

Les substrats Exosol® : synthèse des connaissances

Aout 2025

Contexte

La végétalisation des villes permet l'adaptation au changement climatique en réduisant l'îlot de chaleur et le ruissellement causé par les pluies intenses. Cependant, elle nécessite de grandes quantités de terre végétale, une ressource non-renouvelable. Son prélèvement et son transport sont coûteux et grèvent le bilan carbone des villes. En parallèle, les chantiers de construction en milieu urbain produisent des quantités importantes de matériaux excavés qui finissent fréquemment en décharge, générant d'autres coûts financiers et environnementaux. A titre d'exemple le canton de Genève produit plus de 1 000 000 m³ de matériaux d'excavation par an (de Candolle 2023) et, en 2010, entre 18 et 22 millions de m³ de matériaux d'excavation non-pollués étaient stockés en Suisse (Schneider 2011).

Pour résoudre ce problème, les Technosols construits, ou anthroposols reconstitués (selon le référentiel pédologique français ; Baize 2014), ont été proposés comme solution pour la mise en place d'espaces verts urbains (Cannavo et al., 2018 ; Deeb et al., 2020). Ils sont fabriqués localement à partir de matériaux d'excavation (horizons C, par exemple), et de matière organique (compost de déchets verts, par exemple). Une importante littérature scientifique a été publiée sur le sujet depuis le début des années 2010 (voir https://www.terasol.ch/wp-content/uploads/2025/04/Liste-bibliographique-technosols_07_24.pdf), mais peu de produits sont actuellement commercialisés.

Les substrats Exosol®

Pour répondre à ces défis, l'entreprise Terasol SA a créé Exosol®, une gamme de substrats fertiles fabriqués à partir de matériaux d'excavation (horizon C) et de produits résiduaux organiques (principalement, compost de déchets verts), appartenant à la catégorie pédologique des anthroposols reconstitués. Ils sont destinés à la mise en place d'espaces verts urbains.

Le processus de fabrication des substrats Exosol® est présenté en Figure 1. Brièvement, les matériaux d'excavation sont analysés afin de vérifier l'absence de pollution et leur potentiel de revalorisation agronomique. Ils sont ensuite mélangés avec la matière organique, selon un processus mis au point par Terasol. Le substrat produit est disposé en andains et ensemencé avec un mélange plurispécifique (légumineuses, graminées...) de 13 espèces pour une étape de maturation, qui peut durer jusqu'à 18 mois. Cette étape cruciale va permettre la formation d'un complexe argilo-humique, d'une porosité et d'une structure stables, sous l'action de la variabilité climatique (cycles dessiccation-réhumectation et gel-dégel), du développement racinaire et de la colonisation par les vers de terre (Vidal-Beaudet et al., 2016 ; Deeb et al., 2017 ; Jangorzo et al., 2018). Au-cours de cette étape d'autres phénomènes peuvent également se produire, comme le lessivage des argiles, la dissolution des carbonates, une baisse du pH et une modification de la disponibilité en phosphore pour les plantes (Vidal-Beaudet et al., 2018 ; diedhiou 2022). Ces évolutions des substrats sont cruciales afin qu'ils acquièrent des propriétés fonctionnelles leur permettant de fournir les services écosystémiques attendus par les populations urbaines. Cela concerne en particulier les fonctions écosystémiques suivantes : fournir des nutriments aux plantes, maintenir une structure favorable à la croissance végétale, stocker du carbone, infiltrer,



stocker et transférer l'eau, retenir ou dégrader les contaminants et servir d'habitat aux organismes du sol (Cousin et al., 2024 ; O'Riordan et al., 2021).

Néanmoins, les caractéristiques des Technosols construits à partir d'horizons C, et leur évolution au cours du temps, sont mal connues (voir Annexe 1). Ici, nous présentons une synthèse des connaissances accumulées sur les horizons C excavés et sur les substrats Exosol® sur la période 2023-2025, ainsi que les grands enjeux de production de connaissance identifiés pour les prochaines années.



Figure 1 Représentation schématique du processus de fabrication des substrats Exosol®.

Les matériaux excavés (horizons C)

Les caractéristiques des horizons C excavés, qui constituent l'essentiel de la matière première utilisée pour la fabrication des substrats, sont peu connues. En effet, à la différence des horizons superficiels (A et B), il n'existe pas de programme d'analyse systématique (comme le programme LUCAS dans l'union Européenne ou le RMQS en France) ni de base de données (comme NABODAT en Suisse). Pourtant, nombre des caractéristiques des substrats Exosol® vont être héritées ou fortement déterminées par les caractéristiques de la matière première. Ceci concerne par exemple la texture, le pH ou la capacité d'échange cationique.

Ici, nous utilisons une base de données interne à l'entreprise Terasol, composée d'analyses sur 12 horizons C excavés en Suisse occidentale (considérés comme propre ou non à la fabrication de substrats) (Figure 2), que nous comparons aux valeurs mesurées dans les horizons A de Suisse ou d'Europe dans le cadre du programme LUCAS (Fernandez-Ugualde et al., 2020).

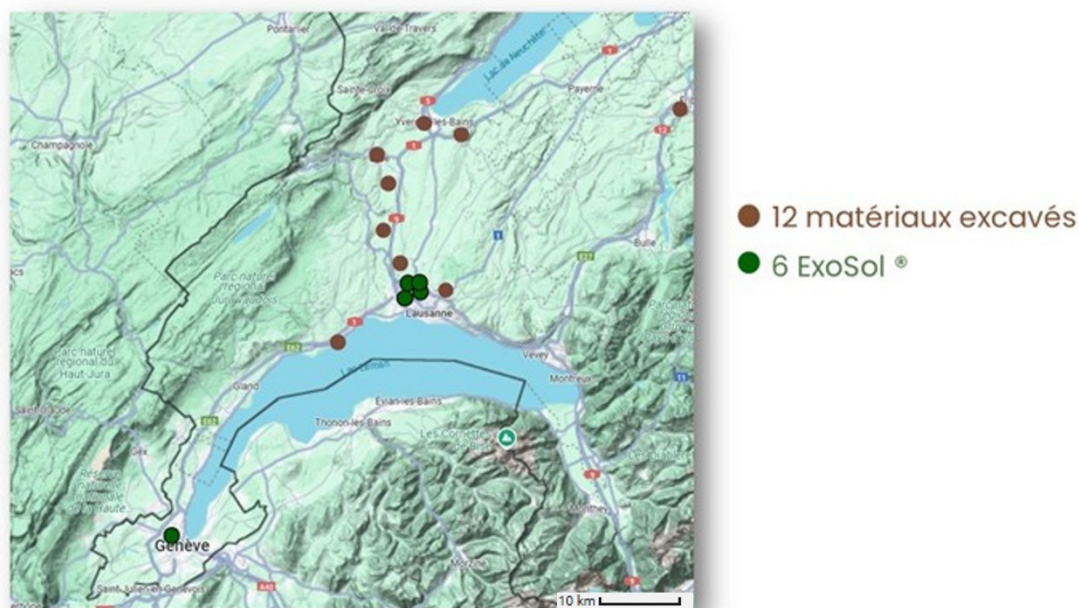


Figure 2 Localisation des sites d'origine des matériaux excavés et des lieux de mise en œuvre des substrats ExoSol®

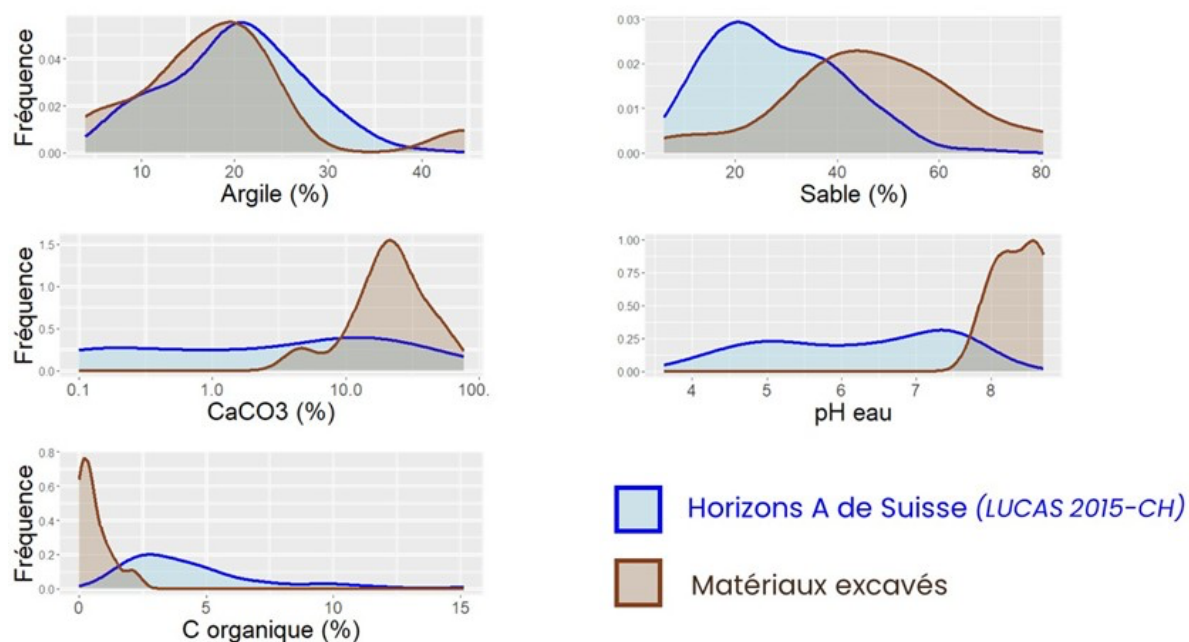


Figure 3 Comparaison des horizons C excavés aux horizons A des sols de Suisse. La distribution des valeurs est représentée par estimation par noyau (paramètre de lissage estimé suivant la règle de Silverman).

Comparés aux horizons A, les horizons C de Suisse occidentale sont plus sableux et présentent des teneurs en carbonates élevées (en moyenne 25 %) qui sont responsables de pH eau basiques (en

moyenne 8,35) (Figure 3). Le pH KCl est légèrement inférieur (en moyenne 7,9) et la capacité d'échange cationique est de 17,4 cmol+/kg, proche de celle mesurée dans les horizons A européens (16,9 cmol+/kg ; Jones et al., 2020). Sans surprise, la teneur en carbone organique (en moyenne 0,57 %), ainsi que la teneur en phosphore disponible pour les plantes (en moyenne 17,8 mg/kg), sont particulièrement faibles.

Des mesures de la composition en argiles minéralogiques par diffraction des rayons X ont également été effectuées sur un échantillon de type morainique provenant de la commune de Bavois et utilisé pour la production de substrats (Puglia 2025). Elles montrent une prédominance de l'illite, de la chlorite et de la smectite (Figure 4). L'illite et la smectite sont des argiles avec des surfaces spécifiques particulièrement élevées, ce qui pourrait être favorable à la formation du complexe argilo-humique. De plus, le mélange d'argiles gonflantes (smectite) et non-gonflante (illite) pourrait augmenter la stabilité structurale en diversifiant les mécanismes de stabilisation des agrégats (El Farricha 2022 ; Chalhoub et al., 2025).

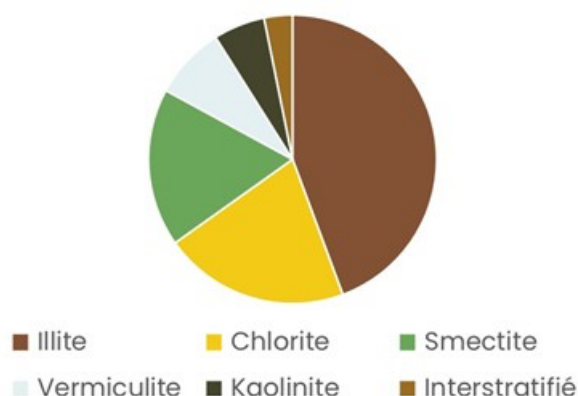


Figure 4 Composition minéralogique des argiles, déterminée par diffraction aux rayons X, dans un échantillon d'horizon C excavé provenant de la commune de Bavois (VD).

Caractéristiques des substrats Exosol® au-cours du temps

Les caractéristiques des substrats Exosol® ont été mesurées sur 6 substrats en place et végétalisés depuis au-moins 8 mois (Figure 2).

Les substrats Exosol® ont, en moyenne, une texture limono-sablo-argileuse, une teneur en carbonate de 24 % et un pH eau de 8,05. Ces caractéristiques sont largement héritées de l'horizon C utilisé pour leur fabrication. La teneur en matière organique (en moyenne 4,3 %), le ratio C:N (en moyenne 11,3) et la teneur en phosphore disponibles pour les plantes (en moyenne 88,1 mg/kg) sont très variables (Figure 5) et largement déterminées par les choix de quantité et de qualité de la matière organique incorporée à la fabrication. La capacité d'échange cationique (CEC), en moyenne de 10,6 cmol+/kg, est un peu plus faible que dans les sols d'Europe (16,9 cmol+/kg ; Jones et al., 2020). Nous ne disposons pas d'assez de données pour savoir si la valeur de CEC est héritée du matériau excavé parental ou si elle est augmentée par l'incorporation de matière organique. La biomasse microbienne est un peu plus faible que la

moyenne observée dans les sols de Suisse (Figure 5) mais, comme généralement observé (Dequiedt et al., 2011), elle est largement déterminée par la teneur en matière organique (Figure 6).

La densité apparente mesurée à -10 hPa (Boivin et Deluz 2024) est en moyenne de 1,04 g/cm³, identique à celle mesurée dans les sols d'Europe (Panagos et al., 2024). La porosité totale est en moyenne de 60 %, et le réservoir utile, estimé à partir de la fonction de pédotransfert de Roman Dobarco et al. (2019), est en moyenne de 0,17 cm³ d'eau /cm³ de sol. Des tentatives de mesures de la conductivité hydraulique à saturation ont été faites par essai Porchet automatisé mais il n'a pas été possible d'atteindre la saturation, les substrats étant trop drainants. D'autres techniques de mesure de la conductivité hydraulique devraient être testées.

Peu de données ont été obtenues sur la stabilité structurale des agrégats. Sur un des substrats Exosol®, les agrégats ont été classés comme stables (diamètre moyen pondéré 1,8 mm) en utilisant la méthode Le Bissonnais (Le Bissonnais et Le Souder 1995). Sur trois autres, une stabilité moyenne (entre 40 et 51 % d'agrégats stables) a été observée en utilisant la méthode de Nyamasoka-Magonziwa et al. (2020). Par ailleurs, des tests menés sur des échantillons remaniés en laboratoire (Deluz et al., 2025), montrent que les horizons C utilisés pour la construction des substrats Exosol® possèdent un bon potentiel de structuration, avec formation d'une porosité structurale et une bonne stabilité des agrégats (Puglia 2025).

Comparé aux sols d'Europe (Figure 7), les substrats Exosol® ont un excès de matière organique particulaire (dite aussi « libre »). Cette situation est probablement liée au jeune âge des substrats (maximum 2 ans) : la matière organique est encore peu intégrée dans les micro-agrégats (<50µm). Ceci est confirmé par les ratios C:N mesurés sur les différentes fractions granulométriques des substrats : le C:N de la matière organique liée (fraction <50µm) est en moyenne de 8,9, proche du C:N des sols d'Europe, tandis celui de la matière organique particulaire est de 20, similaire au C:N du compost utilisé pour la fabrication (C:N moyen : 27). Les mesures de minéralisation potentielle de la matière organique lors d'incubations donnent des indices de minéralisation forts à très forts pour le carbone, ce qui confirme la présence d'une matière organique facilement décomposable, non-protégée par son association avec les constituants minéraux du sol. Cependant, les indices de minéralisation de l'azote sont parfois faibles voir nuls, ce qui indique un risque de faim d'azote, comme confirmé par la différence entre le C/N de la matière organique libre et celui de la biomasse microbienne (en moyenne 6,6 dans les substrats Exosol®). Ce risque est confirmé par un développement plus important des légumineuses par rapport aux graminées dans les couverts implantés sur les substrats Exosol®.

Les indices de minéralisation devraient diminuer et le pourcentage de matière organique dans la fraction liée augmenter au-cours des prochaines années. Le suivi pluriannuel des substrats permettra de vérifier cette hypothèse.



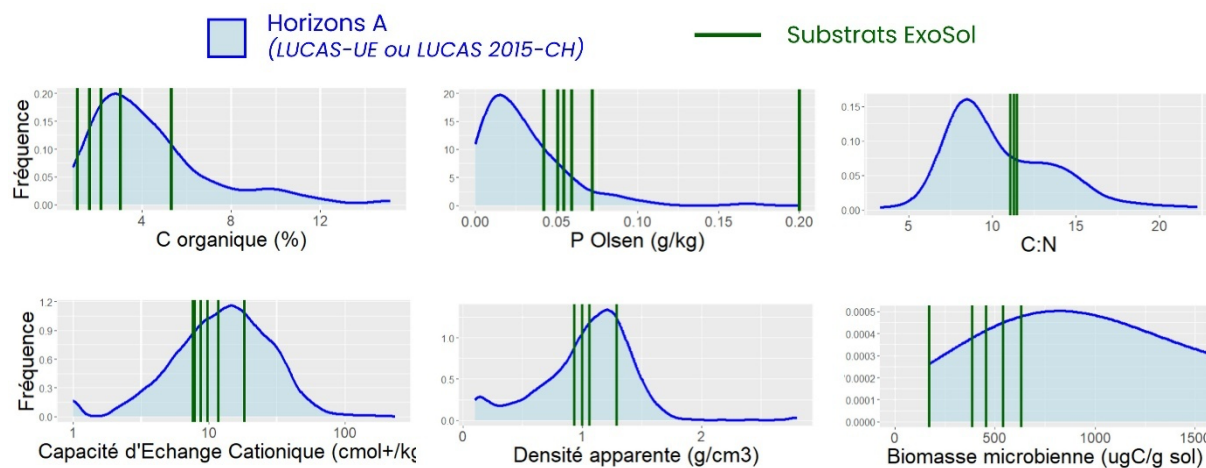


Figure 5 Comparaison des substrats Exosol® aux horizons A des sols de Suisse (C organique, P Olsen, C:N, biomasse microbienne) ou d'Europe (capacité d'échange cationique, densité apparente). La distribution des valeurs est représentée par estimation par noyau (paramètre de lissage estimé suivant la règle de Silverman).

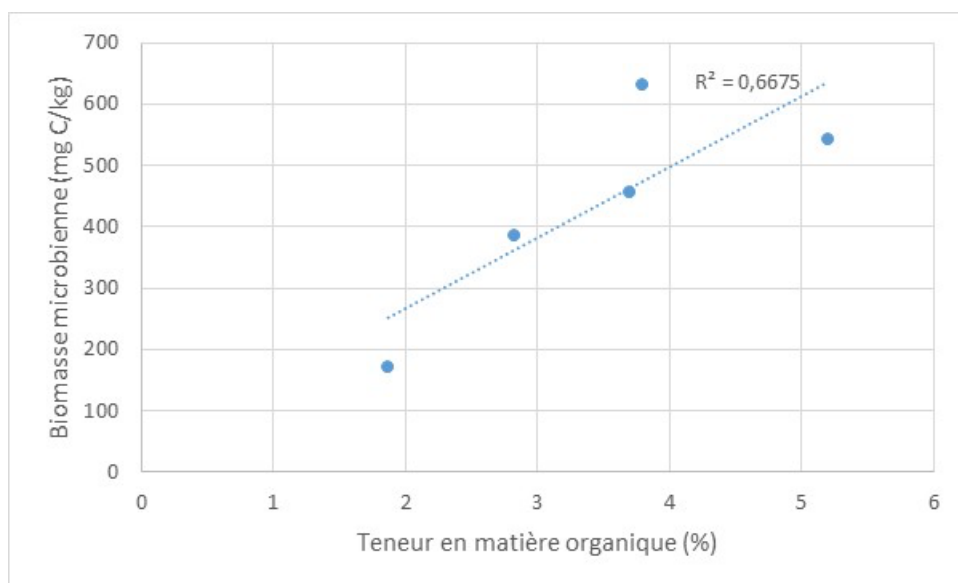


Figure 6 Corrélation entre la teneur du substrat en matière organique et la biomasse microbienne mesurée par fumigation-extraction. R^2 : coefficient de détermination de Pearson.

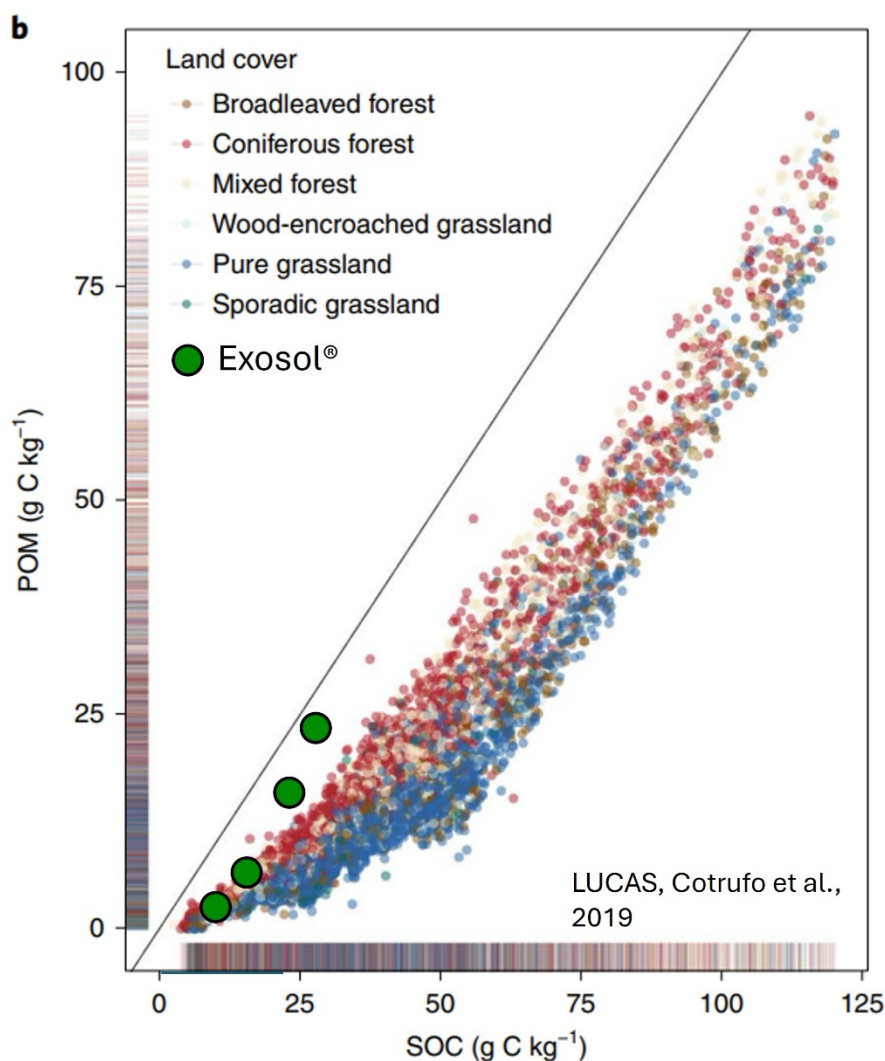


Figure 7 Position des substrats Exosol® par rapport aux sols d'Europe en fonction de la relation entre teneur en carbone organique total et teneur en carbone organique particulaire (présent dans la fraction granulométrique supérieure à 50µm). Les données des sols d'Europe sont issues de Cotrufo et al. (2019).

Evolution des substrats Exosol® au-cours du temps

Les substrats Exosol® évoluent d'abord rapidement, au-cours des 6 à 9 premiers mois de la maturation, puis plus lentement. Le pH eau diminue fortement dès les premiers mois de la maturation (Figure 8-A). Un substrat construit avec un matériel d'excavation carbonaté et très alcalin (pH eau 8,7) est ainsi descendu à pH 7,7 en l'espace de 6 mois. Le phosphore disponible pour les plantes augmente fortement dans les premiers mois suivant la fabrication puis diminue lentement (Figure 8-B). La structure varie également fortement au-cours de la première année. Elle est initialement particulaire, avec une absence presque totale d'agrégats, à l'exception de mottes fermées avec traces d'anoxie (Figure 9), héritées du matériau excavé parental. Au-bout de 6 mois à un an, en fonction de leur texture, les substrats perdent leur caractère particulaire et commencent à développer une structure. Evalués dans le système de notation VESS (Johannes et al., 2020), ils atteignent les notes Sq2 ou Sq3 (Figure 8-C). L'évolution de la structure est probablement liée au développement de la végétation, les agrégats se formant

préférentiellement autour des racines. Ces agrégats se montent particulièrement stables, même après quelques mois de maturation.

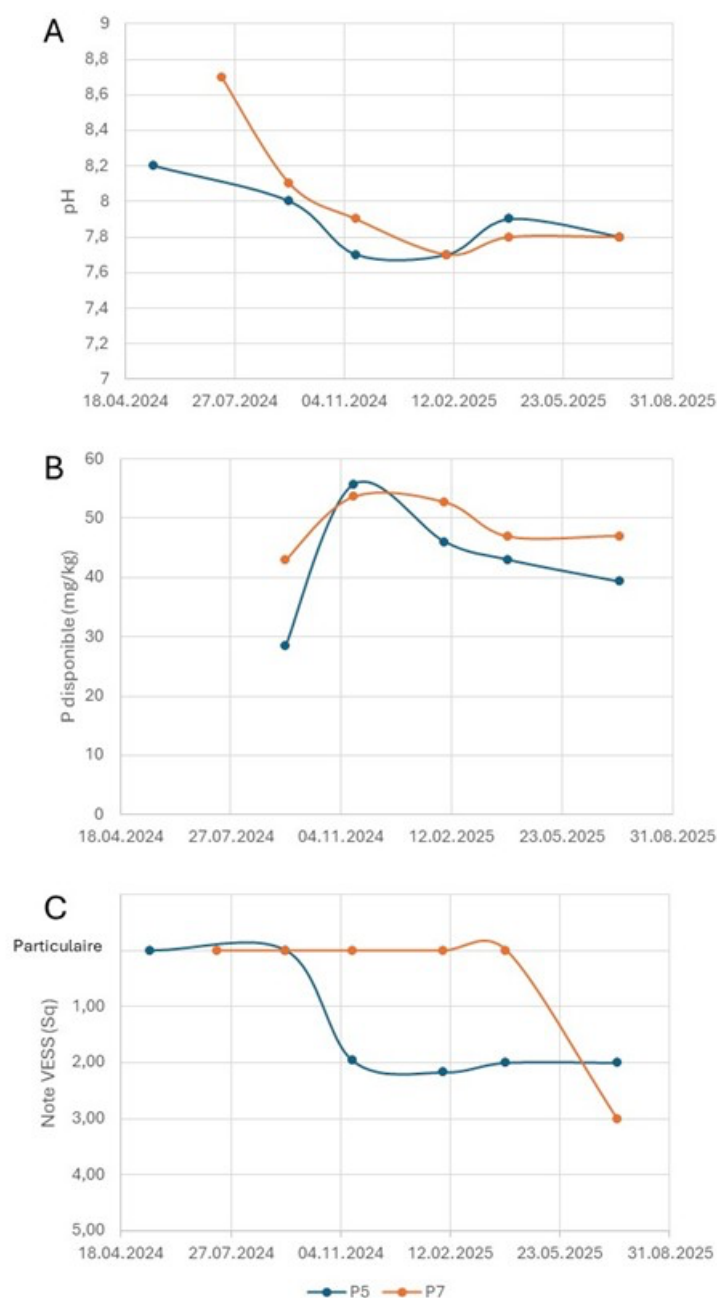


Figure 8 Evolution d'un Exosol® argilo-sablo-limoneux (P5) et d'un Exosol® sableux (P7) au-cours de la maturation. A- pH eau ; B- P disponible (AAE-10) ; C- Notation VESS

La thermolabilité de la matière organique, considérée comme un proxy de sa biodisponibilité (Plante et al., 2009), a été suivie par pyrolyse Rock-Eval. De manière générale, la matière organique des substrats Exosol® est moins thermolabile et plus mature que les produits organiques (fumier, compost) utilisés pour la fabrication, dès 2 à 4 mois de maturation, et se rapproche des valeurs mesurées dans les sols (Figure 10). Sur un pas de temps inférieur à l'année, elle évolue peu et sans direction claire. Cependant,



Figure 9 Evolution de la structure d'un Exosol® argilo-sablo-limoneux (P5) et d'un Exosol® sableux (P7), évaluée par test bêche au-cours de l'année suivant la fabrication.

le suivi pluriannuel permet d'observer une diminution de l'indice de teneur en hydrogène d'une année à l'autre, indiquant une maturation de la matière organique. L'évolution de la matière organique se poursuivra probablement à un rythme lent sur plusieurs années. Le suivi pluriannuel des substrats permettra également d'observer d'autres phénomènes lents : lessivage des argiles, dissolution des carbonates, variation de la teneur en matière organique.

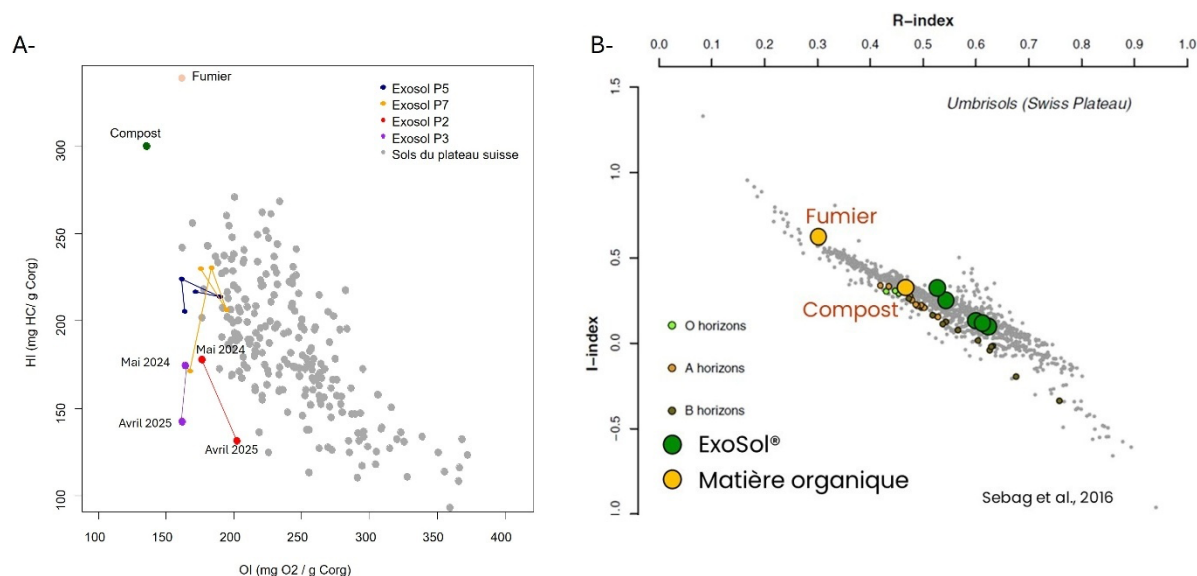


Figure 10 Labilité thermique de la matière organique mesurée par pyrolyse Rock-Eval. A- Indices de teneur en hydrogène (HI) et de teneur en oxygène (OI). L'indice HI tend à diminuer au-cours de l'évolution de la matière organique et l'indice OI tend à augmenter. Pour les Exosol® P5 et P7, les points correspondent à différentes mesures réalisées au-cours de la même année (2024-2025). Les données sur les sols du plateau suisse proviennent de Deluz et al. (2024), B- Indices Immature (I-index) et Refractaire (R-index). L'indice I diminue et l'indice R augmente au-cours de l'évolution de la matière organique. Les données sur les horizons O, A et B correspondent aux umbrisols du plateau suisse et les points gris à l'ensemble des mesures sur litières et sols de Sebag et al. (2016).

Croissance de la végétation

Le principal service écosystémique attendu des substrats Exosol® est la capacité à supporter la croissance de la végétation, et en particulier des arbres. La croissance d'un couvert herbacé installé sur un Exosol® (avenue du Grey, Lausanne) a été suivie tous les 15 jours pendant un an. Le couvert présentait une biomasse aérienne de 5,4 T matière sèche/ha (estimation par prélèvements destructifs en juin 2024), supérieure à celle observée pour des couverts d'interculture agricole implantés à la même saison (Briaud et Minette 2023). Il présentait également une bonne capacité de reprise après la fauche (Figure 11). Sur les 35 arbres plantés dans le substrat, 94 % étaient encore vivants après un an (Annexe 2). Un suivi pluriannuel permettra de mesurer le taux de survie et la croissance des arbres sur les prochaines années.



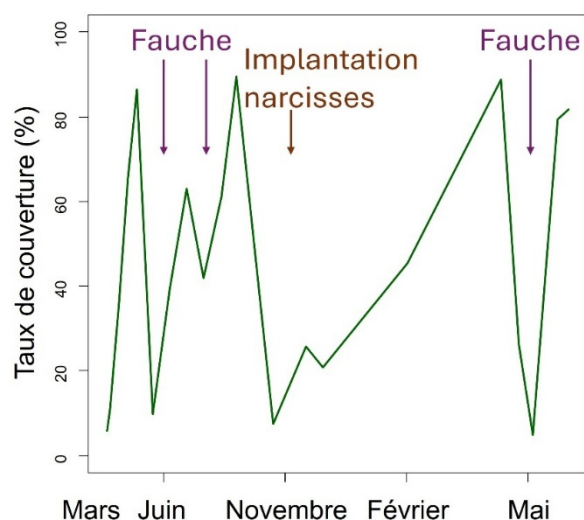


Figure 11 En haut : taux de couverture végétale d'un substrat Exosol® (avenue du Grey, Lausanne), mesuré tous les 15 jours pendant un an avec l'application Canopeo. En bas : suivi photographique du couvert entre mai 2024 et mai 2025.

Colonisation par les vers de terre

Les vers de terre endogés et épigés jouent un rôle important dans l'agrégation des technosols construits (Pey et al., 2013 ; Deeb et al., 2017) et dans le fonctionnement écosystémique des sols (Sharma et al., 2017) : infiltration d'eau, rétention du carbone, disponibilité des nutriments pour les plantes... Le rôle des conditions initiales et les durées nécessaires à la colonisation des Technosols construits par les vers de terre sont mal connues (Vergnes et al., 2017 ; Burrow et al., 2018) mais pourraient se chiffrer en années.

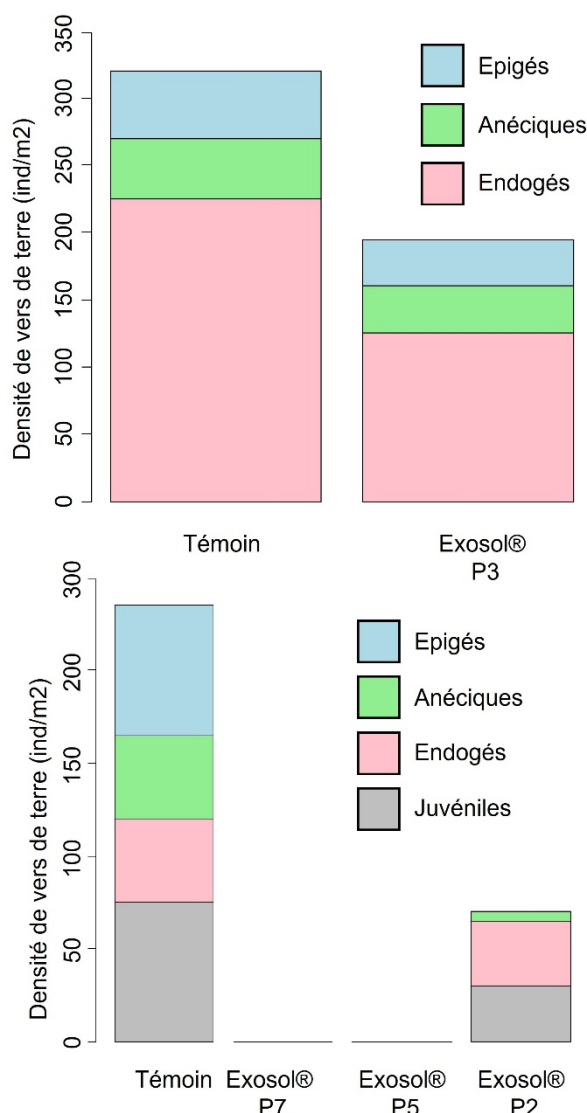


Figure 12 Densités de vers de terre observées dans les substrats Exosol®. En haut, avenue du Grey, à Lausanne. En bas, substrats en cours de maturation sur le site du SPADOM (Lausanne). Voir Annexe 3 pour la description des différents substrats et de leur localisation. Le témoin correspond à la zone végétalisée la plus proche, source probable de colonisation.

Des comptages de vers de terre ont été effectués afin de vérifier que les substrats Exosol® peuvent leur fournir un habitat. Afin de tenir compte du contexte dans lequel sont implantés les substrats et des possibilités de colonisation, les densités de vers de terre ont également été mesurées dans la zone végétalisée la plus proche, source probable de colonisation. Le protocole d'échantillonnage est présenté en Annexe 3.

Un substrat Exosol®, fabriqué depuis 2 ans, et en place depuis un an (avenue du Grey, Lausanne), présentait une densité moyenne de vers de terre de 195 individus/m², avec une majorité de vers endogés (Figure 12-Haut). La proportion des différents groupes fonctionnels et la densité de vers de terre étaient similaires à celles observées dans les sols de grande culture en France (197 individus/m² ; Delourme et al., 2025). La zone source probable de colonisation, en place depuis plusieurs années,

présentait des densités plus élevées, ce qui laisse espérer une augmentation des populations de vers dans l'Exosol® sur les prochaines années.

Deux autres substrats Exosol® (P5 et P7), fabriqués depuis moins d'un an, ne présentaient encore aucune colonisation par les vers de terre, ce qui peut être attribué à leur jeune âge (Figure 12-Bas). L'Exosol® P2, fabriqué à partir de digestat de lisier depuis 2 ans, présentait une faible colonisation par les vers de terre (70 individus/m²), qui pourrait être liée à sa faible teneur en matière organique (1,9 %).

Questions ouvertes et perspectives

De nombreuses questions restent ouvertes quant à l'évolution des substrats Exosol®.

L'évolution de la teneur en matière organique à l'horizon 5-10 ans n'est pas connue mais déterminera l'évolution des caractéristiques fonctionnelles des substrats. Elle pourrait diminuer sous l'effet de la minéralisation, ou augmenter suite à l'entrée de litière aérienne et racinaire. Les substrats Exosol® sont souvent construits à partir de matériaux riches en carbonates. Au cours de la vie du substrat, il est probable que ces carbonates se dissolvent. Aux conditions de pH des substrats Exosol® (supérieur à 7), la dissolution des carbonates peut être un puits de CO₂, pour peu que les ions bicarbonates dissous parviennent à rejoindre la nappe phréatique (Rengasamy et al., 2022). L'évolution de la teneur en matière organique, comme celle de la teneur en carbonates seraient donc à prendre en compte pour évaluer les capacités de séquestration de carbone des substrats Exosol®. Le suivi pluriannuel des substrats permettra de répondre à ces questions.

La capacité à absorber les fortes précipitations est un des principaux services écosystémiques attendus des sols urbains, afin de réduire le risque d'inondation. Dans l'état actuel des connaissances, les capacités d'infiltration et de rétention d'eau des substrats Exosol® sont mal connues. Un projet est actuellement en-cours de montage avec la Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture-Fribourg afin de les mesurer et de les comparer à des sols ayant des usages similaires (fosses de plantation). Un autre objectif serait de savoir si les fonctions de pédotransfert, développées en sols agricoles pour prédire la taille du réservoir utile (Roman Dobarco et al., 2019) et la conductivité à saturation (Gupta et al., 2021) à partir de mesures physico-chimiques simples (granulométrie, teneur en matière organique, éventuellement densité apparente), sont utilisables sur les substrats ExoSol®. Cela permettrait de prédire le réservoir utile et la capacité de drainage des substrats à partir des caractéristiques des matériaux initiaux.

Une fois en place, les substrats Exosol® sont colonisés par les organismes. Des programmes de suivi sont en cours afin d'évaluer la capacité des substrats à servir d'habitat pour la faune du sol. Dans le cadre du projet Toiture Vivante, des mesures d'écotoxicité sur enchytraeides et nématodes seront effectuées par EnviBioSoil SA sur des substrats Exosol® enrichis en biochar et destinés à la végétalisation de toiture. Ces substrats seront ensuite installés sur la toiture de la Maison de la Rivière (Tolochenaz, VD) et ensemencés avec différents mélanges végétaux (Figure 13-Haut). La biodiversité de plantes et d'organismes du sol (collemboles, vers de terre, nématodes, bactéries et champignons), ainsi que leur capacité à dégrader la matière organique (test Bait Lamina), seront mesurées au bout d'un an afin d'évaluer la capacité des substrats à héberger ces organismes. Des suivis de colonisation de substrats de végétalisation de toiture par les microarthropodes (collemboles, acariens) ont également lieu dans le cadre du projet Mirage Urbain (Figure 13-Bas), sur le site de l'entreprise Eltel (Donneloye, VD).



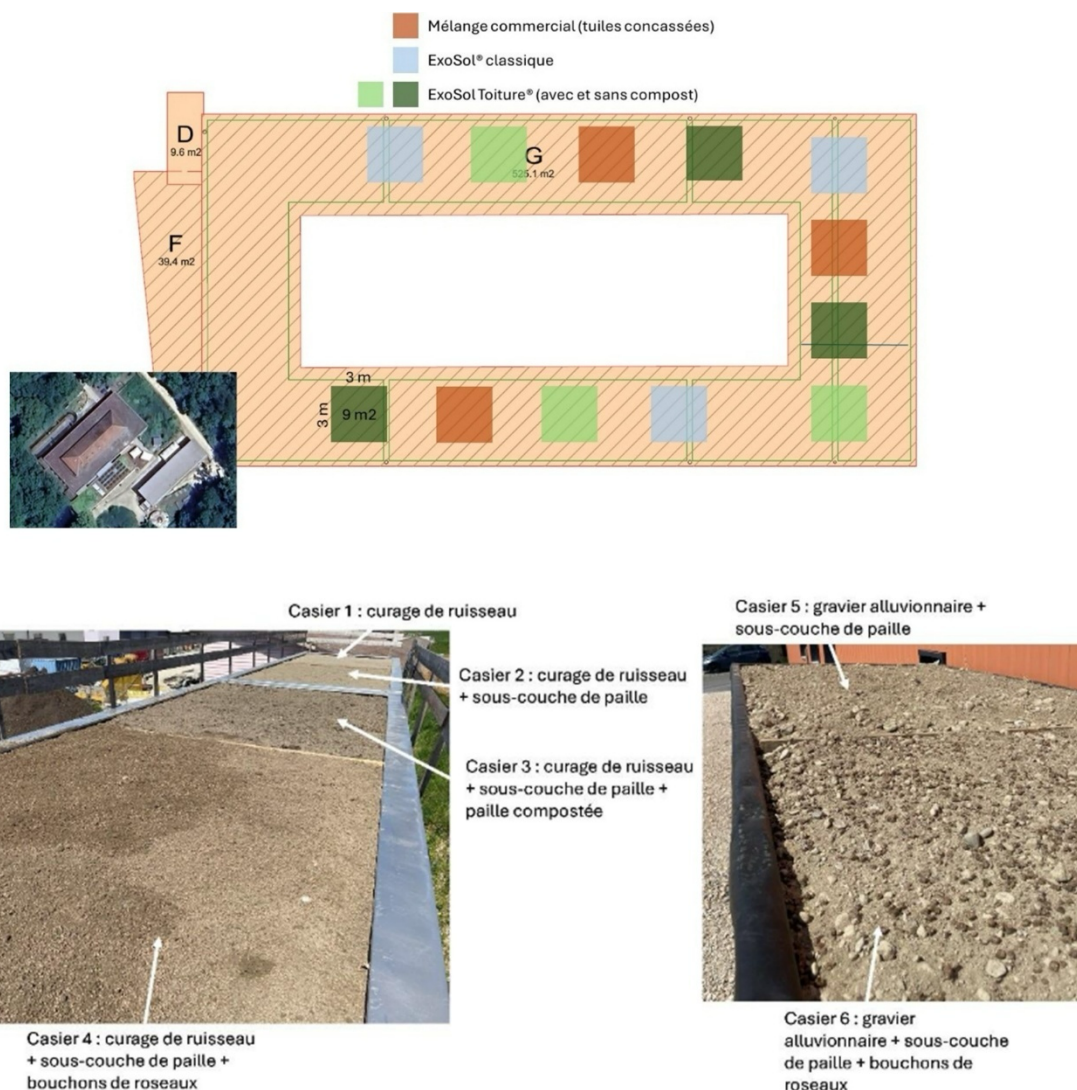


Figure 13 Dispositifs expérimentaux de suivi de la colonisation des substrats de végétalisation de toiture par les organismes. En haut, plan du dispositif expérimental prévu dans le cadre du projet Toiture Vivante. En bas, photographie du dispositif expérimental dans le cadre du projet Mirage urbain.

Conclusion

Les caractéristiques mesurées sur les substrats Exosol® sont proches de celles observées sur les sols d'Europe. Les mesures des paramètres physico-chimiques indiquent une bonne capacité à fournir des nutriments minéraux pour la croissance végétale. La densité apparente moyenne, la formation d'une porosité et la présence d'aggrégats stables sont favorables à la croissance racinaire et à l'infiltration des eaux de pluie. Les substrats semblent également avoir une bonne capacité à héberger les vers de terre, à condition de présenter une teneur en matière organique suffisante.

Un suivi pluriannuel permettra de suivre l'évolution des paramètres physico-chimiques, la croissance de arbres et la colonisation par les vers de terre, afin de mieux connaître la capacité des substrats à fournir des services écosystémiques aux habitants des zones urbaines.

Bibliographie

- Baize, D. (2014). *Les ANTHROPOSOLS selon le Référentiel pédologique 2008*.
- Boivin, P., & Deluz, C. (2024). *Méthode de mesure de la densité apparente d'un échantillon de sol*.
- Briaud, Q., & Minette, S. (2023). *Analyse de la base de données MERCI*. www.methode-merci.fr
- Burrow, C., Pernin, C., & Lepretre, A. (2018). Influence of connectivity & topsoil management practices of a constructed technosol on pedofauna colonization: A field study. *Applied Soil Ecology*, 123, 416–419. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.12.001>
- Cannavo, P., Guénon, R., Galopin, G., & Vidal-Beaudet, L. (2018). Technosols made with various urban wastes showed contrasted performance for tree development during a 3-year experiment. *Environmental Earth Sciences*, 77(18). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7848-x>
- Chalhoub, M., Coussy, S., Simon, J., & Bataillard, P. (2025). Potential of clay-rich waste and industrial by-products as effective inorganic soil amendments to enhance soil physical properties. *Soil Use and Management*, 41(1). <https://doi.org/10.1111/sum.70015>
- Cotrufo, M. F., Ranalli, M. G., Haddix, M. L., Six, J., & Lugato, E. (2019). Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, 12(12), 989–994. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>
- Cousin, I., Desrousseaux, M., & Leenhardt, S. (2024). *Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. Synthèse du rapport d'étude, INRAE (France)*.
- de Candolle, B. (2023). *Rapport de la commission de l'environnement et de l'agriculture chargée d'étudier le rapport du Conseil d'Etat au Grand Conseil sur la pétition : Non à la décharge de matériaux inertes d'excavation*.
- Deeb, M., Desjardins, T., Podwojewski, P., Pando, A., Blouin, M., & Lerch, T. Z. (2017). Interactive effects of compost, plants and earthworms on the aggregations of constructed Technosols. *Geoderma*, 305, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.014>
- Deeb, M., Groffman, P. M., Blouin, M., Perl Egendorf, S., Vergnes, A., Vasenev, V., Cao, D., Walsh, D., Morin, T., & Séré, G. (2020). Using constructed soils for green infrastructure – challenges and limitations. *Soil, European Geosciences Union (EGU)*, 6(2), 413–434. <https://doi.org/10.5194/soil-6-413-2020>
- Delourme, L. (2025). Distribution des communautés lombriciennes de France – premiers résultats du programme RMQS Biodiversité. *17e Journées d'étude Des Sols*.
- Deluz, C., Deluz, A., Keller, T., Doetterl, S., & Boivin, P. (2025). Shrinkage analysis of repacked soil samples enables quantifying the soil's potential physical quality. *Soil Science Society of America Journal*, 89(2). <https://doi.org/10.1002/saj2.70033>
- Deluz, C., Sebag, D., Verrecchia, E., & Boivin, P. (2024). Soil organic matter thermal pools as influenced by depth, tillage, and soil texture – A Rock-Eval® analysis study on the cropland soils of the Swiss Plateau. *Geoderma*, 445. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116871>
- Dequiedt, S., Saby, N. P. A., Lelievre, M., Jolivet, C., Thioulouse, J., Toutain, B., Arrouays, D., Bispo, A., Lemanceau, P., & Ranjard, L. (2011). Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influenced by soil characteristics and management. *Global Ecology and Biogeography*, 20(4), 641–652. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00628.x>



- Diedhiou A. (2022). Lyon (69) : Démonstrateur TERNATEC Champ. Suivi de plateforme et évolution des terres.
- El Farricha, S. (2022). *Fabrication d'agrégats à partir de déchets : recherche sur l'incorporation d'argiles réactives dans des matériaux dédiés aux filières de construction de sol* [Université de Limoges]. <https://theses.hal.science/tel-04520985>
- Jangorzo, N. S., Watteau, F., Schwartz, C., & Schwartz Ranking, C. (2018). Ranking of wetting-drying, plant, and fauna factors involved in the structure dynamics of a young constructed Technosol. *Journal of Soils and Sediments*, 18(9). <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1968-5>
- Jones, A., Fernandez-Ugalde, O., & Scarpa, S. (2020). *LUCAS 2015 Topsoil Survey. Presentation of dataset and results*.
- Gupta, S., Hengl, T., Lehmann, P., Bonetti, S., & Or, D. (2021). SoilKsatDB: global soil saturated hydraulic conductivity measurements for geoscience applications. *Earth System Science Data*, 13, 1593–1612. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3752721>
- Le Bissonnais, Y., & Le Souder, C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Étude et Gestion Des Sols*, 2(1), 43–56.
- Le Duc, N. (2024). Région Ile-de-France. Cadrage des enjeux et des objectifs du PRPGD. In CLUSTER eau milieux sols (Ed.), *Atelier création de terre végétale et fertile en ville*.
- Nyamasoka-Magonziwa, B., Vanek, S. J., Ojiem, J. O., & Fonte, S. J. (2020). A soil tool kit to evaluate soil properties and monitor soil health changes in smallholder farming contexts. *Geoderma*, 376. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114539>
- O'Riordan, R., Davies, J., Stevens, C., Quinton, J. N., & Boyko, C. (2021). The ecosystem services of urban soils: A review. *Geoderma*, 395. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115076>
- Panagos, P., De Rosa, D., Liakos, L., Labouyrie, M., Borrelli, P., & Ballabio, C. (2024). Soil bulk density assessment in Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 364. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108907>
- Pey, B., Cortet, J., Watteau, F., Cheynier, K., & Schwartz, C. (2013). Structure of earthworm burrows related to organic matter of a constructed Technosol. *Geoderma*, 202–203, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.010>
- Puglia, J. (2025). *Propriétés physico-chimiques des Technosols construits* [Mémoire pour l'obtention de la Maîtrise universitaire ès Sciences en biogéosciences]. Université de Lausanne.
- Plante, A.F., Fernández, J.M., Leifeld, J., 2009. Application of thermal analysis techniques in soil science. *Geoderma* 153, 1–10.
- Rengasamy, P., de Lacerda, C. F. & Gheyi, H. R. (2022). Salinity, Sodicity and Alkalinity in T. S. d. Oliveira, R. W. Bell (eds.), *Subsoil Constraints for Crop Production*, Springer Nature Switzerland AG
- Román Dobarco, M., Cousin, I., Le Bas, C., & Martin, M. P. (2019). Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma*, 336, 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022>
- Schneider, M. (2011). *Stockage des matériaux d'excavation non pollués dans les sites d'extraction et les décharges contrôlées pour matériaux inertes Résultats des campagnes de recensement 2011 pour l'année de référence 2010*.



- Sebag, D., Verrecchia, E. P., Cécillon, L., Adatte, T., Albrecht, R., Aubert, M., Bureau, F., Cailleau, G., Copard, Y., Decaens, T., Disnar, J. R., Hetényi, M., Nyilas, T., & Trombino, L. (2016). Dynamics of soil organic matter based on new Rock-Eval indices. *Geoderma*, 284, 185–203. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.025>
- Sharma, D. K., Tomar, S., & Chakraborty, D. (2017). Role of earthworm in improving soil structure and functioning. *Current Science*, 113(6).
- Vergnes, A., Blouin, M., Muratet, A., Lerch, T. Z., Mendez-Millan, M., Rouelle-Castrec, M., & Dubs, F. (2017). Initial conditions during Technosol implementation shape earthworms and ants diversity. *Landscape and Urban Planning*, 159, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.10.002>
- Vidal-Beaudet, L., Rokia, S., Nehls, T., & Schwartz, C. (2016). Aggregation and availability of phosphorus in a Technosol constructed from urban wastes. *Journal of Soils and Sediments*, 18(2), 10. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1469-3>



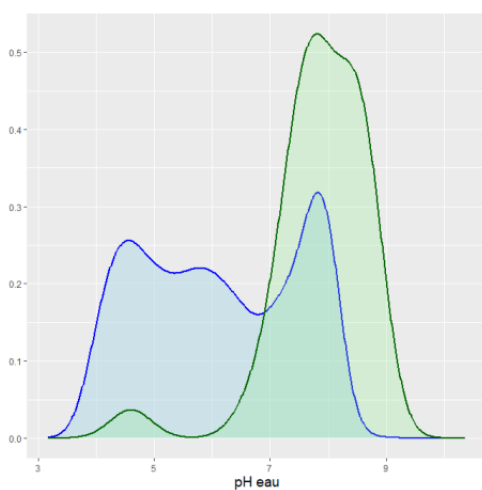
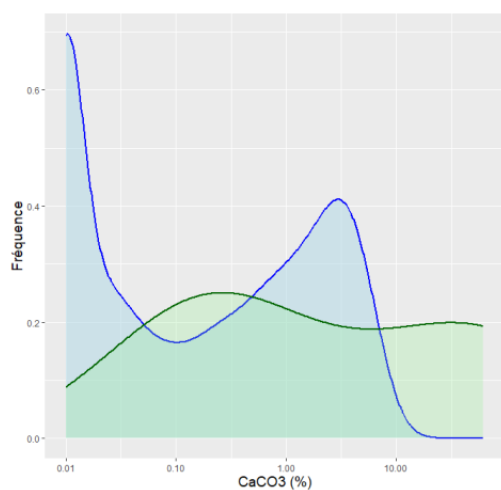
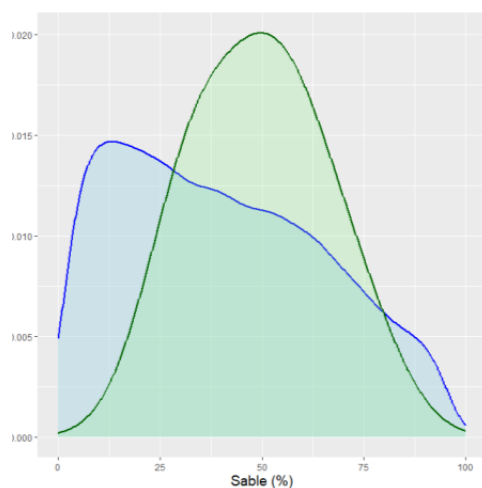
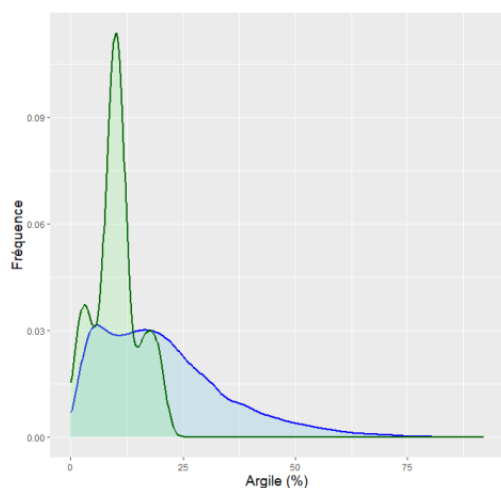
Annexe 1

Propriétés des technosols construits à partir de matériaux excavés

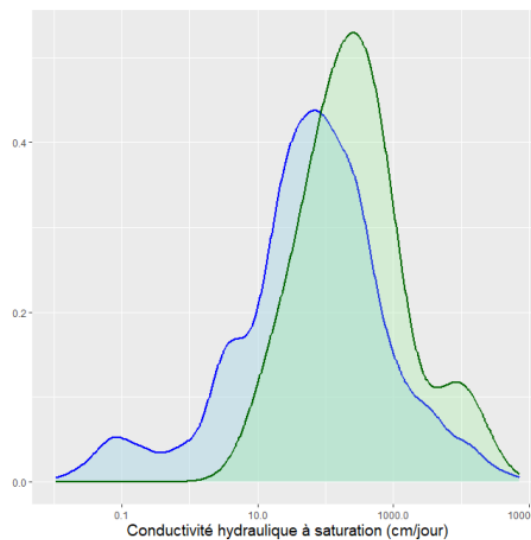
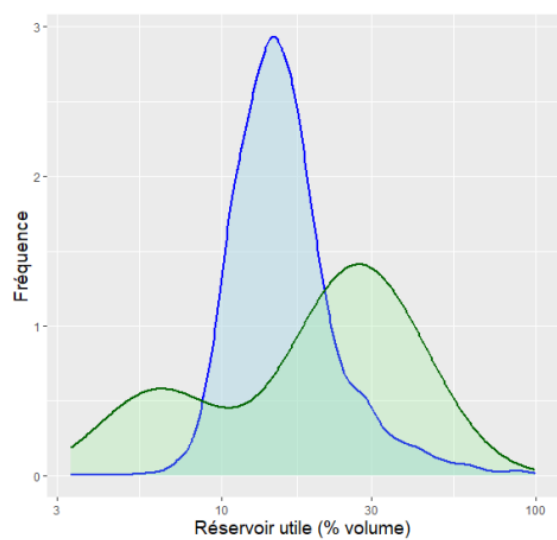
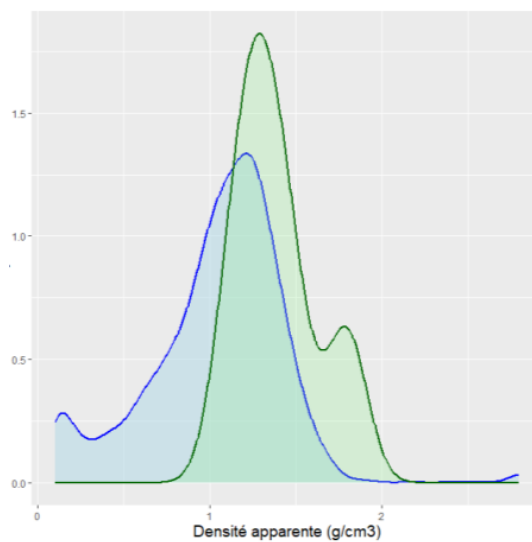
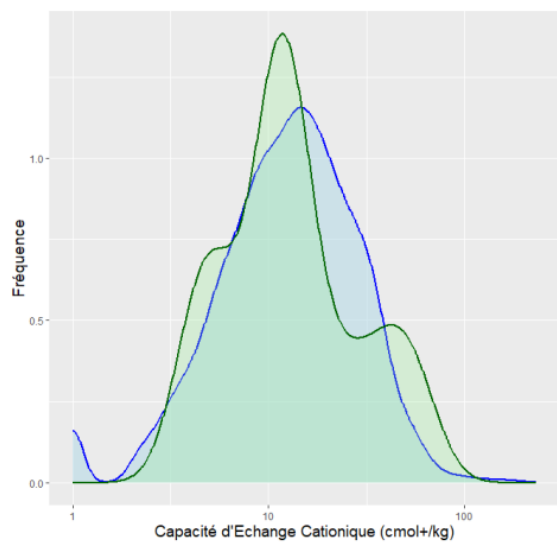
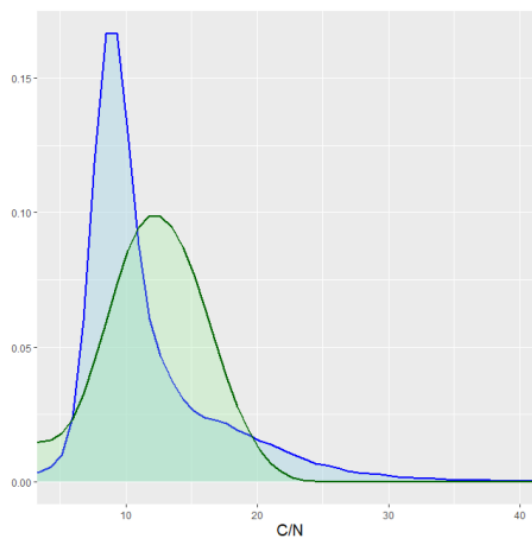
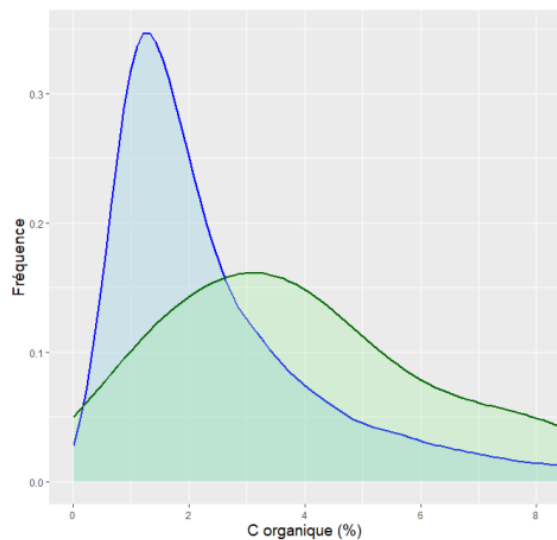
Mars 2025

Les Technosols construits à partir de matériaux excavés sont une solution pour la mise en place d'espaces verts urbains. Néanmoins leurs propriétés et fonctions sont encore mal connues. Ci-dessous, nous avons représenté les propriétés des technosols construits à partir de matériaux excavés et de matière organique (principalement compost) répertoriés dans [notre base de données bibliographique](#), et les avons comparées aux valeurs mesurées dans les sols d'Europe.

Les technosols construits à partir de matériaux excavés sont globalement similaires aux sols d'Europe pour les propriétés étudiées. Ils s'en différencient principalement par un pH basique (en moyenne, pH=7,86), lié à l'utilisation de matériaux parentaux riches en carbonates, et par une plus grande diversité de teneur en matière organique, liée aux choix faits lors de leur construction.



 Sols d'Europe
 Technosols construits



 Sols d'Europe
 Technosols construits



Matériel et Méthodes

Les données sont représentées par estimation par noyau (paramètre de lissage estimé suivant la règle de Silverman). Toutes les données se réfèrent à la couche superficielle des sols (0-30 cm). Les données sur les technosols proviennent de la base de données bibliographique de TeraSol SA (<https://www.terasol.ch/exosol-bibliographie.html>). Les données sur les sols d'Europe proviennent du programme LUCAS 2009-2015 (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/lucas>), sauf pour la conductivité hydraulique à saturation (SoilKsatDB, <https://zenodo.org/records/4541586>, limitée à l'Europe et aux mesures de plein champ). Le réservoir utile a été calculé à partir des données de texture, de teneur en carbone organique et de densité apparente issues du programme LUCAS en utilisant la fonction de pédotransfert proposée par Roman Dobarco et al. (<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022>) pour la couche superficielle du sol.

La base de données et le script utilisés pour la réalisation des graphiques avec le logiciel R v4.4.1 est disponible sur simple demande auprès de TeraSol SA.



Annexe 2

Plantation d'arbres sur un ExoSol®

Avenue du Grey, Lausanne, Suisse

Contexte

L'ExoSol®, mûré 9 mois avec un couvert graminées-légumineuses, et d'une épaisseur de 30 cm, a été posé en avril 2024 sur un mélange terre-pierres. L'usage prévu est une berme plantée non accessible au public.

Plantation d'arbres

La berme a été plantée avec 35 arbres : pins (*Pinus sylvestris*), ormes du Caucase (*Zelkova carpinifolia*), ormes (*Ulmus minor*), chênes (*Quercus robur*), platanes (*Platanus orientalis*) et micocouliers (*Celtis australis*). Douze mois plus tard, 33 arbres sont survivants, soit un taux de survie de 94%. Les deux arbres morts sont des *Q. robur*.





Annexe 3

Protocole de dénombrement des vers de terre dans les substrats Exosol®

Les vers de terre ont été dénombrés en avril 2025 (température de l'air entre 10 et 15°C, sols humides) en suivant le protocole de l'Observatoire participatif des Vers de Terre (OPVT)¹ (prélèvement à la bêche d'un bloc de sols de 20X20X25 cm) dans quatre substrats Exosol® situés à Lausanne : un Exosol® en place sur l'avenue du Grey (P3) et trois substrats Exosol® en maturation (P2, P5, P7) sur le site du SPADOM, avenue du Chablais.

Les vers de terre ont été classifiés en quatre groupes fonctionnels (épigés, épi-anéciques, anéciques, endogés), auxquels a été ajoutée une catégorie « juvéniles non-déterminés », en utilisant la clé d'identification de l'OPVT (2015). En raison de leur faible abondance, les catégories anéciques et épi-anéciques ont ensuite été fusionnées pour l'analyse des données.

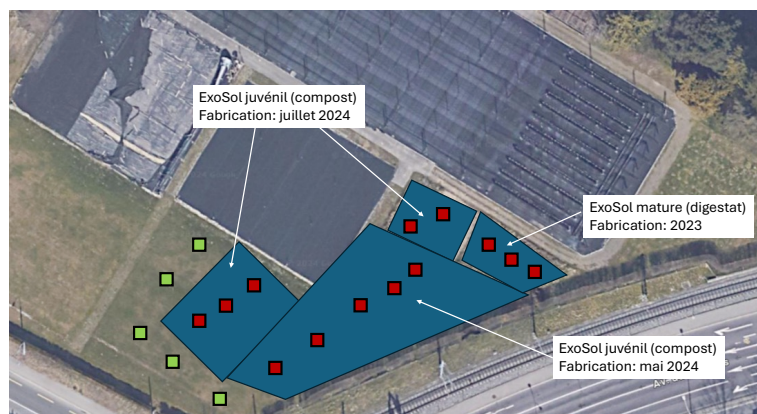
Les caractéristiques des substrats Exosol® sont résumées dans le Tableau 1. La disposition des placettes de prélèvement est présentée en Figure 1.

Tableau 1 Caractéristiques des Exosol® échantillonnés

Exosol®	Date de fabrication	Type de matière organique	Teneur en MO (2025)	Lieu de maturation	Situation actuelle
P2	Avril 2023	Digestat	1,9 %	Rural + urbain	Maturation (andain 70cm)
P3	Avril 2023	Compost	2,8 %	Rural	En place (épaisseur 30 cm) – Av. du Grey
P5	Mai 2024	Compost	3,7 %	Urbain	Maturation (andain 70cm)
P7	Juillet 2024	Compost	5,2 %	Urbain	Maturation (andain 70cm)



- Prélèvement dans la source probable de colonisation
- Prélèvement sur substrat Exosol®



Site du SPADOM- av. du Chablais

Figure 1 Localisation des sites de prélèvement des vers de terre

¹<https://projets.ecobio.univ-rennes.fr/opvt/testb%C3%A0cheversdeterre>