

LES BÉNÉFICES ENVIRONNEMENTAUX DES REVÊTEMENTS DE SOLS PERMÉABLES

Rapport d'étude 2 : #biodiversité des sols



ÉTUDE DE LA BIODIVERSITÉ DES SYSTÈMES DE SOLS PERMÉABLES VÉGÉTALISÉS ET MULCH O2D®



Directeur de publication : Olivier Bataille

Rédactrices : Julie Bertout et Jessica Lépinasse | **Conception graphique :** Margaux Lépine

Etude réalisée par **O2D ENVIRONNEMENT** avec l'intervention du **Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement** (LGCgE) de **Junia Hauts de France et du Laboratoire d'Analyses Microbiologiques des Sols** (LAMS). Projet labellisé par **HYDREOS** et subventionné par l'**ADEME** dans le cadre de l'initiative PME 2016 Eau et Milieux Aquatiques.

Photographie : LGCgE et O2D ENVIRONNEMENT **Maquette et illustrations :** O2D ENVIRONNEMENT

Date de publication : mai 2022

Rapport d'étude 2 : #biodiversité des sols

ÉTUDE DE LA BIODIVERSITÉ DES SYSTÈMES DE SOLS PERMÉABLES VÉGÉTALISÉS ET MUL<u>CH O2D®</u>

REMERCIEMENTS

Nous remercions Céline Pernin, Anthony Brasdefer, Fatimata Diallo et Brice Louvel (LGCgE Junia Hauts-de-France) ainsi qu'Emmanuel Bourguignon (LAMS) pour leur travaux d'expérimentations et d'analyses.

Nous tenons également à remercier Alexandre Folmer et Clément Sannier (Hydreos) ainsi que Cédric Djedovic (Ademe) pour leur accompagnement et soutien dans le cadre de ce projet de recherche.

PRÉAMBULE

Les dernières décennies ont vu naître un nouveau modèle d'aménagement, inscrit dans une vision durable et raisonnée de l'urbanisme. Celui-ci intègre des enjeux environnementaux de plus en plus prégnants dans les sociétés civiles. Pour répondre aux besoins de l'éco-construction, des techniques et matériaux innovants se développent. Les revêtements de sol perméables participent au bouquet de solutions permettant de limiter l'impact de l'artificialisation des sols, inhérente aux opérations d'aménagement.

O2D ENVIRONNEMENT® accompagne les projets de parkings et voies d'accès perméables et végétalisés depuis 2004. Le concept et la formulation des solutions O2D® comportent des avantages environnementaux intrinsèques: système de sol « ouvert » rétablissant les échanges air-eau-sol, infiltration naturelle des eaux pluviales sans ruissellement, apport de matière organique et d'un couvert végétal pour certaines de ses solutions.

Dans un contexte de lutte contre les effets néfastes de l'urbanisation et de l'artificialisation des sols (imperméabilisation, érosion de la biodiversité, émission de CO₂, phénomène d'îlots de chaleur urbains, ...), O2D ENVIRONNEMENT® a souhaité évaluer les performances environnementales des systèmes qu'elle préconise. Dans ce cadre, la société lance en 2017 le projet de recherche et développement ACTIV-S¹. Pour cela, elle met en œuvre en 2018 une plateforme expérimentale de parking perméable, située en métropole lilloise, et destinée à tester différentes compositions de fondations et remplissages. Afin d'explorer différents axes de recherche, O2D ENVIRONNEMENT® mène des expérimentations en collaboration avec des laboratoires, sur la plateforme et également par le biais d'une étude *In Situ*, portant sur douze parkings végétalisés en service, et sélectionnés selon certains critères détaillés dans le présent rapport.

Trois axes du projet ACTIV-S sont explicités à travers une série de rapports d'étude sur les bénéfices environnementaux des revêtements de sol perméables :

1/ Le premier porte sur les performances thermiques des solutions O2D® (publié en novembre 2020),

2/ Le deuxième sur la caractérisation des milieux restaurés par les systèmes O2D° au regard de la biodiversité,

3/ Le dernier sur les capacités de rétention et dégradation des hydrocarbures des systèmes végétalisés.

Ce rapport est donc le deuxième de la série et porte sur la thématique #Biodiversité.

Il regroupe plusieurs études et campagnes d'échantillonnages menées en 2019 et 2021, avec des sujets d'analyses et protocoles expérimentaux distincts. Elles ont été réalisées en collaboration avec deux laboratoires : le Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) de Junia Hauts-de-France et de l'Université de Lille 1, et le Laboratoire d'Analyse Microbiologique des Sols (LAMS).

Les résultats apportent des données scientifiques concernant l'impact environnemental des solutions de revêtements perméables et végétalisés O2D® sur la biodiversité des sols.

¹ Projet subventionné par l'ADEME dans le cadre de l'initiative IPME 2016 Eau & Milieux Aquatiques et labellisé par le pôle de compétitivité HYDREOS.

SOMMAIRE

1. Cadre de l'étude

PAGE 6

- 1.1 L'importance des sols vivants
 - 1.1.1 La biodiversité dans les sols
 - 1.1.2 Les services écosystémiques rendus
 - 1.1.3 La clé de sol
 - 1.1.4 L'impact de l'artificialisation des sols
 - 1.1.5 Les mentalités et les réglementations évoluent
 - 1.1.6 La trame brune

1.2 Objectifs de ce rapport

2. Méthodologie

PAGE 13 -

- 2.1 Localisation de l'étude
 - 2.1.1 Parkings sélectionnés
 - 2.1.2 Plateforme expérimentale
- 2.2 Protocoles d'échantillonnage
 - 2.2.1 Campagnes d'échantillonnage
 - 2.2.2 Macrofaune
 - 2.2.3 Mésofaune
 - 2.2.4 Microorganismes
- 2.3 Indices de diversité écologique : richesse, diversité spécifique et équitabilité
- 2.4 Propriétés physicochimiques
 - 2.4.1 pH_{eau}
 - 2.4.2 Humidité
 - 2.4.3 Densité apparente du sol

2.5 Analyses statistiques

3. Résultats

PAGE 22

- 3.1 La flore
- 3.2 La faune du sol sur les parkings végétalisés
 - 3.2.1 Mégafaune
 - 3.2.2 Macrofaune
 - 3.2.3 Mésofaune
 - 3.2.4 Micoorganismes
- 3.3 La faune du sol sur les parkings en remplissage mulch
 - 3.3.1 Macrofaune
 - 3.3.2 Mésofaune

4. Conclusion

PAGE 40

- 4.1 Les parkings végétalisés : des technosols pouvant être colonisés par une pédofaune variée
- 4.2 La solution O2D MULCH®: une solution alternative intéressante au regard de la biodiversité des sols

INTRODUCTION

LA RÉCENTE PRISE EN COMPTE DE LA NATURE ET DE LA BIODIVERSITÉ DANS L'AMÉNAGEMENT DES TERRITOIRES

Le concept de « Ville Résiliente » fait son chemin ces dernières années, jusqu'à se hisser aujourd'hui au centre des débats politiques et des stratégies d'aménagement pour la ville « de demain ».

Face à l'augmentation des risques et des dégâts subis lors d'épisodes extrêmes, face au constat criant de l'érosion de la biodiversité au niveau mondial, face à la reconnaissance de l'urgence à agir... les pouvoirs publics se mobilisent, convaincus par les nombreux états des lieux et connaissances apportés par les sachants (associations militantes, scientifiques, experts, établissements publics comme l'Office Français de la Biodiversité). On voit alors les documents d'urbanisme s'étoffer de mesures en faveur du retour de la « Nature en ville », dont les bénéfices sont aujourd'hui largement admis. Construire avec la nature implique d'aménager en intégrant différents domaines allant de la gestion durable des eaux pluviales jusqu'à la végétalisation des espaces, en passant par le choix de matériaux écologiques et la considération des services rendus par les sols.

Mais la prise en compte de la nature ne se limite pas aux frontières de la ville. L'objectif de « Zéro Artificialisation Nette » inclus dans le Plan Biodiversité (2018) et confirmé dans la loi Climat et Résilience (2021), vise la lutte contre l'étalement urbain au profit de la protection des zones naturelles, réservoirs de biodiversité, devenues aujourd'hui zones refuges pour de nombreuses espèces. L'objectif ZAN est un formidable levier pour la prise en compte des sols dans les opérations d'aménagement, afin de porter à connaissance les services écosystémiques qu'ils nous rendent et de préserver toute la biodiversité qu'ils abritent.

A l'échelle des territoires se développent alors la protection des zones humides, la création des sites Natura2000, la prise en compte des trames vertes et bleues... tous ces outils et mesures visent à préserver, améliorer la gestion et restaurer la biodiversité.

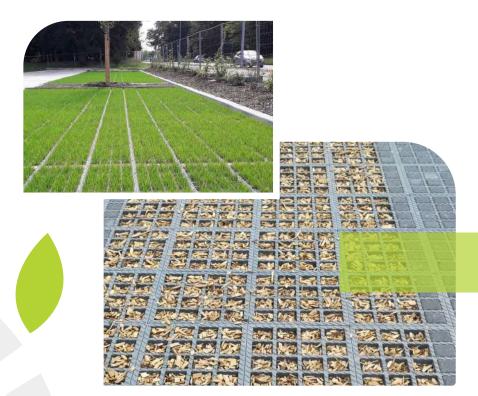
C'est le cas également du concept des « Solutions fondées sur la Nature », apparu en 2009 lors de la conférence des Parties de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) à Copenhague. Elles sont définies par l'UICN comme « les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » (UICN France, 2018). C'est à l'issue de la COP21, puis du Congrès mondial de la nature (2016), que l'on reconnaît les Solutions fondées sur la Nature comme leviers d'action dans l'atteinte des objectifs de développement durable et d'action climatique. En France, le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC 2) et le Plan Biodiversité (2018) encouragent également l'intégration des Solutions fondées sur la Nature dans les projets d'aménagement.

Le sol joue un rôle prédominant pour la préservation de la Biodiversité. Il abrite plusieurs milliers d'espèces (animaux, champignons, bactéries...) indispensables à la qualité de notre vie sur Terre. C'est une ressource non renouvelable à l'échelle humaine puisque sa régénération peut prendre plusieurs milliers d'années (1000 ans pour un centimètre de sol). C'est pourquoi, les menaces qui pèsent sur les sols sont aujourd'hui largement prises en considération : artificialisation, érosion, imperméabilisation, baisse de la biodiversité... La FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) estime la dégradation des sols due aux activités humaines à près de la moitié des sols du monde.

On distingue les sols naturels et les sols anthropiques. Ces derniers désignent les sols modifiés, exploités et aménagés pour répondre aux besoins des activités humaines (sol support ou sol agricole).

Certes, l'Homme continuera à avoir recours à l'anthropisation les sols pour répondre à ses différents besoins. Alors, l'enjeu actuel est d'aménager en tenant compte des fonctions naturelles des sols, en préservant leur qualité et en limitant les impacts des ouvrages, notamment au regard de la biodiversité. Cette nouvelle stratégie d'aménagement vise à restaurer, dans la mesure du possible, des sols vivants et propices au développement des espèces végétales et animales, au cœur de nos espaces de vie.

« Préserver les fonctions naturelles du sol », c'est précisément l'objectif des systèmes de sols perméables et végétalisés développés par O2D ENVIRONNEMENT®. Engagée dans une démarche de recherche et développement, et souhaitant contribuer à l'acquisition de connaissances autour des aménagements de sols urbains, la société O2D ENVIRONNEMENT® s'est investie dans une vaste étude, à travers différentes expérimentations menées en 2019 et 2021, afin d'évaluer l'impact de la mise en place de ses solutions sur la biodiversité du sol.



1. CADRE DE L'ÉTUDE

1.1 L'IMPORTANCE DES SOLS VIVANTS

Le sol évoqué dans la présente étude est un milieu dynamique et vivant dont l'état dépend de paramètres biotiques (matières organiques vivantes) et abiotiques (matières minérales du sol). Les organismes de ce sol comprennent les plantes, visibles en surface, mais également l'ensemble des animaux qui utilisent le sol comme habitat, lieu de reproduction ou source de nourriture. Cette faune, appelée **pédofaune**, regroupe des organismes visibles à l'œil nu mais aussi des formes de vies microscopiques, « invisibles », comme les champignons et les bactéries. Toutes ces communautés d'organismes varient d'un sol à un autre. L'ensemble de ces individus constitue la biodiversité du sol.

1.1.1 LA BIODIVERSITÉ DANS LES SOLS

Les sols sont des écosystèmes, c'est-à-dire des systèmes biologiques formés par l'interaction entre deux éléments : la biocénose et le biotope.

La **biocénose** est constituée de l'ensemble des organismes vivants qui peuplent le milieu. Le **biotope** est constitué d'éléments abiotiques (lumière, vent, humidité, température, etc.) indispensables à la survie de la biocénose.

Les capacités d'adaptation aux changements et la résilience des sols est rendue possible grâce à la biodiversité qu'il abrite. L'écosystème, via ses deux composantes que sont la biocénose et le biotope, assure la réalisation de fonctions biologiques.

Trois mécanismes sont à la base de la relation entre biodiversité et fonctions : le répertoire, les interactions et la redondance (Figure 1). Ainsi, dans un milieu présentant une forte biodiversité, lorsqu'une perturbation entraîne l'affaiblissement d'une espèce, d'autres espèces (répertoire) peuvent prendre le relais pour assurer les mêmes fonctions (redondance). Les réseaux (interactions) au sein du milieu se rééquilibrent. Ces mécanismes permettent au milieu de s'adapter au phénomène auquel il est confronté et de continuer à assurer des services écosystémiques.

RÉPERTOIRE

Plus le répertoire d'espèces présentes dans un milieu est grand, plus les fonctions assurées par celles-ci sont variées.

INTÉRACTIONS

Plus le nombre d'espèces est important, plus le réseau d'intéractions potentielles est riche et complexe.

REDONDANCE

Si les fonctions assurées par différents organismes sont redondantes, c'est pour assurer le maintien des fonctionnalités même dans les cas où certains organismes sont affaiblis ou amenés à disparaître.

BIODIVERSITÉ



Milieux plus adaptables aux changements et plus résilients face aux perturbations.

Figure 1 : Trois mécanismes clés pour la biodiversité d'un milieu (d'après Institut de l'environnement et du développement durable, 2013)

1.1.2 LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DU SOL

Les services écosystémiques sont les biens (matériels) et services (immatériels) que les hommes peuvent tirer des écosystèmes, directement ou indirectement, pour assurer leur bienêtre (nourriture, qualité de l'eau, paysages, ...). Pour les sols, ils sont répartis en quatre grandes catégories : les fonctions de support, d'approvisionnement, de régulation ainsi que les services culturels (Figure 2).

Ils découlent, directement ou indirectement, des fonctions écologiques présentes dans le répertoire du milieu. La *Figure 3* illustre des exemples de relations entre fonctions écologiques et services écosystémiques. On observe qu'une fonction écologique peut contribuer à plusieurs services écosystémiques et, à l'inverse, un service peut être assuré par plusieurs fonctions. Ces exemples, non exhaustifs, mettent notamment en lumière l'importance des organismes du sol dans ces processus complexes et donc la nécessité de les préserver.

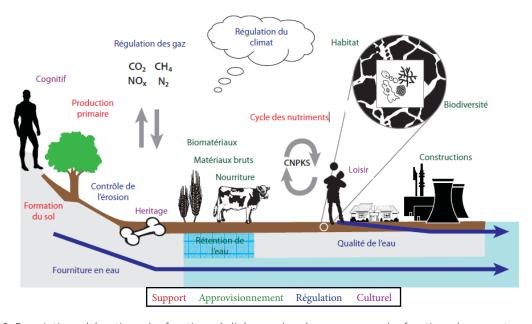


Figure 2 : Description schématique des fonctions réalisées par le sol, avec en rouge les fonctions de support, en vert les fonctions d'approvisionnement, en bleu les fonctions de régulation et en violet les fonctions culturelles. Source : Atlas européen de la biodiversité des sols (Jeffery et al., 2010).

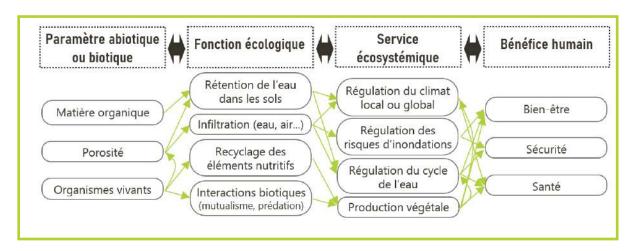


Figure 3 : Exemples de relations entre fonctions écologiques et services écosystémiques (d'après Commissariat Général au Développement Durable, 2010).

1.1.3 LA CLÉ DU SOL

La biocénose

La biocénose est la résultante des interactions entre organismes qui ordonnent, régulent, organisent la communauté des êtres vivants présents dans le milieu (faune, flore, bactéries, champignons).

La faune du sol ou pédofaune

La faune du sol comprend l'ensemble des organismes passant une partie ou l'entièreté de leur cycle de vie dans le sol.

Cette faune peut être classée selon la taille des organismes en quatre groupes (Bachelier, 1978):

La microfaune (< 0,2 mm): composée essentiellement de protozoaires et nématodes.

La **mésofaune** (0,2 - 4 mm) : regroupant essentiellement les deux grands groupes de microarthropodes que sont les collemboles et les acariens.

La **macrofaune** (4 – 80 mm) : constituée de vers de terre, insectes, myriapodes, arachnides, isopodes, etc.

La **mégafaune** (> 80 mm) : comprenant des reptiles, des batraciens, des insectivores, des rongeurs, etc.

Le couvert végétal

Un couvert végétal pérenne est bénéfique pour le sol sur différents aspects. Il crée la continuité entre le sol (système racinaire) et ce qui se passe au-dessus (feuilles, tiges). Il assure la **photosynthèse**, bénéfique à la qualité de l'air (fixation de dioxyde de carbone et libération d'oxygène). **Il joue le rôle de régulateur thermique grâce au phénomène d'évapotranspiration.** Il limite également la dessication du sol en le recouvrant, lui permettant de conserver une fraîcheur et une humidité plus longue lors de périodes sèches. D'autre part, il assure une protection du sol vis-à-vis de l'érosion et de la battance de la pluie. Cette dernière, par exemple, peut altérer la structure de surface d'un sol nu. Cette déstructuration engendre la formation d'une croûte sur les premiers centimètres qui réduit les capacités d'infiltration des eaux dans le sol. A ce rôle protecteur, s'ajoute également **un effet bénéfique de l'enracinement des végétaux sur l'infiltration.**

Les interactions entre le couvert végétal et la pédofaune sont primordiales. Les organismes du sol consomment et recyclent la matière organique produite au-dessus du sol et les substances minérales qu'elle contient. Ces substances nutritives peuvent ainsi être absorbées par les plantes au niveau de leurs racines. La faune du sol participe aussi activement au maintien de la fertilité du sol. A l'inverse, la flore procure nourriture et habitat à la faune.

Le biotope

Les éléments abiotiques font partie intégrante du milieu et influent sur les populations qui le colonisent. Certains de ces facteurs sont détaillés dans le *Tableau 1*.

Tableau 1 : Exemples d'éléments abiotiques caractérisant un sol

Humidité du sol	L'eau est un facteur primordial pour la faune du sol : que ce soit un manque ou, au contraire, un excès, elle influe sur les populations.
Porosité et atmosphère du sol	La porosité d'un sol est importante pour la circulation de l'eau et de l'air. Elle rend également possible la migration de la faune, notamment pour les animaux sensibles aux variations de température et d'humidité. En effet, en règle générale, les arthropodes migrent des milieux chauds et secs vers des zones plus fraîches et humides. Ils se déplacent donc en fonction de leurs besoins, tant au niveau horizontal que vertical.
Température du sol	Chaque espèce possède une température préférentielle pour son activité et les variations de température déterminent des migrations, notamment verticales, de la faune.
pH ou degré d'acidité	La sensibilité des individus au pH est très variable. Certaines espèces préféreront des sols acides (pH 3 à 5), d'autres des sols neutres ou alcalins (pH 6 à 8).

1.1.4 L'IMPACT DE L'ARTIFICIALISATION DES SOLS

Le sol est une ressource vivante aux propriétés biologiques, physiques et chimiques en constante évolution. A l'échelle planétaire, il héberge un quart de la biodiversité mondiale, d'où l'importance de le protéger.

L'artificialisation consiste à transformer un sol naturel, agricole ou forestier, par des opérations d'aménagement afin de les affecter notamment à des fonctions urbaines ou de transport (habitat, commerces, infrastructures, ...) (Ministère de la Transition écologique, 2021). Cette artificialisation peut entrainer une imperméabilisation partielle ou totale, des modifications profondes de leur structure ou encore une fragmentation des habitats pour la faune.

Les enquêtes Teruti, dont la dernière a été publiée en 2021 par l'Agreste, fournissent de précieuses données quant à la couverture et l'utilisation du territoire. D'après la dernière enquête, en France, en 2018, les sols artificialisés couvrent 5 millions d'hectares, soit 8 % de l'ensemble du territoire français (9% du territoire métropolitain). Les résultats montrent également que 44% de ces sols artificialisés sont des surfaces imperméables (bâtiments, routes, places, ...) (Agreste, 2021).

L'Île-de-France est la région la plus artificialisée de France (21 %). Paris est artificialisé à plus de 80 % et ses départements limitrophes (Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis, Val-de-Marne) à plus de 70 % (*Figure 4*).

La région Hauts-De-France, dans laquelle se situent nos études, se place au troisième rang des régions les plus artificialisées avec 11,4% de sa surface.

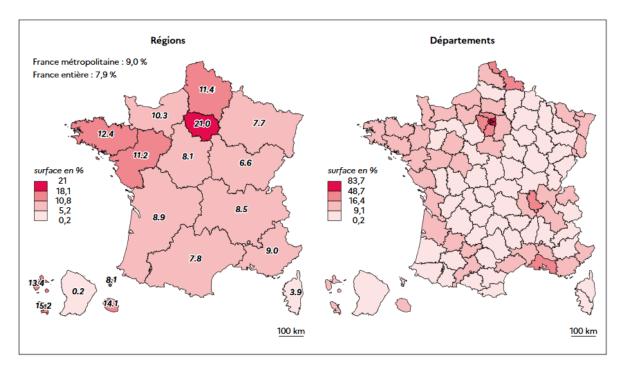


Figure 4 : Part des sols artificialisés selon les régions et les départements en 2018. Source : Agreste – Enquêtes Teruti 2017-2018-2019 (Agreste, 2021)

Or, cette artificialisation est préjudiciable sur de multiples aspects :

- > Accélération de la perte de biodiversité
- > Réchauffement climatique
- > Amplification des risques d'inondations
- > Appauvrissement des terres agricoles
- > Accroissement des dépenses liées aux réseaux (routes, électricité, assainissement)
- > Amplification de la fracture territoriale

1.1.5 LES MENTALITÉS ET LES RÉGLEMENTATIONS ÉVOLUENT

Suite à la prise de conscience de l'importance de la Nature et des sols pour répondre aux enjeux du changement climatique, le concept de « **Retour de la Nature en ville »** émerge.

Les principes de la ville résiliente l'intègrent sous toutes ses formes : flore, faune, eau, air et sol. C'est le cas, par exemple, des trames vertes et bleues (TVB). Leur but est « d'enrayer la perte de biodiversité en participant à la préservation, à la gestion et à la remise en bon état des milieux nécessaires aux continuités écologiques, tout en prenant en compte les activités humaines » (Article L371-1, loi Grenelle 2 de 2010).

Ce réseau écologique participe à la restauration d'une biodiversité en ville par la mise en place « d'aménagements verts ». A titre d'exemple, de nombreuses études scientifiques montrent que les toitures et façades végétalisées constituent des structures favorisant la biodiversité par la création de nouveaux habitats dans un environnement plutôt hostile à certains taxons (Chiquet, 2014; Joimel et al., 2018).

De grandes métropoles s'investissent pleinement dans cette démarche, recherchant les bénéfices environnementaux et leurs effets positifs sur la santé et le bien-être des citoyens. C'est le cas de Paris avec son plan biodiversité, ou du Grand Lyon au travers de son plan nature de la métropole.

Les systèmes de sols perméables et végétalisés participent à cette orientation vers la résilience des territoires. A ce titre, des dispositions favorables à leur aménagement sont retrouvées dans des textes réglementaires tels que, par exemple, la loi pour la reconquête de la nature et des paysages (LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016) ou le Plan Biodiversité national (Comité interministériel biodiversité, 2018).

L'apport de données scientifiques permettra d'accompagner ces changements de mentalités et de besoins. Il confortera les bénéfices apportés par ces solutions « alternatives » d'aménagement et les préconisations de mise en œuvre.

1.1.6 LA TRAME BRUNE

La trame brune se calque sur le modèle de la trame verte et bleue et s'applique à la continuité des sols, véritables réservoirs de biodiversité (*Sordello, 2017*). Cette notion traduit la nécessité de connectivité au niveau des sols pour permettre aux espèces de la pédofaune d'accomplir leur cycle de vie, se déplacer, échapper à des changements ponctuels de leur environnement, recoloniser un milieu après un épisode de mortalité...

La mise en place et la préservation de cette trame est bénéfique pour la pédofaune mais également pour les trames vertes et bleues grâce aux services qu'elle leur rend : cycle de l'eau, cycle des nutriments, lutte contre les pollutions, ... (Bardgett et Van Der Putten, 2014).

L'influence de cette trame brune sur la végétation est notamment mise en évidence pour les arbres en milieu urbain : des arbres et arbustes sont plus fragiles et vulnérables lorsqu'ils sont isolés dans des fosses que s'ils sont connectés les uns aux autres via le sol (Figure 5).

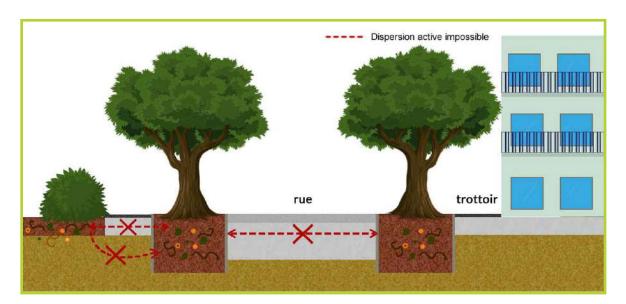


Figure 5 : Fragmentation de la trame brune en milieu urbain, d'après Sordello, 2017.

Cette trame brune n'a pas encore de validité réglementaire mais commence néanmoins à être prise en compte dans la planification d'urbanisme de certaines villes et collectivités territoriales. C'est par exemple le cas dans le deuxième plan Biodiversité adopté par le Conseil de Paris (Plan Biodiversité, 2018-2024 : action 16 de l'axe « penser la ville comme un atout pour la biodiversité »).

Pour répondre à la restauration de la trame brune, des aménagements bénéfiques au retour de la nature en milieu urbain se multiplient. Parmi ceux-ci figurent les technosols.

Ces technosols sont conçus et construits en fonction de l'usage et des services envisagés pour le sol. Ils sont constitués d'horizons distincts, couches successives dont les propriétés permettent de remplir les fonctions définies. L'Homme a une action prédominante sur l'origine de leurs matériaux constitutifs, sur leurs propriétés, leur comportement et fonctionnement (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006).

Dans le cadre de parkings végétalisés perméables, les sols doivent remplir différentes fonctions comme, entre autres, le support d'activités anthropiques (portance), l'infiltration et la filtration des eaux pluviales ou le support de végétation. A ce titre, le choix des matériaux à mettre en œuvre pour un parking perméable et végétalisé est primordial. Ils doivent répondre à de multiples critères relatifs aux attentes techniques mais également biologiques, afin de permettre la restauration de milieux propices au développement de sols vivants, de façon pérenne.

Alors, ils peuvent s'inscrire dans les Solutions Fondées sur la Nature : ils contribuent de façon directe à un défi sociétal identifié, tout en s'appuyant sur les écosystèmes et en comportant des bénéfices pour la biodiversité.

1.2 OBJECTIFS DE CE RAPPORT

LES OBJECTIFS DE CE RAPPORT S'ARTICULENT AUTOUR DE DEUX HYPOTHÈSES.



Les parkings végétalisés peuvent abriter une pédofaune variée et ainsi participer à la lutte contre l'érosion de la biodiversité, notamment en milieu urbain. L'influence de l'ancienneté du parking ainsi que de son environnement proche sont deux critères évalués. Ils apporteront des informations importantes pour les aménageurs souhaitant concevoir des parkings végétalisés. Ce premier volet porte sur les campagnes d'échantillonnage de douze parkings végétalisés O2D GREEN® en activité.

2 La solution O2D MULCH® est un système de sol avec un remplissage de surface organique pouvant accueillir une diversité d'organismes et, à ce titre, participer également à la restauration de milieux propices à la biodiversité des sols.

MÉTHODOLOGIE

2.1 LOCALISATION DE L'ÉTUDE

L'étude s'est déroulée dans la région des Hauts de France. Cette région est sous influence océanique avec une température moyenne annuelle de 12,6°C en 2020. Pour l'année d'échantillonnage (2021), la température moyenne mensuelle varie entre 7,9°C (mars) et 18,9°C (juillet). Le cumul de pluie entre mars et juillet est de 326,7 mm. Des données climatiques plus précises relatives aux campagnes d'échantillonnages figurent dans l'Annexe 1.

La présente étude se découpe en deux parties : la première regroupe 12 parkings sélectionnés selon les critères définis dans la section 2.1.1 ; la seconde a été réalisée sur une plateforme d'essais décrite dans la section 2.1.2 (*Figure 6*).

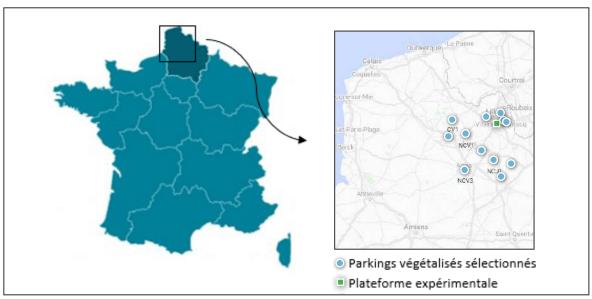


Figure 6 : Localisation des sites d'échantillonnage.

2.1.1 PARKINGS SÉLECTIONNÉS

Les douze parkings sélectionnés respectent les recommandations de mise en œuvre préconisées par O2D ENVIRONNEMENT® à savoir **une fondation terre-pierre, un lit de pose et un substrat de remplissage fertiles.** Les technosols étudiés possèdent ainsi les mêmes profils pédologiques (*Figure 7*).

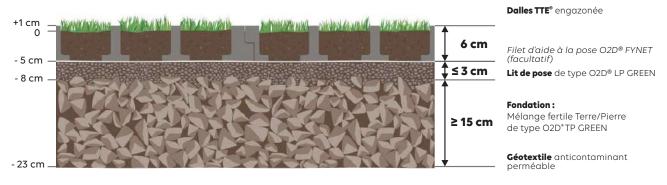


Figure 7 : Profil pédologique d'un parking végétalisé O2D GREEN®.



Figure 8 : (a) photographies et (b) vues aériennes des parkings étudiés pour le lot 1.

Ces parkings ont été sélectionnés selon deux critères : leur ancienneté et leur connectivité à une zone source potentielle de biodiversité.

Les parkings sont considérés comme :

- > Jeunes (J) s'ils sont installés depuis moins de 5 ans,
- Vieux (V) si la mise en place du parking est antérieure à 5 ans,
- > Connectés (C) s'ils sont adjacents à une zone source potentielle de biodiversité,
- > Non-connectés (NC) s'ils sont isolés d'un réservoir de biodiversité par un muret de 30 cm minimum ou par une distance de 5 mètres afin de limiter le plus possible la migration active de la mésofaune (*Ponge*, 2020).

Trois parkings ont ainsi été retenus pour chacune des modalités étudiées (Tableau 2).

Tableau 2 : Différents parkings étudiés et modalités associées

	Connecté (C)	Non-connecté (NC)
Jeune (J)		NCJ1 : Lambres-Lez-Douai NCJ2 : Villeneuve d'Ascq NCJ3 : Aniche
Vieux (V)	CV1 : Lestrem CV2 : Villeneuve d'Ascq CV3 : Brunémont	NCV1 : Auchy-Les-Mines NCV2 : Lomme NCV3 : Arras

Les nomenclatures C/NC, J/V, CJ/CV/NCJ/NCV seront utilisées dans la suite de ce rapport. La *Figure* 8 présente des prises de vues des parkings du lot 1 pour illustrer les différentes catégories.

2.1.2 PLATEFORME EXPÉRIMENTALE

La plateforme expérimentale se situe au sein d'une zone d'activités à Lesquin (*cf Annexe 2*). Au nord de la plateforme expérimentale se trouve une zone logistique, fortement artificialisée et imperméabilisée. A 50 mètres, au sud-est, se trouve un champ conventionnel séparé de la zone par une route métropolitaine fortement circulée.

Dans le cadre de cette étude, la plateforme expérimentale nous permet d'étudier la solution O2D MULCH® (*Figure 9*), mise en place depuis septembre 2018, et de la comparer à une solution végétalisée mise en place à la même période.

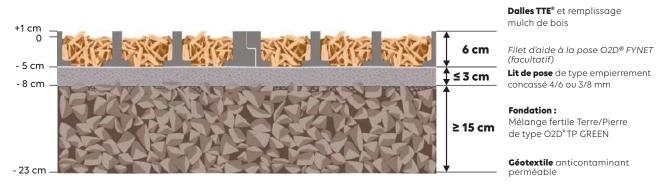


Figure 9 : Profil du système O2D MULCH®.

2.2 PROTOCOLES D'ÉCHANTILLONNAGE

2.2.1 CAMPAGNES D'ÉCHANTILLONNAGE

Afin d'observer la biodiversité des sols sur les parkings végétalisés et étudier l'influence de la connectivité et/ou de l'ancienneté sur celle-ci, plusieurs campagnes d'échantillonnage de la faune du sol sont réalisées en utilisant des méthodes adaptées : **prélèvement de sol** (3 alvéoles sur l'ensemble du parking) et **extraction sur Berlese** pour la mésofaune, mise en place de 3 **pièges Barber** pour la macrofaune et prélèvement (x3) de vers de terre (*Tableau 3*).

Les critères de sélection des alvéoles ont été déterminés en amont afin de limiter les choix arbitraires. Les différents échantillonnages réalisés sur les douze parkings ainsi que la plateforme d'essais suivent le plan expérimental présenté dans la *Figure 10*.

Les prélèvements de la mésofaune sont mensuels et réalisés en deux temps : de mars à avril 2019 et de mars à juin 2021. Afin d'éliminer tout biais d'échantillonnage qui pourrait être lié au jour du prélèvement, chaque mois, ils ont été répartis sur 3 jours, chacun étant consacré aux prélèvements des 4 parkings appartenant à l'ensemble des modalités (soit 3 réplicats par modalité // jour 1 : CJ1 ; CV1 ; NCJ1 ; NCV1 // jour 2 : CJ2 ; CV2 ; NCJ2 ; NCV2 // jour 3 : CJ3 ; CV3 ; NCJ3 ; NCV3). Les prélèvements de la macrofaune circulante, des vers de terre et les mesures de l'activité microbienne ont été réalisés uniquement une fois au mois de mai.

Tableau 7 : Dates	at tachniques	utilicáes pour	les échantillonnages
Tableau 5 . Dates	et techniques	utilisees pour	ies echantinonnages

		2019			2021				
	Technique	Mars	Avril	Mai	Juin	Mars	Avril	Mai	Juin
Mésofaune	Prélèvement de sol et extraction par Berlese								
Macrofaune	Faune circulante : pièges Barber								
Macrotaune	Vers de terre : extraction chimique à l'AITC								
Activité	Mesure de la phosphatase alcaline								
microbienne	Mesure de l'hydrolyse de la FDA								

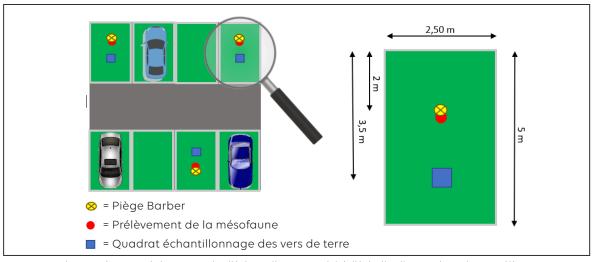


Figure 10 : Plan expérimental du protocole d'échantillonnage : (a) à l'échelle d'un parking, les 3 prélèvements sont répartis sur l'ensemble du parking et distants au minimum de 5 m les uns des autres ; (b) position des prélèvments sur une place – les distances sont indiquée à partir de la tête de parking.

A partir des différents échantillonnages, les paramètres écologiques étudiés qui serviront d'outils pour caractériser les parkings sont récapitulés dans le *Tableau 4*.

Tableau 4 : Dates et techniques utilisées pour les échantillonnages de la pédofaune

Taxons		Paramètres
	Faune circulante	Abondance totale Abondance relative
Macrofaune	Vers de terre	Abondance totale Abondance relative des 3 catégories éco-morphologiques de vers de terre (épigé, endogé, anécique) Ratio juvéniles / adultes
	Mésofaune	Abondance totale Abondance relative
Mésofaune	Collemboles	Abondance totale Abondance relative des trois groupes écologiques de collemboles (épi-, hémi- et euédaphique) Richesse spécifique Diversité spécifique Équitabilité
	Acariens	Abondance totale Abondance relative des différents sous-ordres d'acariens Ratio prédateurs / détritivores
Activité microbienne	Bactéries	Quantification de fluorescéine libérée (mg/g d'échantillon) Mesure de l'activité de la phosphatase alcaline

2.2.2 MACROFAUNE

Les pièges Barber

Le piège Barber permet de récolter la faune épigée qui circule à la surface du sol (Figure 11a). L'échantillonnage de la macrofaune circulante est réalisé en mai 2021. Pour chaque parking, trois pièges Barber sont disposés en lieu et place des alvéoles prélevées pour étudier la mésofaune du sol.

Ces pièges sont adaptés aux dimensions des alvéoles (Figure 11b). Ils contiennent de la saumure afin de ralentir la décomposition des individus s'y retrouvant piégés. Dans le cadre de cette étude, la saumure est préférée à une solution d'éthylène glycol dilué couramment utilisée dans les piégeages car, les parkings étant fréquentés, il était indispensable que la solution de conservation ne présente pas de risque pour la santé. Le contenant est recouvert d'un grillage (maille de 1 cm) afin de limiter la chute de végétation ou de débris dans le piège. Les pièges sont mis en place pour une durée de 8 jours, la faune qui y tombe ne pouvant en ressortir.

Après récupération des pièges, leur contenu est filtré et la macrofaune récoltée conservée dans de l'alcool à 70° avant d'être identifiée. La détermination des individus piégés se fait jusqu'à l'ordre pour l'ensemble des organismes, sauf les isopodes qui sont déterminés jusqu'à l'espèce.

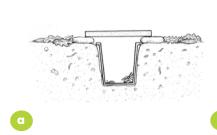






Figure 11 : Illustration du principe des pièges Barber (a) et de leur adaptation (b) à l'alvéole du parking Source principe piège Barber : <u>publicschools.manchester.gov</u>

Les vers de terre : Méthode de l'AITC (isothiocyanate d'allyle)

L'échantillonnage des vers de terre est réalisé sur des quadrats de 60 x 60 cm grâce à un protocole d'extraction chimique utilisant de l'AITC (isothiocyanate d'allyle), principe actif de la moutarde qui irrite les vers de terre et les pousse à remonter à la surface (*Zaborski*, 2003).

Dix litres d'une solution d'AITC est épandue, en deux passages, de façon homogène sur un quadrat (Figure 12a). Les vers de terre remontant dans un délai de 15 minutes après arrosage sont prélevés et identifiés (Figure 12b). La détermination du groupe éco-morphologiques (épigé, anécique, endogé) et du stade de développement (juvénile ou adulte) est réalisée sur place. Les vers de terre sont ensuite rincés et remis en place dans leur environnement.

Pour chaque parking, trois prélèvements correspondent à un échantillon.



Figure 12 : Extraction chimique des vers de terre par la méthode de l'AITC : (a) épandage de la solution sur le quadrat, (b) exemple de vers de terre prélevés pour un échantillon.

2.2.3 MÉSOFAUNE

Pour chaque parking, l'échantillonnage de la mésofaune consiste au prélèvement de trois alvéoles de dalle (Figure 13), réparties sur l'ensemble du parking et distantes de 5 mètres minimum les unes des autres. Les dimensions d'une alvéole sont 8 x 8 x 6 cm. Les échantillons de sol sont placés sur un extracteur de type Berlese-Tullgren pendant 8 jours. Le prélèvement de sol est déposé sur un tamis (maille de 4 mm) disposé sur un entonnoir (Figure 14). Une source lumineuse est placée au-dessus du dispositif. La faune du sol, sensible à la dessication et à la lumière, s'enfonce dans le substrat, traverse le tamis et tombe dans un pot collecteur contenant de l'éthanol (70°).



Figure 13: Exemple d'alvéole prélevée pour un échantillon (ici, alvéole située au-dessous du pavé marqué).

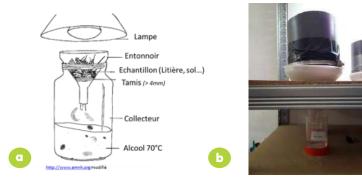


Figure 14 : Principe de l'extracteur Berlese-Tullgren (a) et matériel utilisé en laboratoire (b). Source : Leclercq,2015

Les individus collectés sont dénombrés et identifiés. La mésofaune est classée en 6 taxons : collemboles, acariens, hyménoptères, coléoptères, myriapodes, arachnides et insectes n.d. (non déterminé). Cette dernière classe regroupe essentiellement les insectes au stade larvaire.

Les abondances pourront être exprimées de deux façons :

- L'abondance totale correspond au nombre total d'individus collectés par échantillonnage. Elle peut également être exprimée en densité, c'est-à-dire le nombre d'individus rapporté au m² (à partir de la surface des 3 alvéoles prélevées). Cette dernière donnée est nécessaire pour comparer les systèmes étudiés à des références bibliographiques.
- > **L'abondance relative** des différents taxons rend compte des proportions des différentes populations dans les échantillons.

Pour les deux populations plus spécifiquement étudiées, que sont les acariens et les collemboles, les caractères morphologiques ont permis de différencier 3 sous-ordres pour les acariens et différentes espèces pour les collemboles (*Fjellberg 1999 et 2007; Hopkin, 2007*).

2.2.4 MICROORGANISMES

Les micro-organismes sont responsables de nombreux processus clés dans le cycle des éléments. Les enzymes qu'il produisent sont responsables de la **dégradation des molécules organiques et de leur minéralisation.** Parmi celles-ci figurent les exoenzymes : enzymes sécrétées par les cellules et qui fonctionnent en dehors de celles-ci. Le dosage de l'activité d'exoenzymes présentes dans un sol reflète ainsi, par dosage indirect, l'activité biologique microbienne du sol en question.

Activité de la phosphatase alcaline

La phosphatase alcaline est une enzyme d'intérêt car elle répond à quatre critères importants :

- > Elle est présente chez tous les microorganismes
- > Elle n'existe pas dans les racines des plantes,
- > Son activité ne dépend pas de la teneur en phosphore des sols,
- > Sa technique de dosage est simple et peu coûteuse.

La teneur en phosphatase alcaline est déterminée indirectement par la mesure de son activité enzymatique : le phosphate de p-nitrophényle est dégradé en p-nitrophénol qui est quantifié.

Hydrolyse du Diacétate de fluorescéine (Fluorescein Diacetate FDA)

La mesure du FDA est une méthode simple, rapide et précise pouvant être utilisée comme **bioindicateur biologique/biochimique de la qualité des sols**. Cela constitue un outil pour mesurer l'activité microbienne dans les sols (*Schnürer et Rosswall*, 1982). Cette méthode présente l'avantage de concerner plusieurs groupes d'enzymes différentes, le diacétate de fluorescéine étant hydrolysé par les lipases, des protéases, des estérases, etc. Dans cette étude, la méthode utilisée est celle développée par Green et al. (2006).

L'hydrolyse du diacétate de fluorescéine par les bactéries présentes dans l'échantillon entraîne la libération de fluorescéine. Cette dernière absorbe les radiations à 490 nm. Ainsi la mesure de l'absorbance à cette longueur d'onde est proportionnelle à la quantité de fluorescéine libérée. L'absorbance mesurée est corrigée par soustraction de deux contrôles : l'absorbance des réactifs seuls et l'absorbance de l'échantillon en l'absence de fluorescéine diacétate. La quantité en milligrammes de fluorescéine par grammes d'échantillon est obtenue grâce à une courbe d'étalonnage.

2.3 INDICES DE DIVERSITÉ ÉCOLOGIQUE : RICHESSE, DIVERSITÉ SPÉCIFIQUE ET ÉQUITABILITÉ

La richesse (R) représente le nombre d'espèces (ou familles) recensées lors d'un échantillonnage.

La diversité renseigne sur la relation entre l'abondance et la richesse spécifique. L'indice de diversité de Shannon-Weaver H' est l'un des indices de diversité les plus utilisés (*Magurran*, 1988; *Shannon et Weaver*, 1949). Il se calcule selon la formule suivante :

$$H' = -\sum_{i}^{R} \left[\left(\frac{n_i}{N} \right) . \log 2 . \left(\frac{n_i}{N} \right) \right]$$

R = richesse specifique $n_i = effectif de l'espèce i$

N = effectif de tous les groupes taxonomiques dans chaque échantillon

Un indice faible traduit un déséquilibre élevé entre les espèces et/ou une faible richesse spécifique.

L'équitabilité correspond au rapport entre la diversité observée et la diversité maximale théorique pouvant être obtenue avec le même nombre d'espèces (*Piélou, 1966*). Elle a pour formule :

$$E = \frac{H'}{log2(R)}$$

H' = diversit'e sp'ecifique de ShannonR = Richesse sp'ecifique

L'équitabilité varie de 1 à 0. Elle est égale à 1 lorsque toutes les espèces ont la même abondance (équilibre). Au contraire, elle tend vers 0 quand une espèce représente la quasi-totalité des effectifs.

2.4 PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES

Afin d'étudier l'influence de quelques facteurs abiotiques sur la faune du sol, la mesure des certains paramètres est réalisée.

2.4.1 PH_{EAU}

Des mesures de pH sont effectuées pour chaque échantillon. Pour cela, une suspension de sol est préparée en agitant 10 g de sol sec tamisé (< 2 mm) dans 25 mL d'eau distillée pendant 30 minutes. Après 5 minutes de décantation, les mesures de pH sont réalisées (IQ150-77 Meter and Probe System).

2.4.2 HUMIDITÉ

Sur le terrain, l'humidité volumique ou teneur volumique en eau (V_{eau} / V_{sol}) en %) est mesurée en utilisant un humidimètre de sol portable (*Fieldscout TDR100, modèle 6440FS, SpectrumTechnologies*) équipé de sondes de 4 cm.

Les échantillons de sols humides et secs sont pesés avant et après extraction de la faune du sol afin de calculer la teneur en eau massique et ainsi conforter les mesures réalisées sur le terrain. Les mesures réalisées en laboratoire corrélaient avec les mesures réalisées du terrain.

2.4.3 DENSITÉ APPARENTE DU SOL

La densité apparente a été calculée pour chaque prélèvement de sol.

$$D_a = rac{
ho_a}{
ho_w}$$
 ho_a = Masse volumique apparente du sol
 ho_w = Masse volumique de l'eau
 $ho_a = rac{m_{SS}}{V_{total}}$
 m_{ss} = masse de sol sec
 V_{total} = Volume total du sol

2.5 ANALYSES STATISTIQUES

Les données de comptages des différents prélèvements de la faune du sol ne s'ajustaient pas à une loi Normale d'où l'utilisation de tests statistiques non-paramétriques.

Pour comparer les dispositifs par paires (connectés / non-connectés, jeunes / vieux), des analyses de comparaisons de Mann-Whitney sont réalisées (logiciel XLSTAT).

Afin de comparer statistiquement les quatre modalités (CJ; CV; NCJ; NCV), des analyses de Kruskal-Wallis (méthode non paramétrique, comparaison de K échantillons) associées à une comparaison multiple par paire par une procédure de Dunn, ont été réalisées (logiciel XLSTAT). Les corrélations entre deux variables sont évaluées grâce au test de corrélation de Spearman.

3. RÉSULTATS

3.1 LA FLORE

La présente étude s'attachait à évaluer la biodiversité faunique des parkings végétalisés. L'étude de la flore n'a pas fait l'objet d'une étude approfondie. Néanmoins, certaines observations sont importantes à évoquer.

Les préconisations de mise en œuvre des parkings végétalisés O2D GREEN® incluent la mise en place de matériaux drainants, fertiles et portants sous les revêtements de surface. Le démontage d'un parking nous a permis de constater que ceux-ci remplissent leur fonction. En plus de leurs performances mécaniques, ils offrent un volume disponible permettant à la végétation de s'enraciner en profondeur, sur les 25 premiers centimètres du sol mis en œuvre (Figure 15a). Cette propriété permet aux plantes de puiser les ressources qui leur sont nécessaires dans l'ensemble du système et ainsi de multiplier leurs surfaces d'apport. Cet enracinement est également bénéfique pour le fonctionnement du système perméable en maintenant une porosité pérenne et ainsi facilitant l'infiltration des eaux pluviales.



Figure 15 : (a) Enracinement de la végétation sur l'ensemble de la profondeur du système O2D GREEN®; (b) Photographie du système racinaire vigoureux de la végétation en place (LAMS)

Figure 16: Observations de la végétation spontanée sur certains parkings:

(1) CV2 - avril 2021,

(2) CV2 - avril 2021,

(3) CJ3 – avril 2021,

(4) NCJ2 – juillet 2021, (5) CJ1 – juillet 2021,

(6) CV2 - juillet 2021,

(7) CV3 – juillet 2021, (8) CV1 – juillet 2021

La présence de végétation (*Figure 16*) est intéressante pour plusieurs aspects. Premièrement, spontanée ou semée, **elle apporte différents bénéfices environnementaux** : habitat/abris pour la faune, régulation des températures (maintien de l'humidité dans les sols, évapotranspiration, ...).

Deuxièmement, lorsque cette végétation est fleurie, **elle participe à la biodiversité par son attrait pour les pollinisateurs.** Il a notamment été observé des bourdons des pierres butinant des fleurs de trèfle (végétation semée) ou d'autres butinant des fleurs de sédum (végétation spontanée) >> VIDÉOS EN LIGNE: www.o2d-environnement.com/observatoire-biodiversite/

Enfin, il est important de relever que **l'aspect de la végétalisation évolue en fonction des saisons, au même rythme que les autres espaces verts**. Elle entre en dormance lorsque les conditions climatiques le lui imposent. L'enracinement profond et la biodiversité de la faune présente dans les substrats permettent à la végétation de reprendre sa vitalité lorsque les conditions climatiques sont à nouveau adaptées. Ceci conforte notre vision qui est la nécessité de créer des technosols vivants avec différents horizons fertiles constitués de matériaux de qualité.

3.2 LA FAUNE DU SOL SUR LES PARKINGS VÉGÉTALISÉS

3.2.1 MÉGAFAUNE

La présence de la mégafaune peut parfois être observée sur les parkings végétalisés. Ces apparitions peuvent être en partie liées à l'environnement à proximité des parkings. Il arrive par exemple de repérer le passage de lapins sur des parkings à proximité de leurs lieux d'habitats. On peut également observer certains oiseaux picorer dans les alvéoles. Dans cette mesure, les parkings végétalisés peuvent participer à la trame verte en permettant la circulation ou l'alimentation de certaines espèces.

Ces observations ne sont que ponctuelles et n'ont pas fait l'objet d'un suivi particulier.

3.2.2 MACROFAUNE

Observations générales

Des observations opportunistes de la macrofaune sont également courantes (*Figure 17*). Elles permettent notamment de mettre en évidence la présence de taxons variés : cloportes, hyménoptères (fourmis), araignées, coléoptères carabidés, etc.



Figure 17 : Observations opportunistes de la macrofaune :

- (1) Bourdon
- (2) Gendarme (Pyrrhocoris apterus),
- (3) Vers de terre épigés,
- (4) Cloporte (Armadillidium vulgare),
- (5) Larve de coccinelle,
- (6) Larves non déterminées.

OBSERVATOIRE DE LA BIODIVERSITÉ SUR LES PARKINGS O2D®
DES PRISES DE VUES PHOTOGRAPHIQUES ET VIDÉOS SONT DISPONIBLES
SUR NOTRE SITE : www.o2d-environnement.com/observatoire-biodiversite/

LA MISE EN PLACE DE PIÈGES BARBER POUR COLLECTER LA MACROFAUNE CIRCULANTE A PERMIS DE CONFORTER CES OBSERVATIONS.

Lors de la campagne d'échantillonnage en mai 2021, trois pièges ont été mis en place par parking. Certains pièges ont malheureusement disparu de leur emplacement et n'ont par conséquent pas pu être pris en compte. C'est le cas de deux pièges pour CJ3 et CV2 ainsi que les trois pièges de NCV2. Pour cette raison, les trois parkings cités ci-dessus ne figurent pas sur la *Figure 18* et le *Tableau 5*. L'étude porte donc sur les résultats de collecte de 29 pièges au total.

La campagne d'échantillonnage a permis de collecter 621 individus qui ont été regroupés en onze ordres (*Figure 18*). Ces taxons ont des régimes alimentaires variés (prédateurs, détritivores, polyphages, etc.). Les trois taxons les plus abondants sont les hyménoptères (fourmis) avec 250 individus, soit 40% de la totalité des organismes prélevés, les isopodes avec 109 individus, soit 18%, et les acariens avec 80 individus, soit 13%.

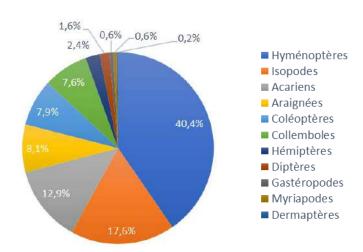


Figure 18 : Abondance relative des différents taxons relevés sur l'ensemble des parkings.

Tableau 5 : Fréquence d'apparition des différents taxons sur les parkings échantillonnés.

	Fréquence	
Taxon	d'apparition	Catégorie
Hyménoptères	100%	
Coléoptères	91%	
Araignées	82%	
Collemboles	82%	Uhiawiataa
Acariens	73%	Ubiquistes
Diptères	64%	
Isopodes	55%	
Hémiptères	55%	
Gastéropodes	36%	Intermédiaires
Myriapodes	18%	intermediaires
Dermaptères	9%	Rare

Les taxons peuvent également être étudiés en fonction de leur fréquence d'apparition sur les parkings échantillonnés. Ainsi, des taxons ubiquistes, intermédiaires et rares peuvent être différenciés. Dans le contexte de cette étude, 8 taxons sont considérés ubiquistes, avec une présence sur plus de 50% des parkings, 2 intermédiaires avec une fréquence d'apparition comprise entre 10% et 50% des parkings échantillonnés, et 1 rare car présent sur moins de 10% des parkings étudiés (*Tableau 5*).

Les fourmis (Hyménoptères)

Les hyménoptères récoltés sont essentiellement des fourmis. Ces dernières sont de plus en plus reconnues comme des outils utiles pour surveiller les écosystèmes de par leur grande diversité (plus de 12 000 espèces) et leur domination en densité et en biomasse dans presque tous les habitats. Par ailleurs, les fourmis sont présentes à de nombreux niveaux trophiques (prédateurs, proies, détritivores, mutualistes, parasites et herbivores). Elles jouent un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes : elles peuvent affecter la physique et la chimie du sol, la disponibilité des nutriments, les flux d'énergie et le type de végétation. Elles sont souvent définies comme des « ingénieurs écologiques » en raison de leurs actions directe et indirecte sur la disponibilité des ressources nutritives. Leur sensibilité aux changements environnementaux est une autre caractéristique importante qui fait de la fourmi un bioindicateur idéal. Beaucoup d'espèces de fourmis sont peu tolérantes et très réactives aux changements environnementaux.

Leur présence sur l'ensemble des parkings végétalisés étudiés a par conséquent toute son importance.

Les isopodes

Les isopodes terrestres prélevés sont des cloportes. Il s'agit des seuls représentants de crustacés terrestres. Cependant, ils vivent dans des environnements avec un haut degré d'humidité relative et sont actifs la nuit de façon à limiter leurs pertes en eau par évaporation. En général, les cloportes sont des décomposeurs : ils se nourrissent de matière végétale morte. Ils peuvent aussi se nourrir de bactéries et champignons vivants, de restes d'animaux ou d'excréments, ...

De plus, ils ont une faible capacité de dispersion. Les isopodes terrestres sont de très bons indicateurs écologiques et biogéographiques car la plupart d'entre eux sont étroitement liés au sol.

Quatre espèces de cloportes ont été identifiées sur les parkings étudiés: Armadillidium nasatum, Armadillidum vulgare, Oniscus asellus et Porcellio scaber. Trois de ces espèces font partie de « big five », autrement dit les espèces les plus communément rencontrées (Hopkin, 1991). Parmi les individus prélevés, de nombreuses formes juvéniles ont été identifiées. Ceci nous permet de mettre en évidence que les parkings végétalisés peuvent être considérés comme des milieux propices à la reproduction de ces espèces. Ces technosols présentent ainsi les conditions nécessaires pour que des isopodes y réalisent l'entièreté de leur cycle de vie.

Les larves

La présence de larves est un autre indicateur de la bonne qualité biologique de ces sols. Elles indiquent, dans un premier temps, que les parkings végétalisés rassemblent des conditions favorables pour la reproduction de diverses espèces. De plus, elles présentent un intérêt dans le réseau trophique. Elles participent activement à la fragmentation de la litière et au cycle de nutriments. De plus, elles constituent également un maillon de la chaîne alimentaire en tant que proies pour certains prédateurs.

Etude de l'influence de la connexion et de l'ancienneté des parkings

Même si les résultats sont hétérogènes en fonction des parkings, tous présentent une grande diversité de taxons (Figure 19). Les indices de diversité calculés montrent la présence d'une macrofaune variée avec des effectifs équitables pour la majorité des parkings (indices d'équitabilité proches de 1, cf *Tableau 6*). Les parkings NCJ3 et NCV3 montre une équitabilité plus faible, liée à une surabondance de certaines populations lors des prélèvements sur ces parkings : acariens pour NCJ3, hyménoptères et isopodes pour NCV3.

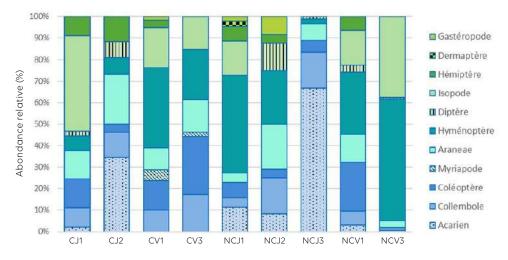


Figure 19 : Abondance relative des différents taxons collectés sur les parkings (n=3).

Tableau 6 : Indicateurs de biodiversité de la macrofaune prélevée sur les différents parkings échantillonnés.

	CJ1	CJ2	CV1	CV3	NCJ1	NCJ2	NCJ3	NCV1	NCV3
Richesse spécifique totale	6	4	5	8	5	4	5	5	5
Indice de diversité de Shannon	2,067	1,478	1,865	2,753	1,665	1,880	1,280	2,038	1,101
Equitabilité	0,873	0,878	0,899	0,943	0,749	0,917	0,595	0,913	0,487

Les vers de terre

Lors de la campagne d'échantillonnage de vers de terre, seuls des individus épigés ont été prélevés dans des parkings « connectés vieux » (CV). Ces lombriciens de surface vivent dans les premiers centimètres du sol. Ils sont généralement de petite taille (1 à 5 cm de long) et sont très colorés (rouge, brun foncé). Ces saprophages jouent un rôle important de recyclage de la matière organique en se nourrissant de matière organique morte ou en décomposition à la surface. Ils sont la proie d'oiseaux, de mammifères ou d'arthropodes prédateurs. Sensibles aux modifications que subit leur environnement, les vers de terre sont des indicateurs pertinents des contraintes anthropiques sur les sols. Leur vitesse de colonisation est lente et est très rarement passive, ce qui peut expliquer qu'ils ne soient retrouvés que dans des parkings « connectés vieux » (à l'exception d'un ver de terre retrouvé sur un parking non connecté jeune). Leur présence est signe d'une bonne qualité des sols (Eijsackers, 2011).

Sur les 40 individus prélevés, 60% étaient des vers de terre juvéniles et 40% des adultes. Cette observation indique que les vers de terre peuvent accomplir leur cycle de vie dans les parkings végétalisés.

Le calcul de l'abondance totale rapportée au m², soit un peu plus de 12 individus au m², montre que celle-ci reste faible par rapport aux valeurs qui peuvent être trouvées dans la littérature. A titre d'exemple, l'agence régionale de la biodiversité en Île-de-France a publié en 2019 les premiers résultats de l'Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT) réalisé dans les sols urbains d'Île-de-France (Agence Régionale de la Biodiversité en Île-de-France, 2019). Ils mettent en évidence la présence de lombrics, toutes espèces confondues, en abondance relativement élevée (316 individus par m²). Celle-ci est très variable puisqu'elle s'échelonne de 17 à 1413 individus par m². Même si les résultats obtenus sur les parkings perméables végétalisés semblent faibles, il est important de noter qu'ils ont été obtenus lors d'une seule campagne d'échantillonnage. De plus, la grande proportion d'individus juvéniles prelevés est encourageante.

L'ensemble de ces données montre que les communautés macrofauniques, échantillonnées grâce aux pièges Barber, sont diversifiées avec notamment des hyménoptères, des isopodes, ou encore des arachnides. Ces taxons ont des régimes alimentaires variés: prédateurs, généralistes, détritivores, ... Cette diversité a toute son importance pour le fonctionnement de l'écosystème. L'observation de la reproduction de certaines espèces met en évidence que les parkings végétalisés peuvent être considérés comme des milieux propices pour participer à la diminution de l'érosion de la biodiversité.

3.2.3 MÉSOFAUNE

La faune du sol participe à la structuration du sol. Lorsque les populations d'arthropodes² se réduisent, les sols perdent la plupart de leurs fonctions principales : porosité, rétention de l'eau et des nutriments, séquestration du carbone, ... Ainsi, la mésofaune constitue un bon indicateur de la santé biologique des sols. **Sur l'ensemble des campagnes d'échantillonnages et des parkings, 11 636 individus ont été collectés et déterminés.**

Observations générales

L'abondance moyenne globale de la mésofaune est égale à 12 626 ind/m² (Figure 20a). La distribution des abondances par parkings échantillonnés montre que 75% des parkings étudiés présentent une abondance inférieure à 20 000 individus par m² (Figure 20b). Le parking NCJ3 présente une abondance très élevée par rapport à l'ensemble des autres parkings. Ce résultat n'a pas pu être expliqué avec les critères étudiés.

²⁶

² Arthropode : Invertébré au corps formé de segments articulés (ex : insecte, arachnide, ...)

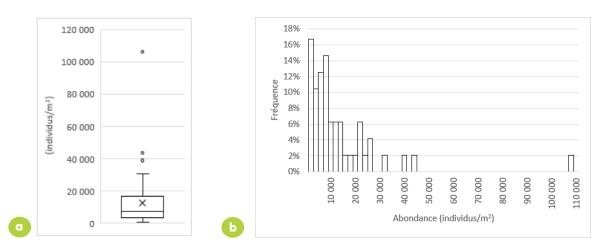


Figure 20 : (a) Abondance de la mésofaune sur les différents parkings étudiés, (b) Distribution des parkings en fonction de l'abondance de la mésofaune

Les conditions climatiques peuvent avoir une influence sur l'abondance de la mésofaune. C'est pourquoi quatre campagnes d'échantillonnage ont été réalisées, de fin mars à fin juin 2021.

L'évolution de l'abondance de la mésofaune prélevée au cours des mois montre que celle-ci est maximale au mois de juin avec 4570 individus collectés (*Figure 21*). On observe une diminution du nombre d'individus collectés aux mois d'avril et mai 2021. Ceci peut s'expliquer par les conditions météorologiques particulières de ces deux mois au cours de l'année 2021, avec des températures et précipitations moyennes en-dessous des normales saisonnières (*Annexe 1*).

Cette hypothèse est en partie confirmée par l'évaluation, grâce à des tests de Spearman, de la corrélation entre l'abondance de la mésofaune et les paramètres physico-chimiques mesurés lors de l'expérimentation (pH, densité apparente, humidité). Ce test a en effet montré une corrélation positive significative uniquement avec l'humidité (R=0,048; p-value = 0,008). Autrement dit, plus l'échantillon est humide, plus la mésofaune est abondante.

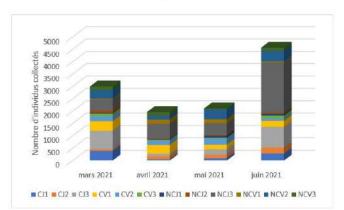


Figure 21 : Evolution du nombre d'individus collectés lors de prélèvements de la mésofaune du sol au cours des différentes campagnes d'échantillonnage.

Si l'on s'intéresse aux abondances relatives des différents taxons (collemboles, acariens, hyménoptères, coléoptères, myriapodes, arachnides et insectes n.d.), nous observons leur présence sur l'ensemble des parkings avec des proportions variables. Les deux taxons les plus abondants sont les collemboles et acariens. Ils représentent entre 75% (CJ2) et 98% (NCJ3) des effectifs. Ceci concorde avec les données trouvées dans la littérature. Ces deux taxons sont étudiés plus particulièrement dans la suite de ce rapport.

La fréquentation des parkings a été identifiée comme l'un des facteurs pouvant influer sur la biodiversité du sol. En effet, les perturbations régulières au niveau des surfaces pourraient altérer cet écosystème. Les résultats de cette étude ne montrent pas de corrélation entre la fréquentation et l'abondance totale d'organismes prélevés (*Tableau 7*). En effet, dans une même catégorie de fréquentation se trouvent des abondances élevées et des abondances faibles.

De la même façon, la fréquentation ne semble pas influer sur les proportions des populations identifiées. Ainsi, le croisement des données de fréquentation et d'abondance de la mésofaune invalide l'hypothèse d'une influence de la fréquentation d'un parking sur l'abondance de la mésofaune. Ce résultat peut, au moins partiellement, s'expliquer par la géométrie alvéolaire de la dalle support des parkings perméables étudiés. Celle-ci a été étudiée pour supporter le roulement des véhicules ainsi que le piétinement. Elle permet ainsi de préserver le contenu de l'alvéole afin d'éviter le tassement du substrat et de protéger la structure végétale. Ceci limite également les impacts des usages anthropiques sur la faune du sol.

Tableau 7 : Abondances totales relevées sur les parkings, toutes campagnes confondues, en fonction de leur taux de fréquentation. Le taux de fréquentation a été estimé en fonction du taux d'occupation du parking, de la durée du stationnement et du nombre de rotations par jour.

Taux de fréquentation	Parking(s) considéré(s)	Abondance totale (individus/m2)
Très fort	NCJ1	197
Fort	CJ1 CJ3 CV2 NCJ3 NCV1 NCV3	826 1 907 700 3 574 393 466
Modéré	CV1 CV3	1 166 305
Faible	CJ2 NCJ2	560 204

Influence des paramètres abiotiques

L'abondance des communautés de la mésofaune a été confrontée aux paramètres physico-chimiques des échantillons. Les tests de Spearman n'ont montré une corrélation positive significative uniquement avec l'humidité (R=0,048; p-value = 0,008) (Figure 22). Autrement dit, plus l'échantillon de sol est humide, plus la mésofaune est abondante. Aucune corrélation significative entre l'abondance de la mésofaune et le pH ou la densité apparente n'a pu être mise en évidence.

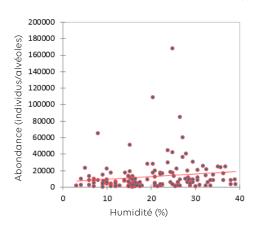


Figure 22 : Test de corrélation de Spearman entre les abondances (individus/alvéole) et l'humidité de l'échantillon (n=144)

L'ensemble des résultats portant sur les communautés mésofauniques récoltées lors des différents échantillonnages montre qu'elles sont variées et abondantes. L'abondance moyenne déterminée dans les parkings végétalisés étudiés (12 626 ind/m²) est proche de celle trouvée par Pey (2010) dans un sol néoformé (11 547 ind/m²) mais inférieure à celle relevée par Joimel (2015) dans des jardins potagers urbains (32 020 ind/m²).

LES PARKINGS VÉGÉTALISÉS SONT AINSI DES MILIEUX ACCUEILLANT UNE MÉSOFAUNE ET PEUVENT CONTRIBUER À LIMITER L'IMPACT DE PROJETS D'URBANISATION TRADITIONNELLEMENT RÉALISÉS AVEC UNE IMPERMÉABILISATION DU MILIEU.

Les collemboles

Les collemboles sont probablement les hexapodes – six pattes – les plus abondants sur Terre (Institut de l'environnement et du développement durable, 2013) (Figure 23). Ils sont ubiquistes, présents à toutes les latitudes, quel que soit le climat (Hopkin, 1997). Ils sont très abondants dans les dix premiers centimètres du sol. En moyenne, leur densité varie entre 10 000 et 100 000 individus au m².



Figure 23 : Collembole épigé prélevé sur l'un des parkings étudiés

Les fonctions qu'ils assurent rendent leur présence primordiale. Essentiellement détritivores et microphytophages, ils contribuent à la dissémination et à la régulation de la microflore du sol (bactéries, champignons) et jouent un rôle majeur dans la circulation des nutriments (azote, potassium, phosphore, ...). Ainsi, ils participent à l'apport en éléments essentiels pour la nutrition des végétaux. De plus, ils empêchent la prolifération excessive de certaines espèces pathogènes, responsables de maladies chez les plantes. Enfin, proies pour de nombreux organismes comme les chilopodes ou certains acariens, ils jouent un rôle important dans le réseau trophique.

Les espèces de collemboles sont distribuées verticalement dans le sol. Leurs caractéristiques morphologiques permettent de les classifier (*Tableau 8*).

Tableau 8 : Classification des espèces de colemboles

Espèces épigées (ou épiédaphiques)	 Espèces vivant dans la strate herbacée, en surface du sol ou d'un substrat naturel Espèces mobiles et pigmentées
Espèces hémi-édaphiques	Espèces présentant des caractéristiques intermédiaires entre les espèces épiédaphiques et les euédaphiques.
Espèces endogées (ou euédaphiques)	Espèces vivant dans le sol Espèce peu mobiles et peu pigmentées

Abondances totales et moyennes

Les échantillonnages effectués ont permis de dénombrer 5 582 collemboles. L'abondance moyenne globale est de 5 701 ind/ m². Lors des échantillonnages d'avril et mai, une détermination à l'espèce a été réalisée sur 1 203 collemboles.

Concernant l'abondance des collemboles, leur effectif est significativement plus élevé de collemboles en juin (2 743 individus collectés, 6 744 ind/m²) en comparaison avec celles des mois d'avril et mai (respectivement 621 et 567 individus collectés, 2 537 et 2 316 ind/m²) (Figure 24). Le mois de mars se situe en position intermédiaire (1 651 individus collectés, 11 205 ind/m²).

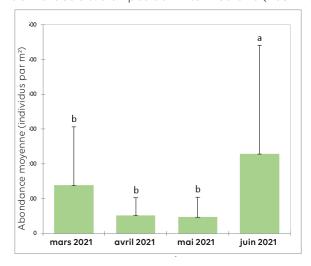


Figure 24 : Abondance moyenne (individus/m²) lors des quatre campagnes d'échantillonnage, tous parkings confondus. Les lettres représentent des groupes statistiquement différents (test non-paramétrique de Kruskal-Wallis et test post-hoc de Dunn – $p \le 0.05$)

Diversité spécifique

La composition spécifique des communautés de collemboles a été décrite pour les mois d'avril et mai car ces mois sont considérés dans la littérature comme les plus propices pour l'étude des collemboles. Néanmoins, comme évoqué précédemment, ces périodes n'étaient vraisemblablement pas les plus propices en 2021 en raison de conditions météorologiques qui ont impacté négativement l'abondance des organismes prélevés (Annexe 1, hypothèse confortée par la littérature et les résultats de la partie « Influence des paramètres abiotiques » ci-dessous).

Les échantillonnages effectués en avril et mai ont permis de dénombrer 21 espèces dont 10 hémi-édaphiques et 11 épiédaphiques qui représentent respectivement 75 % et 25 % de l'effectif total (*Figure 25*). Aucune espèce de collembole endogé n'a été déterminée.

Les collemboles sont largement représentés par une espèce hémiédaphiques : Cryptopygus thermophilus. Cette espèce thermophile est l'une des espèces pionnières présentes lors des premiers stades de colonisation des technosols construits (*Burrow, 2015*).

La faible proportion de collemboles épiédaphiques (ou épigées) est un indicateur pertinent au regard de la perturbation des sols. Ces espèces permettent en effet de définir un gradient de stabilité du milieu, depuis les zones ouvertes fréquemment perturbées où ils sont abondants jusqu'aux milieux très stables (forêts) avec de faibles abondances, en passant par les milieux prairiaux (*Ponge et al., 2006*). Les résultats suggèrent ici une certaine stabilité du milieu sol malgré la fréquentation des parkings.

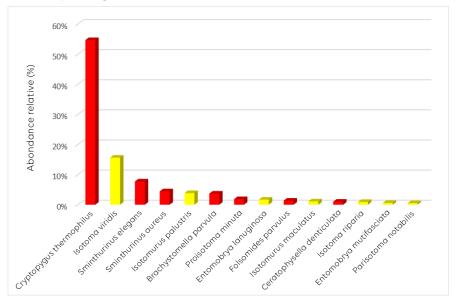


Figure 25 : Proportion des principales espèces de collemboles identifiées sur les parkings, lors des campagnes d'échantillonnages d'avril et mai (n=48) – en rouge : espèces hémi-édaphiques, en jaune : espèces épi-édaphiques.

Influence des paramètres abiotiques

Il est généralement admis que la mésofaune du sol, et plus particulièrement les collemboles, est sensible à la dessication du milieu (Poinsot-Balaguer, 1990). Pour mettre en évidence la corrélation entre l'abondance des collemboles et les paramètres physicochimiques comme l'humidité, le pH, et la densité apparente, des tests de corrélation de Spearman ont été effectués. Ces résultats statistiques concordent avec la littérature puisqu'une relation hautement significative entre l'abondance des collemboles et l'humidité a pu être mise en évidence (R = 0,539; p-value < 0,0001). Ainsi, plus l'échantillon est humide et plus l'abondance en collemboles est importante. Aucune corrélation n'est mise en évidence entre l'abondance en collemboles et le pH ou la densité apparente de l'échantillon. La mesure de la température des sols lors des prélèvements aurait été une donnée importante pour étudier son influence sur les populations.

Influence de la connexion et de l'ancienneté des parkings

Afin d'évaluer l'influence de la connexion et de l'ancienneté des parkings sur les communautés de collemboles, trois indices de diversité écologique sont calculés : la richesse spécifique, la diversité spécifique et l'équitabilité.

Seule la richesse spécifique montre une différence significative entre les parkings jeunes et vieux (*Tableau 9*). Ce résultat est en accord avec les données de la littérature. Après de premières communautés pionnières, caractérisées par une bonne mobilité, les populations se diversifient peu à peu (*Burrow, 2015*).

Tableau 9 : Résultats des tests statistiques (Kruskal-Wallis ou Mann-Whitney) sur la richesse spécifique, la diversité spécifique et l'équitabilité en fonction des lots étudiés. ns : non significatif.

	CJ/CV/NCJ/NCV	C/NC	1//
Richesse spécifique	ns	ns	V > J (p-value = 0,033)
Diversité spécifique	ns	ns	ns
Équitabilité	ns	ns	ns

Les acariens

Avec les collemboles, les acariens sont les arthropodes les plus abondants dans le sol. Ubiquistes, ils sont présents dans tous les types de sol et peuvent coloniser de nombreux habitats contenant de la matière organique. Les acariens du sol font partie de la classe des Arachnides et dépassent rarement 1 mm.

L'étude des acariens est en constante évolution avec plus de 48 000 espèces déjà décrites et un nombre total estimé entre 400 000 et 900 000. Néanmoins, il est admis qu'il existe deux groupes taxonomiques majeurs : les acariformes et les parasitiformes. La pédofaune comprend essentiellement les oribates et actinédides, appartenant à la classe des acariformes, et les gamasides, appartenant à la classe des parasitiformes (*Figure 26*).

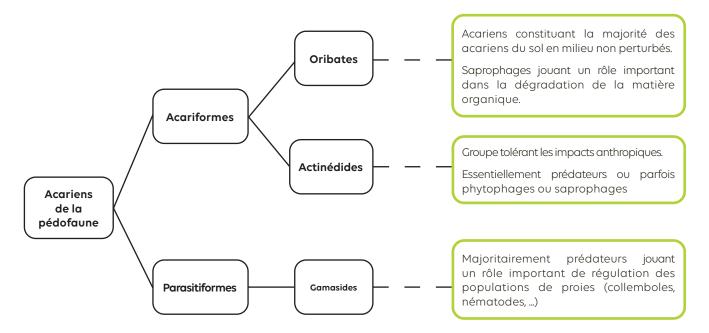


Figure 26 : Classification simplifiée des groupes d'acariens de la pédofaune étudiés dans le cadre de cette étude

La distribution des acariens le long du profil de sol est très variable, aussi bien horizontalement que verticalement. A ce titre, les espèces sont adaptées à leur habitat et à la plupart des conditions environnementales, soulignant leur importance écologique.

Ils sont plus abondants dans les premiers centimètres de sols, riches en matière organique, bactéries et champignons. Comme les collemboles, ils jouent un rôle clé dans les réseaux trophiques. Prédateurs, ils régulent les populations de proies tels que les collemboles, bactéries ou champignons. Décomposeurs de matière organique (macrophytophages ou saprophages/détritivores décomposant, respectivement, des tissus végétaux ou d'autres résidus organiques), ils contribuent à la minéralisation de celle-ci et ainsi à la formation de l'humus du sol.

Abondances totales et movennes

L'abondance moyenne d'acariens est de 5 620 ind/m². Celle-cimontre une tendance à augmenter entre les mois de mars et de juin (*Figure 27*). On note une baisse au mois d'avril, vraisemblablement liée aux conditions climatiques particulières de cette année 2021 (*Annexe 1*). Cependant, de façon générale, il n'existe pas de différence significative entre ces quatre mois.

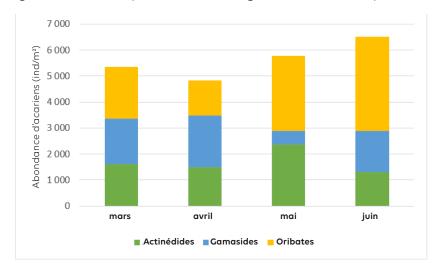


Figure 27 : Abondance d'acariens (individus/ m²) au cours des différentes campagnes d'échantillonnage

La détermination des acariens a été conduite jusqu'au niveau des sous-ordres. Trois groupes ont été identifiés: les oribates, les gamasides et les actinédides. Leur répartition en sous-ordres lors des quatre campagnes d'échantillonnage montre que les plus abondants sont les oribates (44%) suivis des actinédides (30%) puis des gamasides (26%) (Figure 28). Ce résultat est en accord avec la littérature qui indique que les oribates constituent souvent la majorité des acariens dans les écosystèmes peu ou pas perturbés (Wallwork, 1976). Leur présence est intéressante car les oribates, qui sont peu mobiles, ont des besoins exigeants en terme d'habitats et ont un processus de colonisation relativement lent (Burrow, 2015).

Si l'on observe l'évolution de la répartition des populations au cours des campagnes d'échantillonnage, on note une baisse des gamasides au mois de mai (Figure 27). Ce sous-ordre est majoritairement prédateur, notamment de collemboles. Afin d'étudier l'influence de la présence de proies (collemboles) sur l'abondance des acariens, des tests de corrélation de Spearman ont été réalisés. Le coefficient de corrélation de 0,585 (p-value < 0,0001) nous indique que plus le nombre de collemboles est grand, plus l'abondance en acariens est importante. De façon plus fine, si l'on s'intéresse uniquement à la corrélation entre les collemboles et les acariens prédateurs (gamasides essentiellement), une corrélation positive hautement significative peut également être mise en évidence (R = 0,208, p-value = 0,001). La baisse de la proportion de gamasides au mois de mai peut donc être, au moins partiellement, liée à la baisse du nombre de collemboles observée aux mois d'avril et mai. Ce résultat met en évidence l'état dynamique des milieux étudiés ainsi que les différentes interactions présentes dans ces sols.

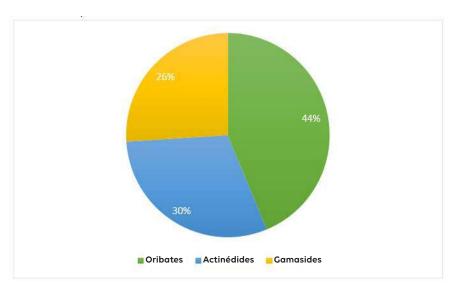


Figure 28: Proportion des trois sous-ordres d'acariens déterminés, toutes campagnes d'échantillonnage confondues (n=48).

Influence des paramètres abiotiques

Aucune corrélation (test de Spearman) n'est mise en évidence entre l'abondance des acariens et l'humidité, le pH ou la densité apparente des échantillons.

Influence de la connexion et de l'ancienneté des parkings

Aucune influence de la connexion et de l'ancienneté des parkings sur l'abondance et la répartition des sous-ordres n'a pu être mise en évidence par les tests statistiques (Kruskal-Wallis ou Mann-Whitney).

L'ensemble des résultats sur la mésofaune montre que les collemboles et acariens sont les taxons les plus abondants avec des proportions variables en fonction des campagnes d'échantillonnage. Cette observation semble nous indiquer que les parkings végétalisés étudiés restent des biotopes jeunes. Même si cet habitat pionnier n'a pas atteint son équilibre, les variations observées entre les différents échantillonnages sont fortement influencées par les conditions météorologiques. Dans ce cadre, la dominance d'acariens est intéressante car ces organismes sont moins sensibles aux facteurs abiotiques (température, humidité) que les collemboles. La présence de ce taxon est importante car elle permet d'éviter des chutes importantes d'abondance dans ces milieux en fonction des conditions météorologiques (Joimel, 2015).

La présence d'une mésofaune variée, même dans un milieu très urbain, est rendue possible grâce à différents facteurs. Le premier est la capacité de ces organismes à migrer, notamment de façon passive grâce au vent ou au transport par d'autres animaux ou par l'homme, jusqu'à ces espaces parfois isolés par les activités anthropiques. Afin que la colonisation soit durable, il est nécessaire que ces individus trouvent les conditions favorables à leur sédentarisation dans ce nouveau milieu récepteur. Pour cela, le deuxième facteur est de recréer ou de conserver des milieux propices à l'accueil d'une mésofaune variée. Ceci est possible avec l'utilisation de matériaux de qualité et une bonne mise en œuvre. Ces matériaux doivent contenir de la matière organique pour permettre à la flore et la faune de s'installer. Les réseaux trophiques et interactions qui en découleront permettront à ce milieu vivant de fonctionner de façon pérenne.

3.2.4 MICROORGANISMES

Activité microbienne dans les différents horizons constitutifs des systèmes de sol O2D®

En juin 2019, l'activité microbienne par mesure de l'activité de la phosphatase alcaline du substrat contenu dans l'alvéole et de celui contenu dans le mélange Terre-Pierre indique des niveaux d'activité supérieurs à 200 mg de p-nitrophénol hydrolysé par gramme de sol sec par heure (*Figure 29*). Cette valeur est comparable à ce qui peut être mesuré dans des substrats de pelouses en milieu urbain et inférieure aux activités mesurées pour des prairies naturelles (activité comprise entre 600 et 800 mg PNP / g de sol sec / h).

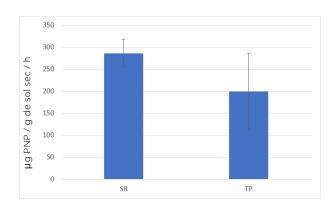


Figure 29: Activité moyenne des phosphatases alcalines dans les substrats des différentes couches constituant le système O2D GREEN® (n=6) – TP = substrat du mélange terre-pierre, SR = substrat de remplissage SR GREEN®. Les barres d'erreurs indiquent l'écart-type standard.

Des prélèvements à différentes profondeurs ont également été réalisés sur la plateforme d'essais en juin 2021. L'activité microbienne globale des échantillons est évaluée par sa capacité à dégrader le diacétate de fluorescéine (FDA) en dosant la quantité de fluorescéine libérée (mg de fluorescéine/g d'échantillon). Ils montrent que les différentes couches constituant un parking végétalisé telles que préconisées par O2D ENVIRONNEMENT® (fondation en mélange terre-pierre, lit de pose fertile et substrat de remplissage fertile) possèdent la capacité d'hydrolyser la FDA (entre 0,23 et 0,28 mg/g d'échantillon) (Figure 30). Aucune différence significative relative à l'activité microbienne entre les différents horizons pédologiques n'a été mise en évidence (test de Kruskal-Wallis). Ces résultats renforcent l'intérêt de la mise en œuvre de parkings végétalisés selon les recommandations d'O2D ENVIRONNEMENT®, à savoir la présence de matière organique dans les différents horizons constituant le système, ce qui permet de favoriser l'activité microbienne dans l'ensemble du technosol.

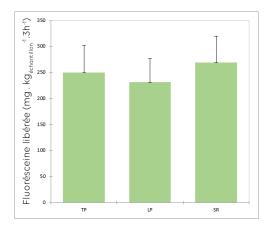


Figure 30 : Quantité moyenne de fluorescéine libérée dans les substrats des différentes couches constituant le système O2D GREEN® (n=3, ± écart-type) – TP = substrat du mélange terre-pierre TP GREEN®, LP = lit de pose fertile LP GREEN®, SR = substrat de remplissage SR GREEN®.

Tableau 10 : Activité microbienne globale moyenne (n=3) dans les échantillons prélevés, évaluée au travers des teneurs en fluorescéine libérée (mg/g d'échantillon). Classement par ordre croissant d'activité.

Échantillon	Moyenne	Écart-type standard
CV2	0,06	± 0,04
CJ1	0,07	± 0,01
NCV1	0,08	± 0,01
CV1	0,09	± 0,02
NCJ2	0,10 ±	0,04
NCJ1	0,10 ±	0,06
CJ2	0,13 ±	0,05
NCV3	0,19 ±	0,03
CJ3	0,19 ±	0,07
CV3	0,20 ±	0,09
NCV2	0,25	± 0,13
NCJ3	0,35	± 0,11

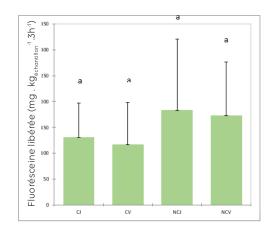


Figure 31 : Quantité moyenne de fluorescéine libérée dans les échantillons prélevés sur les 12 parkings (n=9, ± écart-type).

Activité microbienne en surface sur les différents parkings étudiés

Lors de la campagne de prélèvements sur les différents parkings, en mai 2021, les échantillons présentent une capacité d'hydrolyse du diacétate de fluorescéine entre 0,06 et 0,34 mg/g d'échantillon (Tableau 10). La moyenne, tous échantillons confondus, est 0,16 mg/g d'échantillon. Ces résultats sont issus d'une seule campagne de prélèvement réalisée au mois de mai 2021. Les conditions climatiques des mois d'avril et mai étaient hélas peu favorables aux activités biologiques. Les prélèvements sur la plateforme d'essais avaient été réalisés en juin 2021. Cela peut expliquer que les mesures réalisées sur les parkings soient plus faibles que celles obtenues pour le substrat de remplissage de la plateforme d'essai.

Influence des paramètres abiotiques

Des tests de corrélations non paramétriques de Spearman ne montrent pas d'influence des paramètres physicochimiques comme l'humidité, le pH et la densité apparente.

Influence de la connexion et de l'ancienneté des parkings

Les différentes modalités étudiées (CJ, CV, NCJ, NCV) présentent une activité microbiologique comparable (pas de différence significative, test de Kruskal-Wallis ou de Mann-Whitney).

3.3 LA FAUNE DU SOL SUR LES PARKINGS EN REMPLISSAGE MULCH

La solution O2D Mulch® est proposée comme alternative organique aux remplissages initialement proposés par O2D ENVIRONNEMENT®. Elle a montré de très bonnes propriétés thermiques, caractéristique importante au regard de la lutte contre les îlots de chaleur urbain (*Bertout & Lépinasse, 2020*). L'étude de ses aptitudes à abriter les organismes du sol fait l'objet de la présente partie de l'étude.

L'attractivité de différents types de paillages et leur efficacité pour favoriser le mouvement de la faune du sol ont fait l'objet de différentes études. Celles-ci ont montré que les paillis organiques, tels que ceux utilisés pour la solution O2D MULCH®, pouvaient abriter une pédofaune variée et participer à la circulation des différentes espèces (*Leclercq-Dransart et al., 2020*). Ces aspects fonctionnels présentent un grand intérêt au regard de la connectivité et/ou de la renaturation de certains sols urbains. Dans le cadre de cette étude, nous souhaitons évaluer dans quelle mesure la solution O2D MULCH® concorde avec ces résultats.

3.2.1 MACROFAUNE

Les relevés de macrofaune ont été réalisés en mai 2021. Les résultats présentés correspondent à 3 alvéoles prélevées par modalité sur la plateforme d'essais (*Tableau 11*).

L'abondance totale de la macrofaune est plus élevée dans le système O2D GREEN®, avec 277 individus, par rapport à la modalité O2D MULCH®, avec 35 individus. Concernant l'abondance relative, les deux modalités présentent une richesse taxonomique comparable, avec une dominance d'isopodes (54% pour O2D MULCH® et 87% pour O2D GREEN®). Deux éléments ne doivent être négligés au regard des différences observées.

Premièrement, la différence d'abondance totale d'individus collectés est liée à un très grand nombre d'isopodes dans l'un des prélèvements réalisés dans la solution O2D GREEN®: 181 Armidillium nasatum prélevés dans une alvéole, comprenant des formes adultes et juvéniles. La solution O2D MULCH® se démarque quant à elle par sa diversité d'organismes macrofauniques incluant des détritivores (isopodes, gastéropodes, ...), des prédateurs (araignées, ...) et des ingénieurs du sol (fourmis).

Deuxièmement, la faible abondance collectée dans le mulch peut être liée à l'évolution de ce milieu au cours des trois années depuis sa mise en place. Afin d'observer son comportement au cours du temps, celui-ci n'a pas été regarni depuis 2018. Comme toute matière organique, une biodégradation progressive de celui-ci a pu être observée, avec une diminution de son volume ainsi qu'un changement d'aspect, essentiellement en profondeur.

Trois ans après sa mise en place, le mulch est donc peut-être devenu un milieu moins propice à la colonisation par la macrofaune, notamment en raison de la diminution de son volume ainsi que du nombre de cavités pouvant abriter les différents individus. Il serait intéressant d'étudier l'effet d'un regarnissage sur la colonisation par la macrofaune. Cette recommandation était initialement préconisée en raison de la dégradabilité de ce substrat, pour des raisons de praticabilité (perte de volume dans l'alvéole) et d'esthétique. Or cet entretien pourrait également avoir un rôle bénéfique pour la macrofaune.

Tableau 11 : Abondance des différents taxons collectés dans les pièges Barber lors de la campagne d'échantillonnage de mai 2021 sur la plateforme d'essais.

zozi sui la piaterorme a essais.								
	O2D MULCH®	O2D GREEN®						
Isopodes	19 (54%)	241 (87%)						
Aranae	1 (3%)	19 (7%) 0 (0%)						
Gastéropodes	8 (23%)							
Collemboles	4 (11%)	6 (2%)						
Hyménoptères	1 (3%)	5 (2%)						
Coléoptères	1 (3%)	3 (1%)						
Hémiptères	1 (3%)	3 (1%)						
Total	35	277						

La présence de gastéropodes dans la solution mulch est en accord avec la littérature. En effet, ceux-ci sont fortement sensibles à l'humidité du milieu. De par ses propriétés, le mulch permet de maintenir un sol humide et frais, conditions favorables pour ce taxon.

NOUS POUVONS PAR CONSÉQUENT EN DÉDUIRE QUE LA SOLUTION O2D MULCH® PRÉSENTE UN INTÉRÊT POUR UNE COLONISATION DU SOL PAR UNE MACROFAUNE VARIÉE.

Des prélèvements de la mésofaune ont été réalisés en mars, avril et mai 2019 puis en mars, avril, mai et juin 2021. Toutes campagnes confondues, les abondances moyennes rapportées au m² ne montrent pas de différences significatives (*Figure 32*).

Si l'on s'intéresse maintenant à l'évolution des abondances au cours des mois, en 2019, la solution O2D MULCH® a présenté la plus forte abondance totale ainsi que la plus grande évolution saisonnière (*Figure 33a*). En 2021, les abondances totales ne montrent pas de tendance particulière pour les deux solutions. O2D MULCH® est la solution présentant l'abondance totale la plus élevée, en avril 2021 (*Figure 33b*). Celle-ci est liée à une forte abondance d'individus dans l'une des alvéoles prélevées. C'est pourquoi cette augmentation n'est pas statistiquement significative par rapport aux autres mois (test de Kruskal-Wallis).

D'une façon générale, en 2021, les abondances moyennes d'individus collectés sur les deux modalités ne sont pas statistiquement différentes (données non disponibles en 2019).

Deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer les différences observées entre les résultats de 2019 et 2021.

La première est climatique. Les conditions météorologiques entre ces deux années sont très différentes: des mois de mars et avril avec des températures au-dessus des normales saisonnières et un mois de mars humide en 2019 qui contrastent avec les mois de mars et avril frais à froid et très secs en 2020.

La seconde que nous formulons est liée à la dégradation du mulch au cours des 3 années depuis sa mise en place. Il constitue donc un milieu différent du milieu initialement testé 6 mois après sa mise en œuvre, en 2019. Comme évoqué pour la macrofaune, il aurait été intéressant d'ajouter une condition à l'étude pour observer l'effet d'un regarnissage sur les différentes populations. Ceci nous permettrait d'évaluer dans quelle mesure cette pratique, préconisée par O2D ENVIRONNEMENT®, pourrait influencer positivement la biodiversité du sol.

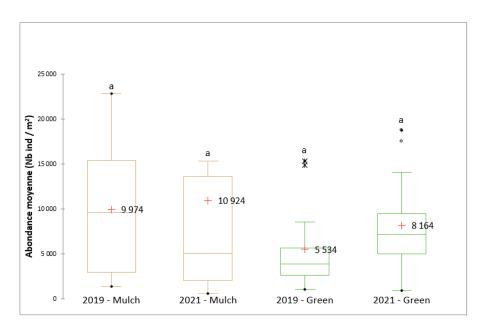
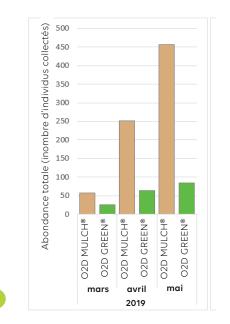


Figure 32 : Abondances moyennes de la mésofaune (nombre d'individus par m^2) sur la plateforme d'essais en fonction de la modalité étudiée (O2D MULCH® et O2D GREEN®) et de l'année de prélèvement (2019 et 2021) (n=24). Les lettres représentent des groupes statistiquement différents (test non-paramétrique de Kruskal-Wallis et test post-hoc de Dunn – $p \le 0,05$)



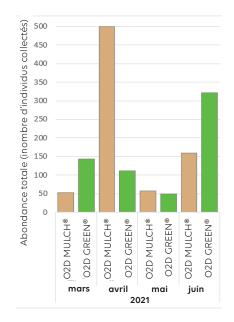


Figure 33: Evolution de l'abondance totale de la mésofaune (a) lors des trois campagnes de prélèvement de 2019 (cumul des 3 alvéoles prélevées par solution par échantillonnage), (b) lors des quatre campagnes de prélèvement de 2021 (cumul des 3 alvéoles prélevées par solution par échantillonnage).

L'étude de l'abondance relative des différents taxons met en évidence que les collemboles et les acariens sont à nouveau les plus représentés, ce qui concorde avec les résultats obtenus sur les différents parkings ainsi qu'avec la littérature (Figure 34). Les abondances relatives déterminées en 2019 et 2021 montrent que la solution O2D GREEN® semble présenter une grande stabilité de la répartition des populations. Entre l'année 2019 et 2021, la composition des communautés pour la modalité O2D MULCH® évolue. Les acariens dominent la communauté en 2021 par rapport aux collemboles (82% et 7% respectivement), et inversement en 2019 (14% et 84% respectivement). Cette dernière observation peut être liée au biotope que constitue le mulch. Celui-ci a évolué davantage au cours des années par rapport au substrat de remplissage, notamment au niveau des facteurs abiotiques.

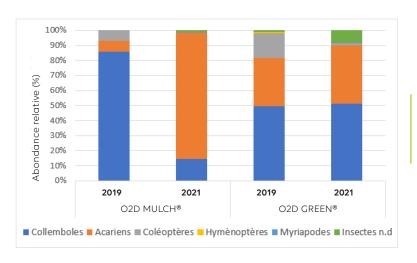


Figure 34: Abondance relative des différents taxons de la mésofaune du sol prélevés dans les deux solutions étudiées sur la plateforme d'essais, toutes campagnes de prélèvements d'une année confondues.

Lorsque l'on s'intéresse plus particulièrement aux collemboles, les indices de biodiversité calculés ne montrent pas de différences significatives entre les deux modalités étudiées. Les proportions des espèces prélevées montrent néanmoins une différence : les espèces les plus abondantes sont respectivement Cryptopygus thermophilus et Brachystomella parvula pour O2D GREEN® et O2D MULCH® (*Figure 35*). Brachystomella parvula est une espèce hémiédaphique présente durant les stades pionniers de colonisation, au même titre que Cryptopygus thermophilus.

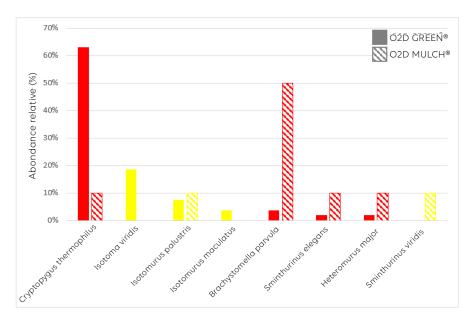


Figure 35 : Proportion des espèces de collemboles identifiées sur la plateforme d'essais, lors des campagnes d'échantillonnages d'avril et mai (n=12), pour O2D MULCH® (remplissage uni) et O2D GREEN® (remplissage hachuré) – en rouge : espèces hémi-édaphiques, en jaune : espèces épi-édaphiques.

L'étude des proportions des différents sous-ordres d'acariens montrent que celles-ci varient en fonction des campagnes d'échantillonnage (*Figure 36*). En effet, en mars, les gamasides sont les espèces majoritaires dans les deux systèmes étudiés. En juin, ce sont les actinédides. Ceci suggère que les différentes populations se régulent en fonction des conditions de leurs milieux. Le milieu, vivant, s'adapte et évolue.

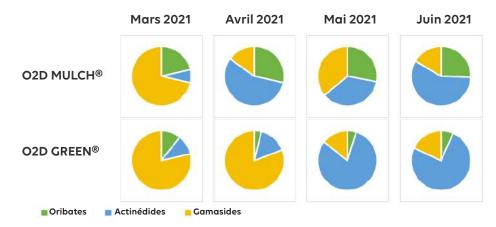


Figure 36 : Proportion des trois sous-ordres d'acariens déterminés dans les systèmes O2D MULCH® et le système O2D GREEN®.

L'ensemble de ces résultats mène à la conclusion que le système O2D MULCH® est une solution intéressante au regard de la biodiversité des sols. En effet, cette solution peut être colonisée par une macrofaune et une mésofaune variées.

Une étude menée par Dransart (2020) met en évidence l'impact positif des mulchs organiques sur les surfaces avoisinantes. Plusieurs hypothèses sont émises pour expliquer ce phénomène. La première est liée à une plus grande abondance d'organismes dans les paillis organiques, qui influence l'abondance des populations sur les surfaces avoisinantes. La seconde met en avant l'impact de ces paillis sur les facteurs abiotiques tels que l'humidité et la température. Cette faculté à tamponner les variations climatiques peut être bénéfique pour les surfaces à proximité immédiate. Ces effets n'ont pas été étudiés lors de la présente étude mais les résultats concernant la faune du sol combinés au comportement thermique de la solution O2D MULCH® laissent présager que ces propriétés pourraient être transposées à ce système également.

4. CONCLUSION

Remettre les sols vivants au centre des préoccupations, lorsque les usages le permettent, fait partie des préoccupations actuelles en matière d'urbanisation. Pour cela, il faut repenser les modes d'aménagements et l'occupation des espaces afin de promouvoir au maximum le retour de la nature en ville.

La biodiversité des sols dans des ouvrages tels que les parkings végétalisés est très peu documentée. Cette étude contribue au développement de connaissances sur ces anthroposols tout en apportant des informations techniques et opérationnelles pour les aménageurs.

Le présent rapport présente deux volets. Le premier avait pour objectifs d'étudier la capacité des parkings perméables végétalisés O2D GREEN® à abriter une pédofaune variée et d'évaluer si l'âge ou la connectivité de ces parkings à une source potentielle de biodiversité avaient une influence sur les populations présentes dans les sols. Le second portait sur l'évaluation des capacités du système O2D MULCH® à participer au retour de la biodiversité dans les sols.

4.1 LES PARKINGS VÉGÉTALISÉS : DES TECHNOSOLS POUVANT ÊTRE COLONISÉS PAR UNE PÉDOFAUNE VARIÉE

La présente étude a permis de montrer que les parkings végétalisés mis en œuvre selon les préconisations d'O2D ENVIRONNEMENT® constituent des milieux accueillants pour une pédofaune variée. Ils représentent des zones de circulation, d'habitat et de reproduction pour une faune variée. Les différents horizons qui constituent le système abritent une activité microbiologique, preuve de la présence des microorganismes indispensables dans les cycles du sol. Ainsi, ces résultats mettent en lumière le rôle bénéfique que peuvent jouer ces anthroposols au regard de la lutte contre l'érosion de la biodiversité.



Afin d'évaluer si les conditions préconisées lors de l'aménagement étaient favorables à une colonisation des sols pérenne, l'étude a porté sur douze parkings mis en œuvre entre 2004 et 2020 répartis dans des environnements plus ou moins urbains. Seuls les vers de terre ont montré une influence de ces deux paramètres sur leur colonisation. En effet, ces lombrics n'ont pu être prélevés que dans des parkings mis en place depuis plus de cinq ans et connectés à une source potentielle de biodiversité. Ce résultat peut être expliqué par le fait que les vers de terre migrent lentement de façon active. L'ancienneté et la connexion des parkings n'ont pas montré d'influence sur l'abondance et la répartition des autres taxons, que ce soit pour la macrofaune et la mésofaune, ni sur l'activité microbiologique du contenu de l'alvéole. Une étude approfondie des collemboles a permis de mettre en évidence que plus le parking était ancien, plus la richesse spécifique était élevée. Ceci est en accord avec la littérature qui montre une diversification des espèces au fur et à mesure du temps.

L'influence de certains facteurs abiotiques sur la présence de mésofaune a été évaluée. Les conditions climatiques lors des prélèvements influent sur l'abondance d'individus : celle-ci est plus faible lors des mois frais/froids et secs. L'étude de l'impact de l'humidité sur le nombre d'individus confirme que plus l'échantillon est humide, plus les organismes sont abondants.

Cette étude a permis de mettre en évidence la présence d'individus ayant des tailles, des capacités de dispersion et des régimes alimentaires variés (saprophages, prédateurs, etc.). L'ensemble de ces résultats permettent de dessiner une ébauche de réseau trophique présent dans les sols de parkings végétalisés (Figure 37). Il rend possible de maintenir durablement un fonctionnement écologique grâce à une diversité de processus et d'organismes qui les réalise (Burrow, 2015). Ceci valide l'hypothèse que les systèmes de parkings végétalisés, conçus avec différents horizons de matériaux fertiles et drainants, sont vivants et fonctionnels.

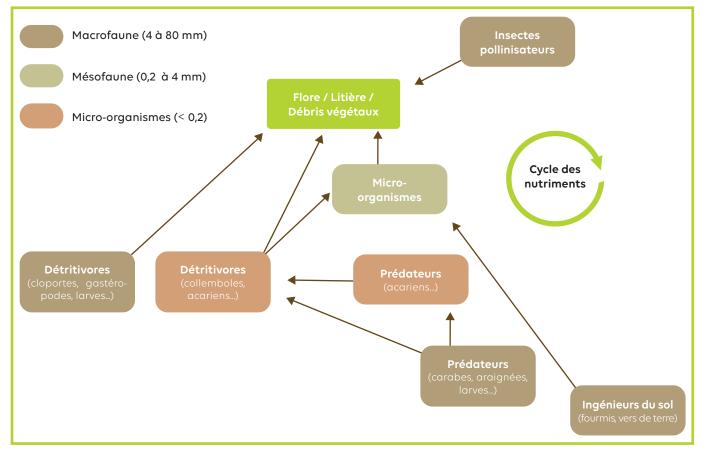
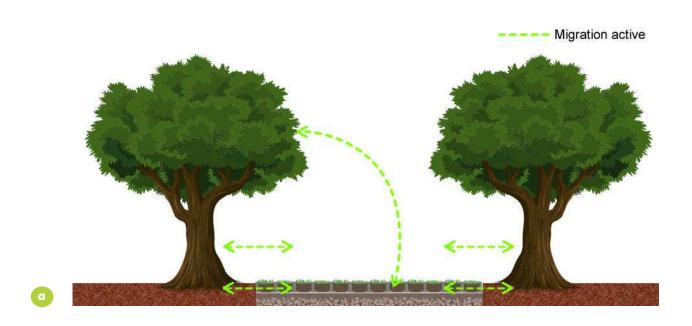


Figure 37: Ebauche de réseau trophique présent dans les parkings perméables végétalisés O2D®.

Les parkings végétalisés peuvent ainsi s'inscrire dans les SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE. En offrant aux espèces des conditions favorables à leur déplacement et à l'accomplissement de leur cycle de vie, ce type d'aménagement peut participer à la « trame brune », notamment en tant que corridor écologique continu ou discontinu (Figure 38). La migration passive des espèces, notamment par le vent, rend en effet possible la colonisation de zones espacées les unes des autres, jouant ainsi le rôle d'espaces-relais potentiels pour la faune du sol (Figure 38b).



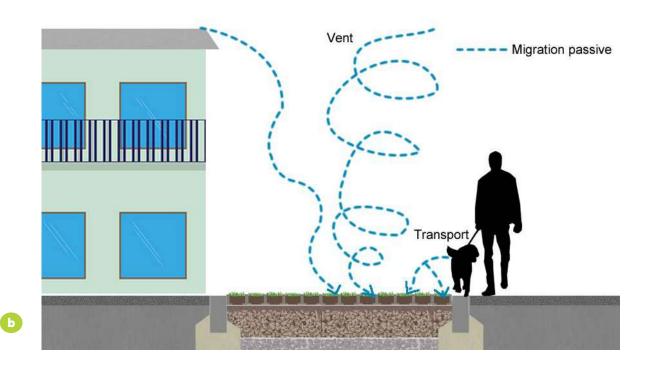


Figure 38 : Contribution aux trames brune et verte (a) Participation aux continuités écologiques, (b) Corridors discontinus, notamment grâce aux migrations passives des espèces.

4.2 LA SOLUTION O2D MULCH® : UNE SOLUTION ALTERNATIVE INTÉRESSANTE AU REGARD DE LA BIODIVERSITÉ DES SOLS

La diversification de la nature des remplissages est un enjeu important pour O2D ENVIRONNEMENT® afin de proposer les solutions les plus adaptées aux besoins des utilisateurs. Dans ce cadre, une nouvelle solution de remplissage organique, la solution O2D MULCH®, a été étudiée. Celle-ci avait déjà fait l'objet d'une étude sur le comportement thermique des solutions O2D® et avait montré des capacités bénéfiques au regard de la lutte contre les îlots de chaleur urbains (Cf « Étude du comportement thermique des systèmes de sol perméables O2D® », O2D ENVIRONNEMENT, 2020). Son aptitude à abriter une pédofaune variée a été étudiée dans le second volet de ce rapport.

Les résultats de cette étude ont montré que le mulch réparti dans les alvéoles constituait un milieu propice à l'accueil d'une pédofaune variée. Plusieurs hypothèses permettent d'expliquer les conditions favorables offertes par le mulch pour la colonisation par la pédofaune. La première repose sur les conditions microclimatiques qu'il peut offrir. Il permet notamment de réguler les températures et de maintenir une humidité de surface. La deuxième est la présence de cavités qui peuvent servir d'habitats et de refuges pour les différents organismes. Cette deuxième hypothèse peut par ailleurs expliquer la comparaison des résultats entre les échantillonnages de 2019 et 2021. En effet, le mulch avait subi une certaine dégradation au cours de ses deux années d'exploitation.

Le choix de la solution O2D MULCH® permet de répondre à différents objectifs :

- > Un entretien modéré par rapport à une solution végétalisée (remplissage tous les 2 à 3 ans),
- > L'apport d'un milieu propice à la colonisation par une pédofaune variée,
- > Un comportement thermique bénéfique pour la lutte contre les îlots de chaleur urbains,
- > L'utilisation de déchets verts comme remplissage, en respectant une certaine granulométrie et en étant vigilant à la biodégradabilité plus lente de certaines essences.



PERSPECTIVES

Dans le contexte actuel de lutte contre les effets néfastes de l'urbanisation massive et la lutte contre l'artificialisation des sols, la nature a été identifiée comme une réponse par de nombreuses études scientifiques. Il est nécessaire que les sols en milieu urbain retrouvent, dans la mesure du possible, leurs fonctions régulatrices des flux (infilltration des eaux), de la qualité de l'air (séquestration du carbone ou de l'azote) et du climat (comportement thermique), ainsi que leur fonction de support de vie (faune et flore).

La résilience des territoires passe également par la préservation ou la restauration de la biodiversité. C'est pourquoi les réglementations et mentalités évoluent avec le renforcement des trames vertes et bleues, la création ou la restauration d'habitats, de corridors ou de ressources alimentaires.

Ce rapport a permis de démontrer que les systèmes O2D GREEN®, pour parkings végétalisés, et O2D MULCH® sont des aménagements qui peuvent participer au développement d'une « trame brune » efficace avec une biodiversité fonctionnelle. **L'établissement d'un véritable réseau trophique est une première étape vers la (re)fonctionnalisation des sols utilisés pour les stationnements de véhicules.** Ce rapport apporte ainsi des éléments importants aux aménageurs souhaitant établir un véritable maillage écologique dans les villes, avec, entre autres, une pédofaune variée. Il met également en avant la résistance des aménagements végétalisés dans le temps.

L'ensemble de ces résultats a permis de contribuer au développement d'un outil d'aide à la décision pour le choix de la configuration de l'aménagement en fonction, par exemple, des critères environnementaux, de la fréquentation ou de l'entretien (Matrice d'aide à la décision O2D®). La variété des solutions proposées par O2D ENVIRONNEMENT® et leur modularité permettent ainsi de répondre à de nombreux besoins, tant au niveau des usages que des bénéfices environnementaux visés ou des partis-pris paysagers.

Les deux premiers rapports publiés par O2D ENVIRONNEMENT®, en collaboration avec des scientifiques, montrent que les solutions O2D GREEN® et O2D MULCH® sont des solutions multifonctionnelles au regard des bénéfices environnementaux qu'elles apportent. En plus de leur comportement thermique bénéfique à la lutte contre les îlots de chaleur urbains, ces deux solutions apportent des conditions satisfaisantes pour une colonisation par une faune du sol et une flore variée, indispensables à de nombreuses fonctions écosystémiques des sols.

LES RÉSULTATS METTENT ÉGALEMENT EN LUMIÈRE DES RECOMMANDATIONS CONCERNANT LA MISE EN ŒUVRE DES TELLES SOLUTIONS AFIN D'APPORTER LES CONDITIONS NÉCESSAIRES À UNE (RE)FONCTIONNALISATION DES SOLS: MISE EN PLACE D'HORIZONS DRAINANTS ET FERTILES SOUS LES SOLUTIONS VÉGÉTALISÉES, UTILISATION DE MATÉRIAUX INCLUANT UNE MATIÈRE ORGANIQUE DE HAUTE QUALITÉ BIOLOGIQUE, RESPECT DU CYCLE NATUREL DES SOLS, ETC. DANS CE CADRE, CES SOLUTIONS PEUVENT PARTICIPER À LA RENATURATION D'ESPACES EN MILIEU URBAIN.



Annexe 1

Tableau 12 : Données climatiques des mois de mars à mai 2019. Moy : Moyenne, E : écart à la normale 1981-2010, Min : minimale, Max : maximale

2019										
	Températures minimales		Températures maximales			Précipitations			Informations complémentaires	
	Moy	E	Min. du mois	Moy	E	Max. du mois	Cumul	E (cumul)	Max. du mois	illo matons complementalies
Mars	5,7	+2,1 °C	0 ℃	12,6 °C	+2 °C	19,8 °C	80,7 mm	+38 %	28,7 mm/ jour	
Avril	6,3	+0,9 °C	-0,6 °C	16 °C	+1,9 °C	25,8 °C	35 mm	-31 %	8,3 mm/ jour	
Mai	7,9 °C	-1 °C	2,5 °C	17,4 °C	-0,5 °C	23,4 °C	25,3 mm	-60 %	10,5 mm/ jour	

Tableau 13 : Données climatiques des mois de mars à juin 2021. Moy : Moyenne, E : écart à la normale 1981-2010, Min : minimale, Max : maximale

2020										
	Températures minimales			Températures maximales			Précipitations			Informations complémentaires
	Moy	E	Min. du mois	Moy	E	Max. du mois	Cumul	E (cumul)	Max. du mois	
Mars	3,6 °C	0 °C	-1 °C	12,1 °C	+1,5 °C	24,8 °C	32,2 mm	-45 %	5,6 mm/ jour	Record pour les jours de mars les plus chauds sur 49 années (31/03/21 et 30/03/21)
Avril	3 °C	-2,4 °C	-1,8 °C	12,6 °C	-1,5 °C	19 °C	25,9 mm	-49 %	17,5 mm/ jour	2 ^{ème} pour les températures minimales moyennes d'avril les plus froides sur 49 années
Mai	7,4 °C	-1,5 °C	0,7 °C	16,9 °C	-1 °C	26,1 °C	8 0 , 8 mm	+26 %	11,5 mm/ jour	
	14,1 °C +2,4 °C									2 ^{ème} pour les températures minimales moyennes de juin les plus chaudes sur 49 années
Juin		+2,4 °C	2,4 °C 8,8 °C 23,2 °C	+2,6 °C	30,4 °C	109,8 mm	+70 %	41,9 mm/ jour	3 ^{ème} pour les moyennes mensuelles de juin les plus chaudes sur 49 an- nées 1 jour de forte chaleur (Température maximale >30)	

Annexe 2





Figure 39 : (a) photographie et (b) vue aérienne de la plateforme expérimentale, située à Lesquin.

BIBLIOGRAPHIE

Agence Régionale de la Biodiversité en Île-de-France. (2019). « Le lombric, indicateur et auxiliaire de la qualité des sols franciliens ».

Agreste. (2021). « L'occupation du sol entre 1982 et 2018 ». La statistique, l'évaluation et la prospective du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

Bachelier, G. (1978). « La faune des sols, son écologie et son action ». *Initiations - Documentations techniques*, no 38: 400.

Bardgett, R. D., et van der Putten, W.H. (2014). « Belowground Biodiversity and Ecosystem Functioning ». *Nature* 515 (7528): 505 11.

Bertout, J., et Lépinasse, J. (2020). « Les bénéfices environnementaux des revêtements de sols perméables : étude du comportement thermique des systèmes des sols perméables O2D ». Rapport d'étude 1 : îlots de chaleur urbains.

Burrow, C. (2015). « Influence des modalités de restauration de sols dégradés sur leur colonisation par une faune du sol fonctionnelle ». Thèse de doctorat, Lille 1.

Chiquet, C. (2014). « The Animal Biodiversity of Green Walls in the Urban Environment ». Doctoral, Staffordshire University.

Comité interministériel biodiversité. (2018). « Plan biodiversité ». www.ecologie.gouv.fr.

Commissariat Général au Développement Durable. (2010). « Projet de caractérisation des fonctions écologiques des milieux en France », Etudes et documents, no 20.

Eijsackers, H. (2011). « Earthworms as Colonizers of Natural and Cultivated Soil Environments ». *Applied Soil Ecology* 50: 1 13.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2014). World Reference Base for Soil Resources 2014: International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps.

Green, V. S., Stott, D. E., & Diack, M. (2006). « Assay for Fluorescein Diacetate Hydrolytic Activity : Optimization for Soil Samples ». *Soil Biology and Biochemistry* 38 (4): 693 701.

Hopkin, S. P. (1991). « A Key to the [37 Species of] Woodlice of Britain and Ireland ». *Field Studies (United Kingdom)*.

Hopkin, S. P. (1997). Biology of the Springtails: (Insecta: Collembola). OUP Oxford.

Jeffery, S., Gardi, C., Jones, A., Montanarella, L., Marmo, L., Miko, L., Ritz, K., Peres, G., Römbke, J., & van der Putten, W. H. (2010). *Atlas européen de la biodiversité des sols*. Commission européenne, Bureau des publications de l'Union Européenne, Luxembourg. ©Union européenne, 2013.

Joimel, S., Grard, B., Auclerc, A., Hedde, M., Le Doaré, N., Salmon, S., & Chenu, C. (2018). « Are Collembola "Flying" onto Green Roofs? » *Ecological Engineering* 111: 117 24.

Leclercq, J. (2015). « Évaluation de l'efficacité de méthodes d'ingénierie écologique visant à restaurer la fonctionnalité de sols fortement dégradés du Nord de la France ». Thèse de doctorat, Lille 1.

Leclercq-Dransart, J., Demuynck, S., Douay, F., Grumiaux, F., Pernin, C., & Leprêtre, A. (2020). « Comparison of the Interest of Four Types of Organic Mulches to Reclaim Degraded Areas: A Field Study Based on Their Relative Attractiveness for Soil Macrofauna ». *Ecological Engineering* 158: 106066.

LOI nº 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (1). (2016). 2016-1087.

Magurran, A. (1988). Ecological Diversity and Its Measurement.

Ministère de la Transition écologique. (2021). « Artificialisation des sols ».

Pey, B. (2010). « Contribution de la faune du sol au fonctionnement et à l'évolution des technosols ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.

Pielou, E. C. (1966). « The Measurement of Diversity in Different Types of Biological Collections ». *Journal of Theoretical Biology* 13: 131 44.

Poinsot-Balaguer, N. (1990). « Des insectes résistants à la sécheresse ». Science et changements planétaires / Sécheresse 1 (4): 265 71.

Ponge, J.-F., Dubs, F., Gillet, S., Sousa, J. P., & Lavelle, P. (2006). « Decreased Biodiversity in Soil Springtail Communities: The Importance of Dispersal and Landuse History in Heterogeneous Landscapes ». *Soil Biology and Biochemistry* 38 (5): 1158 61.

Schnürer, J., et Rosswall, T. (1982). « Fluorescein Diacetate Hydrolysis as a Measure of Total Microbial Activity in Soil and Litter ». *Applied and Environmental Microbiology* 43 (6): 1256 61.

Shannon, C., et Weaver, W. (1949). « The Mathematical Theory of Communication », 131.

Sordello, R. (2017). « Trame verte, trame bleue et autres trames ».

UICN France. (2018). « Les solutions fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France ».

Wallwork, J. A. (1976). « The Distribution and Diversity of Soil Fauna. » The Distribution and Diversity of Soil Fauna.

Zaborski, E. R. (2003). « Allyl Isothiocyanate: An Alternative Chemical Expellant for Sampling Earthworms ». *Applied Soil Ecology* 22 (1): 87 95.

02D ENVIRONNEMENT® S'ENGAGE AU QUOTIDIEN POUR LE DÉVELOPPEMENT **DE SOLUTIONS VERTUEUSES AVEC UN OBJECTIF:**

préserver les fonctions naturelles du sol





FRANCE

O2D ENVIRONNEMENT® 117 rue Pierre Brizon 59810 LESQUIN

Tél.:+33(0)320068376 Email: contact@o2d.fr

BELGIQUE

O2D ENVIRONNEMENT® Rue Joseph Stevens 7 1000 BRUXELLES

Tél.: +32(0)487847362 Email: contact@o2d.be Retrouvez-nous sur les réseaux







www.o2d-environnement.com