



Projet MATERIAUX

Sols artificiels genevois



Rapport intermédiaire

Genève, 17.12.2025

Auteurs : Patrice Prunier¹, Pascal Boivin¹, Sarah Cédileau¹, M. Deeb¹, P.A. Frossard¹, C. Heiniger¹, Fabienne Mörch¹

¹Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève HEPIA

Avec la collaboration de l'Office Cantonal de l'Environnement – Etat de Genève : Sébastien Gassman, Bastien Guex

h e p i a

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

Rue de la Prairie 4
CH-1202 Genève

Tél. +41 22 558 50 10
hepia@hesge.ch
www.hesge.ch/hepia

1	Contexte	5
2	Objectifs.....	7
3	Méthodes et indicateurs	7
4	Description du plan expérimental	8
4.1	Conception	8
4.2	Réalisation.....	0
5	Résultats	1
5.1	Suivis de végétation	1
5.1.1	Recouvrement vasculaire	1
5.1.2	Richesse spécifique.....	0
5.1.3	Expression du mélange grainier et part d'espèces spontanées hors mélange	0
5.1.4	Conclusion végétation	5
5.2	Suivis de la qualité du substrat	5
5.2.1	Caractérisation des matériaux parentaux pour Technosols construits.....	5
5.2.2	Formulation et propriétés des matériaux chimiques en mélange et leur évaluation pour des sols construits	5
5.2.3	Formulation et propriétés physiques des matériaux en mélange et leur évaluation pour des sols construits	6
5.2.4	Analyse de la composition organique par Rock-Eval.....	10
5.2.5	Influence de la profondeur et de la proportion de compost sur le développement racinaire.....	12
5.2.6	Conclusion sur les propriétés des Technosols construits	13
6	Annexes	15
6.1	Annexe 1 : Liste des espèces enlevées spécifiquement lors de l'entretien de mise en place de l'expérience.	15

h e p i a

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

Rue de la Prairie 4
CH-1202 Genève

Tél. +41 22 558 50 10
hepia@hesge.ch
www.hesge.ch/hepia

1 Contexte

Du point de vue environnemental, énergétique et démographique, la végétalisation durable des villes et de leur périphérie est une nécessité.

L'un des objectifs de cette végétalisation est de reconstituer des écosystèmes viables et autonomes, tolérant les phases de sécheresses estivales, en lieu et place des surfaces imperméabilisées (parkings, toitures, etc). Bien que les situations et opportunités soient très variées, pour être conduites selon des principes de durabilité de l'ONU (ODD, 9, 11, 15), cette reconstitution implique la création de substrats appropriés à la croissance de végétaux adaptés aux conditions urbaines, et répondant l'un et l'autre à un ensemble de fonctionnalités attendues.

Les sols construits destinés aux infrastructures vertes doivent être conçus pour fournir un ensemble de fonctions interconnectées, qui vont au-delà de la simple réutilisation des matériaux. Ces sols doivent présenter des caractéristiques physico-chimiques et structurelles adaptées à l'usage urbain, notamment : une fertilité chimique compatible avec la végétation visée, une profondeur suffisante pour l'ancrage racinaire, une capacité de stockage et d'infiltration de l'eau permettant la régulation des eaux pluviales, une porosité et une conductivité hydraulique favorables à la gestion des eaux, une capacité portante adéquate pour les usages piétonniers ou mécaniques, une structure stable pour limiter l'érosion et la compaction, ainsi qu'une conductivité hydraulique adaptée aux usages spécifiques (par exemple, gestion des eaux pluviales) (Deeb et al., 2020). La gestion des matériaux dans les sols construits ne vise pas simplement le « bouclage local des cycles », mais s'inscrit dans une logique plus large de conception sur mesure des substrats, en combinant des matériaux organiques et minéraux pour atteindre des propriétés fonctionnelles ciblées (fertilité, capacité de rétention en eau, stabilité mécanique, etc.) (Deeb et al., 2020 ; 2024).

Le recyclage des matériaux doit suivre une demande croissante de matériaux réutilisables pour la construction de sols fonctionnels :

- de matériaux terreux issus du décapage de sols urbains lors d'opération de densification ;
- de matériaux minéraux locaux d'excavation ;
- de matériaux minéraux d'origine anthropique ;
- de produits organiques issus de recyclages, notamment la biomasse recyclée par compostage ou pyrolyse (ex-compost, produits graminéens séchés, biochars, etc.) ;

En Suisse, les matériaux minéraux issus de l'excavation représentent un gisement important, avec environ 57 millions de tonnes produites chaque année à l'échelle nationale, principalement lors de travaux de construction et de terrassement ([BAFU, 2023](#)). Dans le canton de Genève, plus de 2,6 millions de tonnes de matériaux non pollués sont générées annuellement ([CDC Genève, 2022](#)). Ces matériaux, constitués essentiellement de roche et de terre, constituent une ressource précieuse pour la construction de sols fonctionnels et la valorisation locale.

Compte tenu de la variabilité des sources de matériaux dans leur nature et leur disponibilité temporelle, il importe de développer un savoir-faire technique hautement adaptable pour la création de ces écosystèmes et leur support. Ce projet vise donc à établir les bases méthodologiques permettant de mettre en relation une demande (support de végétation, Technosol) et une provenance de matériaux, pour produire un substrat ou sol répondant aux attentes.

La Haute Ecole du Paysage d'Ingénierie et d'Architecture œuvre en ce sens depuis plus de 10 ans en répondant à différents usages : végétalisation d'espaces au sol (travaux de végétalisation de voies de Tramway – projet TNGS ou de chemin de fer – projet Tapis vert), services écosystémiques urbains (fosses à impluvium multifonctionnelles – projet ArbreTech), toitures végétalisées extensives (projets SEED, Bryotop, TVEG) et biosolaires (projets PV Plantes, PLANETE, TEXTS) ou encore verticaux en façades (Mubersec, Enveloppe végétale, HUG-GIBOR). Elle a également participé à des recherches portant sur les matériaux de recyclage avec la mise en place d'une expérimentation comparative de reconstitution de sols porteurs composés de matériaux minéraux recyclés et adaptés à la plantation (Recycling-URB).

L'OCEV-GESDEC a notamment pour mission la valorisation des sols et des roches. Le service porte également une politique de réduction à la source de la production des déchets et de remploi pour basculer vers une économie circulaire où le déchet redevient matière première (ECOMAT^{GE}, La P'tite Poubelle VERTE, Plan Cantonal de gestion des déchets 2020-2025). Au cœur des activités de la construction, le service dispose des connaissances nécessaires pour accompagner le développement de solutions de réemploi des matériaux locaux.

Eu égard à leurs expériences respectives, les deux partenaires se questionnent néanmoins sur les potentiels de croissance végétale et de diversité de substrats comportant des proportions variables de matières minérales et organiques. Ils souhaitent aussi évaluer les propriétés des matériaux géologiques genevois, ainsi que des produits organiques issus de recyclages locaux.

Par exemple, lors de la réalisation d'une toiture végétalisée, la détermination de la part respective de ces matériaux, tributaire de la résistance de charge de la dalle, est plus souvent subie que choisie ; les mélanges de matériaux étant constitués pour répondre à une contrainte mécanique. Pareillement, lors de la réalisation de projet au sol, les discussions sur la part de ces matériaux sont récurrentes et fonction des objectifs assignés à la végétalisation, le cas échéant des matériaux disponibles.

Ainsi, les références sont nécessaires sur les potentiels de croissance végétale utilisant des parts variables de matériaux minéraux et organiques locaux à revaloriser lors de semis de mélanges grainiers d'espèces indigènes.

Dans ce contexte, les questions suivantes émergent :

- Quelles sont les aptitudes des matériaux d'excavation locaux pour la création de sols artificiels ? Les propriétés minéralogiques et physico chimiques des matériaux doivent être caractérisées. Les rôles de squelette, de formation de plasma réactif, de complexation des matières organiques peuvent être variablement exprimés selon les matériaux, ils seront caractérisés en relation avec les propriétés des matériaux bruts ;
- Comment évoluent les sols construits jeunes au fil du temps ?
- Le suivi de l'évolution des sols construits jeunes est essentiel, car ces sols restent très sensibles au cours des premières phases de leur développement. Leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques peuvent évoluer significativement sous l'effet des interactions biotiques, des cycles de séchage et d'humidification, ainsi que des facteurs climatiques (deeb et al., 2016 ; 2017). Observer ces changements au fil du temps permet de déterminer le moment où le sol atteint une stabilité fonctionnelle, d'évaluer sa capacité à assurer les propriétés structurales, la rétention de l'eau, la fixation du carbone, la formation d'associations minéral-organiques, ainsi que sa durabilité globale. Ce suivi temporel est donc crucial pour concevoir des sols

construits robustes et durables, capables de remplir de manière fiable leurs fonctions écologiques et hydrologiques prévues. Sur la base de ces informations, quels processus permettent d'exprimer au mieux le potentiel des matériaux à former des Technosols ? La création d'une agrégation stable et d'une porosité structurale, la stabilisation des matières organiques par complexation au minéral ou par récalcitrance, seront visés. Des formulations (mélanges) et des processus de pédogenèse accélérée seront établis. Les propriétés physico-chimiques des Technosols obtenus seront caractérisées de façon complète (perméabilité, rétention en eau, équilibre air-eau, portance, rétention de polluants, fertilité chimique) ;

- Quels objectifs de végétalisation (recouvrement, richesse spécifique, équitabilité, type d'associations végétales, contraintes d'entretien) peuvent être visés en fonction des propriétés des matériaux et de leur assemblage en substrat ou Technosol ?
- Quelle est la vitesse de colonisation des substrats constitués (à échéance de 3 ans) ? Une attention particulière sera apportée aux propriétés des substrats permettant à la couverture végétale choisie de faire face aux situations extrêmes (en particulier le manque d'eau) en conservant ses propriétés.

2 Objectifs

L'objectif général de ce projet est ainsi de déterminer les potentiels de réemploi des matériaux d'excavation locaux pour la création d'espaces végétalisés multifonctionnels.

Cet objectif implique de : 1. Caractériser ces matériaux, leurs aptitudes à assurer le rôle de constituants des sols fonctionnels, les protocoles de mélange permettant de produire des sols adaptés aux usages urbains visés et 2. Identifier les potentiels de recouvrement, la diversité végétale et leur rapidité d'implantation.

3 Méthodes et indicateurs

En raison de la variabilité des matériaux et de leur disponibilité, de la variété des usages demandés, de la nécessité de travailler sur des échelles de temps pluriannuelles, cette recherche doit pouvoir s'élaborer progressivement dans le moyen et le long terme. Elle doit combiner des caractérisations de base (matériaux), des essais de constitution de mélanges et des suivis de végétalisation.

Un premier développement est proposé en mettant à profit le centre expérimental de *Toitures végétalisées* de Lullier pour une expérience *ex situ* de constitution de Technosol et de végétalisation avec des espèces herbacées indigènes, prenant en compte après analyse et proposition de l'OCEV, des matériaux minéraux et organiques en part variable. La caractérisation préalable des matériaux putatifs et de leur combinaison a été effectuée au laboratoire *Sols et substrats* d'HEPIA. Cette étape permet de préciser un mode opératoire et les constituants importants et leur rôle.

Pour l'expérience projetée, cinq cases de 60 m² sont dédiées. Une compartimentation de chacune des cases en quatre surface élémentaire (placette) de 15 m² (aire minimale nécessaire pour observer l'expression de la diversité végétale d'une formation herbacée) est mise en œuvre.

Les suivis de la végétation ont été réalisés deux fois par année (printemps et automne) selon la méthode des points contact qui permet d'identifier les types d'associations végétales en présence et l'évolution temporelle de la végétation sur plusieurs années, via l'analyse du taux de recouvrement

des espèces végétales vasculaires. Ces suivis ont été complétés par des relevés exhaustifs de la flore, permettant d'obtenir les indicateurs classiques en écologie végétale tels que la richesse spécifique, la part d'espèces issues du mélange grainier semé, ainsi que la part de néophytes.

Les suivis de la qualité des sols construits reposent sur des analyses physico-chimiques et hydriques, permettant de suivre l'évolution des propriétés des matériaux et le rôle des plantes en interaction avec les différentes proportions de compost. Les paramètres étudiés pour la fertilité chimique incluent : pH, conductivité électrique (EC), phosphore (P), potassium (K), magnésium (Mg), carbonates (CaCO_3), azote total (N Kjeldahl), PAF (phosphore assimilable par la flore), matière organique (MO) et texture du sol. Les propriétés physiques et hydriques évaluées comprennent : stabilité structurale, capacité d'agrégation, rétention d'eau totale et eau disponible dans les phases plasmique et structurale, eau résiduelle, infiltration, porosité et conductivité hydraulique en conditions saturées et non saturées. Les analyses permettent également de suivre les associations minéral-organiques à travers les courbes de retrait et de rétention.

Pour la stabilisation et la minéralisation du carbone, des analyses Rock Eval® sont effectuées, avec le calcul de l'I-index (proportion de matière labile versus stable) et du R-index (proportion de matière réfractaire/stable). Ces indicateurs sont essentiels, car une grande partie du carbone labile peut être rapidement libérée au cours des premières semaines ou mois, avant que les processus pédogénétiques et les interactions plante-minéral-microorganismes ne stabilisent le carbone. Ce suivi permet donc de quantifier à la fois la minéralisation initiale rapide du carbone et la stabilisation progressive de la matière organique sur le long terme.

Les analyses sont réalisées à l'installation du substrat, puis chaque mois pendant les six premiers mois (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6), ainsi qu'à 12 mois, et seront ensuite répétées chaque année, afin de suivre l'évolution des propriétés chimiques, physiques et de carbone dans le temps. Cette approche permet de caractériser la dynamique des sols construits, leur capacité à soutenir la végétation et à maintenir des fonctions hydriques, structurelles et de séquestration du carbone durables pour des usages urbains.

4 Description du plan expérimental

4.1 Conception

Le projet se situe sur l'espace d'expérimentation des toitures végétalisées de Lullier situé au 150 route de Presinge, 1254 Jussy (Figure 1).

Comme précisé précédemment, cinq cases ont été mises à disposition du projet sur l'espace d'expérimentation, chacune d'entre elles étant divisée en quatre parties égales d'environ 15 m², un total de 20 placettes expérimentales est ainsi aménagé. Les 5 modalités testées sont : 10 / 25 / 50 / 75 et 90 % de matière minérale et organique pour une épaisseur de 30 cm. Chaque modalité est répétée 4 fois (cf. Figure 2).

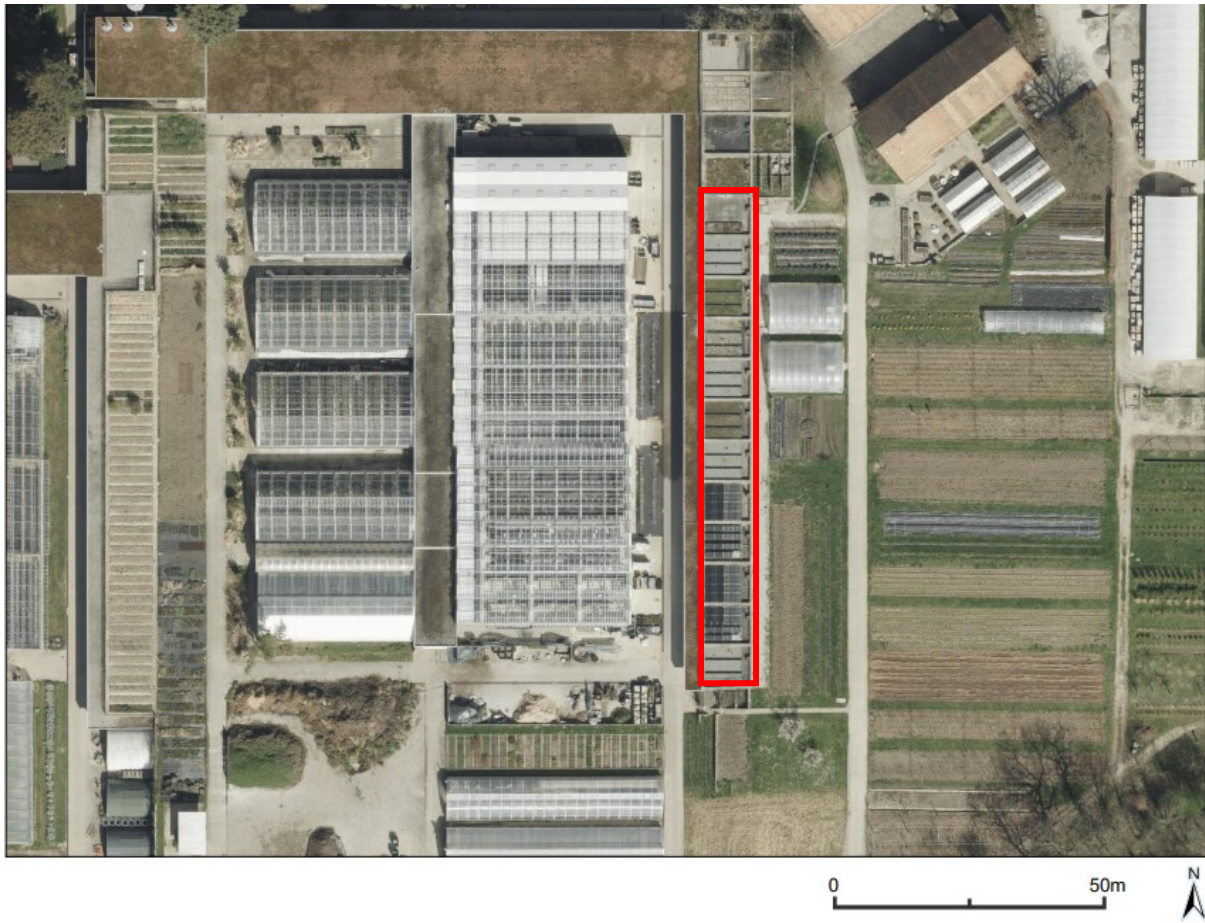


Figure 1 : Plan de situation des placettes sur l'espace « Toitures végétalisées » de Lullier

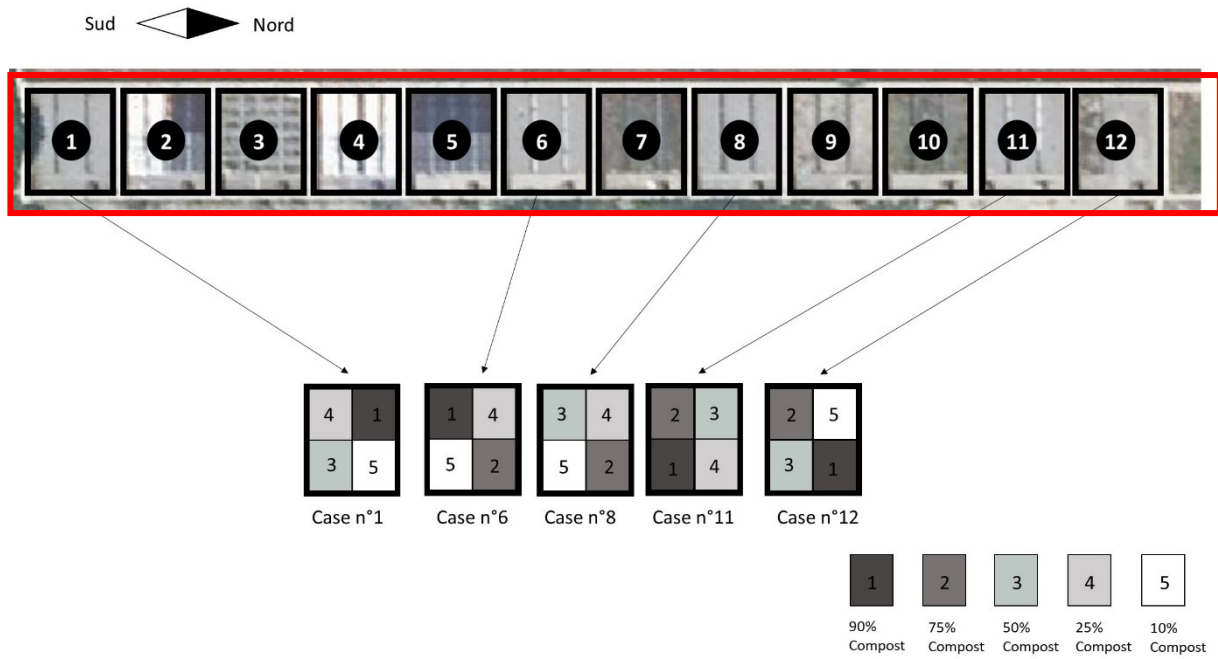


Figure 2 : Plan expérimental des placettes sur l'espace « Toitures végétalisées » de Lullier

4.2 Réalisation

Suite à un appel d'offres sur invitation auprès de trois entreprises, l'entreprise Jacquet SA a été retenue pour la réalisation des travaux s'élevant à un montant de 39'081,00 CHF (HT). Les travaux ont démarré le 21 mai 2024 et la réception de chantier a eu lieu le 31 mai 2024 (Figure 3).

Les matériaux utilisés sont les suivants :

- 40 m³ de compost fin 0/10 (Gicord) ;
- 40 m³ de moraine wurmienne 7d, provenance chantier de la Bistoquette (Piasio) ;
- 80 m de planches de sapin pour compartimenter les cases en placettes ;
- 300 m² géotextile synthétique de séparation ;
- 380 m² géomembrane (étanchéité) stratex PELD 50.



Figure 3 : Travaux de mise en œuvre des placettes expérimental sur l'espace « Toitures végétalisées » de Lullier

Le mélange grainier semé cible spécifiquement des milieux de prairies mi-sèches - mésophiles (*Mesobromion*), xérophiles (*Xerobromion*) et des ourlets maigres xérothermophiles (*Geranium sanguinei*) peu productifs. Il présente une composition originale de 39 espèces - 3 poacées, 5 fabacées et 31 autres dicotylédones, fournit par UFA Semences. Il a été semé avec une densité de 2 g/m² manuellement le 7 juin 2024.

5 Résultats

5.1 Suivis de végétation

5.1.1 Recouvrement vasculaire

Le taux de recouvrement atteint un plafond dès la première année après trois mois d'ensemencement pour les modalités 50% de compost et plus. Le démarrage pour les modalités 10 et 25% est plus lent, mais augmente fortement dès le 5e mois pour atteindre des valeurs élevées en 15 mois (Figure 4 et

Figure 5). A noter qu'avec seulement 10% de compost un recouvrement de 86% est atteint en 15 mois. La modalité 90% de compost montre quant à elle une diminution du recouvrement entre mai 2025 (11 mois) et septembre 2025 (15 mois). L'importante part de compost a favorisé la colonisation par des espèces annuelles spontanées qui ont vite investi l'espace en début de saison, laissant peu de place aux espèces du mélange. La fauche d'entretien effectuée en deuxième quinzaine de juillet a mis ensuite en évidence cet espace devenu libre (Figure 6).

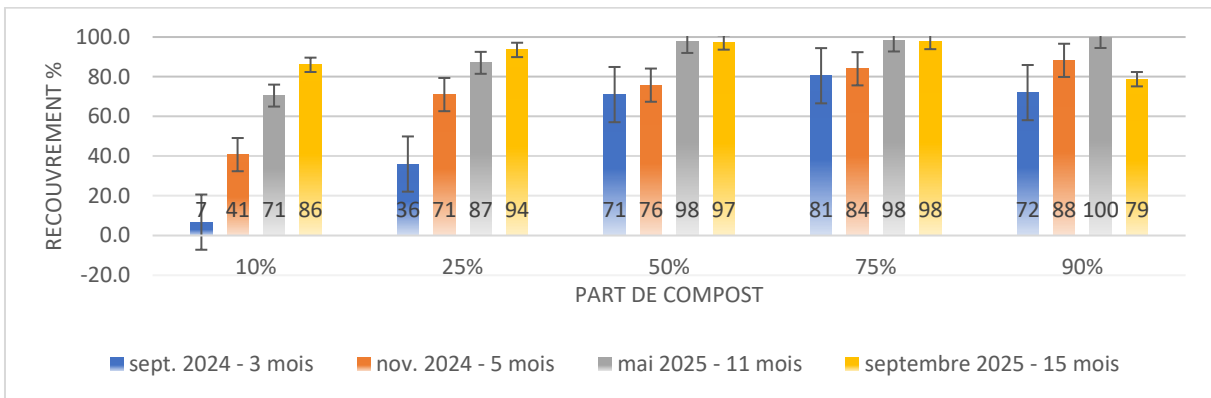


Figure 4 : Evolution du recouvrement par les plantes vasculaires



Figure 5: Illustration des différences de couvert végétal selon les modalités testées après 3 mois (en haut) et 15 mois (en bas).





Figure 6 : Modalité 90% de compost colonisée par les espèces spontanées annuelles avant (gauche) et après la fauche (droite).

5.1.2 Richesse spécifique

Globalement, le nombre d'espèces relevées au cours de la première année de suivi augmente régulièrement avec le temps et la richesse spécifique croît pour atteindre un maximum à 11 mois, quelle que soit la modalité considérée (cf. Figure 7).

Une différence est notable en comparant les différentes modalités : la richesse spécifique est maximale pour le substrat contenant 50% de compost sur l'ensemble des quatre relevés réalisés (cf. Figure 7). Elle décroît régulièrement en deçà et au-delà de la teneur 50%. Les valeurs en termes de nombre d'espèces demeurent élevées pour toutes les modalités. La Figure 8 ci-dessous fournit un aperçu de la différence d'aspect de la végétation selon les parts de compost.

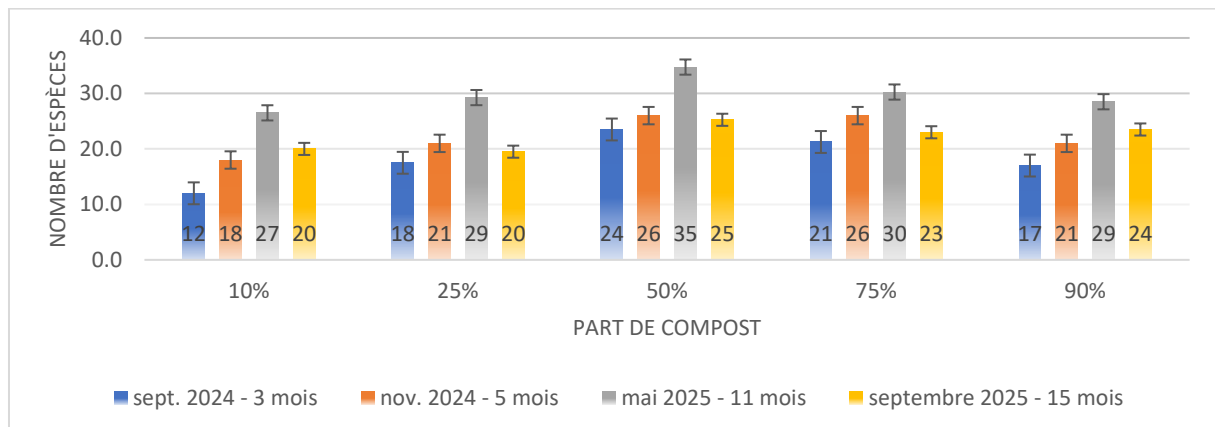


Figure 7 : Evolution de la richesse spécifique globale.



Figure 8 : Illustration des différences de composition végétale selon les modalités testées à 1 an : 10% en haut à gauche : aspect de pelouse mi-sèche peu diversifiée (type *Onobrychido-Brometum*), 50% en haut à droite : aspect de pelouse mi-sèche très diversifiée à 1 an (type *Salvio-Brometum*), 75% en bas à gauche : aspect de pelouse mi-sèche diversifiée rudéralisée type *Salvio-Brometum*, 100% en bas à droite : aspect de communauté agreste type *Stellario-Papaveretum*

5.1.3 Expression du mélange grainier et part d'espèces spontanées hors mélange

5.1.3.1 Recouvrement

Trois mois après la mise en place de l'expérience, le recouvrement était constitué principalement par des espèces spontanées rudérales et annuelles à forte capacité de grenaison. Une fauche sélective sur ces espèces a été réalisée afin de limiter leur dissémination, et ainsi laisser plus de place aux espèces du mélange. Ces espèces sont répertoriées dans l'Annexe 1 : Liste des espèces enlevées spécifiquement lors de l'entretien de mise en place de l'expérience. Comme l'indique la Figure 9 ci-dessous, le recouvrement par les espèces spontanées pour les modalités 50 %, 75 % et 90 % s'est respectivement réduit de 41 à 11 % (50%), de 59 à 24 % (75 %) et de 61 à 48 % (75 %). Ceci indique que cet entretien se révèle nécessaire pour assurer la bonne installation du mélange grainier dès la première année.

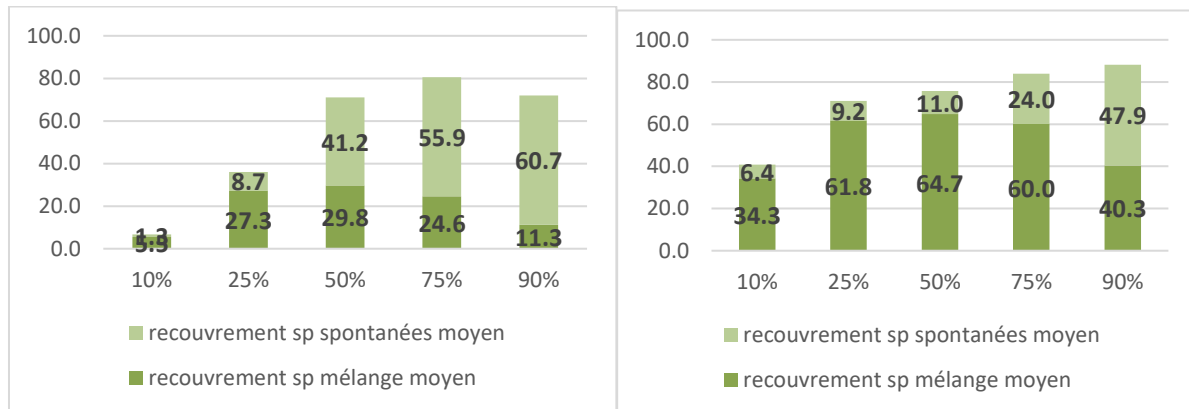


Figure 9 : Recouvrement vasculaire moyen des espèces issues du mélange vs espèces spontanées (hors mélange) après 3 mois en septembre 2024 (à gauche) et 5 mois en novembre 2024 (à droite).

Onze mois après le semis, les espèces du mélange recouvrent majoritairement les placettes par rapport aux espèces spontanées pour toutes les modalités, à l'exception de la modalité avec 90% de compost (cf. Figure 10).

La tendance observée est que moins le substrat contient de compost, plus il est adapté aux espèces du mélanges et permet son expression. L'optimum de développement est atteint après 11 mois pour la part 25% de compost avec 80,5% de recouvrement par les espèces semées relevées contre 6,5% par les espèces agrestes et rudérales. Cette part à tendance à diminuer en automne, après 15 mois, avec la venue des espèces annuelles spontanées, sauf pour la modalité de 10% de compost qui semble permettre au mélange de se développer encore plus (cf. Figure 10).

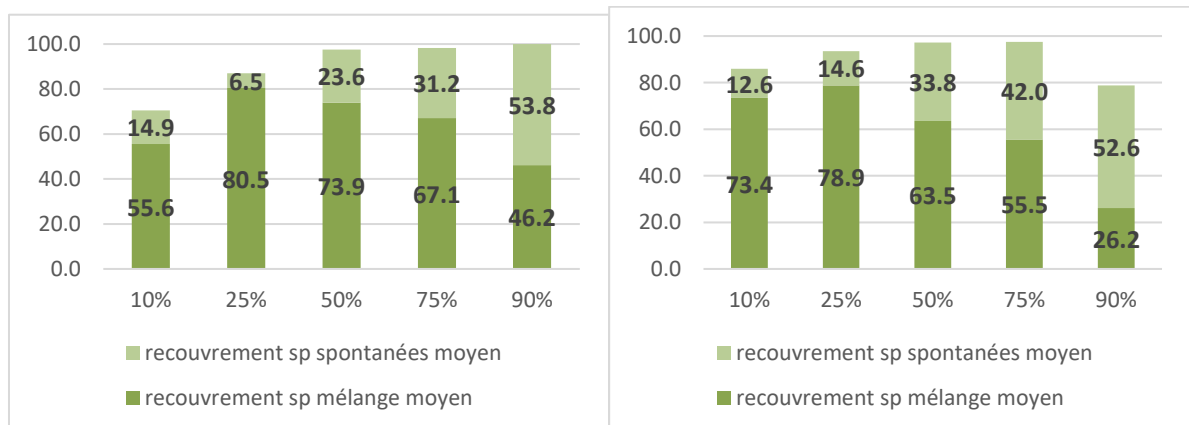


Figure 10 : Recouvrement vasculaire moyen des espèces issues du mélange vs espèces spontanées (hors mélange) après 11 mois en mai 2025 (à gauche) et 15 mois en septembre 2025 (à droite).

Les Figure 11Figure 12Figure 13Figure 14Figure 15 montrent l'évolution de la végétalisation entre mai et septembre 2025 avec le top cinq des espèces les plus recouvrantes pour chacune des modalités. Les plantes surlignées en gris sont des plantes annuelles spontanées (hors mélange). Comme relevé précédemment (cf. 5.1.1) la modalité avec 90% de compost est plus favorable au développement des espèces spontanées rudérales (cf. Figure 15).

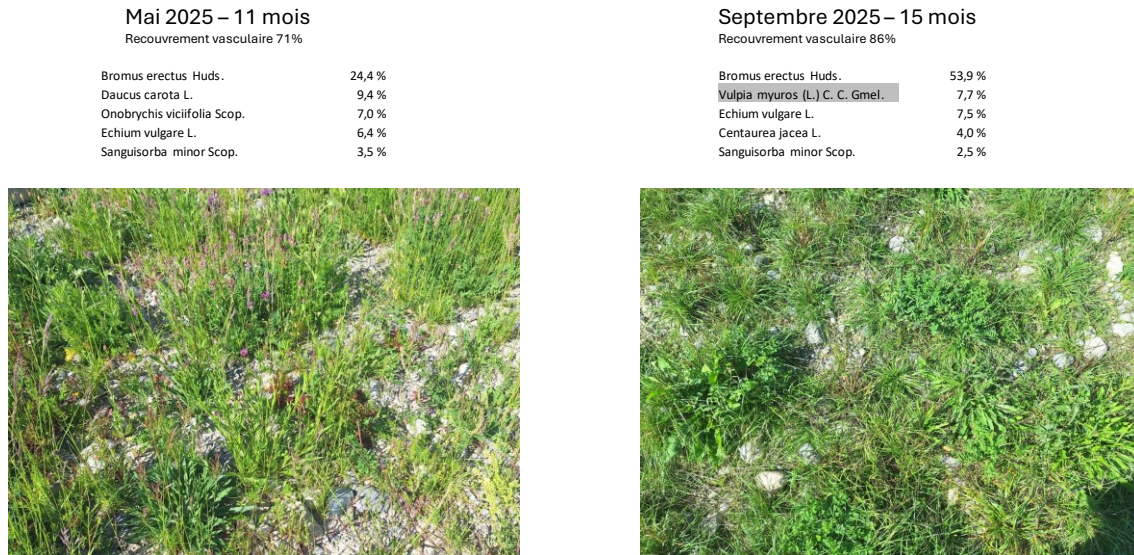


Figure 11 : Top 5 des espèces les plus recouvrantes au bout de 11 mois et 15 mois pour la modalité de 10% de compost. Les espèces surlignées en gris sont des espèces spontanées annuelles.



Figure 12: Top 5 des espèces les plus recouvrantes au bout de 11 mois et 15 mois pour la modalité de 25% de compost. Les espèces surlignées en gris sont des espèces spontanées annuelles.

Mai 2025 – 11 mois

Recouvrement vasculaire 98%

Bromus erectus Huds.	23,2%
Echium vulgare L.	12,2%
Daucus carota L.	9,9%
Centaurea jacea L.	7,1%
Salvia pratensis L.	5,5%



Septembre 2025 – 15 mois

Recouvrement vasculaire 97%

Bromus erectus Huds.	41,6%
Vulpia myuros (L.) C. C. Gmel.	14,4%
Centaurea jacea L.	6,2%
Salvia pratensis L.	5,9%
Echium vulgare L.	5,3%



Figure 13 : Top 5 des espèces les plus recouvrantes au bout de 11 mois et 15 mois pour la modalité de 50% de compost. Les espèces surlignées en gris sont des espèces spontanées annuelles.

Mai 2025 – 11 mois

Recouvrement vasculaire 98%

Echium vulgare L.	18,1%
Daucus carota L.	11,7%
Bromus erectus Huds.	11,5%
Geranium rotundifolium L.	10,0%
Salvia pratensis L.	7,0%



Septembre 2025 – 15 mois

Recouvrement vasculaire 98%

Bromus erectus Huds.	25,2%
Salvia pratensis L.	14,0%
Vulpia myuros (L.) C. C. Gmel.	13,6%
Echium vulgare L.	7,2%
Bromus sterilis L.	7,2%



Figure 14 : Top 5 des espèces les plus recouvrantes au bout de 11 mois et 15 mois pour la modalité de 75% de compost. Les espèces surlignées en gris sont des espèces spontanées annuelles.

Mai 2025 – 11 mois
Recouvrement vasculaire 100%

Geranium rotundifolium L.	17,2%
Poa compressa L.	9,1%
Lactuca serriola L.	8,0%
Papaver rhoeas L.	6,5%
Daucus carota L.	6,5%



Septembre 2025 – 15 mois
Recouvrement vasculaire 79%

Bromus erectus Huds.	11,9%
Portulaca oleracea L.	9,8%
Geranium rotundifolium L.	9,3%
Digitaria sanguinalis aggr.	8,6%
Vulpia myuros (L.) C. C. Gmel.	7,7%



Figure 15 : Top 5 des espèces les plus recouvrantes au bout de 11 mois et 15 mois pour la modalité de 90% de compost. Les espèces surlignées en gris sont des espèces spontanées annuelles.

Il est également important de souligner que *Bromus erectus*, qui est une espèce structurante des milieux secs et pauvres en nutriments, s'est très bien implantée au bout de 15 mois, surtout avec 10 % et 25 % de compost (cf. Figure 16).

Recouvrement par *Bromus erectus*
espèce structurante du milieu

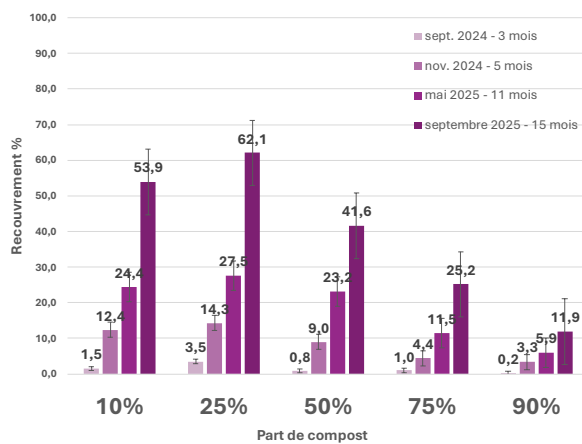


Figure 16 : Evolution du recouvrement par *Bromus erectus*, espèce structurante des milieux secs et pauvres.

5.1.3.2 Richesse spécifique

La modalité avec 25 % de compost est favorable aux espèces du mélange en termes de nombre d'espèces par rapport aux espèces spontanées (Figure 17) jusqu'à 11 mois d'évolution. On observe après trois, cinq et onze mois respectivement à 10,3 espèces du mélange versus 7,3 espèces spontanées, 11,5 versus 9,5 et 15,3 versus 14. La modalité avec 10% de compost privilégie qualitativement les espèces du mélange seulement après 3 mois. Les autres pourcentages de compost favorisent plutôt les espèces spontanées.

Comme démontré plus haut (Figure 7) la richesse spécifique maximale de 35 est atteinte après 11 mois pour la modalité de 50% de compost. Elle présente un nombre équivalent d'espèces du mélange et d'espèces spontanées (17,3 contre 17,5).

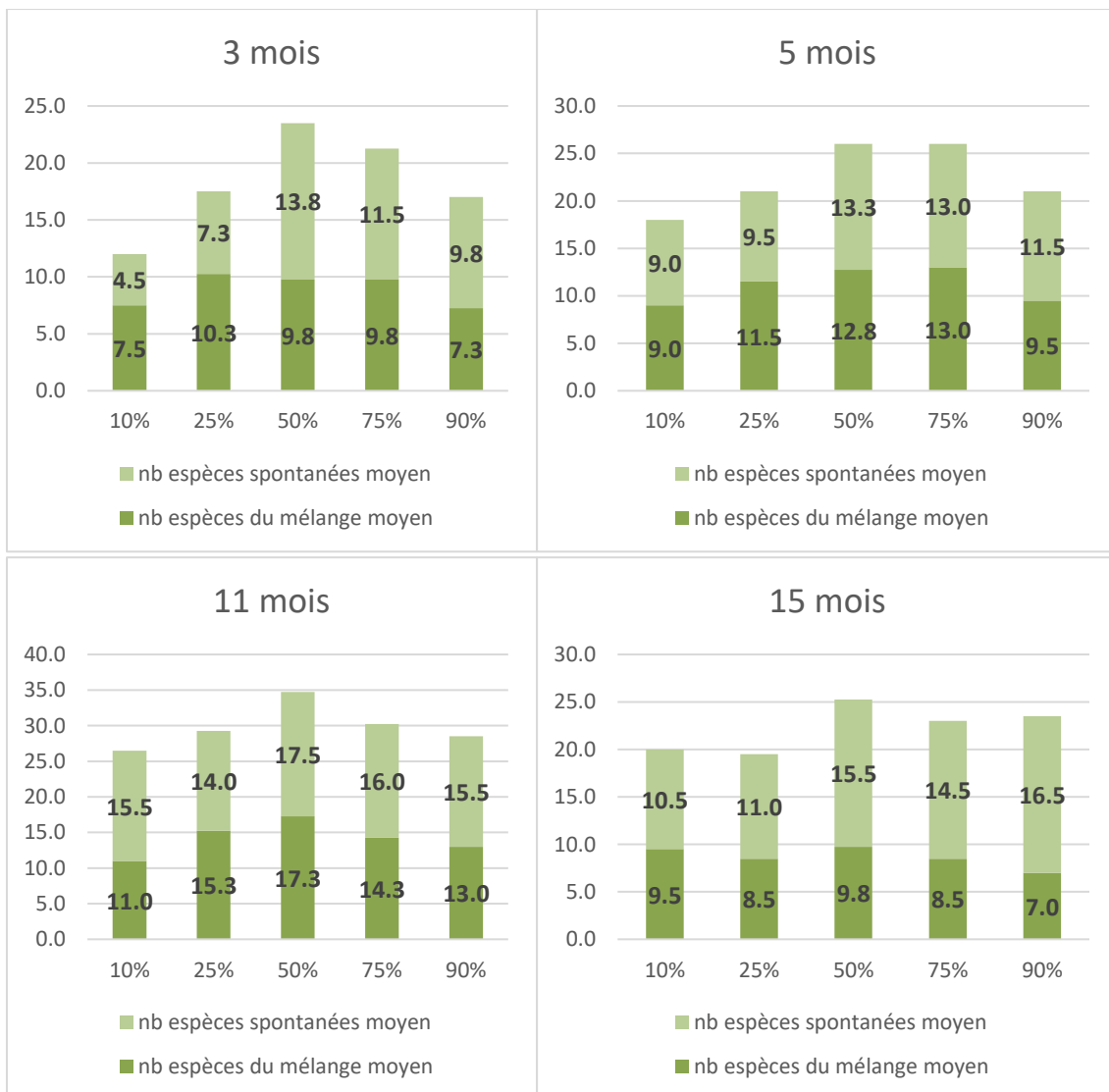


Figure 17 : Nombre d'espèces du mélange et d'espèces spontanées après 3 mois, 5 mois, 11 mois et 15 mois pour chacune des modalités.

5.1.4 Conclusion végétation

Après une année de végétation et pour une épaisseur de substrat de 25cm, le recouvrement du sol est presque total pour toutes les modalités. Cependant, les espèces du mélange s'expriment davantage sur les modalités avec 10, 25 et 50 % de compost (moins riches en nutriments - cf. ci-après). *Bromus erectus*, qui est l'espèce structurante des prairies sèches à mi-sèches s'épanouit particulièrement à 10 et 25% de compost en recouvrant plus de la moitié de la surface. A partir de 50% de compost, les espèces spontanées entrent en concurrence avec les espèces du mélange et prennent de plus en plus d'importance au fur et à mesure que la part de compost augmente.

En termes de biodiversité, un maximum de 35 espèces a été atteint à 11 mois pour la modalité de 50% de compost, avec une part d'espèces du mélange équivalente à celle des spontanées. Cependant, la modalité 25% de compost est également diversifiée avec 29 espèces à 11 mois ; la part d'espèces du mélange étant plus importante que la part des spontanées.

L'option avec 25% de compost, semble, en l'état actuel, l'option la plus pertinente pour l'épaisseur de substrat de 25 cm, car celle-ci favorise les espèces du mélange autant pour le recouvrement que pour la biodiversité. La modalité 10% de compost permet d'atteindre un recouvrement presque total avec une part plus importante des espèces du mélange, mais de manière plus lente que les autres modalités. Les options avec 75 et surtout 90 % sont marquées par une forte concurrence des espèces spontanées (bénéficiant de la forte proportion d'élément nutritifs) vis-à-vis des espèces du mélange, notamment à 90 %..

5.2 Suivis de la qualité du substrat

5.2.1 Caractérisation des matériaux parentaux pour Technosols construits

Dans cette étude, des **couches géologiques excavées (CGE)** provenant des dépôts fluvio-glaciaires de Genève ont été utilisées comme matériau minéral parent. Les CGE présentent un pH élevé (8,1) et une faible conductivité électrique (0,1 mS/cm), avec une teneur en matière organique très faible (0,4 %) et un faible azote total (<0,1 %). La granulométrie révèle une proportion importante de limon (42–44 %) et d'argile (30–32 %), le reste étant constitué de sable (25–28 %), et d'une teneur élevée en carbonates (34–35 %). Ces caractéristiques montrent que les CGE de Genève sont très minéralisées et peu fertiles, comparativement aux sols agricoles suisses typiques, qui présentent des pH plus modérés (6,0–7,5), des teneurs en matière organique plus élevées (2–5 %) et une texture plus équilibrée entre sable, limon et argile (BAFU, 2022).

Le **compost de déchets verts (GWC)** utilisé pour la constitution des mélanges apporte des éléments nutritifs significatifs : pH 8,4–8,5, conductivité électrique 1,1 mS/cm, phosphore ~8,5 mg/L, potassium 576–595 mg/L, magnésium ~8,3 mg/L, carbonates 5,7–7,4 %, azote Kjeldahl 1,5–1,7 % et PAF 40–47 %. Comparativement, les amendements organiques utilisés en Suisse pour l'amélioration des sols urbains ou agricoles ont généralement des teneurs en azote légèrement inférieures (1–1,3 %) et des taux de carbone organique similaires (30–50 %), mais avec des variations selon l'origine des déchets (BMLRT, 2021).

5.2.2 Formulation et propriétés des matériaux chimiques en mélange et leur évaluation pour des sols construits

L'analyse des caractéristiques chimiques des mélanges au temps d'installation et après six mois d'installation révèle des modifications significatives de la fertilité chimique des sols construits. À l'état initial, les mélanges présentent des propriétés héritées des matériaux constitutifs, avec une

disponibilité limitée de certains éléments nutritifs notamment dans les mélanges contenant une faible proportion de compost.

Après six mois, une amélioration globale est observée, traduite par une augmentation du phosphore disponible, du magnésium, de la matière organique totale et de la capacité d'échange cationique (CEC). Cette évolution est liée aux processus progressifs de stabilisation du carbone et d'association organo-minérale de la matière organique, renforçant le complexe adsorbant et améliorant la rétention des cations (Figure 18).

En revanche, les teneurs en azote et en potassium diminuent avec le temps. Cette baisse du potassium peut s'expliquer par l'absorption et l'immobilisation par la biomasse microbienne : dans les sols enrichis en compost, le développement progressif des microorganismes et de la microfaune conduit à une immobilisation temporaire du K pour leur métabolisme, suivie de sa libération ultérieure lors de la décomposition de la biomasse. Ces observations mettent en évidence l'importance d'un suivi temporel pour comprendre la dynamique des nutriments et évaluer la durabilité chimique et agronomique des sols construits (Figure 18).



Figure 18 : Résumé des méthodes utilisées : prélèvement, séchage, analyse de la composition organique (Rock-Eval) et mesure de la biomasse racinaire.

5.2.3 Formulation et propriétés physiques des matériaux en mélange et leur évaluation pour des sols construits

La pédogenèse d'un Technosol construit commence par le mélange des matériaux parents dans des proportions choisies, influençant fortement la structure et les propriétés physiques du sol, telles que la texture, la densité apparente et la rétention d'eau. Les sols jeunes présentent un risque élevé de compaction et une perte rapide de matière organique, tandis que la dynamique des organismes biotiques contribue à optimiser la formation de la structure et la fonctionnalité hydro-physique (Deeb et al., 2020).

Les courbes de retrait (SSCs) (Figure 20) ont été choisies car elles permettent d'évaluer **quantitativement et de manière sensible la structure du sol, la dynamique des pores structural et plasmique, la rétention d'eau et la stabilité hydro-structurale**, offrant ainsi un diagnostic plus complet que les méthodes classiques. Les pores plasmiques résultent de l'agrégation des colloïdes (argiles, hydroxydes, fines particules de limon) et des particules humiques au sein des peds primaires. Ces pores interparticulaires, de diamètre maximal d'environ 15 μm à l'état sec, servent principalement de tampon pour l'eau et les nutriments (Boivin et al., 2004 ; Fiès & Bruand, 1998). Les pores structural, en revanche, sont de diverses origines et formes (lacunes, fissures, biopores créés par la faune) et résultent de l'agrégation des peds primaires avec des particules minérales du squelette $>2 \mu\text{m}$ (silt et sable). La combinaison de ces deux systèmes contrôle la rétention d'eau, la filtration, la stabilité structurelle du sol et influence le développement racinaire, ainsi que l'habitat des organismes (Boivin, Garnier, & Vauclin, 2006 ; Schäffer et al., 2008).

Les SSCs présentent plusieurs avantages interdisciplinaires par rapport à d'autres méthodes (densité apparente, analyse d'images, etc.), permettant de caractériser la structure du sol, la dynamique des pores structural et plasmique, l'évolution de leur teneur en eau et en air du sol saturé au sol sec, ainsi que la stabilité structurelle (Boivin, Garnier, & Vauclin, 2006 ; Boivin, Schäffer, et al., 2006). Elles sont particulièrement sensibles aux effets de la compaction, des changements d'usages des sols, de la nature et de la quantité de matière organique (Deeb et al., 2016), de la teneur en argile, de la capacité d'échange cationique (CEC) et de l'activité biologique (Deeb et al., 2016), ce qui en fait un outil précieux pour évaluer les services écosystémiques liés à l'eau, à la biomasse et au maintien des conditions physico-chimiques et biologiques du sol.

Les résultats présentés ici (Figure 19) mettent en évidence l'effet des matériaux parents et des plantes, ainsi que leur interaction, à l'état d'installation et après six mois. Ces analyses seront complétées par des évaluations supplémentaires après 12, 24 et 36 mois à l'aide des SSCs, afin de caractériser l'évolution de la structure physique et de la stabilité hydro-structurale des Technosols construits.

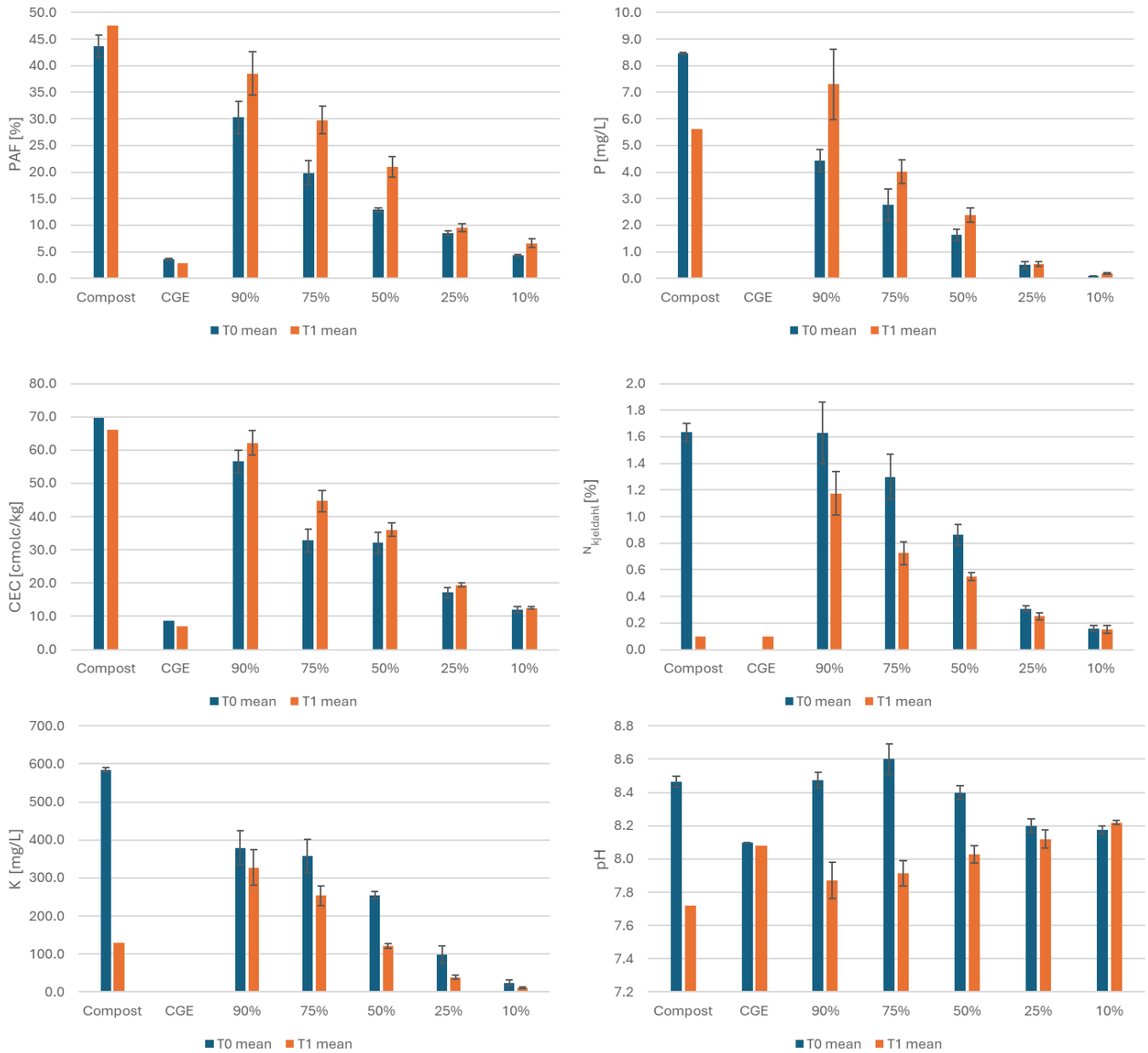


Figure 19 : Comparaison des propriétés chimiques des mélanges de sol construits selon la proportion de compost au temps d'installation (T0) et après six mois (T1), moyenne ± écart-type

La Figure 20 présente de manière générique les phases des courbes de retrait du sol (SSC) et leur rôle fonctionnel.

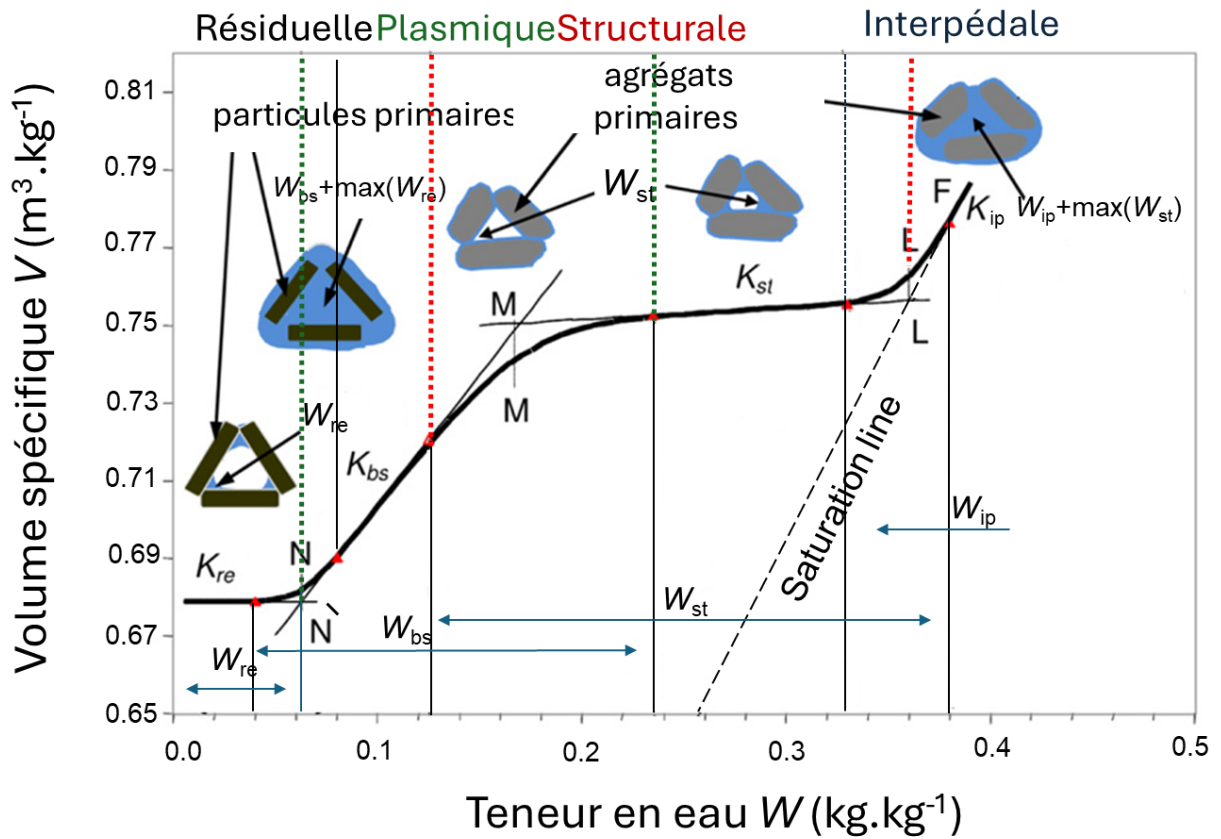


Figure 20 : Phases des courbes de retrait du sol (SSC) et leur rôle fonctionnel. La phase de saturation (interpédale) correspond à un sol entièrement saturé en eau avec un volume maximal, où l'eau libre s'évacue par gravité. La phase structurale se caractérise par une perte d'eau sans retrait significatif, reflétant la résistance du sol à la compaction et aux contraintes mécaniques. La phase plasmique montre une perte simultanée d'eau et de volume, permettant de maintenir les associations organo-minérales et de stocker l'eau disponible pour les plantes. Enfin, la phase résiduelle correspond à un volume quasi constant malgré la perte continue d'eau, représentant l'eau difficilement disponible pour les plantes.

Les résultats présentés à la Figure 21 montrent qu'au moment de l'installation, la porosité totale et la capacité de rétention d'eau augmentent avec la proportion de compost dans le mélange. Après six mois, le mélange contenant 50 % de compost présente des phases structurale et plasmique bien distinctes, indiquant une association organo-minérale stable et une fonctionnalité hydro-structurale comparable, voire supérieure, à celle du mélange à 75 % de compost. Le mélange à 10 % de compost ne montre pas de changement significatif par rapport à l'état initial, tandis que le mélange à 25 % de compost développe, dans la phase plasmique, une association organo-minérale notable. Dans tous les mélanges, une perte de volume initiale est observée, conséquence de la formation de porosité artificielle, et ne doit pas être interprétée comme une instabilité. Des mesures à 1 et 2 ans permettront d'évaluer la stabilisation des mélanges et leur comparabilité avec les sols naturels, en termes de structure et de fonctionnalité hydro-structurale.

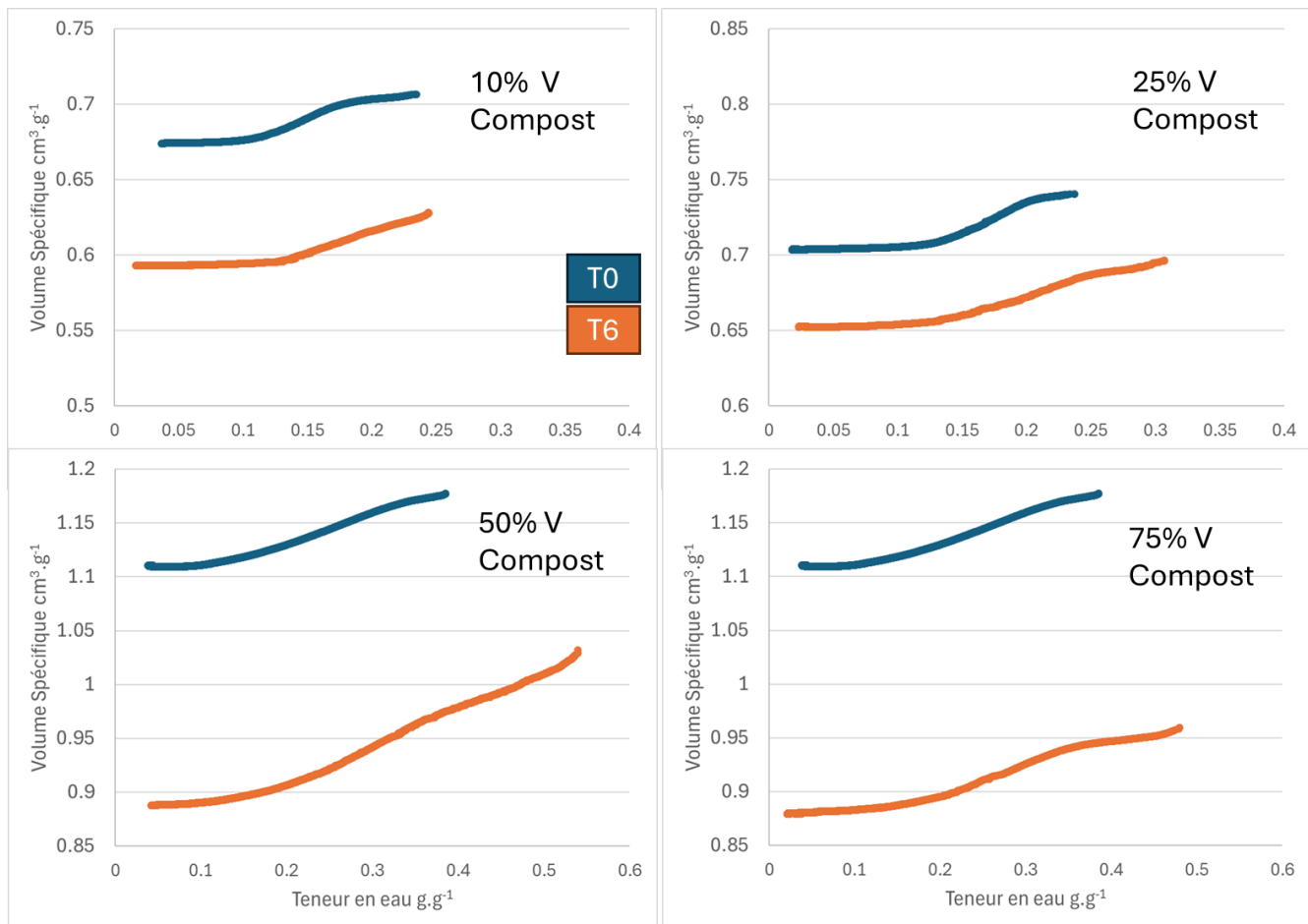


Figure 21 : Évolution de la structure hydro-structurale des Technosols construits selon la proportion de compost, illustrée par les courbes de retrait du sol (SSC) à l'installation et après six mois.

5.2.4 Analyse de la composition organique par Rock-Eval

Le Rock-Eval est une méthode permettant de mesurer la composition de la matière organique dans un sol ou un compost, en distinguant la matière labile (facilement dégradable, indice I) et la matière réfractaire (stable, indice R).

Les résultats obtenus pour différents taux de compost sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1: Indices I (matière labile) et R (matière réfractaire) de la matière organique mesurés par Rock-Eval pour différents taux de compost (%). Les valeurs indiquent la moyenne (Av) et l'écart-type (sd).

COMPOST (%)	I_AV	I_SD	R_AV	R_SD
0	0.315	0.0536	0.672	0.00908
10	-0.0455	0.0244	0.724	0.0308
25	0.0560	0.0534	0.653	0.0331
50	0.151	0.0795	0.585	0.0475
75	0.193	0.0434	0.558	0.0260
90	0.262	0.00587	0.515	0.00688
100	0.274	0.0111	0.509	0.00355

Le mélange avec 25 % de compost présente un indice I de 0,056 et un indice R de 0,653, valeurs comparables à celles d'un sol suisse de référence (Sebag et al., 2016), ce qui indique un bon équilibre entre matière labile et stable. Avec l'augmentation du taux de compost, l'indice I augmente progressivement, tandis que l'indice R diminue, montrant que le compost enrichit le sol en matière organique facilement dégradable tout en réduisant légèrement la fraction stable (Figure 22).

En suivant l'évolution dans le temps, le mélange à 25 % de compost se stabilise après environ 3 mois, tandis que le mélange à 50 % de compost atteint un pic de réactivité après 3 mois, puis commence à diminuer légèrement après 6 mois, suggérant que des taux plus élevés de compost nécessitent plus de temps pour atteindre un équilibre stable de la matière organique (Figure 23).

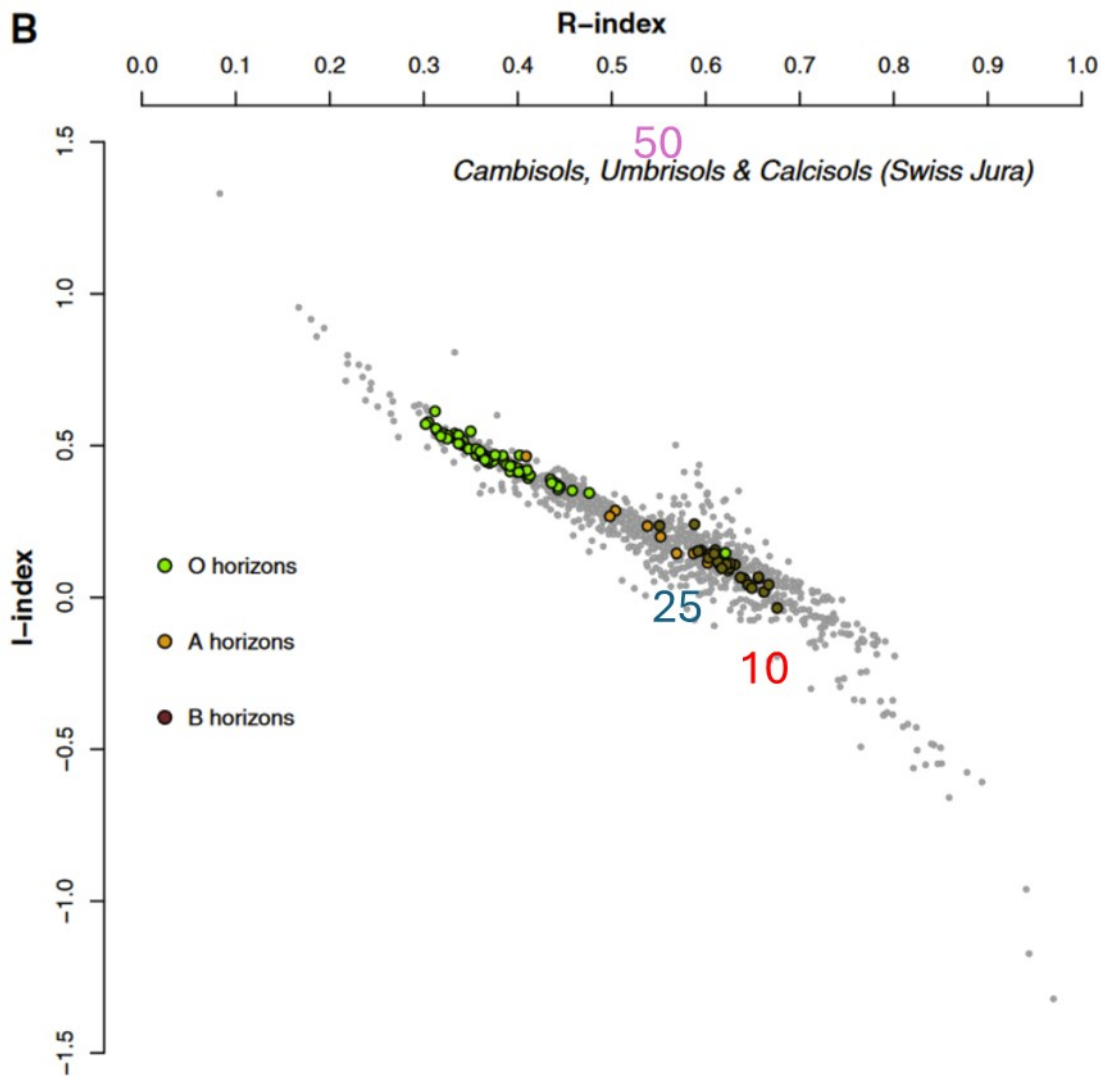


Figure 22 : Variation des indices I (matière labile) et R (matière réfractaire) en fonction du taux de compost (%) mesurée par Rock-Eval. Les valeurs du mélange à 25 % de compost sont comparées aux résultats de Sebag et al. (2016) pour un sol suisse

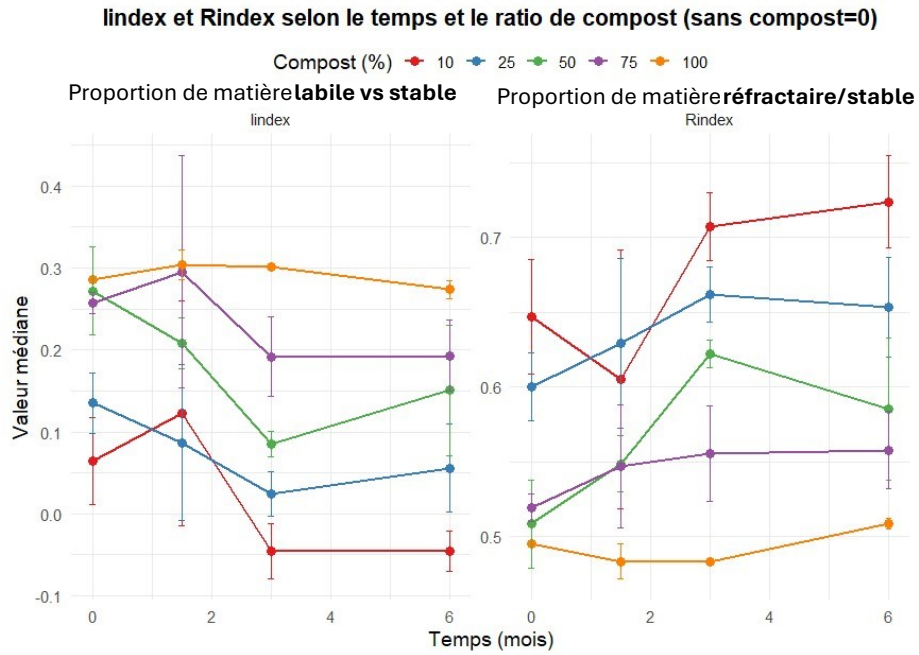


Figure 23 : Évolution des indices I et R après 6 mois d'installation

5.2.5 Influence de la profondeur et de la proportion de compost sur le développement racinaire

L'analyse conjointe de la profondeur et de la proportion de compost révèle une interaction marquée entre ces deux facteurs (Figure 24). Dans les modalités à faible teneur en compost (10 à 50 %), le ratio racines/terre reste faible (0,05 à 0,20) et relativement stable d'un horizon à l'autre.

En revanche, dans les substrats riches en compost, la distribution verticale des racines change nettement. À 75 % de compost, le ratio atteint $0,57 \pm 0,192$ à 8–16 cm et reste élevé dans les autres horizons. À 90 % de compost, une valeur maximale de $0,74 \pm 0,406$ est observée à 16–24 cm, avec une variabilité inter-réplica importante (55 % de la moyenne).

Ces résultats suggèrent que l'augmentation de la teneur en compost favorise un développement racinaire plus profond. Il est alors intéressant de mettre ces observations en regard avec le recouvrement moyen et le nombre d'espèces en fonction de la quantité de compost.

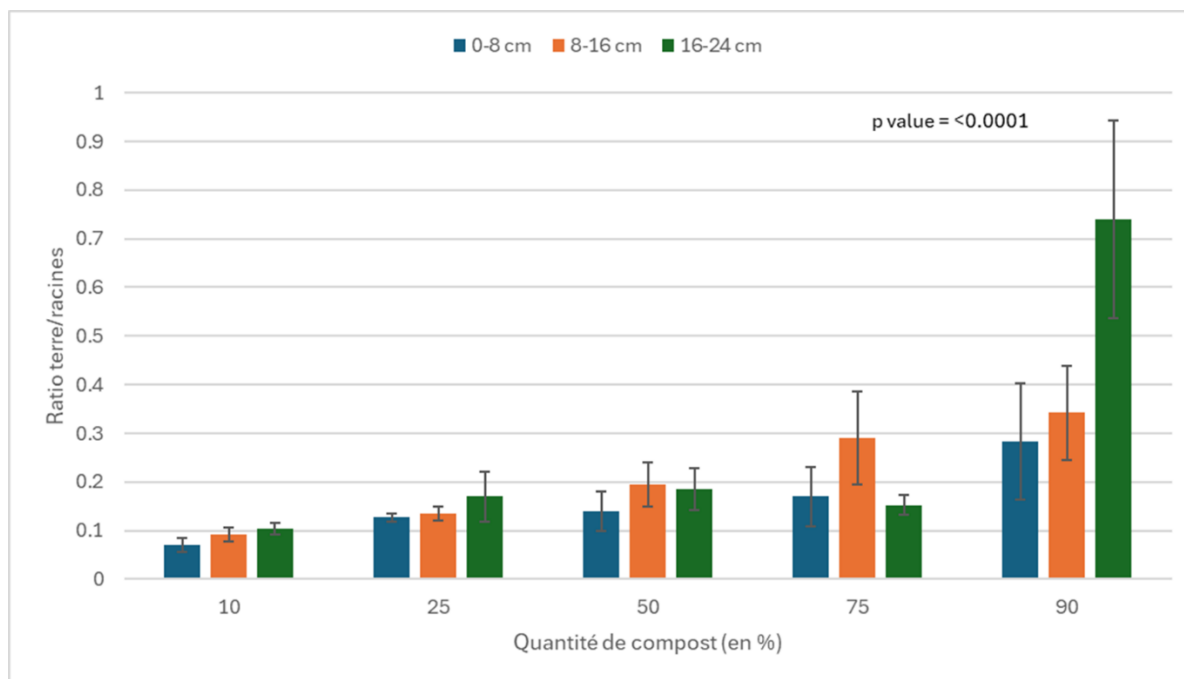


Figure 24: Influence de la profondeur et de la teneur en compost sur le développement racinaire

5.2.6 Conclusion sur les propriétés des Technosols construits

L'étude montre que la composition des matériaux parentaux et la proportion de compost influencent fortement les propriétés chimiques, physiques et biologiques des Technosols construits. Les couches géologiques excavées (CGE) utilisées sont très minéralisées, faiblement fertiles et riches en carbonates, tandis que le compost de déchets verts apporte des éléments nutritifs importants, améliorant la fertilité chimique des mélanges.

Au moment de l'installation, les mélanges présentent les caractéristiques héritées de leurs composants, avec une disponibilité limitée en certains nutriments pour les faibles proportions de compost. Après six mois, une amélioration générale de la fertilité est observée, avec une augmentation du phosphore, du magnésium, de la matière organique totale et de la capacité d'échange cationique, indiquant une stabilisation progressive des associations organo-minérales. En revanche, l'azote et le potassium diminuent, probablement en raison de l'immobilisation par la biomasse microbienne, soulignant l'importance d'un suivi temporel pour évaluer la dynamique des nutriments.

Sur le plan physique, la structure des Technosols est fortement influencée par le mélange des matériaux et la présence de compost. Les analyses par courbes de retrait (SSCs) montrent que la porosité totale et la rétention d'eau augmentent avec la proportion de compost, particulièrement pour des mélanges jusqu'à 50 %, et surtout après six mois. La distinction des phases structurale et plasmique à ce stade indique une association organo-minérale stable et une fonctionnalité hydro-structurale améliorée. Ces propriétés sont essentielles pour soutenir le développement racinaire et l'habitat des organismes du sol.

L'analyse de la composition organique par Rock-Eval révèle que les mélanges à 25 % de compost présentent un équilibre proche de celui d'un sol suisse de référence, avec stabilisation de la matière organique après trois mois. Les mélanges à plus forte proportion de compost montrent une augmentation plus rapide de la matière labile mais nécessitent plus de temps pour atteindre un équilibre stable.

Enfin, le développement racinaire est fortement influencé par la proportion de compost : les mélanges riches en compost favorisent un enracinement plus profond, tandis que les faibles proportions maintiennent un ratio racines/terre bas et stable. Ces observations suggèrent que le choix des matériaux et leur proportion dans les Technosols construits permet de moduler simultanément la fertilité chimique, la structure physique et la dynamique biologique, et qu'un suivi à long terme est nécessaire pour évaluer la durabilité et la fonctionnalité de ces sols.

6 Annexes

6.1 Annexe 1 : Liste des espèces enlevées spécifiquement lors de l'entretien de mise en place de l'expérience.

Amaranthus retroflexus, *Chenopodium album*, *Digitaria ischaemum*, *Digitaria sanguinalis*, *Echinochloa crus-galli*, *Fallopia convolvulus*, *Lactuca serriola*, *Panicum capillare*, *Picris hieracioides*, *Picris echioides*, *Polygonum aviculare*, *Polygonum persicaria*, *Portulaca oleracea*, *Robinia pseudoacacia*, *Setaria italica*, *Setaria viridis*, *Solanum nigrum*, *Sonchus asper*.