

Étude de la biodiversité des sols (macrofaune épigée) urbains et péri-urbains dans le cadre de la création d'une trame brune

Q. Vincent^(1*), N. Mangin⁽²⁾, R. Rigolot⁽²⁾ et A. Blanchart⁽¹⁾

- 1) SAS Sol & co - 2 Avenue de la Forêt de Haye, Vandoeuvre-lès-Nancy, France
- 2) Association FLORE 54 - Fédération Meurthe et Mosellane pour la Promotion de l'Environnement et du Cadre de Vie
65 Rue Léonard Bourcier, Nancy, France

* Auteur correspondant : quentin.vincent@sol-et-co.fr

RÉSUMÉ

La biodiversité des sols urbains et péri-urbains, bien qu'elle participe activement au fonctionnement des sols en ville et qu'elle subisse de nombreuses pressions anthropiques, reste encore peu, voire pas, prise en compte dans les plans d'aménagements urbains. Une des raisons de ce manque de considération est le peu de connaissance de cette biodiversité en ville et des paramètres favorisant sa préservation. A l'échelle du territoire, la macrofaune épigée du sol présente des enjeux forts mais les principaux paramètres des sols étudiés en milieu urbain restent souvent limités à la physico-chimie et à la pollution. C'est pourquoi l'objectif de cette étude est d'identifier les paramètres physico-chimiques (pH, taux de matières organiques, taux de calcaires, etc.) mais également les paramètres pédologiques (profondeur de l'horizon de surface, taux en éléments grossiers etc.) et stationnels (type de milieux, couverture végétale, pierrosité, etc.) susceptibles d'influencer les communautés de la macrofaune épigée des sols urbains, dans le cadre de la création d'une trame brune. Pour cela, 15 sites urbains et péri-urbains, ayant des usages différents et représentatifs des principaux usages de sols rencontrés dans les contextes urbains et péri-urbains (forêts, prairies, pelouses, espaces verts, sites agricoles anciennement ou actuellement peu exploités), ont été étudiés au sein de la Métropole du Grand Nancy (France). Leur sélection a également reposé sur une concertation avec les aménageurs territoriaux, de sorte que l'étude puisse également leur apporter des connaissances fines sur les sols et leur biodiversité sur ces milieux à forts enjeux et nourrir les réflexions déjà engagées par chaque collectivité sur ces territoires. Sur chaque site, des mesures de paramètres physico-

Comment citer cet article :
Vincent Q., Mangin N., Rigolot R. et
Blanchart A., 2022 - Étude de la biodiversité
des sols (macrofaune épigée) urbains et péri-
urbains dans le cadre de la création d'une trame
brune - *Étude et Gestion des Sols*, 29, 275-294

Comment télécharger cet article :
<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-29/>

Comment consulter/télécharger
tous les articles de la revue EGS :
<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

chimiques des sols couplées à des inventaires de la macrofaune épigée des sols ainsi que des paramètres pédologiques et stationnels ont été réalisés. L'abondance, la richesse taxonomique et la composition taxonomique et fonctionnelle (groupe trophique) ont été étudiées comme paramètres biologiques. Les résultats mettent en exergue que l'abondance de la macrofaune épigée observée semble faible par rapport à d'autres sols forestiers ou agricoles, mais que la richesse taxonomique observée est comparable à ces sols forestiers ou agricoles. L'abondance et la richesse taxonomique ne sont pas significativement différentes entre les sites et sont peu influencées par les paramètres physico-chimiques, pédologiques et stationnels. Par contre, la composition taxonomique et fonctionnelle (groupe trophique) des communautés de la macrofaune épigée est influencée par certains paramètres stationnels (notamment le type de milieu, le couvert végétal et la pierrosité) et pédologiques (profondeur de l'horizon de surface), mais peu influencée par les paramètres physico-chimiques. Ces résultats montrent que l'étude de la composition des communautés taxonomique et fonctionnelle est un des outils à favoriser dans la création et l'étude de l'efficacité d'une trame brune. L'étude souligne également l'importance de considérer des milieux différents, avec des micro-habitats variés (pierrosité et couverts végétaux différents notamment), dans la création d'une trame brune, car cette diversité de milieux favorise une diversité d'espèces au sein et entre les communautés.

Mots-clés

Faune du sol, arthropode, aménagement, sol urbain.

SUMMARY

STUDY OF THE BIODIVERSITY OF URBAN AND PERI-URBAN SOILS (EPIGEOUS MACROFAUNA) IN THE CONTEXT OF THE CREATION OF A BROWN GRID

The biodiversity of urban and peri-urban soils, although it plays an active role in the functioning of urban soils and is subject to numerous anthropogenic pressures, is still little or not taken into account in urban development plans. One of the reasons for this lack of consideration is the lack of knowledge of this biodiversity in the city and of the parameters that promote its preservation. On a territorial scale, the epigeous macrofauna of the soil presents strong stakes, but the main parameters of the soils studied in the urban environment are physicochemistry and pollution. This is why the objective of this study is to identify the physico-chemical parameters (pH, organic matter rate, limestone rate, etc.) but also the pedological parameters (depth of the surface horizon, rate of coarse elements, etc.) and site parameters (type of environment, plant cover, stoniness, etc.) likely to influence the communities of the epigeous macrofauna of urban soils, within the framework of the creation of a brown screen. For this purpose, 15 urban and peri-urban sites, with different uses typical of urban and peri-urban environments (forests, meadows, lawns, green spaces, agricultural sites formerly or currently little exploited) were studied within the Metropolis of Grand Nancy (France) and chosen in consultation with the territorial developers according to their needs. On each site, measurements of physico-chemical parameters of the soils as well as pedological and site parameters, coupled with inventories of the epigeous macrofauna of the soils were carried out. Abundance, taxonomic richness and taxonomic and functional composition (trophic group) were studied as biological parameters. The results highlight that the abundance of the observed epigeous macrofauna appears to be low compared to other forest or agricultural soils, but that the observed taxonomic richness is comparable to these forest or agricultural soils. Secondly, abundance and taxonomic richness are not significantly different between sites and are little influenced by physico-chemical, soil and site parameters. On the other hand, the taxonomic and functional composition (trophic group) of the epigeous macrofauna communities is influenced by certain site (notably the type of environment, vegetation cover and stoniness) and pedological (depth of the surface horizon) parameters, but little influenced by physicochemical parameters. These results show that the study of the composition of taxonomic and functional communities is one of the tools to be favored in the creation and study of the effectiveness of a brown screen. The study also underlines the importance of considering different environments, with varied micro-habitats (notably stoniness and different plant cover), in the creation of a brown screen, because this diversity of environments favors a diversity of species within and between communities.

Key-words

Soil fauna, arthropod, planning, urban soil.

RESUMEN

ESTUDIO DE LA BIODIVERSIDAD DE LOS SUELOS URBANOS Y PERIURBANOS (MACROFAUNA EPIGEA) EN EL CONTEXTO DE LA CREACIÓN DE UNA RED MARRÓN

La biodiversidad de los suelos urbanos y periurbanos, aunque desempeña un papel activo en el funcionamiento de los suelos urbanos y está sujeta a numerosas presiones antropogénicas, sigue siendo poco o nada tenida en cuenta en los planes de desarrollo urbano. Una de las razones de esta falta de consideración es el desconocimiento de esta biodiversidad en la ciudad y

de los parámetros que favorecen su conservación. A escala territorial, la macrofauna epigea del suelo presenta fuertes desafíos, pero los principales parámetros del suelo estudiados en el medio urbano son la fisicoquímica y la contaminación. Por ello, el objetivo de este estudio es identificar los parámetros fisicoquímicos (pH, tasa de materia orgánica, tasa de caliza, etc.), pero también los parámetros edáficos (profundidad del horizonte superficial, tasa de elementos gruesos, etc.) y sitio (tipo de entorno, cobertura vegetal, pedregosidad, etc.) susceptibles de influir en las comunidades de la macrofauna epigea de los suelos urbanos, en el marco de la creación de una pantalla marrón. Para ello, se han estudiado 15 emplazamientos urbanos y periurbanos con diferentes usos típicos de los entornos urbanos y periurbanos (bosques, praderas, céspedes, espacios verdes, emplazamientos agrícolas que antes o actualmente se utilizaban poco) dentro de la Gran Metrópolis de Nancy (Francia) y se han elegido en consulta con los planificadores territoriales en función de sus necesidades. En cada emplazamiento se realizaron mediciones de los parámetros fisicoquímicos del suelo, así como de los parámetros pedológicos y paisajísticos, junto con inventarios de la macrofauna epigea del suelo. Se estudiaron como parámetros biológicos la abundancia, la riqueza taxonómica y la composición taxonómica y funcional (grupo trófico). Los resultados muestran que la abundancia de la macrofauna epigea observada parece ser baja en comparación con otros suelos forestales o agrícolas, pero que la riqueza taxonómica observada es comparable a la de estos suelos forestales o agrícolas. En segundo lugar, la abundancia y la riqueza taxonómica no son significativamente diferentes entre los sitios y están poco influenciadas por los parámetros fisicoquímicos, pedológicos y paisajísticos. Por otra parte, la composición taxonómica y funcional (grupo trófico) de las comunidades de macrofauna epigea está influenciada por ciertos parámetros sitio (en particular el tipo de entorno, la cobertura vegetal y la pedregosidad) y pedológicos (profundidad del horizonte superficial), pero poco influenciada por los parámetros fisicoquímicos. Estos resultados muestran que el estudio de la composición de las comunidades taxonómicas y funcionales es una de las herramientas a favorecer en la creación y estudio de la eficacia de una pantalla marrón. El estudio también subraya la importancia de tener en cuenta diferentes entornos, con microhábitats variados (especialmente la pedregosidad y la diferente cobertura vegetal), en la creación de una pantalla marrón, ya que esta diversidad de entornos favorece la diversidad de especies dentro de las comunidades y entre ellas.

Palabras clave

Fauna del suelo, artrópodo, planificación, suelo urbano.

INTRODUCTION

Bien que fortement impactés par les activités humaines, les sols en milieu urbain et péri-urbain sont capables de rendre des services écosystémiques essentiels au bien-être des sociétés humaines. Ces sols urbains et péri-urbains participent ainsi au fonctionnement de la ville (e.g. support d'activités humaines, production de biomasse destinée à la consommation humaine et animale) et font également face à des enjeux environnementaux intrinsèques à ces milieux (e.g. régulation de la qualité de l'air, de l'eau, atténuation de l'effet îlot de chaleur urbain) (Blanchart *et al.*, 2017). Mais aujourd'hui encore, les sols urbains sont une ressource insuffisamment reconnue pour la conception et la construction de la ville durable (Barot *et al.*, 2019; FRB, 2018), c'est-à-dire une ville qui respecte les capacités de charge de son territoire et qui diminue son empreinte écologique (Emelianoff, 2007). En prenant en compte les services écosystémiques rendus par les sols urbains, il est possible de comprendre comment ces sols peuvent répondre à des enjeux écologiques de l'aménagement du territoire. Parmi les différents services que les sols urbains peuvent fournir, celui de support de

biodiversité est encore trop peu étudié et considéré, bien que le sol soit l'habitat privilégié pour assurer la biodiversité.

La biodiversité des sols représente environ 25 % de la biodiversité totale de la planète (Joint Research Centre, 2010) et fournit de nombreuses fonctions essentielles au fonctionnement des sols, notamment urbains, comme la dégradation des matières organiques, les processus biogéochimiques des éléments nutritifs, l'infiltration de l'eau (en augmentant sa porosité), etc. (Orgiazzi *et al.*, 2016; Wall *et al.*, 2015). Bien que cette biodiversité soit menacée par les activités anthropiques, les quelques études sur le sujet montrent qu'elle n'en demeure pas moins importante en milieu urbain par rapport aux milieux agricoles (Joimel *et al.*, 2017) ou aux milieux naturels proches (Bray et Wickings, 2019). Ainsi, la protection de cette biodiversité ordinaire, représentée par des espèces « qui ne sont ni menacées, ni domestiquées, ni exploitées » (Couvet et Vandeveld, 2014), doit être un enjeu crucial dans l'aménagement du territoire, au même titre que par exemple les amphibiens ou les chiroptères, considérés lors des études d'impacts. Pourtant, il n'existe à l'heure actuelle aucun outil réglementaire ou de planification territoriale permettant de prendre en compte cette biodiversité

ordinaire dans les projets d'aménagement (Sordello, 2017). La biodiversité des sols représente encore un enjeu d'ordre secondaire dans les politiques d'aménagements urbains (Blanchart, 2018 ; Guillard *et al.*, 2018). Ainsi, les réseaux écologiques sont bien connus en surface des sols et les trames vertes et bleues sont des outils de planification actuellement utilisés et qui permettent d'identifier des zones refuges pour la biodiversité et les connexions entre elles (Cormier *et al.*, 2010). Toutefois, ces réseaux écologiques sont bien moins connus dans les sols. C'est pourquoi, depuis quelques années, la notion de trame brune est apparue. Inventée sur le modèle de la trame verte et bleue, elle est appliquée à la continuité des sols par la connectivité de milieux refuges au sein d'un territoire donné (ADEME, 2016 ; Chalot, 2016). Cette trame brune comme outil de planification souligne le besoin des organismes du sol à se déplacer pour se reproduire, se nourrir, coloniser un milieu ou bien échapper aux perturbations par exemple (Auclerc *et al.*, 2009 ; Mathieu *et al.*, 2005). Cependant, la notion de trame brune est encore absente des documents de planification urbaine. Le contexte de la présente étude est donc d'engager la réflexion d'une prise en compte des sols et de leur biodiversité aux échelles du site mais également de la planification territoriale, pour une protection et restauration des continuités écologiques au sein d'une métropole, en associant une fédération d'associations de protection de l'environnement, une entreprise issue de la recherche ainsi que cinq communes, un Conseil Départemental et une Métropole.

Une des raisons de cette faible considération de la biodiversité des sols dans les projets d'aménagement urbain est le manque de connaissance des paramètres favorisant la préservation de la biodiversité des sols urbains, dans un milieu contraint et anthropisé. Cette biodiversité des sols est constituée de micro-organismes et d'animaux de la microfaune, de la mésofaune et de la macrofaune. Toutefois, avant de considérer la biodiversité microbienne ou celle de la micro- ou mésofaune qui reste encore très peu connue des aménageurs, la macrofaune constitue un groupe biotique d'intérêt pour la mise en place d'une stratégie de préservation de la biodiversité des sols. En effet, la macrofaune est le groupe d'organismes du sol le plus connu, notamment grâce aux lombriciens (Blanchart *et al.*, 2005). La macrofaune du sol est l'ensemble des animaux dont la taille est comprise entre 4 et 80 mm et qui vivent en majorité dans la litière ou creusent des galeries dans le sol (Gobat *et al.*, 2010). Concernant les facteurs influençant cette biodiversité, les études mettant en relation les indices de biodiversité de la macrofaune des sols anthropisés et les paramètres abiotiques ne portent généralement que sur les paramètres physico-chimiques (taux en matières organiques, en azote, texture, concentrations en cations majeurs disponibles, etc.) et la pollution (concentrations en éléments traces métalliques, en hydrocarbures aromatiques polycycliques, etc.) (Hedde *et*

al., 2019 ; Pruvost *et al.*, 2020 ; Vincent *et al.*, 2018a,b) et s'intéressent plus rarement aux paramètres pédologiques (épaisseurs et couleurs des horizons, charge en éléments grossiers, etc.) et stationnels (type de milieux, taux de recouvrement végétal, pierrosité, etc.) (Pouyat *et al.*, 2015 ; Madre *et al.*, 2013). Et pourtant, ces paramètres pédologiques et stationnels sont déterminants dans la création d'une trame brune (Small *et al.*, 2006). Afin d'identifier les paramètres influençant la biodiversité des sols en milieu urbain et péri-urbain pour mieux orienter les stratégies d'aménagement urbain dans l'élaboration de la trame brune, cette étude a pour but de répondre à la question suivante : quels sont les paramètres physico-chimiques, pédologiques et stationnels qui influencent les communautés de la macrofaune épigée des sols urbains et péri-urbains aux usages différents (forêts, prairies, pelouses, espace verts, etc.) ? Nous faisons l'hypothèse que la structure des communautés de la macrofaune épigée des sols urbains et péri-urbains est influencée par les paramètres physico-chimiques, pédologiques et stationnels, en lien avec leurs usages, de façon directe (présence d'habitats et de nourritures) et indirecte (la fertilité physico-chimique des sols influençant la couverture végétale), ce qui nécessite de prendre en compte l'ensemble de ces paramètres dans la création des trames brunes.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les sites d'étude

Au sein de la métropole du Grand Nancy, 15 sites ont été étudiés. Ces sites ont tout d'abord été sélectionnés afin d'étudier une diversité d'usages représentatifs des milieux urbains et péri-urbains (forêts, prairies, pelouses, parcelles agricoles et espaces verts) dont les usages ne sont pas susceptibles de changer dans les décennies (à contrario des friches urbaines et industrielles), tout en restant dans un contexte géologique (Jurassique inférieur et moyen) et météorologique similaire (7,7 km de distance maximale entre les sites). Ce choix permet d'étudier des milieux contrastés et donc des propriétés physico-chimiques, pédologiques et stationnelles différentes pour tester l'effet de ces paramètres sur les communautés taxonomique et fonctionnelle de la macrofaune épigée, dans une zone géographique restreinte à l'aire urbaine (Blanchart, 2018). Ensuite, l'emplacement exact des sites d'étude s'est décidé après concertation avec les élus des communes concernées et des prospections avec les agents responsables de la gestion des espaces verts et naturels, selon leurs besoins en matière d'aménagement du territoire. Ainsi, cinq sites sélectionnés sont des forêts : les sites AD pour Abbé Didelot, BDF pour Bois des Fourasses, BDR pour Bois du Railleu et CCH pour Coteaux Cote

Tableau 1 - Description des 15 sites d'étude pour la création de la trame brune.**Table 1** - Description of the 15 study sites for the creation of the brown grid.

Commune	Nom du site	Description	Latitude	Latitude (degrés décimal)	Longitude (degrés décimal)	Usage	Type de milieu	Couverture végétale	Type de sondage pédologique	Nombre de pièges Barber
Laxou	FDL	Fond de Lavaux	48.687562	6.134867	Forêt	Semi-naturel	Arbustive	calcosol	Fosse	3
	SDB	Square des Bosquets	48.683815	6.149236	Parc urbain	Artificialisé	Peu ou pas de végétation	anthrosol	Fosse	3
	ST	Secteur Tarrere	48.682093	6.137563	Ancien verger	Semi-naturel	Herbacée (prairie)	anthrosol	Fosse	3
	AD	Abbé Didelot	48.680038	6.142904	Forêt (urbaine)	Semi-naturel	Arborée	anthrosol	Fosse	3
Villers-les-Nancy	FDH	Fond d'Hardeval	48.669886	6.136768	Forêt (lisière)	Semi-naturel	Herbacée (prairie)	calcosol	Fosse	3
	BDF	Bois des Fourasses	48.667178	6.134667	Forêt	Forêt	Arborée	calcosol	Tarière	3
	PDV	Plateau de Villers	48.66098	6.13602	Pelouse	Semi-naturel	Herbacée (pelouse)	rendosol	Fosse	3
	PDB	Parc de Brabois	48.659534	6.141302	Prairie	Agricole	Herbacée (prairie)	calcisol	Fosse	2
Vandoeuvre-les-Nancy	SAP	Sapinière	48.656653	6.160665	Parc urbain	Semi-naturel	Herbacée (prairie)	calcisol	Fosse	3
	CGF	Coteaux General Frère	48.659270	6.167278	Espace vert	Artificialisé	Peu ou pas de végétation	calcosol	Tarière	2
	CCH	Coteaux Cote Hou-demont	48.652009	6.172334	Forêt	Semi-naturel	Arbustive	pélosol	Fosse	3
Ludres	BDR	Bois du Railleu	48.629512	6.177057	Forêt	Forêt	Arborée	calcosol	Tarière	3
	CDC	Carrière de la Castine	48.628658	6.156383	Pelouse		Peu ou pas de végétation	calcosol	Fosse	3
	CJP	Coteaux Jardin Pédagogique	48.625585	6.155650	Jardin potager	Agricole	Herbacée (prairie)	calcosol	Fosse	3
	CMP	Coteaux Mare Pédagogique	48.623697	6.154054	Prairie	Semi-naturel	Herbacée (prairie)	calcisol	Fosse	2

Houdemont. Quatre sites sont des espaces verts : les sites SDB pour Square des Bosquets, SAP pour Sapinière, CGF pour Coteaux General Frère et FDL pour Fond de Lavaux. Deux sites sont des sols agricoles anciennement ou actuellement peu exploités : les sites ST pour Secteur Tarrere et CJP pour Coteaux Jardin Pédagogique. Deux sites sont des pelouses naturelles : les sites PDV pour Plateau de Villers et CDC pour Carrière de la Castine. Trois sites sont des prairies : les sites PDB pour Parc de Brabois, CMP pour Coteaux Mare Pédagogique et FDH pour Fond d'Hardeval situé en lisière de forêt (Tableau 1).

Quatre sites ont été sélectionnés dans la commune de Laxou (AD, SDB, FDL et ST), 4 autres à Villers-lès-Nancy (PDB, PDV, BDF et FDH), 3 à Vandoeuvre-lès-Nancy (CGF, SAP et CCH)

et 4 à Ludres (CMP, CJP, CDC et BDR) (Figure 1), le but étant d'avoir un équilibre des sites d'étude entre les communes. Les études pédologiques et stationnelles, les échantillonnages de sol et des organismes de la macrofaune épigée ainsi que les analyses physico-chimiques ont été réalisés entre début juin et mi-juillet 2021.

Étude de la station

Sur site, les informations stationnelles suivantes sont relevées : le type de milieu concerné (artificialisé, agricole, forêt, semi-naturel), la pente du site (nulle, peu pentue, pentue, très pentue), présence/absence d'affleurements, l'hydrologie (présence/absence d'un cours d'eau à moins de 100 m). De plus, des

Figure 1 : Carte des différents points échantillonnés dans le cadre du projet. [forêts] AD = Abbé Didelot; BDF = Bois des Fourasses; BDR = Bois du Railleu; CCH = Coteaux Cote Houdemont; [espaces verts] SDB = Square des Bosquets; SAP = Sapinière; CGF = Coteaux General Frère; FDL = Fond de Lavaux; [sites agricoles anciennement ou actuellement peu exploités] ST = Secteur Tarrere; CJP = Coteaux Jardin Pédagogique; [pelouses naturelles] PDV = Plateau de Villers; CDC = Carrière de la Castine; [prairies] PDB = Parc de Brabois; CMP = Coteaux Mare Pédagogique; FDH = Fond d'Hardeval, situé en lisière de forêt.

Figure 1: Map of the project sampled points. [forests] AD = Abbé Didelot; BDF = Bois des Fourasses; BDR = Bois du Railleu; CCH = Coteaux Cote Houdemont; [green spaces] SDB = Square des Bosquets; SAP = Sapinière; CGF = Coteaux General Frère; FDL = Fond de Lavaux; [agricultural sites formerly or presently little exploited] ST = Secteur Tarrere; CJP = Coteaux Jardin Pédagogique; [natural lawns] PDV = Plateau de Villers; CDC = Carrière de la Castine; [meadows] PDB = Parc de Brabois; CMP = Coteaux Mare Pédagogique; FDH = Fond d'Hardeval, located on the edge of the forest.



données sur l'état de la surface du sol ont été enregistrées : la couverture végétale dominante (arborée, arbustive, herbacée ou présentant peu ou pas de végétation), le taux de recouvrement par la végétation (en %), le taux de recouvrement en turricules (en %), le taux de pierrosité du sol (en %, évalue la densité en éléments grossiers (>2 mm) à la surface du sol) et la présence éventuelle d'une croûte de battance.

Étude pédologique

Les études pédologiques ont été réalisées grâce à la l'ouverture d'une fosse pédologique ou d'un sondage à la tarière sur chaque site d'étude (dans tous les cas, plusieurs sondages à la tarière ont été effectués sur le site d'étude, de sorte à avoir connaissance de l'hétérogénéité des sols en place et de considérer un profil « moyen » pour l'étude) (Tableau 1). Pour les sondages à la fosse pédologique, une pelleteuse a creusé une fosse d'environ 2 m de côté et d'une profondeur dépendante de la proximité de la roche mère. Seule la profondeur totale du sol du site AD n'a pas pu être déterminée car la mini-pelle ne permettait pas d'aller plus loin. Pour les sites inaccessibles à la pelleteuse (sites BDR et CGF) ou présentant des réseaux souterrains trop en surface (site BDF), 3 sondages à la tarière ont été pratiqués sur chaque site. Une étude pédologique a été réalisée afin d'identifier les facteurs pédologiques comme sources d'habitats, de nourriture ou de pollution (présence d'éléments grossiers, hydromorphie, matériaux anthropogéniques, etc.), qui influenceraient les structures des communautés de la macrofaune épigée des sols urbains et péri-urbains étudiés. Ainsi, dans chaque site une description pédologique a été effectuée selon la norme NF X31-003 en mesurant notamment pour le premier horizon (horizon OH et A; les horizons OL et OF sont retirés), son épaisseur, sa texture (méthode NF X 31-107, 2003), sa compacité (test au couteau, niveau de 0 à 4), sa couleur (charte Munsell), sa teneur en éléments grossiers (fraction > 2 mm) et le taux de calcaire (test d'effervescence à l'HCl, niveau de 0 à 4). Seuls les paramètres mesurés du premier horizon ont été pris en compte dans cette étude car la macrofaune étudiée vit essentiellement à la surface du sol, en interaction avec le premier horizon.

Analyses physico-chimiques

Des échantillons de sol du premier horizon de chaque profil ont été prélevés afin de réaliser des analyses physico-chimiques. Ces analyses ont pour but d'identifier les facteurs physico-chimiques, en lien avec la fertilité des sols, qui peuvent influencer les structures des communautés de la macrofaune épigée des sols urbains et péri-urbains étudiés. Ces échantillons sont généralement composés de l'horizon O, en excluant la litière (OL). Ces analyses ont été effectuées par le LANO (Laboratoire Agronomique de NORmandie). Le

pH à l'eau (ISO 10390, 1994), la texture (NF X 31-107, 2003), la teneur en matière organique, la teneur en azote total (ISO 10694, 1995), le rapport entre la teneur en carbone organique et en azote total, la capacité d'échange cationique (CEC) (NF X 31-130, 1999), la teneur en éléments majeurs échangeable (K, Ca, Na, Mg) (NF X 31-130, 1999 et ISO 22036, 2008), la teneur en phosphore disponible (NF ISO 11263, 1995; par la méthode Olsen), le taux de saturation, la teneur en CaCO₃ total (ISO 10693, 1995) ont été mesurés ou calculés.

Étude de la macrofaune épigée du sol

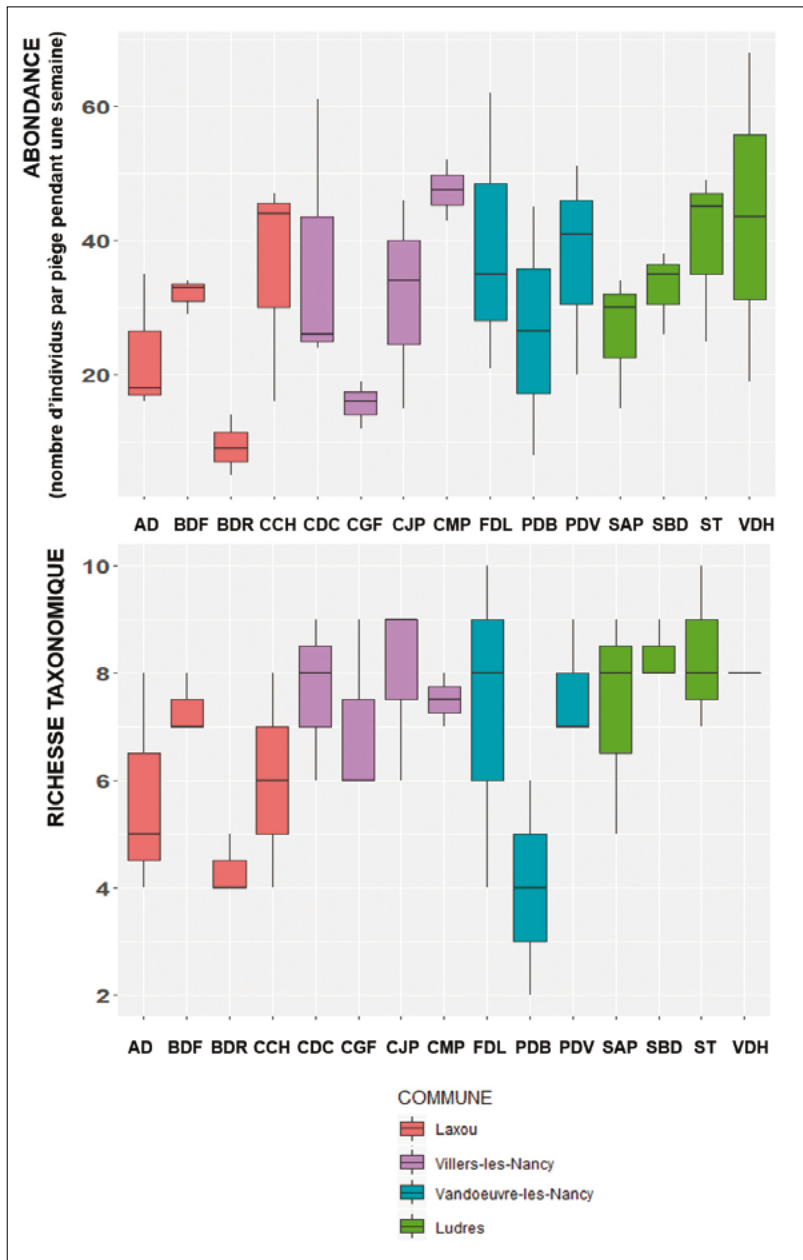
La macrofaune épigée (*i.e.* vivant à la surface) a été échantillonnée sur l'ensemble des sites par la technique du pot piège (« pitfall traps » en anglais), nommée également « piège Barber », pendant 7 jours. Ces pots, de 6,5 cm de diamètre, sont enterrés dans le sol, jusqu'au bord supérieur de façon à créer un puits. Ils contiennent du vinaigre blanc, dans lequel les organismes marcheurs à la surface du sol vont tomber. Sur chaque site, trois pièges Barber ont été placés dans un rayon d'une dizaine de mètres autour de la fosse pédologique ou du lieu de sondage à la tarière. Les pièges Barber ont été placés à des endroits représentatifs de l'ensemble du site. Les pièges ont été récoltés après une semaine et leur contenu a été stocké en attendant de procéder à l'identification en laboratoire. Tous les pièges Barber ont été récupérés, exceptés pour les sites CGF, CMP et PDB où seulement 2 pièges ont été retrouvés sur chaque site.

Une fois les pièges récoltés, les individus ont été identifiés sous loupe binoculaire (grossissement x10), jusqu'au niveau de l'ordre ou de la famille (comme Bolger *et al.*, 2000; Martins *et al.*, 2018; van Nuland et Whitlow, 2014), à l'aide de différents ouvrages (Mignon *et al.*, 2016; Hopkin, 1991; Geoffroy 1992 et 1993; Galkowski 2013). L'abondance totale (nombre d'individus observés) ainsi que la richesse taxonomique (nombre de groupes taxonomiques différents observés) ont été calculées. Les fourmis ne sont pas prises en compte dans toutes les analyses de l'abondance car ce sont des animaux sociaux ayant une distribution agrégée dans l'espace, pouvant induire une très forte hétérogénéité spatiale des communautés (Nahmani et Rossi, 2003).

Une approche fonctionnelle des communautés de la macrofaune épigée a été réalisée à travers l'étude des groupes trophiques. Trois groupes trophiques sont étudiés : phytophages, zoophages et décomposeurs (Pey *et al.*, 2014). Une communauté totale composée d'un pourcentage de chaque groupe trophique a été calculée (appelé MPC pour moyenne pondérée de la communauté) pour chaque type de milieu (forêt, semi-naturel, agricole et artificialisé), chaque couverture végétale (arborée, arbustive, herbacée et avec peu ou pas de végétation) et selon la pierrosité (0, 5, 10, 30,

Figure 2: Boîte de Tukey de l'abondance en individus récoltés dans un piège Barber après une semaine (en haut) et de la richesse taxonomique (en bas) des 15 sites étudiés (AD, SDB, FDL et ST à Laxou, PDB, PDV, BDF et FDH à Villers-lès-Nancy, CGF, SAP et CCH à Vandoeuvre-lès-Nancy et CMP, CJP, CDC et BDR à Ludres). Le nombre de réplicas par site est mentionné dans le Tableau 1.

Figure 2: Tukey box of the abundance of individuals collected in a Barber trap after one week (top) and the taxonomic richness (bottom) of the 15 sites studied (AD, SDB, FDL and ST in Laxou, PDB, PDV, BDF and FDH in Villers-lès-Nancy, CGF, SAP and CCH in Vandoeuvre-lès-Nancy and CMP, CJP, CDC and BDR in Ludres). The number of replicates per site is shown in Table 1.



40 et 90 %). La MCP a été obtenue à l'aide de l'équation 1 (Garnier et al., 2004), où P_i est l'abondance relative du taxon, n est le nombre taxon de la macrofaune épiquée, et $Groupe_i$ est le groupe trophique étudié (phytophage, zoophage et décomposeur).

Equation 1:

$$MCP = \sum_{i=1}^n P_i \times Groupe_i$$

Analyses statistiques

Pour évaluer la significativité des différences entre les conditions étudiées (effet du site, des paramètres stationnels et pédologiques) incluant l'étude des différents groupes trophiques selon le type de milieu, la couverture végétale ou la pierrosité (des tests univariés ont été effectués indépendamment sur les MCP pour chaque groupe trophique), la normalité du jeu de données pour chaque condition a été vérifiée avec le test de Shapiro Wilk ($P > 0,05$) et l'homogénéité des variances entre les différentes conditions a été confirmée avec le test de Bartlett ($P > 0,05$). Lorsque les données suivaient des conditions permettant des tests paramétriques, des analyses de variances (ANOVA) à un facteur ont été réalisées, suivies par le test de comparaison multiple HSD (Honest Significant Difference) de Tukey. Si les données ne suivaient pas les conditions nécessaires pour réaliser un test paramétrique, c'est le test de Kruskal-Wallis qui a été employé, suivi du test de comparaison multiple entre traitements selon la fonction « `kruskalmc` » de la librairie « `pgirmess` » (Siegel et Castellan, 1988). Des régressions linéaires ont été réalisées afin de tester la corrélation (Pearson), entre l'abondance ou la richesse taxonomique de la macrofaune épiquée des sols et les paramètres agronomiques. Ces tests sont effectués grâce à la librairie `lmtree` (Hothorn et al., 2015). Pour tous les tests statistiques, les différences sont considérées comme significatives lorsque le risque α est inférieur à 5 %.

Une analyse factorielle des correspondances (Escofier-Cordier, 1965) a été employée pour l'étude de la composition

des communautés de la macrofaune épigée du sol. Dans la représentation projetée des différents pièges Barber, ces derniers ont été regroupés selon le site ou selon des paramètres stationnels ou pédologiques. Parmi les différents paramètres pédologiques (épaisseur du premier horizon, sa couleur, son taux d'éléments grossiers, etc.) et stationnels (pierrosité, pente, taux de couverture végétale, etc.) étudiés, seuls les paramètres pour lesquels la structure des communautés de la macrofaune épigée semble être différente ont été représentés dans cet article. De plus, une analyse de co-inertie (Doledec et Chessel, 1994) a été employée pour l'étude d'une co-variance entre les paramètres agronomiques et la composition de la communauté de la macrofaune épigée du sol (Ruiz-Camacho, 2004; Vincent *et al.*, 2018a). Elle a été effectuée grâce à la fonction « coinertia » de la librairie « ade4 » (Dray et Dufour, 2007).

RÉSULTATS

Étude de l'effet du site

Les premiers indicateurs calculés sont l'abondance totale et la richesse taxonomique (Figure 2). L'abondance et la richesse taxonomique ne sont significativement pas différentes entre les sites (test de l'ANOVA, p-value = 0,63 et 0,71 pour l'abondance et la richesse taxonomique respectivement). Tous échantillons confondus, l'abondance totale de la macrofaune épigée des sols est en moyenne de 31 ± 16 individus et la richesse taxonomique est de 7 ± 2 groupes taxonomiques par piège (moyenne \pm écart-type). En moyenne, les taxons les plus abondants sur les 15 sites, représentant 73 % de la communauté, sont les fourmis (*Hymenoptera*, 25 %), les araignées (*Aranea* 19 %), les cloportes (*Oniscidea*, 8 %), les staphylins (*Staphylinidae*, 8 %), les carabes (*Carabidae*, 8 %), les orthoptères (*Orthoptera*, 5 %).

La composition de la communauté est illustrée par une AFC en figure 3 dont les deux axes factoriels représentent 57 %

Figure 3: Analyse factorielle des correspondances de la communauté de la macrofaune épigée du sol (à droite) des 43 pièges Barber, regroupés selon les 15 sites (à gauche).

Figure 3: Correspondence factor analysis of the soil epigeous macrofauna community (right) of the 43 Barber traps, grouped by the 15 sites (left).

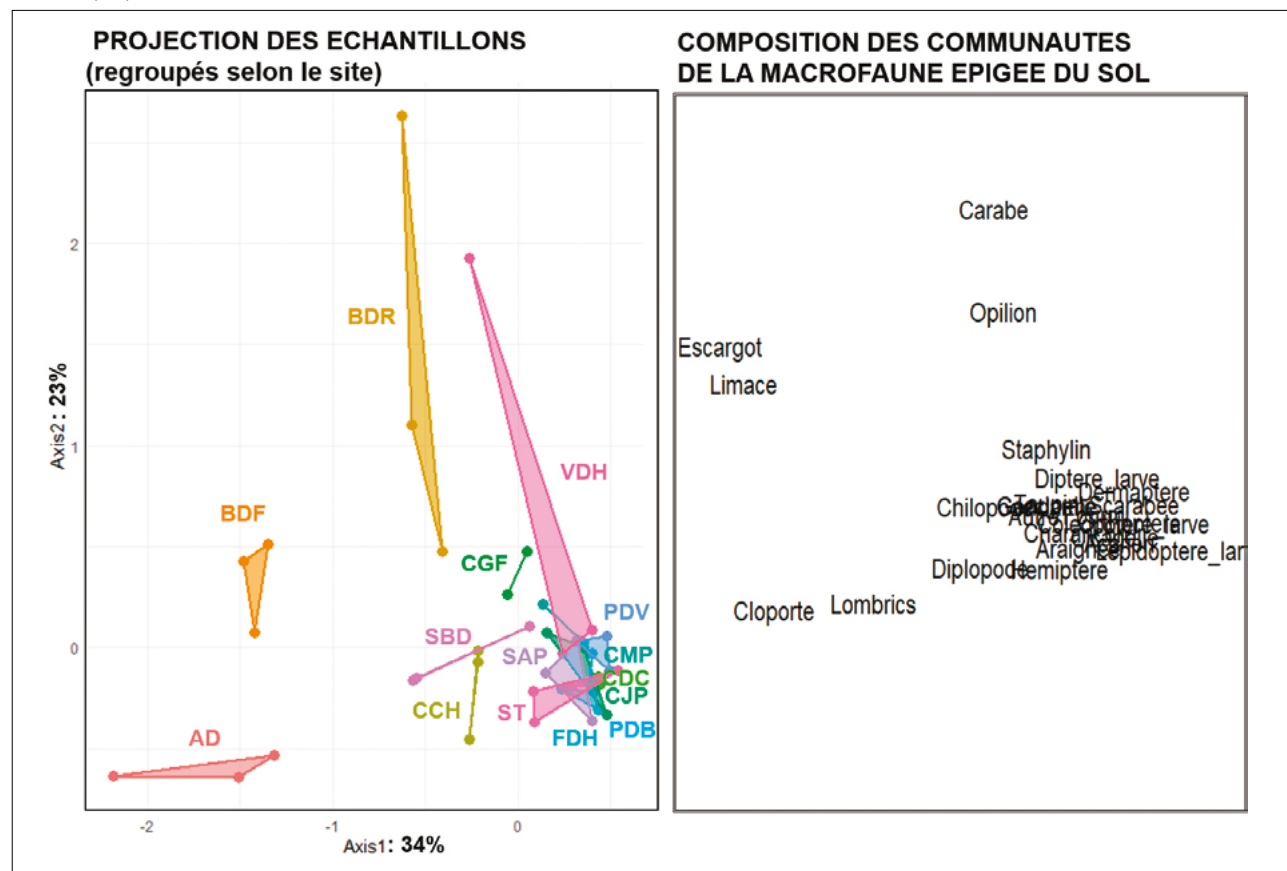


Tableau 2 : P-value (ANOVA ou Kruskal-Wallis) des différences de l'abondance totale et de la richesse taxonomique de la macrofaune épigée des sols selon des paramètres stationnels : [Type de milieu (artificialisé, agricole, forêt, semi-naturel), pente du site (nulle, peu pentue, pentue, très pentue), présence/absence d'affleurements, hydrologie (présence/absence d'un cours d'eau à moins de 100 m), couverture végétale dominante (arborée, arbustive, herbacée ou présentant peu ou pas de végétation), taux de recouvrement par la végétation (en %), taux de recouvrement en turricules (en %), taux de pierrosité du sol (en %, évalue la densité en éléments grossiers (>2 mm) à la surface du sol) et présence éventuelle d'une croûte de battance] et des paramètres pédologiques [pour le premier horizon (horizon OH et A, les horizons OL et OF sont retirés), mesure de l'épaisseur, texture (NF X 31-107, 2003), compacité (test au couteau, niveau de 0 à 4), couleur (charte Munsell), teneur en éléments grossiers (fraction > 2 mm) et taux de calcaire (test d'effervescence à l'HCl, niveau de 0 à 4)].

Table 2: P-value (ANOVA or Kruskal-Wallis) of the differences in total abundance and taxonomic richness of the epigeous macrofauna of the soils according to landscape parameters: [Type of environment (artificial, agricultural, forest, semi-natural), slope of the site (no slope, shallow slope, steep slope, very steep slope), presence/absence of outcrops, hydrology (presence/absence of a watercourse within 100 m), dominant vegetation cover (trees, shrubs, grasses, or little or no vegetation), vegetation cover rate (in %), grub cover rate (in %), stoniness of the soil (in %, evaluates the density of coarse elements (>2 mm) on the soil surface) and the possible presence of a crust of threshing] and pedological parameters [for the first horizon (OH and A horizon, OL and OF horizons are removed), measurement of thickness, texture (NF X 31-107, 2003), compactness (knife test, level from 0 to 4), color (Munsell chart), content of coarse elements (fraction > 2 mm) and limestone content (HCl effervescence test, level from 0 to 4)].

Paramètres étudiés		P-value (test de l'ANOVA ou de Kruskal-Wallis)	
		Abondance	Richesse taxonomique
Station	Type de milieu	0,340	0,230
	Pente	0,550	0,260
	Affleurement	0,850	0,210
	Hydrologie	0,770	0,690
	Couverture végétale	0,650	0,532
	Hauteur des végétaux	0,200	0,700
	Taux de recouvrement de la végétation	0,940	0,250
	Taux de turricules	0,250	0,088
	Taux de pierrosité	0,990	0,500
	Présence d'une croûte de battance	0,640	0,320
Pédologie (1^{er} horizon : horizon OH et A)	Profondeur	0,250	0,012
	Couleur (Charte Munsell)	0,670	0,917
	Texture	0,110	0,042
	Calcaire (test à l'HCl)	0,110	0,500
	Compacité (test du couteau)	0,560	0,800
	Taux d'éléments grossiers (>2 mm)	0,570	0,300

de la projection totale. Les échantillons sont tout d'abord séparés le long du premier axe factoriel (34 % de la projection totale), discriminant les sites AD-BDF des autres sites puis, les échantillons sont également séparés le long du deuxième axe (23 % de la projection totale), discriminant les sites AD et BDR des autres sols. Parmi les groupes taxonomiques

identifiés, les carabes (*Carabidae*) et les opilions (*Opiliones*) sont particulièrement abondants sur le site BDR et dans un des pièges Barber du site VDH par rapport aux autres échantillons. Ensuite, les gastéropodes (*Gasteropoda*, ici les escargots et les limaces) sont particulièrement abondants sur le site BDF par rapport aux autres sites. Enfin, les

cloportes (*Oniscidea*) et les lombriciens (*Lumbricidae*, ici des vers épigés) sont plus abondants sur le site AD par rapport aux autres sites (8 ± 3 par rapport à 3 ± 3 individus par piège, respectivement ; moyenne \pm écart-type). Les autres groupes taxonomiques sont retrouvés dans la majorité des sites étudiés. Ces groupes taxonomiques plus ubiquistes que les autres sont les suivants : mille-pattes (chilopodes et diplopodes), araignées, dermaptères (*Forficulidae*), gendarmes (*Pyrrhocoris apterus*), charançons (*Elateridae*), scarabées (*Scarabaeoidea*), coccinelles (*Coccinellidae*), cicadelles (*Cicadellidae*), sauterelles, grillons et criquets (*Orthoptera*), larves de diptères (*Diptera*) et de lépidoptères (*Lepidoptera*).

Étude de l'effet des paramètres pédologiques et stationnels

Afin d'identifier les différences d'abondance totale et de richesse taxonomique de la macrofaune épigée du sol selon des paramètres stationnels et pédologiques, des tests de l'ANOVA ou de Kruskal-Wallis ont été réalisés (Tableau 2). Les résultats témoignent que seule la richesse taxonomique est significativement différente selon l'épaisseur du 1er horizon et sa texture. Le test post-hoc de Tukey HSD montre que la richesse taxonomique est plus faible dans le sol ayant la profondeur la plus importante, c'est-à-dire 50 cm (sol du site ST, constitué de remblais contenant de nombreux matériaux anthropiques) par rapport aux sols ayant un premier horizon de 20 cm de profondeur (sols des sites CCH, SDB, CDC, CJP, PDV et BDF) (p -value = 0,023). De plus, le post-hoc de Tukey HSD montre que la richesse taxonomique est plus faible dans le premier horizon du sol ayant une texture sableuse (sol du site CGF) par rapport au premier horizon des sols ayant une texture limono-argileuse (sols des sites SDB, BDR, CJP et FDH) (p -value = 0,042).

La composition de la communauté des échantillons regroupés selon certains paramètres stationnels et pédologiques est illustrée par une AFC en figure 4. La composition de la communauté semble différente selon le type de milieu, la couverture végétale du site et la pierrosité. Les sites forestiers AD, BDR et BDF accueillent une communauté ayant une abondance plus importante en gastéropodes (*Gasteropoda*), en cloportes (*Oniscidea*) et en lombrics (*Lumbricidae*) par rapport aux autres sites. La composition des communautés des sites agricoles CJP et ST, et des sites semi-naturels PDV et CDC (pelouses naturelles), PDB, CMP et FDH (prairies), SAP et FDL (espaces verts peu artificialisés) est similaire, majoritairement représentée par des espèces ubiquistes (voir partie « Étude de l'effet du site »), tandis que les sols des espaces verts artificialisés (SDB et CGF) ont une composition des communautés intermédiaires entre celles retrouvées dans des sites agricoles/semi-naturels et celles des sites forestiers.

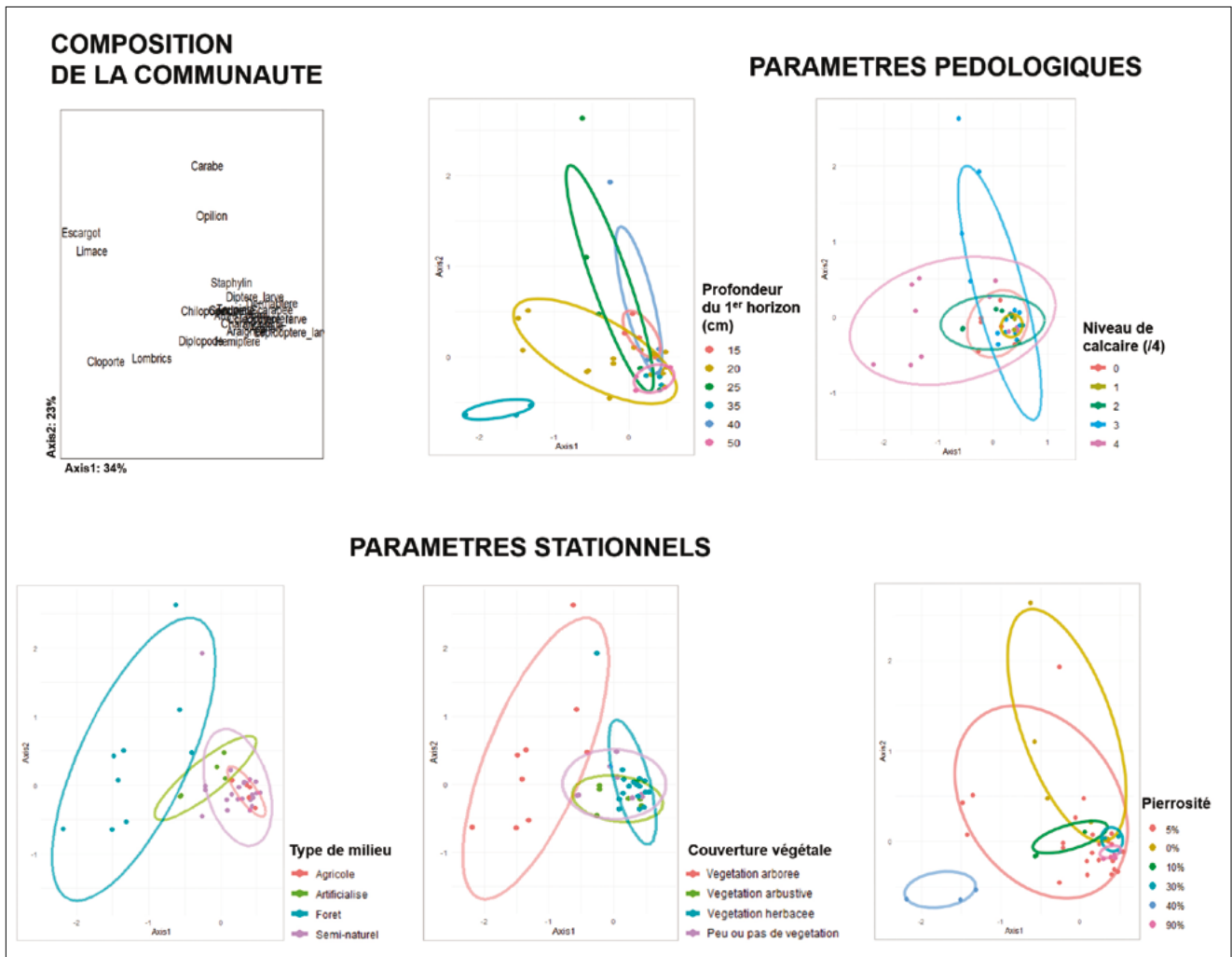
La couverture végétale montre un certain gradient dans la particularité de la communauté. En effet, les communautés de la macrofaune épigée sont peu diversifiées dans les milieux herbacés (sites ST, FDH, PDV, PDB, SAP, CJP, CMP). Ensuite, les communautés des milieux avec peu ou pas de végétation (sites CDC, SDB et CGF) et ceux ayant une végétation arbustive (sites CCH et FDL) ont des compositions de communautés similaires et un peu plus différenciées par rapport aux communautés des milieux herbacés. Pour finir, les communautés des milieux arborées (AD, BDR et BDF) ont une composition encore plus différenciée, présentant davantage de gastéropodes (*Gasteropoda*), des cloportes (*Oniscidea*), de lombrics (*Lumbricidae*), de carabes (*Carabidae*) et d'opillions (*Opiliones*) que les autres. La pierrosité semble également importante dans la composition de la communauté, puisque celle des sols ayant 10, 30 et 90 % de pierrosité de surface (SDB, PDV et CDC respectivement) est similaire et peu différenciée, comparée aux sols sans pierres en surface (0 % de pierrosité), comme les sites BDR et CMP, qui accueillent davantage de carabes (*Carabidae*) et d'opillions (*Opiliones*), ou bien les sites ayant 5 % de pierrosité (SAP, CGF, CCH, FDL, ST, CJP, FDH, PDB et BDF), ou bien le site AD, avec 40 % de pierrosité, qui accueille davantage de cloportes (*Oniscidea*) et de lombrics (*Lumbricidae*) que les autres.

La composition de la communauté est également différente selon certains paramètres pédologiques. En effet, la communauté de la macrofaune épigée des sols semble peu différenciée pour les sols ayant un premier horizon faiblement profond (15 cm, sites CGF et CMP) ou très profond (50 cm, site ST). Un optimum de différenciation de la communauté semble apparaître pour des sols ayant un horizon d'une profondeur entre 20 et 35 cm (autres sites). Enfin, la composition de la communauté de la macrofaune épigée du sol semble différente selon le niveau estimé de calcaire du premier horizon, avec des communautés différenciées pour les niveaux de calcaires les plus élevés (3/4 pour les sites FDL, ST, BDR, FDH et PDV et 4/4 pour les sites CGF, AD, CDC et BDF).

À travers une approche fonctionnelle de la communauté, la composition des groupes trophiques de la macrofaune épigée est différente selon le type de milieu, la couverture végétale et la pierrosité (Figure 5). La proportion de la communauté en prédateurs est significativement plus élevée en milieu artificialisé qu'en milieu forestier. Cependant, la proportion en phytophages est significativement plus faible dans les milieux artificialisés par rapport aux milieux semi-naturels et agricoles. Enfin, les résultats indiquent que la proportion en détritivores est significativement plus élevée dans les milieux forestiers et semi-naturels par rapport aux milieux agricoles. Ces principaux résultats se retrouvent également lorsque la couverture végétale dominante est étudiée. La proportion de

Figure 4 : Analyse factorielle des correspondances de la communauté de la macrofaune épigée du sol (à gauche) des 43 pièges Barber, regroupés selon certains paramètres pédologiques (en haut : profondeur du 1^{er} horizon et le niveau de calcaire mesuré par le test à l'HCl) et stationnels (en bas : type de milieu, couverture végétale et pierrosité).

Figure 4 : Correspondence factor analysis of the soil epigeal macrofauna community (left) of the 43 Barber traps, grouped according to certain site parameters pedological (top : depth of the first horizon and the level of limestone measured by the HCl test) and landscape (bottom : type of environment, vegetation cover and stoniness).



la communauté en prédateurs est significativement plus faible dans les milieux arborés que dans les milieux arbustifs et herbacés, et la proportion de la communauté en détritivores est significativement plus élevée dans les milieux arborés par rapport aux milieux herbacés. Concernant la pierrosité, la proportion en prédateurs diminue significativement en fonction de ce paramètre (excepté pour l'unique site CDC, à 90 % de pierrosité).

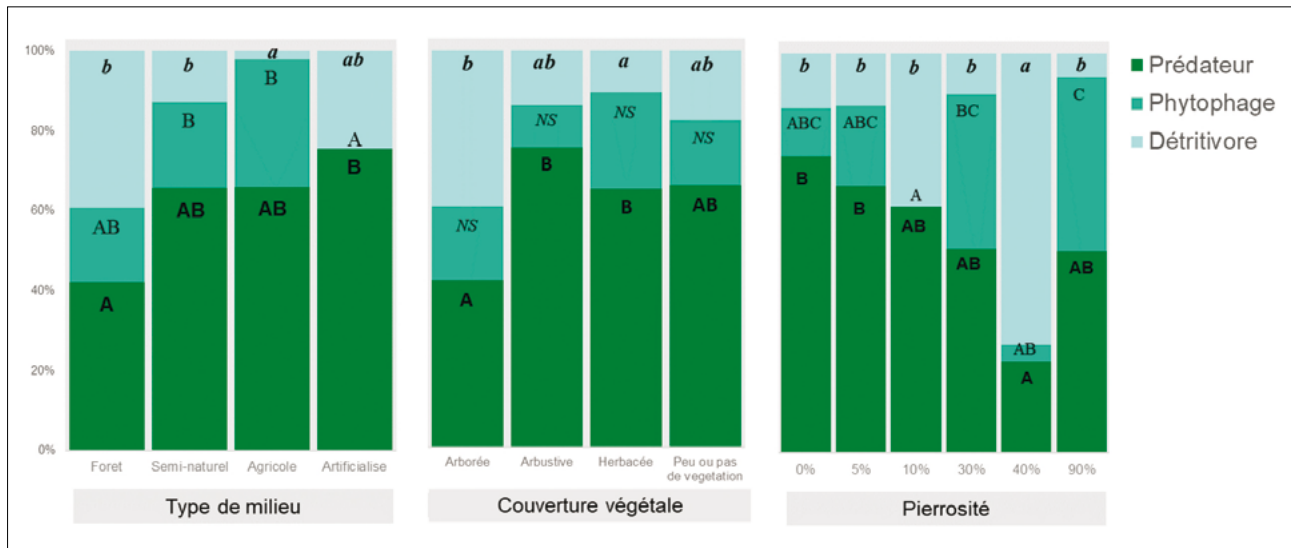
Étude de l'effet des paramètres physico-chimiques

L'étude des paramètres physico-chimiques (Tableau 3) montre que seule la teneur en calcaire totale et le taux de sable est significativement corrélée négativement à l'abondance de la macrofaune épigée du sol : plus le taux de calcaire ou le taux en sables est élevé, plus l'abondance de la macrofaune est faible.

Pour étudier le lien entre les paramètres physico-chimiques du premier horizon de sol et la composition de la communauté

Figure 5 : Valeurs de la moyenne pondérée de la communauté (MPC) des groupes trophiques de la macrofaune épigée mesurées dans les 15 sites, selon [à gauche] le type de milieu (forêt, semi-naturel, agricole et artificialisé), [au milieu] la couverture végétale (arborée, arbustive, herbacée et avec peu ou pas de végétation) et [à droite] la pierrosité (0, 5, 10, 30, 40 et 90 %). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les 4 couvertures végétales ($P < 0,05$) en utilisant le test de Kruskal-Wallis suivi de comparaisons multiples de la distribution des rangs avec le test LSD de Fisher.

Figure 5 : Community weighted average (CWA) values of epigeal macrofaunal trophic groups measured at the 15 sites by [left] environment type (forest, semi-natural, agricultural, and artificial), [middle] vegetation cover (forested, shrubby, herbaceous, and with little or no vegetation), and [right] stoniness (0, 5, 10, 30, 40, and 90%). Different letters indicate significant differences between the 4 vegetation covers ($P < 0.05$) using the Kruskal-Wallis test followed by multiple comparisons of the rank distribution with Fisher's LSD test.



de la macrofaune épigée du sol, une analyse de co-inertie a été réalisée (Figure 6). Les deux axes de projections représentent 73 % de la co-inertie totale et montrent une faible co-variation des paramètres agronomiques et de la communauté de la macrofaune épigée ($RV = 23\%$). En effet, la projection des échantillons est différente si on les considère d'après les paramètres agronomiques (ronds verts) par rapport à une considération selon la composition des communautés (losanges oranges). Toutefois, certains paramètres agronomiques en particulier semblent influencer l'occurrence de certains groupes taxonomiques. En effet, l'abondance en cicadelles (*Cicadellidae*) est significativement et positivement corrélée au taux en argiles dans le premier horizon des sols ($R^2 = 0,42$; test de Student: p -value = 10-6). L'abondance en limaces (*Limacidae*) est significativement et positivement corrélée au taux en sables dans le premier horizon des sols ($R^2 = 0,23$; test de Student: p -value = 0,02). Cette observation semble être le cas également pour les escargots mais elle n'est pas significative selon le test de Student. L'abondance en cloportes (*Oniscidea*) est significativement et positivement corrélée avec la teneur en potassium des sols ($R^2 = 0,31$; test de Student: p -value = 0,045) et surtout avec le teneur en phosphore disponible ($R^2 = 0,36$; test de Student: p -value = 10-5).

DISCUSSION

Les sols urbains et péri-urbains : un potentiel de réserve de biodiversité des sols en ville

Les niveaux d'abondance en macrofaune épigée (31 ± 16 individus; moyenne \pm écart-type) dans les 15 sols urbains et péri-urbains étudiés sont similaires à ceux mesurés dans des sols très anthropisés comme des sols urbains (25 ± 36 individus par piège issus des travaux de Auclerc *et al.* (2019), majoritairement des sols de jardins urbains et des sites de maraîchages urbains et péri-urbains), des sols en agriculture conventionnelle (30 individus d'après Lahati et Ladjinga (2021) dans des cultures de légumes) et des sols récemment construits avec des matériaux issus de déchets du type boues de papeterie, sols industriels traités thermiquement et compost de déchets verts (36 ± 6 individus d'après Hedde *et al.* (2019)). Toutefois, ces niveaux d'abondance observés sur les 15 sites sont plus faibles que ceux retrouvés dans des forêts secondaires et des sols agricoles en culture avec peu d'intrants organiques (71 ± 15 et 72 ± 12 individus respectivement d'après Rousseau *et al.* (2013)) ou des sols

Tableau 3 : Résultats des tests de corrélation (test de Student) de l'abondance et de la diversité taxonomique avec les paramètres physico-chimiques. Argiles = taux d'argiles, Limons = taux de limons, Sables = taux de sables, MO = taux de matière organique, Ntot = taux d'azote total, Rapport Corg/Ntot = rapport entre le taux de carbone organique et le taux d'azote total, CEC = capacité d'échange cationique, pH = pH mesuré à l'eau, calcaire total = taux en calcaire total, Taux de saturation = somme des cations/CEC, P Olsen = phosphore disponible extrait par la méthode Olsen, [Concentrations en cations échangeables] Ca = calcium ; Na = sodium ; K = potassium ; Mg = magnésium.

Table 3: Results of correlation tests (Student's test) of abundance and taxonomic diversity with physico-chemical parameters and taxonomic diversity with agronomic parameters. Clay = clay content, Silt = silt content, Sand = sand content, OM = organic matter content, Ntot = total nitrogen content, Corg/Ntot ratio = organic carbon/total nitrogen content, CEC = cation exchange capacity, pH = pH measured with water, Total limestone = total limestone content, Saturation rate = sum of cations/CEC, P Olsen = available phosphorus extracted by Olsen method, [Exchangeable cation concentrations] Ca = calcium ; Na = sodium ; K = potassium ; Mg = magnesium.

		p-value (Corrélation - test de Student)	
		Abondance	Richesse taxonomique
Teneurs	pH	0,116	0,280
	MO (%)	0,404	0,177
	N total (mg/kg)	0,179	0,132
	Corg/Ntot	0,307	0,677
	CEC (cmol+/kg)	0,043	0,095
Concentrations (mg/kg)	Ca	0,112	0,454
	K	0,085	0,691
	Mg	0,137	0,292
	Na	0,892	0,169
	P Olsen	0,525	0,146
	Taux de saturation (%)	0,038	0,058
Taux (%)	Calcaire total	0,027	0,087
	Argiles	0,042	0,199
	Sables	0,022	0,099
	Limons	0,090	0,129

agricoles en culture biologique (45 individus d'après Lahati et Ladjinga (2021), dans des cultures de légumes) mais plus élevés que ceux retrouvés dans des sols agricoles en jachère faiblement pollués, c'est-à-dire avec des teneurs en éléments traces métalliques se situant à $\pm 20\%$ des seuils fixés par l'arrêté du 08/01/98 (environ 7 individus ; Ineris, 2020 ; Hedde et al., 2012).

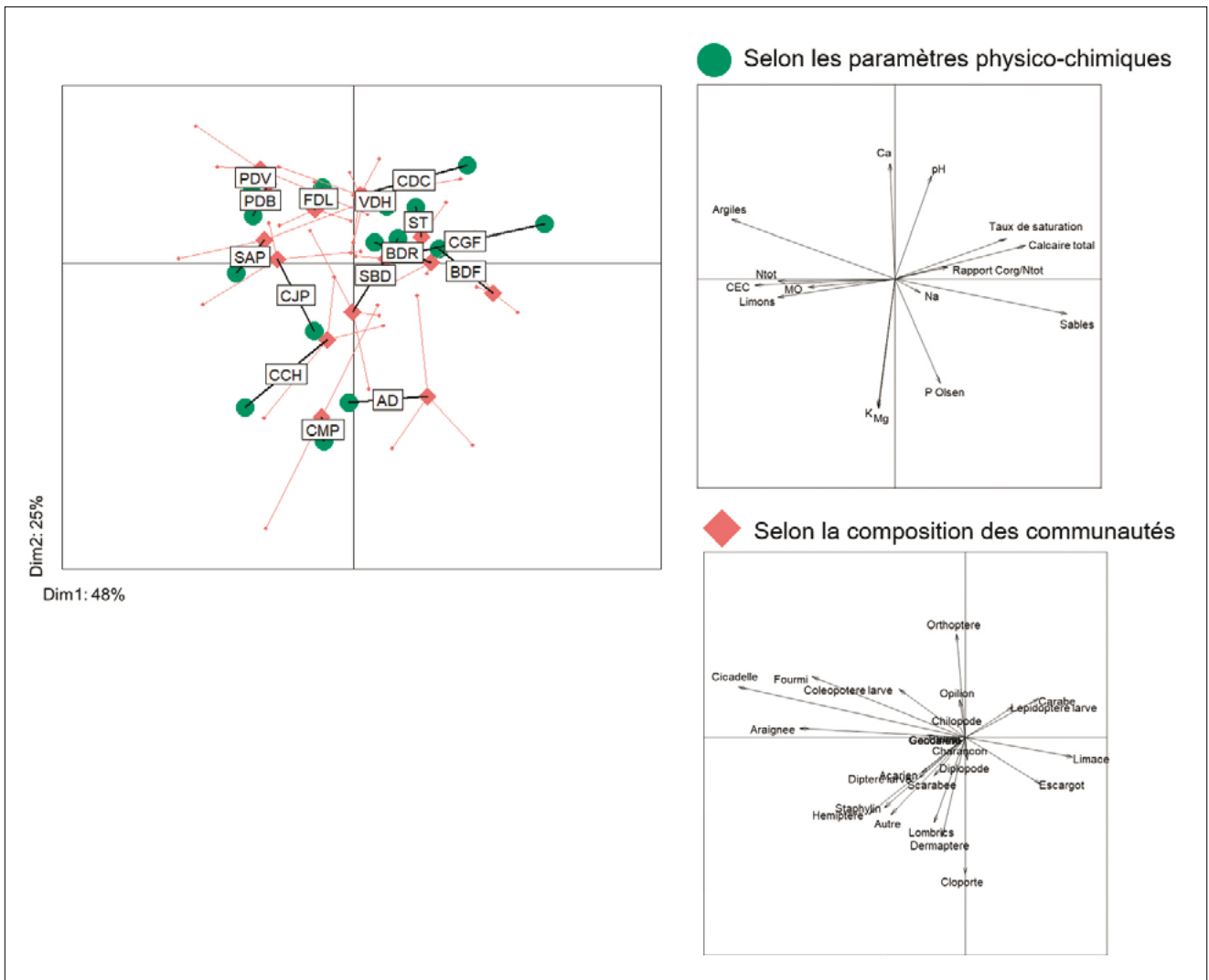
Quant à la richesse taxonomique, 8 ± 2 taxons (moyenne \pm écart-type) ont été observés dans les 15 sols urbains et péri-urbains étudiés. Ces niveaux de richesse taxonomique sont comparables à ceux mesurés dans des sols de forêts de feuillus millénaires (entre 6 et 9 groupes taxonomiques au niveau de l'ordre ou de la famille, dans des sols argileux gleyifiée d'après Carpenter et al., 2012), des sols agricoles en jachère (8 groupes taxonomiques différents, d'après Pérez-Bote et Romero, 2012), des sols de prairies humides et sèches (4-7 groupes taxonomiques différents, d'après Carpenter et al., 2012) et les sols faiblement

pollués décrits par Hedde et al. (2012) avec 5 à 10 groupes taxonomiques différents).

Ainsi, les sols urbains et péri-urbains semblent être des milieux qui impactent l'abondance en macrofaune épigée du sol. Shochat et al. (2006) précisent que les stratégies de gestion urbaine limitent la variabilité spatiale et temporelle des ressources dans les sols urbains, en comparaison aux sols dont les compositions et les modes de gestions sont moins impactés par les activités humaines (forêts, prairies, etc.), ce qui pourrait limiter le développement des différentes populations de la macrofaune épigée. Par contre, les sols urbains sont souvent hétérogènes de par leurs compositions et leurs usages variés (pelouses, massifs, potagers, bosquets, noues, etc.) (McIntyre et al., 2001), présentant de nombreux habitats différents (Byrne, 2007), permettant la cohabitation de groupes taxonomiques différents, favorisant ainsi la richesse taxonomique (Bardgett, 2002 ; Cole et al., 2006).

Figure 6 : Analyse de co-inertie entre les paramètres physico-chimiques du premier horizon et la composition des communautés des 43 échantillons. Les ronds verts représentent la répartition des échantillons de l'analyse en composantes principales (ACP) selon les variables agronomiques et les losanges rouges représentent la répartition des échantillons de l'ACP selon la composition des communautés de la macrofaune épigée du sol. Argiles = taux d'argiles, Limons = taux de limons, Sables = taux de sables, MO = taux de matière organique, Ntot = taux d'azote total, Rapport Corg/Ntot = rapport entre le taux de carbone organique et le taux d'azote total, CEC = capacité d'échange cationique, pH = pH mesuré à l'eau, calcaire total = taux en calcaire total, Taux de saturation = somme des cations/CEC, P Olsen = phosphore disponible extrait par la méthode Olsen, [Concentrations en cations échangeables] Ca = calcium ; Na = sodium ; K = potassium ; Mg = magnésium.

Figure 6 : Co-inertia analysis between physico-chemical parameters of the first horizon and community composition of the 43 samples. Green circles represent the distribution of the Principal Component Analysis (PCA) samples according to agronomic variables and red diamonds represent the distribution of the PCA samples according to community composition of the soil macrofauna. Clay = clay content, Silt = silt content, Sand = sand content, OM = organic matter content, Ntot = total nitrogen content, Corg/Ntot ratio = organic carbon/total nitrogen content ratio, CEC = cation exchange capacity, pH = pH measured with water, Total limestone = total limestone content, Saturation rate = sum of cations/CEC, P Olsen = available phosphorus extracted by Olsen method, [Exchangeable cation concentrations] Ca = calcium ; Na = sodium ; K = potassium ; Mg = magnesium.



Les arthropodes, dont le nombre d'individus dans les populations est important et fluctue faiblement (*Blattidae*, *Formicidae*, etc. d'après Kruess et Tscharrntke (1994)), peuvent être capables d'exploiter ces habitats fragmentés (Kruess et Tscharrntke, 1994) et donc de tolérer un niveau d'anthropisation plus important que les espèces plus sensibles à la perte d'habitat (McIntyre *et al.*, 2001). En effet, pour la plupart des sites urbains et péri-urbains étudiés dans la Métropole du Grand Nancy, les taxons observés sont identiques. Ces taxons ubiquistes ont tendance à avoir une large gamme géographique, ce qui indique une capacité d'adaptation à de nombreuses régions et habitats (McIntyre *et al.*, 2001). Par exemple, les fourmis sont parmi les invertébrés les plus abondants dans les sols urbains (terrains vagues et jardins; Uno *et al.*, 2010), ce qui est également en accord avec les résultats observés dans notre étude. L'abondance des fourmis augmente également avec la couverture des bâtiments (Philpott *et al.*, 2014), ce qui montre le lien important entre urbanisation et abondance en fourmis. Quant aux araignées, elles sont généralement plus abondantes et diversifiées dans les habitats fragmentés (Bolger *et al.*, 2000; Pinkus-Rendón *et al.*, 2006), ce qui explique nos résultats où les araignées sont le groupe taxonomique le plus abondant après les fourmis. En effet, les sites étant en milieux urbains et péri-urbains, la fragmentation des habitats y est importante (Clergeau, 2007). Concernant les cloportes, ils sont présents dans les sites étudiés mais leur abondance est plus faible que ceux des sols urbains étudiés par Philpott *et al.* (2014) (59 % dans les sols de forêts urbaines, 83 % dans les sols de jardins urbains et 17 % dans les sols de friches urbaines) ou par Auclerc *et al.* (2019) (majoritairement des sols de jardins urbains et des sites de maraîchages urbains et péri-urbains). De plus, l'abondance en diplopodes est nettement plus faible dans les sites étudiés par rapport aux sols urbains (4 %; Philpott *et al.*, 2014). Les carabes sont également peu abondants dans les communautés observées par notre étude (présents dans quelques sites seulement), alors que plusieurs études ont montré une importante abondance en carabes dans des sols urbains ou agricoles. En effet, Pérez-Bote et Romero (2012) (pour des sols agricoles sous culture d'oliviers et/ou de vignes, de blé, sols en jachère ou vignobles en friches) ainsi que Bolger *et al.*, 2000 (pour les sols urbains, présentant un couvert végétal d'arbustes indigènes) montrent que les carabes figurent parmi les 5 groupes taxonomiques les plus abondants (abondance supérieure à 20 % de la communauté).

L'étude de la composition des communautés : un outil pertinent dans les stratégies de sauvegarde de la biodiversité en ville

L'abondance représente un paramètre pouvant être mesuré indépendamment des difficultés liées à l'identification des arthropodes du sol, et des outils d'identification faciles ont été créés afin d'estimer la diversité taxonomique, tel que l'outil Jardibiodiv pour l'étude de la macrofaune (Auclerc *et al.*, 2019) ou l'outil de l'OPVT pour les lombriciens (Guernion *et al.*, 2017). Nos résultats montrent que l'abondance et la richesse taxonomique varient peu selon les paramètres stationnels, pédologiques et physico-chimiques des sols et qu'ils ne sont donc pas les meilleurs indicateurs. L'étude de la composition des communautés taxonomique (à l'échelle de l'ordre ou de la famille *a minima*) mais également fonctionnelle semble donc plus pertinente dans des stratégies de conservation de la biodiversité en ville, reflétant mieux ce que doit être cette biodiversité, en appréciant la diversité des communautés et pas seulement la diversité des taxons. Un indice similaire à celui de la richesse fonctionnelle (qui permet de calculer, dans un espace multidimensionnel, un volume à n dimensions des différentes valeurs de traits de la communauté en entière; Villéger *et al.*, 2008), pourrait être calculé pour estimer la variabilité des communautés.

Maximiser la diversité des milieux dans les projets d'aménagement du territoire pour favoriser des communautés différentes

Les communautés de la macrofaune épigée des zones urbaines et péri-urbaine sont différentes selon le type de milieu (Philpott *et al.*, 2014). Par exemple, les opilions (*Opiliones*) sont plus abondants dans les milieux caractérisés par la présence de ligneux et présentant une faible diversité en espèces herbacées (Philpott *et al.*, 2014), ce qui est similaire à nos résultats puisque les opilions ont été majoritairement retrouvés dans des habitats forestiers. Pour les limaces, leur abondance est corrélée à la teneur en sables du premier horizon du sol, ce qui est similaire aux résultats de Ruiz-Camacho (2004) (avec la famille des *Arionidae*, abondant dans nos échantillons), mais en contradiction avec d'autres études qui montrent que les limaces préfèrent les sols plutôt argileux et limoneux (Forbes, 2019). Sur les sites de la présente étude, l'abondance en cloportes est influencée par (i) la couverture végétale, (ii) les teneurs en phosphore disponible, en potassium et en magnésium des sols et (iii) la pierrosité. Tout d'abord, les cloportes présents dans les milieux étudiés sont plus abondants dans les milieux à fort couverts arborés, comme l'ont montré Hornung *et al.* (2015) dans des sols de forêts

urbaines. Ensuite, ces organismes sont également sensibles à la qualité de la litière du sol (Paoletti *et al.*, 1999). D'après Lucisine *et al.* (2015), la vitesse de dégradation de la litière par des détritivores est positivement corrélée aux teneurs en éléments nutritifs, notamment avec le phosphore des litières, ce qui pourrait expliquer la relation observée dans notre étude entre l'abondance en cloportes et la teneur en phosphore disponible du sol. De même, des auteurs ont également constaté une co-variation entre l'abondance de certains isopodes et la concentration en potassium et en magnésium échangeables (Ruiz-Camacho, 2004), probablement liée à la qualité des litières différentes selon les milieux. Pour finir, les matériaux minéraux, tels que les pierres, jouent un rôle dans la composition des communautés, comme l'ont montré Warburg et Hornung (1999) avec une co-variation entre la couverture totale de pierres et l'abondance en *Isopodes*, soulignant également l'importance de la taille des pierres sur la colonisation des cloportes.

Ces différences de composition des communautés de la macrofaune épigée des sols urbains et péri-urbains se retrouvent également d'un point de vue fonctionnel, où les proportions des groupes trophiques sont différentes selon le type de milieux, la couverture végétale et la pierrosité. Ces différences sont dues à 3 taxons majoritaires : les cloportes, les araignées et les staphylins (hors fourmis). En effet, les cloportes sont des détritivores et représentent 38 ± 19 % de la communauté dans les milieux arborés, alors qu'ils ne représentent plus que 10 ± 5 %, 2 ± 2 % et 13 ± 10 % de la communauté dans les milieux arbustifs, herbacés et ceux présentant peu ou pas de végétation, respectivement. Ces détritivores préfèrent les milieux humides, riches en litières comme peuvent l'être les milieux forestiers (Hornung *et al.*, 2015). De plus, les araignées et les staphylins, tous deux prédateurs, ne représentent que 21 ± 15 % de la communauté dans les milieux arborés, alors qu'ils représentent 70 ± 14 %, 54 ± 23 % et 52 ± 21 % de la communauté dans les milieux arbustifs, herbacés et ceux présentant peu ou pas de végétation, respectivement. Cette proportion de prédateurs est significativement plus importante dans les milieux artificialisés par rapport aux forêts tandis que la proportion en phytophages est significativement plus faible. Ces milieux artificiels sont isolés, entourés de sols scellés et présentent un faible couvert végétal (tondue, monospécifique), ce qui limite l'installation de la macrofaune phytophage (Aguilera *et al.*, 2019 pour les lépidoptères ; Unterweger *et al.*, 2018 pour les hémiptères) mais favorise les prédateurs comme les araignées (Bolger *et al.*, 2000 ; Pinkus-Rendón *et al.*, 2006). La plus faible proportion en prédateurs dans les milieux où la pierrosité est plus élevée (sauf pour le seul site CDC, à 90 % de pierrosité) est liée à la plus faible abondance en araignées (Laška, 2011 ; Franin, 2016). L'étude fonctionnelle des communautés de la macrofaune épigée permet d'établir plus

facilement des liens entre la composition des communautés et les paramètres stationnels (Sattler *et al.*, 2010), ce qui présente un intérêt dans les stratégies d'aménagement des trames brunes. Toutefois, dans un contexte d'aménagement d'une trame brune, la question de la mobilité des organismes comme fonction biologique est essentielle (Auclerc *et al.*, 2009 ; Sattler *et al.*, 2010), et mériterait donc une étude plus poussée à travers l'évaluation de ces traits et préférences écologiques des communautés observées. L'utilisation de la base de données BETSI (Pey *et al.*, 2014) permettrait d'affilier un ou plusieurs groupes fonctionnels à chaque taxon identifié et d'aller plus loin dans l'étude de la diversité fonctionnelle. Parmi les traits et préférences écologiques disponibles, la préférence d'habitats et de micro-habitats ainsi que la capacité de dispersion semblent pertinentes à étudier, tout comme les facteurs physico-chimiques, stationnels et pédologiques influençant la sélection de ces traits et les préférences écologiques dans les sites étudiés (Vincent *et al.*, 2018b).

Prendre en compte les caractéristiques pédologiques et paysagères dans l'aménagement des trames brunes, mais pas seulement...

Notre étude met en évidence l'importance de certaines variables pédologiques (comme la profondeur du sol) et stationnels (comme le type de milieu, la couverture végétale et la pierrosité) dans la composition de la communauté de la macrofaune du sol. Ces indicateurs sont liés aux habitats et notamment aux micro-habitats que les sols peuvent accueillir (présence de pierres, de litières, d'herbacées, etc.). L'intégration de la diversité des micro-habitats du sol (à travers des diagnostics pédologiques et stationnels notamment) dans les projets d'aménagement est donc essentielle pour une meilleure sauvegarde de la biodiversité des sols (Berg, 2012). C'est à partir de l'échelle centimétrique, celle du micro-habitat, que les projets de conservation de la biodiversité des sols pourront être efficaces à l'échelle d'un territoire. Les micro-habitats sont actuellement encore peu pris en compte dans les diagnostics de la qualité des sols, alors que les études de la qualité de l'eau prennent en compte ce paramètre depuis longtemps, notamment lors de la détermination de l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN ; NF T90-350, 2004). Dans les milieux terrestres, seules les études des écosystèmes forestiers prennent en compte les micro-habitats liés aux arbres (appelés dendro-microhabitats ; Larrieu, 2014).

Bien que l'échelle du micro-habitat semble pertinente, il reste difficile à définir précisément les facteurs influençant cette biodiversité. Notre étude ne permet pas d'isoler les effets des paramètres pédologiques et stationnels (et également

physico-chimiques) car de nombreux facteurs sont liés et confondants. Une étude plus fine des micro-habitats de chaque site ainsi qu'une caractérisation plus précise des formes d'humus et de la qualité de litières permettraient d'isoler les facteurs qui semblent influencer la structure des communautés de la macrofaune épigée. De plus, certaines conditions ne sont retrouvées que sur un seul site (e.g. pierrosité de 40 % ou profondeur du premier horizon de 35 cm uniquement sur le site AD) ce qui ne permet pas de généraliser l'effet observé. Une prochaine étude avec des sites considérés comme des pseudo-réplicas (quantité et qualité des litières similaires, pierrosités similaires, couvertures végétales identiques), permettrait de valider ou invalider les quelques résultats obtenus sur un seul site dans cette étude. De plus, si les paramètres physico-chimiques ont une influence sur la composition des communautés de la macrofaune épigée, elle n'est que partielle et indirecte. En effet, la macrofaune épigée est moins en interaction directe avec l'horizon de surface étudié, ce qui explique les effets limités des paramètres physico-chimiques des sols sur les organismes épigés. Ces paramètres physico-chimiques peuvent avoir un effet indirect sur la macrofaune épigée en conditionnant la composition et la croissance des communautés végétales (muscinale, herbacée, arbustive et arborée), sources de nourriture et d'habitats pour la macrofaune épigée (Vincent *et al.*, 2018a).

CONCLUSION

Les sols urbains et péri-urbains étudiés accueillent une faible abondance d'organismes, mais une composition taxonomique et fonctionnelle (groupes trophiques) des communautés de la macrofaune épigée variée, et différente selon certains paramètres stationnels (notamment le type de milieux, la couverture végétale et la pierrosité) et pédologiques (profondeur de l'horizon de surface). Les paramètres physico-chimiques du sol semblent moins influencer la composition des communautés, probablement du fait que les communautés étudiées vivent en surface et donc leurs interactions avec les paramètres physico-chimiques des sols sont limitées. Dans le cadre de la création d'une trame brune, il est essentiel de définir deux objectifs : préserver la biodiversité des sols et la mesurer. Pour mesurer cette biodiversité, les indicateurs d'abondance et de richesse taxonomique ne suffisent pas, car ils ne reflètent pas la complexité des communautés, qui est l'enjeu principal de la sauvegarde de cette biodiversité. L'étude de la composition des communautés taxonomique et fonctionnelle semble donc un des outils à favoriser dans la création et l'étude de l'efficacité d'une trame brune. Pour préserver cette biodiversité des sols grâce à la création d'une trame brune,

il ne faut pas se limiter à connecter des milieux entre eux. Il s'agit plutôt, d'une part, de connecter des milieux différents, car cette diversité de milieux favorise une diversité d'espèces au sein des communautés et d'autre part, il faut également que ces milieux aient des micro-habitats différents avec une pierrosité et des couverts végétaux différents, car cette variabilité amènera une diversité taxonomique et fonctionnelle des communautés. Ces approches, tant sur la mesure de la biodiversité des sols que sur la prise en compte des milieux et micro-habitats, doivent être retranscrites dans des outils de planification, tels que le Schéma Régional de Cohérence Écologique, le Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires, le Plan Local d'Urbanisme intercommunal, mais également dans des outils de conservation de la biodiversité.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Région (notamment Alexandra Rossi), les Agences de l'Eau (notamment Marie Lemoine), la DREAL (notamment Grégoire Palierse) et l'OFB pour le financement du projet. De plus, les auteurs remercient les communes de Laxou (notamment Annie Henrard et Julie Vaneson), Villers-les-Nancy (notamment Stéphane Klopp, Valérie Maimbourg et Bernard Mangeol), Vandoeuvre-les-Nancy (notamment Dany Ackermann, Alicia Le Guyader et Nadine Piboule), Ludres (notamment Philippe Goetz et Elodie Velsin) et la métropole du Grand Nancy (notamment Julien Soret) ainsi que les étudiants de FLORE54 (Anaïs Hayat, Laure Foyart, Manon Baudin) pour la réalisation de ce projet.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, 2016 - Les écosystèmes : Eléments d'analyse thématiques et techniques, complément du Guide de l'AEU2. Groupe Moniteur (Éditions du Moniteur), Antony, ISBN : 978-2-281-14005-7. 55 p.
- Aguilera G., Ekroos J., Persson A.S., Pettersson L.B., Öckinger E., 2019 - Intensive management reduces butterfly diversity over time in urban green spaces. *Urban Ecosystems*, 22(2), 335-344.
- Auclerc A., Blanchart A., Vincent Q., 2019 - Jardibiodiv, un outil de sciences participatives sur la biodiversité des sols urbains. *Revue Étude et Gestion des Sols* 26, 195-209.
- Auclerc A., Ponge J.-F., Barot S., Dubs F., 2009 - Experimental assessment of habitat preference and dispersal ability of soil springtails. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 1596-1604.
- Bardgett R.D., 2002 - Causes and consequences of biological diversity in soil. *Zoology (Jena, Germany)* 105, 367-374.
- Barot S., Abbadie L., Auclerc A., Barthélémy C., Bérille E., Billet P., Clergeau P., Consales J.N., Deschamp-Cottin M., David A., Devigne C., Dham V., Dusza Y., Gaillard A., Gonzalez E., Hédon M., Labarraque D., le Bastard A.M., Morel J.L., Petit-Berghem Y., Rémy E., Rochelle-Newall E., Veyrières M., 2019 - Urban ecology, stakeholders and the future of ecology. *Science of the Total Environment* 667, 475-484.

- Berg M.P., 2012 - Patterns of biodiversity at fine and small spatial scales. *Soil ecology and ecosystem services* 136-152.
- Blanchart A., Séré G., Chérel J., Warot G., Stas M., Consaes J.N., Schwartz C., 2017 - Contribution des sols à la production de services écosystémiques en milieu urbain-une revue. *Environnement Urbain/Urban Environment*, (Volume 11 - URL : <http://journals.openedition.org/eue/1809>).
- Blanchart A., 2018 - Vers une prise en compte des potentialités des sols dans la planification territoriale et l'urbanisme opérationnel. Thèse de doctorat-Université de Lorraine. 380 p.
- Blanchart E., Brown G.G., Chernyanski S.S., Deleporte P., Feller C., Goulet F., 2005 - Perception et popularité des vers de terre avant et après Darwin.
- Bolger D.T., Suarez A.V., Crooks K.R., Morrison S.A., Case T.J., 2000 - Arthropods in urban habitat fragments in southern California: area, age, and edge effects. *Ecological Applications*, 10(4), 1230-1248.
- Bray N., Wickings K., 2019 - The roles of invertebrates in the urban soil microbiome. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 359.
- Byrne L.B., 2007 - Habitat structure: A fundamental concept and framework for urban soil ecology. *Urban Ecosystems* 10, 255-274.
- Carpenter D., Hammond P.M., Sherlock E., Lidgett A., Leigh K., Eggleton P., 2012 - Biodiversity of soil macrofauna in the New Forest: A benchmark study across a national park landscape. *Biodiversity and Conservation* 21, 3385-3410.
- Chalot R., 2016 - La Trame Brune. <https://www.habitatqualitedevie.fr/inspirations/la-trame-brune/>.
- Clergeau P., 2007 - Une écologie du paysage urbain. Editions Apogée, 137 p.
- Cole L., Bradford M.A., Shaw P.J.A., Bardgett R.D., 2006 - The abundance, richness and functional role of soil meso- and macrofauna in temperate grassland-A case study. *Applied Soil Ecology* 33,186-198.
- Cormier L., Lajarte A.B.D., Carcaud N., 2010 - La planification des trames vertes, du global au local : réalités et limites, Cybergeo: European Journal of Geography [En ligne], Aménagement, Urbanisme, document 504, URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/23187>.
- Couvét D., Vandevelde J-C., 2014) Biodiversité ordinaire: des enjeux écologiques au consensus social. In book: La biodiversité en question. Enjeux philosophiques, éthiques et scientifiques. Editions Matériologiques, Casetta E., Delord J. DOI: 10.3917/edmat.delor.2014.01.0181
- Doledec S., Chessel D., 1994 - Co-inertia analysis: an alternative method for studying species-environment relationships. *Freshwater Biology* 31:277-294. *Freshwater Biology* 31, 277-294.
- Dray S., Dufour A.B., 2007 - The ade4 Package: Implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software* 22, 1-20.
- Emelianoff C., 2007 - La ville durable : l'hypothèse d'un tournant urbanistique en Europe. *L'Information géographique*, vol. 71, no. 3, 48-65.
- Escofier-Cordier B., 1965 - Analyse des correspondances. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de Rennes, dans Les Cahiers du bureau universitaire de recherche opérationnelle, 196.
- Forbes E., 2019 - Utilising the patchy distribution of slugs to optimise targeting of control; improved sustainability through precision application., Doctoral dissertation, Harper Adams University. 197.
- Franić K., Kuštera G., Šišeta F., 2016 - Fauna of ground-dwelling arthropods in vineyards of Zadar County (Croatia - Poljoprivreda, 22(2), 50-56.
- FRB, 2018 - Groupe de travail Écologie et sociétés urbaines. BiodiverCité, richesse et enjeux de la recherche sur la biodiversité en ville. Paris, France: FRB, 56 p. ISBN 979-10-91015-36-3
- Galkowski C., Lebas C., Wegnez P., Blatrix R., 2013) Fourmis de France, de Belgique et du Luxembourg. Delachaux et Niestlé. ISBN: 978-2-603-01899-6, 287 p.
- Garnier E., Cortez J., Billès G., Navas M., Roumet C., 2004 - Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. *Ecology* 85, 2630-2637.
- Geoffroy J.J., 1992 - Clés d'identification des classes de Myriapodes et des ordres de Chilopodes fréquents dans le sol et ses annexes (Myriapoda; Chilopoda - Millepattia 1: 23-37.
- Geoffroy J.J., 1993 - Clés d'identification des ordres de diplopodes fréquents dans le sol (Myriapoda; Diplopoda - Millepattia 2: 4-28.
- Gobat J.-M., Aragno M., Matthey W., 2010 - Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols, 3^e édition (Vol. 14 - ed. PPUR Presses polytechniques. 819.
- Guernion M., Hoeffner K., Guillocheau S., Hotte H., Cyllly D., Piron D., Cluzeau D., Hervé M., Nicolai A., Pères G., 2017 - When citizens and scientists work together: a french collaborative science network on earthworms communities distribution, in: EGU General Assembly Conference Abstracts. 13543.
- Guilland C., Maron P.A., Damas O., Ranjard L., 2018 - Biodiversity of urban soils for sustainable cities. *Environmental Chemistry Letters* 16, 1267-1282.
- Hedde M., Nahmani J., Séré G., Auclerc A., Cortet J., 2019 - Early colonisation of constructed technosols by macro-invertebrates. *Journal of Soils and Sediments*, 19(8), 3193-3203.
- Hedde M., van Oort F., Lamy I., 2012 - Functional traits of soil invertebrates as indicators for exposure to soil disturbance. *Environmental Pollution* 164, 59-65.
- Hopkin S.P., 1991 - A Key to the [37 Species of] Woodlice of Britain and Ireland. *Field Studies (United Kingdom)* 7(4): 599-650.
- Hornung E., Szlavczek K., Dombos M., (2015 - Demography of some non-native isopods (Crustacea, Isopoda, Oniscidea) in a Mid-Atlantic forest, USA. *ZooKeys* 2015, 127-143.
- Hothorn T., Zeileis A., Farebrother R.W., Cummins C., Millo G., Mitchell D., 2015 - lmtree: Testing linear regression models. R package version 0.9-34.
- Ineris (2020 - Arrêté du 15/09/20 modifiant l'arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées
- ISO 10390, 1994 - Qualité du sol - Détermination du pH.
- ISO 10693, 1995 - Qualité du sol - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode volumétrique
- ISO 10694, 1995 - Qualité du sol - Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (analyse élémentaire -
- ISO 22036, 2008 - Qualité du sol - Dosage des éléments traces dans des extraits de sol par spectrométrie d'émission atomique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES).
- Joimel S., Schwartz C., Hedde M., Kiyota S., Krogh P.H., Nahmani J., Pères G., Vergnes A., Cortet J., 2017 - Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality. *Science of the Total Environment* 584-585, 614-621.
- Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, European atlas of soil biodiversity, Jeffery, S.(editor), Gardi, C.(editor), Jones, A.(editor), Publications Office, 2010, <https://data.europa.eu/doi/10.2788/94222>
- Kruess A., Tschamtké T., 1994 - Habitat fragmentation, species loss, and biological control. *Science*, 264(5165), 1581-1584.
- Lahati B.K., Ladjinga E. 2021. Soil Macrofauna Diversity in Organic and Conventional Vegetable Fields in Ternate City. *Techno: Jurnal Penelitian*, 10(1), 44-53.
- Larrieu L., 2014 - Les dendro-microhabitats : facteurs clés de leur occurrence dans les peuplements forestiers, impact de la gestion et relations avec la biodiversité taxonomique (Doctoral dissertation. Université de Toulouse) 333 p.
- Laška V., Kopecký O., Růžička V., Mikula J., Věle A., Šarapatka B., Tuf I.H., 2011 - Vertical distribution of spiders in soil. *The Journal of Arachnology*, 39(3), 393-398.

- Lucisine P., Lecerf A., Danger M., Felten V., Aran D., Auclerc A., Gross E.M., Huot H., Morel J.-L., Muller S., Nahmani J., Maunoury-Danger F., 2015 - Litter chemistry prevails over litter consumers in mediating effects of past steel industry activities on leaf litter decomposition. *Science of The Total Environment* 537, 213-224.
- Madre F., Vergnes A., Machon N., Clergeau P., 2013 - A comparison of 3 types of green roof as habitats for arthropods. *Ecological Engineering*, 57, 109-117.
- Martins A.L.P., Siqueira G.M., de Moura E.G., Silva R.A., Silva A.J.C., Aguiar A. das C.F., 2018 - Associations Between Different Soil Management Practices, Soil Fauna and Maize Yield. *Journal of Agricultural Science*, 10(9), 333-343.
- Mathieu J., Rossi J.P., Mora P., Lavelle P., Martins P.F.D.S., Rouland C., Grimaldi M., (2005 - Recovery of soil macrofauna communities after forest clearance in Eastern Amazonia, Brazil. *Conservation Biology* 19, 1598-1605.
- McIntyre N.E., Rango J., Fagan W.F., Faeth S.H., 2001 - Ground arthropod community structure in a heterogeneous urban environment. *Landscape and Urban Planning* 52, 257-274.
- Mignon J., Haubruge É., Francis F., 2016 - Clé d'identification des principales familles d'insectes d'Europe. Presses agronomiques de Gembloux. ISBN: 2870161417. 87p.
- Nahmani J., Rossi J.P., 2003 - Soil macroinvertebrates as indicators of pollution by heavy metals. *Comptes Rendus Biologies* 326, 295-303.
- NF T90-350, 2004 - Qualité de l'eau - Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN)
- NF ISO 11 263, 1995 - Qualité du sol - Dosage du phosphore - Dosage spectrométrique du phosphore soluble dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium.
- NF X 31-003, 1998 - Qualité des sols - Description du sol.
- NF X 31-107, 2003 - Qualité du sol - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol - Méthode à la pipette.
- NF X 31-130, 1999 - Qualité des sols - Méthodes chimiques - Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles.
- Orgiazzi A., Bardgett R.D., Barrios E., Behan-Pelletier V., Briones M.J.I., Chotte J.-L., de Deyn G.B., Eggleton P., Fierer N., Fraser T., Hedlund K., Jeffery S., Johnson N.C., Jones A., Kandeler E., Kaneko N., Lavelle P., Lemanceau P., Wall D.H., 2016 - Global soil biodiversity atlas. European Commission. ISBN: 9789279481697. 176 p.
- Paoletti M., Gea O., Longo G., Paoletti M.G., Hassall M., 1999 - Woodlice (Isopoda: Oniscidea): their potential for assessing sustainability and use as bioindicators, *Ecosystems and Environment*.
- Pérez-Bote J.L., Romero A.J., 2012 - Epigeic soil arthropod abundance under different agricultural land uses. *Spanish Journal of Agricultural Research* 10, 55-61.
- Pey B., Laporte M.A., Nahmani J., Auclerc A., Capowicz Y., Caro G., Cluzeau D., Cortet J., Decaens T., Dubs F., Joimel S., Guernion M., Briard C., Grumiaux F., Laporte B., Pasquet A., Pelosi C., Pernin C., Ponge J.F., Salmon S., Santorufo L., Hedde M., 2014 - A thesaurus for soil invertebrate trait-based approaches. *PLoS One*. 2014 Oct 13;9(10):e108985.
- Philpott S.M., Cotton J., Bichier P., Friedrich R.L., Moorhead L.C., Uno S., Valdez M., 2014 - Local and landscape drivers of arthropod abundance, richness, and trophic composition in urban habitats. *Urban Ecosystems* 17, 513-532.
- Pinkus-Rendón M.A., León-Cortés J.L., Ibarra-Núñez G., 2006 - Spider diversity in a tropical habitat gradient in Chiapas, Mexico. *Diversity and Distributions* 12, 61-69.
- Pouyat R.V., Szlavecz K., Yesilonis I.D., Groffman P.M., Schwarz K., 2015 - Chemical, Physical, and Biological Characteristics of Urban Soils. pp. 119-152. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr55.c7>
- Pruvost C., Mathieu J., Nunan N., Gigon A., Lerch T.Z., Blouin M., 2020 - Tree growth and macrofauna colonization in Technosols constructed from recycled urban wastes. *Ecological Engineering*, 153, 105886.
- Rousseau L., Fonte S.J., Téllez O., van der Hoek R., Lavelle P., 2013 - Soil macrofauna as indicators of soil quality and land use impacts in smallholder agroecosystems of western Nicaragua. *Ecological Indicators* 27, 71-82.
- Ruiz-Camacho N., 2004 - Mise au point d'un système de bioindication de la qualité du sol base sur l'étude des peuplements de macroinvertébrés., Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 327 p.
- Sattler T., Duelli P., Obrist M.K., Arlettaz R., Moretti M., 2010 - Response of arthropod species richness and functional groups to urban habitat structure and management. *Landscape Ecology* 25, 941-954.
- Shochat E., Warren P.S., Faeth S.H., McIntyre N.E., Hope D., 2006 - From patterns to emerging processes in mechanistic urban ecology. *Trends in Ecology and Evolution* 21, 186-191.
- Siegel S., Castellan N.J., 1988 - Non-parametric statistics for the behavioral sciences. *American Journal of Sociology*. Vol. 63, No. 4. 442-443.
- Small E., Sadler J.P., Telfer M., 2006 - Do landscape factors affect brownfield carabid assemblages? *Science of the Total Environment* 360, 205-222.
- Sordello R., 2017 - Pollution lumineuse et trame verte et bleue : vers une trame noire en France ? Territoire en mouvement *Revue de géographie et aménagement*. Territory in movement *Journal of geography and planning*. [En ligne]. 35. URL : <http://journals.openedition.org/tem/4381>.
- Uno S., Cotton J., Philpott S.M., 2010 - Diversity, abundance, and species composition of ants in urban green spaces. *Urban Ecosyst* 13, 425-441.
- Unterweger P.A., Klammer J., Unger M., Betz O., 2018 - Insect hibernation on urban green land: a winter-adapted mowing regime as a management tool for insect conservation. *BioRisk*, 13, 1.
- van Nuland M.E., Whitlow W.L., 2014 - Temporal effects on biodiversity and composition of arthropod communities along an urban-rural gradient. *Urban Ecosystems* 17, 1047-1060.
- Villéger S., Mason N.W., Moullot D., 2008 - New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*, 89(8), 2290-2301.
- Vincent Q., Auclerc A., Beguiristain T., Leyval C., 2018a - Assessment of derelict soil quality: Abiotic, biotic and functional approaches. *Science of the Total Environment* 613-614, 990-1002.
- Vincent Q., Leyval C., Beguiristain T., Auclerc A., 2018b - Functional structure and composition of Collembola and soil macrofauna communities depend on abiotic parameters in derelict soils. *Applied Soil Ecology*, 130, 259-270.
- Vincent Q., 2018c - Etude des paramètres abiotiques, biotiques et fonctionnels, et de leurs interactions dans des sols délaissés - Thèse de doctorat. Université de Lorraine) 301 p.
- Wall D.H., Nielsen U.N., Six J., 2015 - Soil biodiversity and human health. *Nature* 528, 69-76.
- Warburg M.R., Hornung E., 1999 - Diversity of terrestrial isopod species along a transect. *Biodiversity and Conservation* 8, 1469-1478.