na	na	na	na	na	na
Lullier	2	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.625	na	na	na	na	na	na
Lullier	3	Espèces semées	Kruskall-Wallis	0.058	na	na	na	na	na	na
Lullier	3	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.639	na	na	na	na	na	na
Lullier	3	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.771	na	na	na	na	na	na

Annexe 11 (2^e partie): Statistiques comparant les différences de recouvrement par mélange selon différentes catégories d'espèces: semées, spontanées et problématiques, en fonction des sites et années (Muttentz, Bavois, Cornaux).

Lieu	Année	Catégorie	Test	p_value	CC	CSR	KT	RR	SS	TV2
Muttentz	0	Espèces semées	Kruskall-Wallis	0.245	na	na	na	na	na	na
Muttentz	0	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.513	na	na	na	na	na	na
Muttentz	0	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.495	na	na	na	na	na	na
Muttentz	1	Espèces semées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.010	ab	ab	a	ab	b	na
Muttentz	1	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.337	na	na	na	na	na	na
Muttentz	1	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.878	na	na	na	na	na	na
Muttentz	2	Espèces semées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.006	ab	a	b	na	a	na
Muttentz	2	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis	0.068	na	na	na	na	na	na
Muttentz	2	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.269	na	na	na	na	na	na
Bavois	0	Espèces semées	Kruskall-Wallis	0.368	na	na	na	na	na	na
Bavois	0	Espèces spontanées	Kruskall-Wallis + Dunn	0.031	a	na	ab	na	na	b
Bavois	0	Espèces problématiques	Kruskall-Wallis	0.075	na	na	na	na	na	na
Bavois	1	Espèces semées	Student/Wilcoxon	0.885	a	na	a	na	na	na
Bavois	1	Espèces spontanées	Student/Wilcoxon	1.000	a	na	a	na	na	na
Bavois	1	Espèces problématiques	Student/Wilcoxon	0.286	a	na	a	na	na	na
Bavois	2	Espèces semées	NA	NA	na	na	na	na	na	na
Bavois	2	Espèces spontanées	NA	NA	na	na	na	na	na	na
Bavois	2	Espèces problématiques	NA	NA	na	na	na	na	na	na
Cornaux	0	Espèces semées	Student/Wilcoxon	0.062	na	na	a	na	na	a
Cornaux	0	Espèces spontanées	Student/Wilcoxon	0.253	na	na	a	na	na	a
Cornaux	0	Espèces problématiques	Student/Wilcoxon	0.357	na	na	a	na	na	a
Cornaux	1	Espèces semées	Student/Wilcoxon	0.069	na	na	a	na	na	a
Cornaux	1	Espèces spontanées	Student/Wilcoxon	0.914	na	na	a	na	na	a
Cornaux	1	Espèces problématiques	Student/Wilcoxon	0.874	na	na	a	na	na	a
Cornaux	2	Espèces semées	Student/Wilcoxon	0.188	na	na	a	na	na	a
Cornaux	2	Espèces spontanées	Student/Wilcoxon	0.352	na	na	a	na	na	a
Cornaux	2	Espèces problématiques	Student/Wilcoxon	0.771	na	na	a	na	na	a

Photos finales Vue d'ensemble de Cousset

05.03.2019, vue du site O-E



25.04.2019, vue du site E-O



16.05.2023, vue d'ensemble O-E



03.10.2023, vue d'ensemble E-O

