

Outils d'évaluation de la diversité et de l'activité des vers de terre : de la science participative à la recherche fondamentale

R.C. Le Bayon^(1*), S. Campiche⁽²⁾, V. Gerber⁽¹⁾, A. Fietier⁽³⁾, L. Scherrer⁽³⁾ et P. Turberg⁽⁴⁾

- 1) Université de Neuchâtel, Laboratoire d'Ecologie Fonctionnelle, Emile Argand 11, 2000 Neuchâtel - Suisse
- 2) EnviBioSoil, Rue des Cerisiers 6, 1124 Gollion - Suisse
- 3) FRI, Fondation Rurale Interjurassienne, Courtemelon, 2852 Courtételle - Suisse
- 4) École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), School of Architecture, Civil and Environmental Engineering (ENAC), Station 2, 1015 Lausanne - Suisse

* Auteur correspondant : claire.lebayon@unine.ch

RÉSUMÉ

La compréhension et le suivi du fonctionnement des écosystèmes requièrent l'utilisation d'indicateurs biologiques simples et efficaces. Les vers de terre en font partie et leur étude permet d'appréhender l'écosystème à différents niveaux, depuis les sciences participatives impliquant le grand public à la recherche de pointe nécessitant des compétences scientifiques de haut niveau. Cet article présente une synthèse et une comparaison des techniques et outils actuels pour l'étude des communautés de vers de terre et leurs activités de bioturbation en fonction des objectifs et des besoins des potentiels utilisateurs. Depuis le simple comptage d'animaux au séquençage d'ADN en passant par les techniques de tomographie, l'étude des vers de terre offre un large éventail d'outils et de techniques qui permettent de mieux comprendre leur implication essentielle dans les services écosystémiques.

Mots-clés

Ver de terre, sciences participatives, outil diagnostique, biodiversité, monitoring.

Comment citer cet article :

Le Bayon R.C., Campiche S., Gerber V., Fietier A., Scherrer L. et Turberg P., 2022 - Outils d'évaluation de la diversité et de l'activité des vers de terre : de la science participative à la recherche fondamentale - *Étude et Gestion des Sols*, 29, 99-116

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/>

SUMMARY**TOOLS FOR ASSESSING BIODIVERSITY AND EARTHWORM ACTIVITY:
from participatory science to basic research**

Understanding and monitoring the functioning of ecosystems requires the use of simple and effective biological indicators. Earthworms are one of them their study allows to understand the ecosystem at different levels, from participatory science involving the general public to advanced research requiring high level scientific skills. This article presents a synthesis and comparison of current techniques and tools for the study of earthworm communities and their bioturbation activities according to the objectives and needs of potential users. From simple animal counts to DNA sequencing and tomographic techniques, the study of earthworms offers a wide range of tools and techniques to better understand their essential involvement in ecosystem services.

Key-words

Earthworm, participatory sciences, diagnostic tool, biodiversity, monitoring.

RESUMEN**HERRAMIENTAS PARA EVALUAR LA BIODIVERSIDAD Y LA ACTIVIDAD DE LAS LOMBRICES DE TIERRA:
de la ciencia participativa a la investigación básica**

La comprensión y el seguimiento del funcionamiento de los ecosistemas requiere el uso de indicadores biológicos sencillos y eficaces. Las lombrices de tierra son uno de esos indicadores y su estudio permite comprender el ecosistema a diferentes niveles, desde la ciencia participativa que involucra al público en general hasta la investigación avanzada que requiere conocimientos científicos de alto nivel. Este artículo presenta una síntesis y comparación de las técnicas y herramientas actuales para el estudio de las comunidades de lombrices de tierra y sus actividades de bioturbación en función de los objetivos y necesidades de los usuarios potenciales. Desde el simple recuento de animales hasta la secuenciación del ADN y las técnicas tomográficas, el estudio de las lombrices de tierra ofrece una amplia gama de herramientas y técnicas para comprender mejor su participación esencial en los servicios del ecosistema.

Palabras clave

Lombric de tierra, ciencia participativa, herramienta de diagnóstico, biodiversidad, seguimiento.

1. INTRODUCTION

Le sol est au cœur du fonctionnement des écosystèmes terrestres. Situé à l'interface entre plusieurs compartiments (biosphère, atmosphère, lithosphère, hydrosphère), il est le siège d'interactions qui vont déterminer son fonctionnement et sa capacité à fournir des services écosystémiques essentiels au bien-être de l'homme (Costanza *et al.*, 1997; MEA, 2005). Dans ce contexte, les organismes du sol interviennent à différents niveaux et de nombreuses façons, notamment dans la transformation de la matière organique du sol, le recyclage des nutriments, la mise en place et le maintien de la structure du sol ainsi que la régulation de populations d'organismes subordonnés (Kibblewhite *et al.*, 2008). Leur rôle est donc essentiel et, parmi ces organismes, les vers de terre en tant qu'ingénieurs du sol ont un impact primordial sur les processus de pédogenèse et le fonctionnement des sols au travers de leurs activités de bioturbation (Blouin *et al.*, 2013; Le Bayon *et al.*, 2021). De plus, ils présentent l'avantage d'être faciles à collecter et à reconnaître du point de vue de leur morphologie générale. Ainsi, l'identification des catégories écologiques de vers de terre (épigés, anéciques, endogés; Bouché, 1972; Bottinelli *et al.*, 2020) peut se réaliser au travers de critères simples de taille ou de couleur (OPVT, 2021), ce qui la rend accessible à un public relativement large. La détermination au genre voire à l'espèce nécessite quant à elle des outils et des connaissances plus

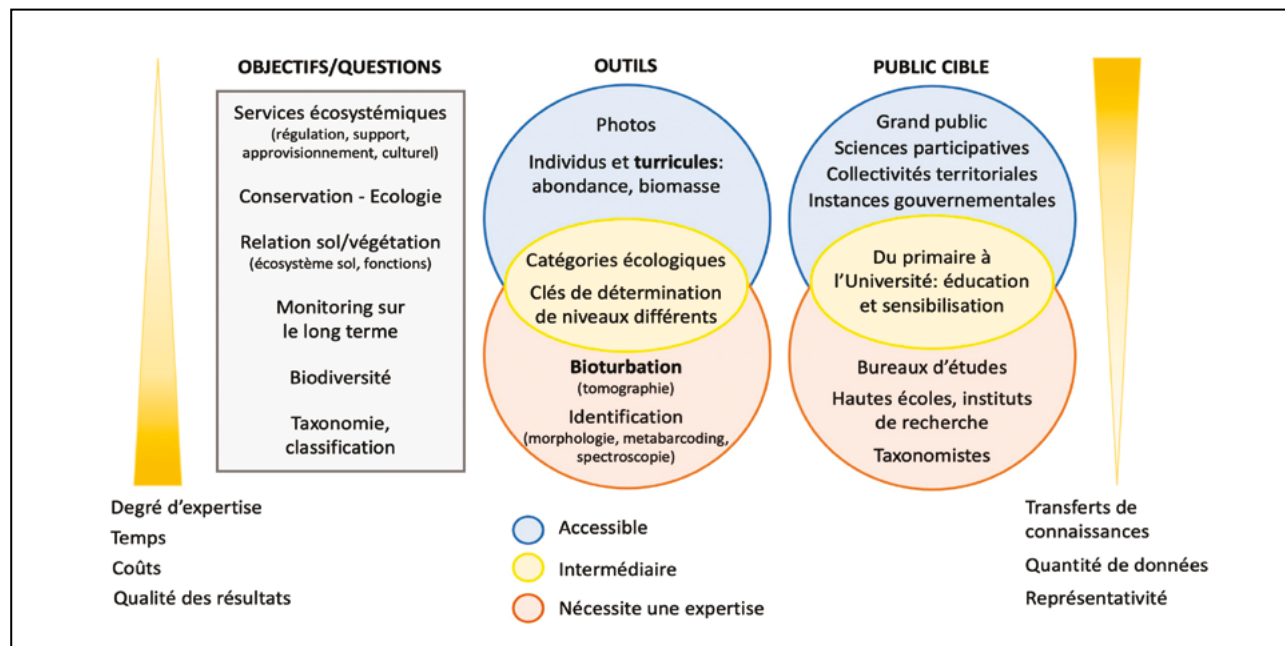
poussées et se limite par conséquent à un panel de personnes plus expérimentées. Plusieurs approches sont donc possibles avec ces animaux, depuis les sciences participatives par des particuliers (OPVT, 2021) à la recherche universitaire pour des spécialistes en taxonomie (Drilobase, 2021). Cet article a pour objectif de présenter une synthèse des techniques et outils actuels pertinents pour l'étude des communautés de vers de terre et leurs activités de bioturbation du sol en fonction des approches et des besoins des potentiels utilisateurs.

2. QUELLE EST LA QUESTION ? QUE SOUHAITE-T-ON ÉTUDIER ?

Pour étudier les communautés de vers de terre, il est essentiel d'identifier clairement l'objectif que l'on souhaite atteindre et en fonction duquel l'approche variera notamment en termes d'échelle, de qualité des mesures mais aussi de coûts. La *figure 1* donne un aperçu de ces différents aspects en présentant dans les grandes lignes les relations entre questions posées (objectifs de l'étude), outils à disposition et public cible. Les codes couleurs (bleu : accessible à tous, jaune : intermédiaire, orange : nécessite une expertise) permettent d'évaluer à la fois le degré de connaissances et de savoir-faire nécessaires, mais aussi les notions de temps investi par

Figure 1 - Synthèse des différents outils à disposition pour étudier les vers de terre, en lien avec les questions posées et le public cible selon les niveaux d'expertise exigés. Les termes en gras indiquent les études indirectes (comme par exemple les traces d'activités que sont les déjections et les galeries).

Figure 1 - Summary of the different tools to study earthworms, concerning the asked questions and the target audience according to the levels of expertise required. Words in bold indicate indirect studies (as for example traces of activities such as casts and burrows).



échantillon, de coûts relatifs aux techniques employées et de qualité des résultats obtenus. La distinction est faite également entre les études directes (comptages d'individus par exemple) et les études indirectes au travers des indices d'activité de vers de terre tels que les déjections et les galeries (termes en gras). La représentativité spatiale, le volume de données récoltées et le transfert de connaissances sont également indiqués. Cette figure sert de base de référence aux sections 2.1 et 2.2.

2.1 L'objectif détermine l'outil et le public cible

Les vers de terre sont de bons indicateurs de la qualité des sols au travers de leur implication dans des fonctions essentielles telles que la stabilité structurale ou encore les cycles de l'eau et des nutriments (Fründ *et al.*, 2011 ; Bünenmann *et al.*, 2018 ; Creamer *et al.*, 2022). La collecte des vers de terre étant relativement aisée, ces organismes sont par conséquent de bons candidats pour répondre à des problématiques de biodiversité globale, mieux appréhender le fonctionnement des écosystèmes mais également participer à la surveillance de la qualité des sols ainsi qu'à la découverte de nouvelles espèces et l'incrémentation de bases de données de références taxonomiques (Drilobase, 2021).

2.1.1 Etudier la biodiversité des vers de terre grâce aux sciences participatives

S'agissant des services écosystémiques, les vers de terre sont des acteurs incontournables du maintien de la fertilité des sols au travers de leur activité de bioturbation, avec en ligne de mire plus particulièrement les services de régulation et d'approvisionnement (MEA, 2005). Les concepts de conservation des espèces ou encore de biodiversité sont par conséquent directement concernés, termes qui sont très percutants et relativement phares pour le grand public. Dans ce contexte, il est aisé de privilégier les formes de communication de ces enjeux lors de conférences, débats radio et/ou télévisés en mettant en avant les vers de terre. Ainsi, en 2011, le ver de terre a été élu animal de l'année par l'association de protection de la nature Pronatura en Suisse (Pronatura, 2011). Une telle popularité a permis au public de mieux connaître cet invertébré souvent discret qui est pourtant indispensable dans nos sols et de sensibiliser dans certains cas les collectivités territoriales du point de vue des traitements phytosanitaires en ville (jardins publics mais aussi collectifs ou privés ; Tresch *et al.*, 2019), des types de couverts végétaux à privilégier pour favoriser la macrofaune, etc. (TerresVivantes, 2021).

La sensibilisation du public permet de promouvoir les relations d'échanges avec les institutions scientifiques. Ces dernières peuvent ainsi bénéficier d'une aide bienvenue pour incrémenter les bases de données sur la répartition des vers

Figure 2 - Tests à la bêche dans le cadre du projet Terres Vivantes. Les galeries de vers de terre sont bien visibles dans les mottes de terre (droite). Crédit photos : Claire Le Bayon.

Figure 2 - Spade tests in the Terres Vivantes project. The earthworm galleries are well visible in the soil clods (right).

Photo credit: Claire Le Bayon.



de terre. C'est notamment le cas en France de l'Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT) lancé conjointement par le CNRS et l'Université de Rennes en 2011 (OPVT, 2021). Ce projet a pour but de recenser l'abondance et la biodiversité spécifique des vers de terre sur le territoire français. Les sites étudiés sont principalement liés à l'agriculture, la viticulture, l'agroforesterie mais aussi les jardins de particuliers. Les premières tendances de l'étude sur 731 sites indiquent une abondance moyenne de 264 individus au mètre carré sur le territoire français sur la période 2005-2015 (Nature France, 2021).

En Suisse, la biodiversité des vers de terre est encore mal connue au regard de ce qui est recensé du point de vue de la flore (Infloflora, 2021) et du reste de la faune (CSCF, 2021). Récemment, le projet Terres Vivantes (2019-2026) cible une vision de sciences participatives intégrant cette fois plus spécifiquement les acteurs du monde agricole. Financé entre autres par l'Office Fédéral de l'Agriculture (OFAG), il s'intéresse tout particulièrement à l'impact des pratiques culturales sur les communautés de vers de terre. Sur la base du volontariat, et moyennant une compensation financière pour la mise à disposition de leurs parcelles, des agriculteurs se sont impliqués dans ce projet qui s'attache à résoudre des problématiques concrètes rencontrées sur le terrain, comme celle de la perte de matière organique dans les sols ou encore l'érosion (TerresVivantes, 2021). Dans ce type d'approche participative focalisée sur une problématique spécifique et des

besoins concrets, il est essentiel que la démarche fasse sens pour l'agriculteur (Scherrer et Fietier, comm. pers.) et qu'elle soit en lien direct avec leurs activités professionnelles. Pour ce faire, l'étude se concentre parmi d'autres variables sur l'abondance et la diversité des vers de terre, mais également sur leur activité de bioturbation au travers du suivi des déjections de surface, les turricules. Ces observations sont ensuite mises en relation avec la qualité structurale des sols et les pratiques culturales.

Ainsi, étudier la biodiversité des vers de terre au travers d'approches participatives permet, grâce à la mise en place d'outils simples, et dans l'idéal standardisés, d'obtenir une grande quantité de données à moindre coût de temps et d'investissement. Ces sciences citoyennes s'adressent au grand public au sens large (les retraités sont particulièrement actifs dans ces réseaux; Aebi, comm. pers.), mais également à des corps de métiers tels que les agriculteurs ou encore des bureaux d'études et des collectivités territoriales. Elles peuvent également servir de base à des projets pédagogiques innovants pour des classes d'élèves voire des enseignements plus poussés dans les Hautes Ecoles et Universités.

2.1.2 Biodiversité et fonctions du sol : l'intérêt des kits pédagogiques

Biodiversité et approche fonctionnelle se réalisent la plupart du temps à l'échelle de l'écosystème, et les vers de terre représentent un excellent indicateur des relations entre le

Figure 3 - Atelier découverte des vers de terre pour les seniors (Université du 3^e âge, Neuchâtel).

Crédit photos: Laure Chappuis Sandoz.

Figure 3 - Workshop on earthworms for seniors (University of the Third Age, Neuchâtel). Photo credit: Laure Chappuis Sandoz.



sol et la végétation en tant qu'ingénieur de l'écosystème. Les formes d'humus sont par ailleurs le reflet de cette approche fonctionnelle, notamment du point de vue de l'intégration et du recyclage de la matière organique, et ce quel que soit le milieu étudié. L'activité des vers de terre et les divers processus et fonctions dans lesquels ils sont impliqués jouent en effet un rôle majeur dans la structure du sol. Cette dernière peut être appréhendée sur le terrain au travers de la forme, de la taille et de la stabilité des agrégats dans l'horizon organo-minéral de surface. Pour ce faire, l'Humus Index est particulièrement adapté aux sols forestiers (Ponge *et al.*, 2002) et met en avant la facilité d'approche de cette zone critique d'échanges d'énergie et de matières, où les vers de terre sont les acteurs privilégiés. La gamme de compétences nécessaires pour ce niveau d'expertise intermédiaire varie grandement selon le degré de précision que l'on souhaite atteindre (*Figure 1*) et c'est la raison pour laquelle l'enseignement est selon toute vraisemblance le meilleur moyen d'aborder ce niveau. En effet, des écoles maternelles à l'Université, l'apprentissage scolaire de la biodiversité des vers de terre peut être adapté à tous les niveaux, depuis le prélèvement et la simple observation de ces animaux à l'utilisation de clés de détermination. Des kits pédagogiques existent sur le sol et ses organismes (FRAPNA, 2009; WWF, 2016; CARABE, 2021) et des clés simplifiées de détermination de vers de terre sont également disponibles en ligne notamment pour la France, le Royaume-Uni et l'Irlande (OPVT, 2021; ESB, 2021). Elles sont tout à fait utilisables pour déterminer facilement les catégories écologiques de vers de terre grâce à des critères simples tels que la couleur, la taille, la position du clitellum, etc. Des ateliers de découverte et d'initiation sont régulièrement organisés dans les écoles, depuis la maternelle au lycée, et peuvent être ainsi directement intégrés au programme d'études en biologie et Sciences de la Vie et de la Terre (du collège au Bachelor/Licence universitaire), notamment lors d'excursions et de travaux pratiques. En Suisse, des formations d'adultes sont également possibles, à la fois pour les enseignants (CRB, 2021) mais également pour les retraités toujours très actifs, notamment au sein de l'Université du 3^e âge (U3a Neuchâtel, *Figure 3*).

2.1.3 Monitoring et taxonomie : une affaire de spécialistes

S'agissant d'études sur le long terme de type monitoring intégrées dans des programmes de recherche fondamentale ou appliquée (*Figure 1*, niveau nécessitant une expertise), un degré de formation d'études supérieures (par exemple, Bachelor/Licence universitaire en 3^e année) est généralement nécessaire à l'identification des vers de terre. Il s'agit en effet non seulement de se former aux clés de détermination usuelles (Bouché 1972; Sims et Gerard, 1999; Csuzdi et Zicsi, 2003; Blakemore, 2008; pour les plus connues en Europe) mais également de maîtriser les outils d'ADN metabarcoding et de

séquençage (Bienert *et al.*, 2012) ou de spectroscopie en moyen infrarouge (MIR; Pham *et al.*, 2021) ainsi que les traitements statistiques correspondants. Les publications scientifiques qui en découlent visent par conséquent un public averti, depuis les bureaux d'études et institutions gouvernementales en charge de suivi d'écosystèmes et de préservation d'habitats jusqu'aux unités de recherche spécialisées dans la taxonomie des vers de terre à l'échelle mondiale et la mise en place de bases de données de références (Cameron *et al.*, 2016; Rutgers *et al.*, 2016; Drilobase, 2021; Csuzdi, 2021; Phillips *et al.*, 2021). À ce jour, 23 familles, près de 400 genres et plus de 5 300 espèces de vers de terre ont été identifiés à l'échelle mondiale (Drilobase, 2021).

En France, un inventaire de la communauté de vers de terre a été réalisé pour la région Bretagne (Programme RMQS BioDiv; Cluzeau *et al.*, 2009) entre 2006 et 2007, et a ensuite été étendu à l'échelle nationale (projet de Réseau de Mesures de la Biodiversité du Sol, RMQS2 2016-2027; Jolivet *et al.*, 2018). En Suisse, une grande campagne a été effectuée entre 1991 et 1994 sur mandat de 9 cantons et de l'Office Fédéral de l'Environnement. Elle a été conduite par des chercheurs expérimentés et s'est limitée à un territoire ciblé, à savoir 91 prairies permanentes du plateau suisse situées entre 400 et 800 m d'altitude (Cuendet *et al.*, 1997). Un total de 23 espèces a été recensé pour une biomasse de vers de terre variant entre 130 et 515 g/m², avec une médiane à 301 g/m². Les résultats obtenus mettent également en avant le fait que les variations sont largement dépendantes du mode d'exploitation des prairies permanentes : la fertilisation par ajout de purin et de lisier augmente systématiquement la biomasse des vers de terre, alors que l'intensité de la pâture n'a aucun effet significatif. Suite à cette étude, le canton de Berne a mis en place en 1998 un réseau de surveillance des communautés de vers de terre au niveau cantonal. D'autres pays, comme les Pays-Bas (Programme BISQ - Biological Indicators of Soil Quality), ont également intégré les vers de terre comme paramètres de surveillance de la qualité de leurs sols (Pulleman *et al.*, 2012). À l'échelle européenne, le projet LUCAS (Land Use and Coverage Area Frame Survey) présente également un volet biologie dont un des axes concerne les vers de terre pour l'année 2018; les données ne sont pas publiées à ce jour (Orgiazzi *et al.*, 2018).

2.2. L'objectif et le public cible déterminent l'outil

Les outils à disposition pour étudier la biodiversité des vers de terre sont variés et dépendent avant tout du but et de la précision de l'approche recherchée (Butt, 2009). Cela implique par conséquent de connaître et de définir explicitement les questions de recherche en amont. D'autres outils complémentaires permettent de faire le lien entre l'activité

biologique des vers de terre, voire des organismes du sol en général, et le fonctionnement de l'écosystème (cf. 2.2.3).

L'étude des vers de terre peut se dérouler par le biais d'études directes (prélèvement d'individus, comptage, pesée, identification) ou indirectes en se focalisant sur certaines traces laissées par les vers de terre (déjections, galeries, ADN). Si les premières donnent une information précise, les traces d'activité de vers de terre restent encore à ce jour délicates du point de vue de leur mise en relation avec les communautés en place. Les études directes sont par conséquent souvent privilégiées. Pour l'étude de la biodiversité globale par le grand public ou les sciences participatives, des techniques simples comme le tri manuel des vers présents dans un cube de sol ou encore l'extraction à la moutarde ou au jus d'oignon sont facilement accessibles et relativement aisées à mettre en œuvre (cf. 2.2.1). Elles permettent d'informer et de sensibiliser le public sur le rôle des communautés de vers de terre dans le fonctionnement de l'écosystème sol. De plus, elles présentent l'avantage de pouvoir relâcher les vers de terre une fois comptés, pesés et rincés à l'eau claire. Les approches ciblant un monitoring ou une identification taxonomique à l'espèce requièrent quant à elles des techniques plus élaborées permettant de garantir une plus grande fiabilité et reproductibilité des résultats (cf. 2.2.2). Dans ce cadre, les méthodes standardisées doivent être privilégiées. Ces techniques nécessitent en revanche le sacrifice des individus collectés pour permettre une détermination ultérieure.

2.2.1 Techniques d'extraction de vers de terre

Les techniques d'extraction de vers de terre sont variées et cela a l'avantage de pouvoir être pratiqué par une gamme d'intervenants relativement vaste tout en assurant une comparaison possible, même si des biais sont inévitables. La première partie du *tableau 1* présente les techniques d'extraction les plus couramment utilisées et citées dans la littérature, une estimation des coûts engendrés (temps, financier) ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients.

Les produits chimiques sont les plus couramment employés, qu'ils soient issus de l'industrie chimique (le formaldéhyde et l'allyl isothiocyanate AITC) ou du commerce (la moutarde, sous forme de condiment ou de farine, le jus d'oignon obtenu par extraction). Le formaldéhyde est toxique et interdit d'usage dans plusieurs pays car cancérigène et mutagène avéré pour l'homme et néfaste pour l'environnement (INRS, 2021). L'AITC est quant à lui potentiellement irritant mais reste une alternative moins toxique que le formaldéhyde (Zaborski, 2003 ; Pelosi *et al.*, 2009). La moutarde ou l'oignon ont démontré leur efficacité (Lawrence et Bowers, 2002 ; Singh *et al.*, 2016, 2018) mais restent plus aléatoires du point de vue de la préparation des solutions de départ (les concentrations en substances irritantes pouvant varier d'une fois à l'autre selon le produit de base utilisé) et rendent ainsi le protocole d'extraction moins rigoureux. De plus, quelle que soit la méthode d'extraction chimique utilisée,

le facteur limitant le plus contraignant reste la nécessité d'avoir à proximité un point d'eau ; en effet, sur une surface d'un mètre carré, pas moins de 30 litres d'eau sont déversés, sans tenir compte du rinçage de la surface. Outre cette contrainte, une forte teneur en argile, un sol compacté, un terrain en pente ou encore le fait de travailler dans une réserve naturelle ne permettent pas toujours d'utiliser ces méthodes. Par conséquent, selon le site d'étude, il est nécessaire d'adapter la méthode. En zone alluviale par exemple, la méthode de la moutarde est particulièrement efficace au regard de la texture particulièrement sableuse et limoneuse (Bullinger *et al.*, 2012), alors qu'en sols urbains, l'AITC ou la méthode électrique sont à privilégier et montrent des résultats similaires (Pelosi *et al.*, 2009).

Le tri manuel est souvent réalisé conjointement avec l'extraction chimique, avant ou après application du produit sur la surface (Andriuzzi *et al.*, 2017). Il permet notamment de récupérer des individus (la plupart du temps des endogés) qui restent souvent piégés dans le réseau racinaire des plantes, assurant ainsi une extraction la plus exhaustive possible. Des tests sur plusieurs parcelles agricoles ont permis de prouver l'efficacité de la combinaison oignon + tri manuel au détriment du tri manuel seul ou de l'oignon seul (Fischer, 2021 ; données non publiées). Le tri manuel est toutefois la seule alternative possible dans des milieux dépourvus de points d'eau proches, dans des milieux difficilement accessibles, très en pente et peu propices à l'utilisation de solutions liquides comme c'est le cas en haute montagne (Tatti, 2016).

L'extraction des vers de terre grâce aux vibrations (Catania, 2008) ou par électrisation (Schmidt, 2001 ; Pelosi *et al.*, 2009) est également utilisée. L'avantage est que ces systèmes perturbent très peu le milieu environnant et sont donc tout à fait pertinents dans des milieux sensibles tels que les réserves naturelles. Un inconvénient majeur toutefois est le coût d'achat de l'appareil au départ, ou de sa construction (environ 3 000,00 € pour un extracteur électrique), et son inefficacité lorsque le sol est trop sec (Eisenhauer *et al.*, 2008). De plus, l'utilisation d'électricité nécessite une certaine protection pour éviter tout risque d'électrocution car l'ampérage est très élevé (bottes en caoutchouc, éviter de faire de grandes enjambées). L'appareil Kempton (Coja *et al.*, 2008), qui est proche d'un extracteur Berlese, est quant à lui efficace pour extraire les vers de terre mais il nécessite de prélever une colonne de sol dans le milieu (souvent 25 cm de côté, jusque 50 cm de profond), ce qui n'est pas toujours envisageable.

2.2.2 Quelles variables pour quelles réponses ?

L'abondance et la biomasse des vers de terre sont les deux variables les plus simples à mesurer sur le terrain et sont donc couramment utilisées dans la plupart des projets de sciences participatives. Un autre paramètre à prendre en compte lors des prélèvements est la proportion de vers de terre juvéniles que l'on peut facilement reconnaître à l'œil nu par l'absence de clitellum.

En effet, les juvéniles présentent des comportements différents de ceux qu'ils adoptent au stade adulte. Par exemple, un juvénile de *Lumbricus terrestris* a un comportement épigé alors qu'adulte, il a tendance à vivre en quasi-permanence dans sa galerie en U (Lee, 1985 ; Edwards et Bohlen, 1996).

Essentielle à connaître pour mieux comprendre non seulement un état ponctuel mais également l'évolution de la composition des communautés, la diversité spécifique apporte également des informations cruciales du point de vue du fonctionnement du sol. En effet, certaines espèces de vers de terre sont reconnues pour jouer des rôles particuliers ou tolérer des conditions environnementales spécifiques (Lee, 1985 ; Edwards et Bohlen, 1996). Ainsi, l'espèce *Lumbricus rubellus* est connue pour être pionnière dans des milieux souvent perturbés (Zorn et al., 2005 ; Bullinger et al., 2012). Des espèces peuvent aussi caractériser des conditions édaphiques particulières telles que le degré d'humidité du sol : selon Bouché (1972), *Octolasion cyaneum* est une espèce typique des sols humides, tandis qu'*Allolobophora cupulifera* et *Aporrectodea longa ripicola* affectionnent les milieux ripicoles et sont toutes deux qualifiées d'espèces hygrophiles. L'espèce *Allolobophora chlorotica* est connue pour accentuer la densité du sol, jouant ainsi un rôle non négligeable sur la structure et la porosité (Milleret et al., 2009 ; Kohler-Milleret et al., 2013).

Il est donc essentiel dans le contexte d'une recherche fondamentale de pouvoir déterminer les individus au minimum au niveau de la catégorie écologique, au moins dominante si on se réfère aux récents travaux de Bottinelli et al. (2020), voire à l'espèce, certaines techniques le permettant à la fois sur des adultes et des juvéniles (Tableau 1, seconde partie). Toutefois, elles engendrent la plupart du temps le sacrifice des organismes étudiés et leur conservation pose également question pour la préservation sur le long terme d'espèces types qui puissent servir de référence pour des études futures (Sherlock, 2018).

L'utilisation de clés basées sur des critères morphologiques est une des méthodes d'identification les plus courantes et permet de valider celles plus récentes impliquant par exemple des outils moléculaires. Peu coûteuses, elles sont sujettes parfois à des erreurs ou des imprécisions, voire à l'impossibilité d'identifier l'espèce pour les individus juvéniles. Les méthodes d'identification les plus onéreuses sont celles utilisant l'imagerie numérique, la microtomographie, la spectroscopie MIR et les analyses ADN (tissus de ver de terre ou échantillons de sol). Ces deux dernières sont complémentaires car elles permettent de prendre en compte les effets de l'habitat « sol » sur la composition biogéochimique des vers de terre en plus de l'identification de l'appartenance à une espèce (Pham et al., 2021). En contrepartie de leur coût, elles apportent une précision sur les mesures et éliminent quasiment tout risque d'erreur. Réservées à un public d'initiés, ces techniques de pointe offrent une grande qualité de résultats et permettent aux spécialistes du domaine de progresser dans l'étude des vers de terre, de la

communauté à la diversité spécifique en passant par l'activité de bioturbation (cf. 2.2.3.2).

2.2.3 L'activité biologique : le lien entre communautés de vers de terre et fonctions du sol

Etudier l'activité des organismes est un moyen d'aborder le fonctionnement d'un écosystème et en particulier les fonctions du sol. La gamme des outils à disposition est relativement large, les techniques les plus couramment utilisées sont présentées dans le Tableau 2 avec les coûts estimés ainsi que leurs avantages et inconvénients. Vis-à-vis des vers de terre, ce sont des études essentiellement indirectes au travers des traces laissées par ces animaux (déjections, galeries, ADN) ou alors des méthodes en lien avec la mesure de la dégradation de la matière organique (Bait lamina, sachets de litière, cottons trip, etc.) impliquant également d'autres organismes vivants.

2.2.3.1 Sur le terrain

Les structures biogéniques fabriquées par les vers de terre sont facilement reconnaissables au champ et constituent par conséquent un moyen usuel de mettre en évidence l'activité des vers de terre. Dans le cadre du projet Terres Vivantes (TerresVivantes, 2021), le comptage et la pesée des turricules ont été testés et il est rapidement apparu que la distinction d'un turricule parmi un amoncellement de déjections était source de subjectivité (Figure 4). De plus, les vers de terre anéciques fabriquent leurs turricules en plusieurs étapes, parfois sur plusieurs jours et en modifiant par leurs passages successifs tout ou partie de la déjection précédemment émise ; il est donc délicat d'individualiser chaque turricule. Pour éviter toute confusion, la masse des turricules doit être le critère à privilégier dans ce cas de figure. Outre l'activité de surface, il est également envisageable d'observer voire de quantifier la formation de galeries de vers de terre *in situ*. Au travers du test à la bêche qui permet d'évaluer la structure d'un sol (Ball et al., 2007 ; Guimarães et al., 2011), une étude dans la motte du réseau de galeries (nombre de galeries, longueur, diamètre, etc. ; Figure 4) ou encore des déjections peut être intéressante mais elle reste informative car les techniques d'imagerie par tomographie à rayons X permettent un degré de précision plus poussé. Ces dernières peuvent être pratiquées sur des colonnes de sols non remaniées prélevées au champ et analysées au laboratoire (cf. 2.2.3.2).

En complément de ces approches ciblées sur les vers de terre, des mesures plus générales de l'activité biologique sont disponibles, comme celles permettant par exemple la mesure (directe ou indirecte) de la dégradation de la matière organique. Le test du Bait lamina (von Törne, 1990 ; Kratz, 1998 ; Beyaert et Fox, 2006 ; Römbke, 2014 ; ISO, 2016 ; Figure 5) permet d'étudier l'activité alimentaire des organismes édaphiques *in situ*, en particulier mais pas exclusivement celle de la méso- et macrofaune comme les vers de terre. Des bandelettes de

Tableau 1 - Synthèse des techniques les plus courantes utilisées dans le prélèvement et l'identification des vers de terre. Les coûts présentés ne concernent que les consommables usuels, sans prise en compte de l'achat d'équipement.

Table 1 - Summary of the most common techniques used in the collection and identification of earthworms. The costs presented concern only the usual consumables, without considering the purchase of equipment.

Technique	Méthode usuelle	Coût estimé par échantillon	Avantages	Inconvénients	Références présentant et/ou comparant les techniques
EXTRACTION					
Vibrations	Bois dans le sol frotté par une plaque de métal	Préparation : 5 min/m ² <i>In situ</i> : 15 min/m ² Finance : 0 € /m ²	Rapide, peu coûteux	Difficile de standardiser la méthode	Catania (2008)
Moutarde	Condiment ou farine à diluer dans de l'eau	Préparation : 5 min/m ² <i>In situ</i> : 45 min/m ² Finance : 0,20 € /m ²	Peu coûteux Achat accessible à tous Possibilité de relâcher les vers de terre après extraction	Difficile de standardiser la méthode selon l'origine du produit	Gunn (1992) Lawrence et Bowers (2002) Starking et Roloff (2019)
Oignon	Jus d'oignon dilué dans de l'eau	Préparation : 15 min/m ² <i>In situ</i> : 45 min/m ² Finance : 0,20 € /m ²	Peu coûteux Achat accessible à tous Possibilité de relâcher les vers de terre après extraction	Difficile de standardiser la méthode selon l'origine du produit Coûteux en temps de préparation pour extraire le jus d'oignon	Singh <i>et al.</i> (2016, 2018)
AITC allyl isothiocyanate	Concentration comprise entre 0,25 et 4 mM	Préparation : 10 min/m ² <i>In situ</i> : 45 min/m ² Finance : 0,10 € /m ²	Méthode standardisée	Potentiellement toxique pour l'environnement, effet à étudier. Irritant pour l'homme	Zaborski (2003) Pelosi <i>et al.</i> (2009) ISO (2018)
Formal-déhyde	Solution diluée entre 0,25 % et 1,6 %	Préparation : 5 min/m ² <i>In situ</i> : 45 min/m ² Finance : 0,20 € /m ²	Peu coûteux	Toxique, cancérigène Atteinte à la santé des vers de terre : impossible de les relâcher	Bouché et Aliaga (1986) ISO (2004)
Tri manuel	Cube de sol extrait à la bêche (30 x 30 x 30 cm)	Préparation : 5 min/m ² <i>In situ</i> : 10 min/m ² Finance : 0 € /m ²	Peu coûteux	Nécessite de pouvoir extraire un cube de sol : pas toujours possible selon les milieux (accès, réserve naturelle, etc.) Sous-estime les anéciques	Bouché et Aliaga (1986)
Électricité	Courant : 2 A, 250 V jusque 7,5 A, 600V	Préparation : 10 min/m ² <i>In situ</i> : 30-40 min/m ² Finance : 2 € /m ²	Peu coûteux Perturbe très peu le milieu	Sous-estime les espèces endogées Dangerosité de la technique selon l'humidité du milieu Nécessite des conditions d'humidité minimales Investissement coûteux au départ	Schmidt (2001) Pelosi <i>et al.</i> (2009)
Chaleur et lumière	Kempson, type extraction Berlese Extraction d'un monolithe de sol (50 x 25 x 25 cm)	Préparation : 5 min <i>In situ</i> : 10 min Finance : 1 € /échantillon	Peu coûteux	Perturbe le milieu Impossible à appliquer dans les environnements protégés Investissement coûteux au départ pour l'extracteur Kempson	Coja <i>et al.</i> (2008)

Tableau 1 (suite) - Synthèse des techniques les plus courantes utilisées dans le prélèvement et l'identification des vers de terre. Les coûts présentés ne concernent que les consommables usuels, sans prise en compte de l'achat d'équipement.

Table 1 - Summary of the most common techniques used in the collection and identification of earthworms. The costs presented concern only the usual consumables, without considering the purchase of equipment.

Technique	Méthode usuelle	Coût estimé par échantillon	Avantages	Inconvénients	Références présentant et/ou comparant les techniques
IDENTIFICATION					
Clés d'identification taxonomique	Identification grâce à des critères morphologiques	Préparation : 2 min/ind Finance : dépend de l'expérience du taxonomiste	Permet de mesurer des traits individuels (longueur, masse, diamètre, etc.)	Long et nécessite une formation préalable Difficulté voire impossibilité d'identifier les juvéniles	Bouché (1972) Sims et Gerard (1999) Csuzdi et Zicsi (2003) Blakemore (2008)
Spectroscopie MIR et NIRS	Analyse sur des vers de terre (MIR) ou sur des structure biogéniques (NIRS)	Préparation : 5 min/ind <i>In situ</i> : 10 min/m Finance : 5 à 10 €/échantillon selon la technique	Rapide Complémentaire aux outils moléculaires La spectroscopie MIR apporte une plus-value sur l'écologie	Difficile à utiliser dans certains contextes Nécessite une expertise pointue dans les analyses de données	Pham <i>et al.</i> (2021) Bottinelli <i>et al.</i> (2013) Zangerlé <i>et al.</i> (2014, 2016) Dominguez-Haydar <i>et al.</i> (2020)
Reconnaissance par imagerie	Identification basée sur l'imagerie numérique	Préparation : 5 min/ind <i>In situ</i> : 10 min/m Finance : 1 €/échantillon	Peu coûteux Rapide Permet de préserver les organismes vivants	Nécessite une expertise pointue dans les analyses de données et l'utilisation du modèle	Anleeb <i>et al.</i> (2021)
	Microtomographie sur spécimens de collection colorés à l'I ₂ K	Préparation : 5 min/ind <i>In situ</i> : - Finance : 20 €/échantillon	Excellente résolution (2D, 3D) Possibilité de voir les organes internes sans dissection	Cher Nécessite une expertise pointue dans les analyses de données Les animaux sont sacrifiés	Fernandez <i>et al.</i> (2014)
DNA barcoding	Analyses sur des vers de terre (ADNmt 16S, 18S et COI) ou sur des échantillons de sol (ADN environnemental)	Préparation : 10 min/échantillon <i>In situ</i> : 20-40 min/m ² selon la technique d'extraction Finance : 25 €/échantillon	Rapide Demande peu d'expertise de terrain	Cher Nécessite une expertise pointue dans les analyses et le traitement du séquençage Les animaux sont sacrifiés	Pop <i>et al.</i> (2003, 2007) Chang et James (2011) Bienert <i>et al.</i> (2012) Jackson <i>et al.</i> (2017)

PVC perforées contenant un appât sont placées dans le sol : plus les organismes sont actifs et nombreux, plus l'activité de nutrition est élevée. Les sachets de litière (Beyaert et Fox, 2006), de thé (Keuskamp *et al.*, 2013) ou encore les bandes de coton (cotton strips; Latter *et al.*, 1988; Colas *et al.*, 2019; Sanyal *et al.*, 2020) représentent également des moyens relativement simples d'aborder la décomposition de la matière organique mais n'impliquent pas uniquement les vers de terre (Figure 5).

Au laboratoire

L'étude de colonnes de sol reconstituées (Kohler-Milleret *et al.*, 2013; Amossé *et al.*, 2015; Schomburg *et al.*, 2019) ou prélevées *in situ* (Lienur *et al.*, 2017) apporte des informations précises sur l'activité de bioturbation des vers de terre. Les galeries et les déjections peuvent être ainsi analysées grâce à des outils puissants d'imagerie tels que la tomographie à rayons X (Capowiez *et al.*, 1998, 2011, 2021; Amossé *et al.*, 2015;

Tableau 2 - Synthèse des techniques les plus courantes utilisées pour étudier l'activité biologique des sols.**Table 2** - Summary of the most common techniques used to study soil biological activity.

Technique	Méthode usuelle	Coût estimé par échantillon	Avantages	Inconvénients	Références présentant et/ou comparant les techniques
Turricules	Comptage Pesée	Préparation : 0 min/m ² <i>In situ</i> : 10 min/m ² Finance : 0 € /m ²	Rapide et facile à mettre en place	Activité corrélée à la pluviométrie Parfois difficile de distinguer les anciens turricules	Binet et Le Bayon (1999) Le Bayon <i>et al.</i> (2002)
	Stabilité structurale	Préparation : 10 min Protocole : 2-5 min Finance : 2 € /échantillon	Permet de lier activité lombricienne et propriété du sol Méthode standardisée	Investissement coûteux au départ pour l'appareil	Schomburg <i>et al.</i> (2019)
	Rock Eval	Préparation : 10 min Protocole : 15 min/échantillon Finance : 20 € /échantillon	Permet de discriminer l'origine des agrégats Important en recherche fondamentale Méthode standardisée	Nécessite une expertise et l'accès à l'appareil	Sebag <i>et al.</i> (2006) Schomburg <i>et al.</i> (2018)
Bait lamina	Activité alimentaire par comptage du nombre d'appâts consommés	Préparation : 10 min/bandelette <i>In situ</i> : 10 min/m ² Finance: 3 € / bandelette	Peu coûteux Méthode standardisée Méthode fonctionnelle (proxy pour la dégradation de la matière organique) Réponse rapide (10 à 14 jours en milieu tempéré) Simple à appliquer et à interpréter	Nécessite un matériel de base spécifique Doit rester en place plusieurs jours Implique de ne pas perturber le milieu pendant plusieurs jours	von Törne (1990) Kratz (1998) Römbke (2014) ISO (2016)
Sachets de litière	Différence de biomasse	Préparation : 30 min/m ² <i>In situ</i> : 15 min/m ² Finance : 5 € /m ² (selon la taille du maillage)	Peu coûteux Facile d'analyse Représentatif de la litière en place, proche de la réalité de terrain	Long à préparer Risque de perte de matériel lors du transport Doit rester en place plusieurs jours Implique de ne pas perturber le milieu pendant plusieurs jours	Karberg <i>et al.</i> (2008)
Sachets de thé	Différence de biomasse	Préparation : 0 min/m ² <i>In situ</i> : 10 min/m ² Finance : 1 € /m ²	Peu coûteux Facile d'analyse	Peu représentatif de la réalité de terrain car très appétant pour les organismes Doit rester en place plusieurs jours Implique de ne pas perturber le milieu pendant plusieurs jours	Keuskamp <i>et al.</i> (2013)
Cotton strip	Résistance à la traction	Préparation : 15 min/m ² <i>In situ</i> : 10 min/m ² Test de résistance : 10-15 min/échantillon Finance : 5 € /m ²	Méthode standardisée Facile d'emploi	Nécessite une expertise et l'accès à l'appareil de test de résistance Peu représentatif de la réalité de terrain car très appétant pour les organismes Doit rester en place plusieurs jours Implique de ne pas perturber le milieu pendant plusieurs jours	Latter <i>et al.</i> (1988) Colas <i>et al.</i> (2019) Sanyal <i>et al.</i> (2020)

Tableau 2 (Suite) - Synthèse des techniques les plus courantes utilisées pour étudier l'activité biologique des sols.**Table 2** - Summary of the most common techniques used to study soil biological activity.

Technique	Méthode usuelle	Coût estimé par échantillon	Avantages	Inconvénients	Références présentant et/ou comparant les techniques
Tomographie CT	Analyse d'images sur échantillons non remaniés <i>in situ</i> ou en microcosmes	Préparation et prélèvement : 15-30 min selon la méthode de prélèvement <i>In situ</i> : 30 min/m ² Au laboratoire : 15 min/colonne Analyse : variable selon la précision souhaitée Finance : 40-80 € / échantillon selon la précision souhaitée	Méthode standardisée Précision et résolution optimales Reconstitution de réseau de galeries, calculs par analyse d'image Analyses d'agrégats de tailles variables	Coûteux Nécessite une expertise et l'accès à l'appareil	Capowiez <i>et al.</i> (1998, 2011, 2021) Amossé <i>et al.</i> (2015) Lienur <i>et al.</i> (2017) Schomburg <i>et al.</i> (2019) Le Bayon <i>et al.</i> (2020)

Figure 4 - Dans une pelouse urbaine (haut, gauche), en prairie temporaire (haut, droite) ou en forêt (bas, gauche), il est difficile d'individualiser les déjections produites par les vers de terre. Les galeries d'anéciques (bas, droite) sont faciles à identifier ; en haut de la photo à gauche, on aperçoit un cocon de ver de terre. Crédit photos: Claire Le Bayon et Valentine Gerber.

Figure 4 - In an urban lawn (top left), in temporary grassland (top right) or in a forest (bottom left), it is difficult to identify the droppings produced by earthworms. The galleries of anecdotics (bottom right) are easy to identify; at the top of the photo on the left, an earthworm cocoon can be seen. Photo credit: Claire Le Bayon and Valentine Gerber.



Lienur *et al.*, 2017 ; Schomburg *et al.*, 2019). Il est alors possible de reconstituer le réseau 3D de galeries de vers de terre, d'étudier l'architecture de ces réseaux mais aussi d'évaluer leur connectivité et la porosité de l'échantillon. Par cette technique d'imagerie, il est également possible de suivre l'évolution des galeries dans le temps au sein d'un même échantillon de sol (4D

monitoring). La *figure 6* montre bien par exemple la différence de comportement des vers de terre endogés *Allolobophora chlorotica* et *Aporrectodea rosea*, par rapport à la colonne témoin sans vers de terre.

De récentes recherches apportent des compléments sur l'activité des vers de terre et notamment leur rôle

Figure 5 - Quelques techniques pour étudier l'activité biologique. De gauche à droite : Bait lamina, sachets à litière de différents maillages (de 1 à 4 mm, parfois combinés comme ici), sachet de thé.

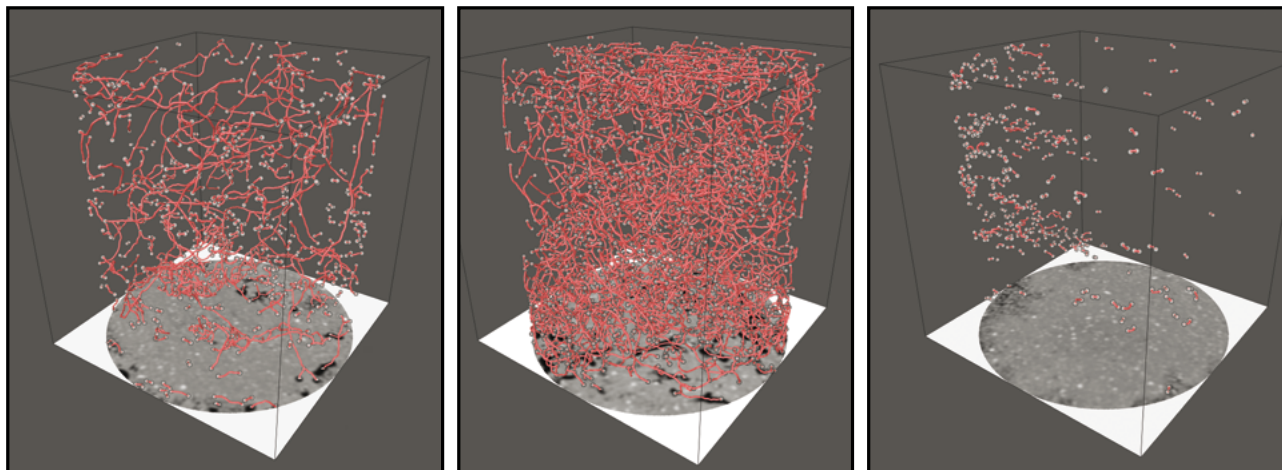
Crédit photos : Sophie Campiche, Valentine Gerber et Claire Le Bayon.

Figure 5 - Some techniques for studying biological activity. From left to right : Bait lamina, litter bags of different mesh sizes (from 1 to 4 mm, sometimes combined like here), tea bag. Photo credits : Sophie Campiche, Valentine Gerber and Claire Le Bayon.



Figure 6 - Images 3D de colonnes de sol urbain reconstituées, avec vers de terre (gauche : *Aporrectodea rosea*, centre : *Allolobophora chlorotica* ; 3 individus de chaque espèce par colonne de sol, 5 répliques, 3 mois d'incubation), ou sans ver de terre (droite). Sur ces reconstructions 3D, les galeries des vers de terre sont représentées par des tubes (squelettisation) pour mieux les visualiser et les caractériser. Crédit photos : Pascal Turberg.

Figure 6 - 3D images of reconstructed urban soil columns with earthworms (left: *Aporrectodea rosea*, centre: *Allolobophora chlorotica*; three individuals per soil column for each species, 5 replicates, 3 months of incubation), or without earthworms (right). On these 3D reconstructions, the earthworm galleries are represented by tubes (skeletonisation) to better visualise and characterise them. Photo credit: Pascal Turberg.



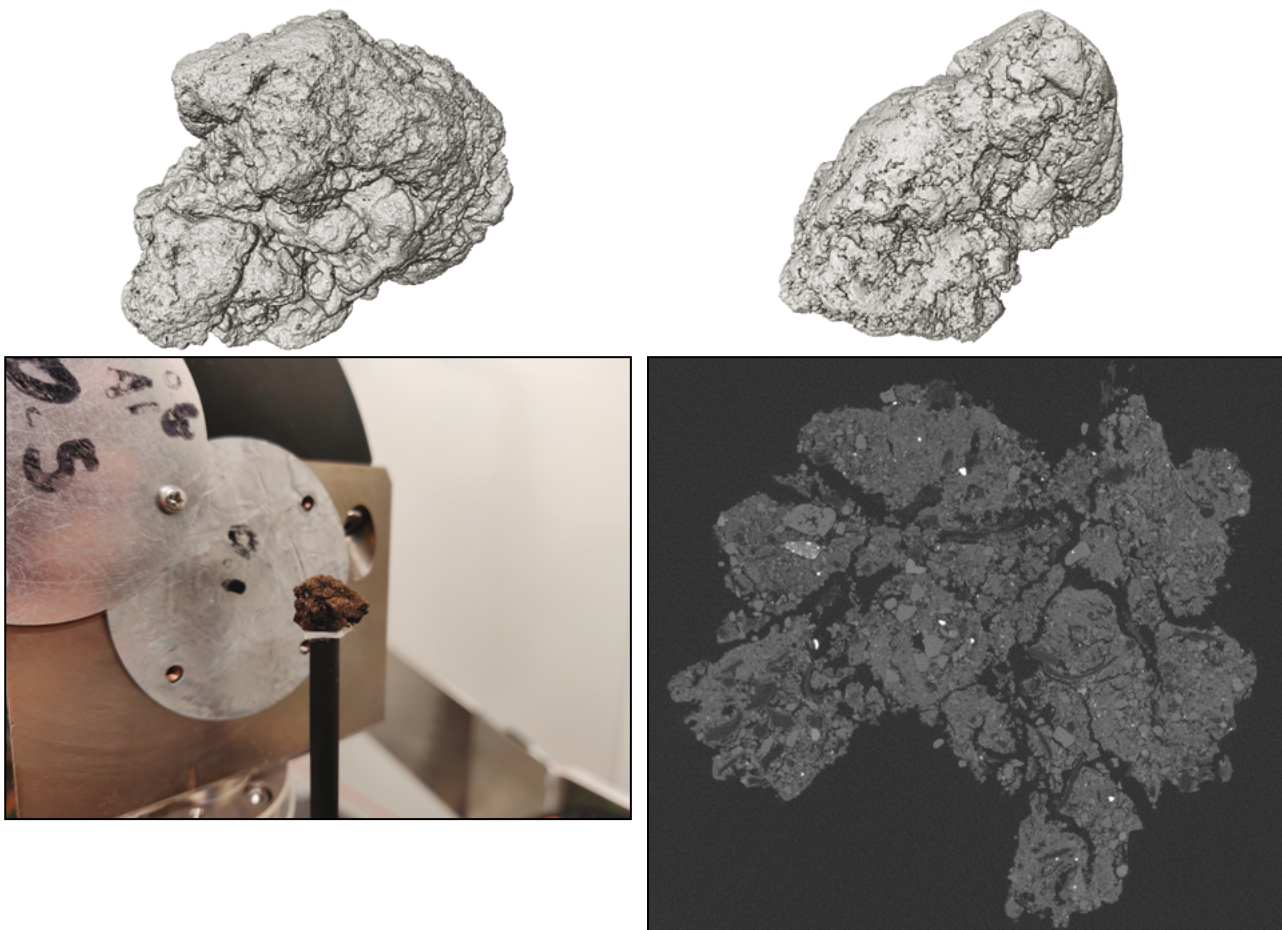
d'intégration de la matière organique à la matrice minérale. Elles permettent de discriminer visuellement et par analyse d'image les agrégats fabriqués par des vers de terre des agrégats contrôles (Figure 7). Il est clairement visible que le turricule de *Lumbricus terrestris* présente un aspect plus arrondi et modelé que l'agrégat de sol qui n'est pas passé dans le tractus digestif d'un ver de terre. Il est également possible par ces techniques d'imagerie d'analyser la composition des agrégats, par exemple leurs proportions en grains minéraux, en pores, en matière organique et en matrice fine (Le Bayon et al., 2020). Ces résultats préliminaires sont encourageants et laissent présager un bel avenir à ces techniques d'imagerie non invasives à haute résolution.

De plus, l'identification de l'origine des agrégats est rendue possible grâce à la pyrolyse Rock Eval (Sebag et

al., 2006) qui indique clairement que la nature chimique des matières organiques contenues dans les agrégats diffère selon qu'elles soient d'origine racinaire (majoritairement des exsudats) ou issues des vers de terre (principalement le mucus ; Schomburg et al., 2018). La spectroscopie NIRS permet également de discriminer dans certains cas les galeries fabriquées par des vers de terre (Zangerlé et al., 2016) ou d'estimer l'âge des déjections (Zangerlé et al., 2014). Toutefois, les résultats dépendent du contexte et nécessitent des investigations plus poussées (Bottinelli et al., 2013 ; Dominguez-Haydar et al., 2020). C'est le cas notamment dans les sols très riches en carbonates qui brouillent le signal et engendrent un bruit de fond trop conséquent (Shomburg, données non publiées).

Figure 7 - Haut : Représentation en volume par X-ray CT à haute résolution d'un turricule de ver de terre *Lumbricus terrestris* (gauche) et d'un agrégat de sol (droite). Bas : Un agrégat biomacrostructuré (> 4 mm) issu d'un horizon A en cours de mesure par microtomographie (gauche) et l'image de sa structure interne en coupe 2D transversale (droite). Crédit photos: Pascal Turberg.

Figure 7 - Top: High resolution X-ray CT volume representation of an earthworm *Lumbricus terrestris* surface-cast (left) and a soil aggregate (right). Bottom: A biomacrostructured aggregate (> 4 mm) from an A horizon being measured by microtomography (left) and the image of its internal structure in 2D transverse section (right). Photo credit: Pascal Turberg.



2.2.4 L'approche par les traits fonctionnels

Depuis plusieurs années, la recherche s'intéresse aux « traits fonctionnels » des organismes du sol. Il s'agit des caractéristiques morphologiques, biochimiques, physiologiques, structurelles, phénologiques ou comportementales qui influencent non seulement la performance d'un individu (« fitness ») mais permettent d'étudier son impact et sa réponse à différents filtres environnementaux (Violle *et al.*, 2007; Pey *et al.*, 2014). L'approche par traits permet ainsi de se focaliser sur les fonctions assurées par les organismes et apporte une meilleure compréhension que les seules densité et diversité des communautés (Hedde *et al.*, 2012). La standardisation des méthodes de mesure des traits fonctionnels est à ce stade un enjeu majeur (Moretti *et al.*, 2017) pour assurer une bonne résolution des traits et la prise en compte de la complexité des interactions trophiques, en particulier lorsque l'on s'intéresse aux rôles des invertébrés dans le recyclage des nutriments à l'échelle de l'écosystème (McCary et Schmitz, 2021). La collecte et l'établissement de bases de données sont des étapes essentielles dans ce processus, à l'image du projet Biological and Ecological Traits for Soil Invertebrates (BETSI, 2022).

S'agissant des vers de terre, quelques bases de données sur les traits existent (BETSI, Drilobase, EOL; Cameron *et al.*, 2016). La base EGrowth (Mathieu, 2018; Egrowth, 2022) rassemble exclusivement des données sur la variabilité intraspécifique de la croissance corporelle des vers de terre en fonction des conditions environnementales. Selon Mathieu (2018), ce trait est essentiel dans l'élaboration de modèles sur l'écologie des vers de terre. De plus en plus d'études s'intéressent à ces interrelations entre traits, fonctions du sol et services écosystémiques (Andriuzzi *et al.*, 2016; Marichal *et al.*, 2017). Aborder le rôle des vers de terre dans le fonctionnement des écosystèmes au travers d'approches ciblées sur les traits fonctionnels est assurément une perspective d'avenir.

3. CONCLUSION

L'étude de la biodiversité du sol au travers des communautés de vers de terre couplée à leurs activités de bioturbation permet de répondre à différents objectifs en intégrant plusieurs niveaux, depuis les sciences participatives impliquant le grand public jusqu'à la recherche fondamentale visant à mieux comprendre *in fine* les processus de pédogenèse ou encore à incrémenter les connaissances sur la taxonomie des vers de terre. La complémentarité des outils, depuis la collecte des animaux jusqu'aux analyses moléculaires et aux traits fonctionnels, offre un large éventail qui ouvre des possibilités de combiner des études de terrain et en laboratoire permettant ainsi une meilleure appréhension du rôle des vers de terre sur les fonctions du sol et à l'échelle des écosystèmes. Incrémenter le savoir sur ces invertébrés, que ce soit leur diversité, leur abondance,

leur activité en tant qu'ingénieurs du sol, mais également les interactions engendrées avec d'autres organismes du sol est fondamental pour mieux valoriser leur implication indéniable dans les services écosystémiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont très reconnaissants aux étudiants et collaborateurs qui ont participé à la valorisation de ce travail au travers de leur expérience de terrain ainsi que des tests réalisés en mésocosmes et *in situ*, en particulier: Dylan Tatti, Sarah Frey, Andreas Schomburg, Simon Tresch, Joël Amossé, Alyssa Fischer, Franziska Fischer, Sandrine Fattore, Séverine Didier, Nathalie Moreira et Coraline Sahin. Les auteurs remercient chaleureusement le Fonds National suisse de la Recherche Scientifique d'avoir financé les projets de recherche FloodSTRESS (SNF n°315230_153460), FloodSTRUBIO (SNF n°3100A0-116825) et Sinergia BetterGardens (CRSII1_154416). Ils remercient également l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) pour le financement du projet Bioindication in Urban Soils (BUS) et l'Office Fédéral de l'Agriculture (OFAG) pour leur contribution financière au projet Terres Vivantes. Les auteurs remercient également les relecteurs de cet article pour leurs commentaires et leurs suggestions d'amélioration.

BIBLIOGRAPHIE

- Amossé J., Turberg P., Kohler R., Gobat J.M., Le Bayon R.C. - 2015 - Effects of endogeic earthworms on the soil organic matter dynamics and the soil structure in urban and alluvial soil materials. *Geoderma*, 243-244, pp. 50-57.
- Andriuzzi W.S., Pulleman M.M., Cluzeau E.D., Pérès G., 2017 - Comparison of two widely used sampling methods in assessing earthworm community responses to agricultural intensification. *App. Soil Ecol.* 119, pp. 145-151.
- Andriuzzi W.S., Schmidt O., Brussaard L., Faber J.H., Bolger T., 2016 - Earthworm functional traits and interspecific interactions affect plant nitrogen acquisition and primary production. *App. Soil Ecol.*, 104, pp. 148-156.
- Andleeb S., Abbasi W.A., Mustafa R.J., Islam G.U., Naseer A., Shafique I., Parween A., Shaheen B., Shafiq M., Altaf M., Abbas S.A., 2021 - ESIDE: A computationally intelligent method to identify earthworm species (*E. fetida*) from digital images: Application in taxonomy. *PlosOne*, 16, e0255674.
- Ball B.C., Batey T., Munkholm L.J., 2007 - Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerkamp test. *Soil Use Manag.*, 23, pp. 329-337.
- Beyaert R.P., Fox C.A., 2006 - Assessment of soil biological activity. In Carter M.R. et Gregorich E.G., eds.) - *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd Edition, CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA, Chapter 40, pp. 527-547.
- Biernert F., De Danieli S., Miquel C., Coissac E., Poillot, C., Brun J.-J., Taberlet P., 2012 - Tracking earthworm communities from soil DNA. *Mol. Ecol.*, 21, pp. 2017-2030.
- Binet F., Le Bayon R.C., 1999 - Space-time dynamics in situ of earthworm casts under temperate cultivated soils. *Soil Biol. Biochem.*, 31, pp. 85-93.

- Blakemore R.J., 2008 - An updated list of valid, invalid and synonym names of Criodriodea (Criodrilidae) and Lumbricoidea (Annelida: Oligochaeta: Sparganophilidae, Ailoscolecidae, Hormogastridae, Lumbricidae, and Lutodrilidae).
- Blouin M., Hodson M.E., Delgado E.A., Baker G., Brussaard L., Butt K. R., Dai J., Dendooven L., Peres J., Tondoh E., Cluzeau D., Brun J.-J., 2013 - A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *Eur. J. Soil Sci.*, 64, pp. 161-182.
- Bottinelli N., Hedde M., Jouquet P., Capowiez Y., 2020 - An explicit definition of earthworm ecological categories – Marcel Bouché's triangle revisited. *Geoderma*, 372, 114361.
- Bottinelli N., Capowiez Y., Hallaire V., Rangera J., Jouquet P., 2013 - Inability of Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) to identify belowground earthworm casts in no-tillage soil. *App. Soil Ecol.*, 70, pp. 57-61.
- Bouché M.B., 1972 - Lombriciens de France - écologie et systématique. Institut national de la recherche agronomique, France, 671 p.
- Bouché M.B., Aliaga R., 1986 - Contre une dégradation physique et chimique des sols et pour leur optimisation économique, l'échantillonnage des lombriciens: une urgente nécessité. *La Défense des Végétaux*, 242, pp. 30-36.
- Bouché M.B., Gardner, R.H., 1984 - Earthworm functions. VII. Population estimation techniques, *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol*, 21, pp. 37-63.
- Bullinger-Weber G., Guenat C., Salomé C., Gobat J.M., Le Bayon R.C., 2012 - Impact of flood deposits on earthworm communities in alder forests from a subalpine floodplain (Kandersteg, Switzerland). *Eur. J. Soil Biol*, 49, pp. 5-11.
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R., Flessens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J.W., Brussaard L., 2018 - Soil quality - A critical review. *Soil Biol. Biochem.*, 120, pp. 105-125.
- Butt K.R., 2009 - Collection and rearing of earthworms. Workshop Kommission III der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft « Experimenting with Earthworms ». Veranstalter: Kommission III der DBG. https://clok.uclan.ac.uk/1533/1/Butt_TrierDBG_2009b.pdf
- Cameron E.K., Decaëns T., Lapiéd E., Porco D., Eisenhauer N., 2016 - Earthworm databases and ecological theory: Synthesis of current initiatives and main research directions. *Appl. Soil Ecol.*, 104, pp. 85-90.
- Capowiez Y., Gilbert F., Vallat A., Poggiale J.-C., Bonzom J.-M., 2021 - Depth distribution of soil organic matter and burrowing activity of earthworms—mesocosm study using X-ray tomography and luminophores. *Biol. Fert. Soils*, 57, pp. 337-346.
- Capowiez Y., Pierret A., Daniel O., Monestiez P., Kretschmar A., 1998 - 3D skeleton reconstructions of natural earthworm burrow systems using CAT scan images of soil cores. *Biol. Fert. Soils*, 27, pp. 51-59.
- Capowiez Y., Sammartino S., Miche, E., 2011 - Using X-ray tomography to quantify earthworm bioturbation non-destructively in repacked soil cores. *Geoderma* 162, pp. 124-131.
- Catania K.C., 2008 - Worm grunting, fiddling, and sharming - humans unknowingly mimic a predator to harvest bait. *PlosOne*, 3, e3472.
- Chang C.H., James S., 2011 - A critique of earthworm molecular phylogenetics. *Pedobiol.*, 54S, pp. S3-S9.
- Cluzeau D., Pérès G., Guernion M., Chaussod R., Cortet J., Fargette M., Martin-Laurent F., Matelle T., Pernin C., Ponge J.-F., Ruiz-Camacho N., Villenave C., Rougé L., Mercier V., Bellido A., Cannavacciuolo M., Piron D., Arrouays D., Boulonne L., Jolivet C., Lavelle P., Velasquez E., Plantard O., Walter C., Foucaud-Lemerrier B., Tico S., Giteau J.-L., Bispo A., 2009 - Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols: Exemple du programme-pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv. *Etude et Gestion des Sols*, 16, pp.187-201.
- Coja T., Zehetner K., Bruckner A., Watzinger A., Meyer E., 2008 - Efficacy and side effects of five sampling methods for soil earthworms (Annelida, Lumbricidae). *Ecotox. Env. Saf.*, 71, pp. 552-565.
- Colas F., Woodward G., Burdon F.J., Guérol F., Chauvet E., Cornut J., Cèbron A., Clivot H., Danger M., Danner M.C., Pagnout C., Tiegs S.D., 2019 - Towards a simple global-standard bioassay for a key ecosystem process: organic-matter decomposition using cotton strips. *Ecol. Indic.*, 106, 105466.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M., 1997 - The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, pp. 253-260.
- Creamer R.E., Barel J.M., Bongiorno G., Zwetsloot M., 2022 - The life of soils: Integrating the who and how of multifunctionality, *Soil Biol. Biochem.*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108561>.
- Csuzdi C., Zicsi A., 2003 - Earthworms of Hungary (Annelida: Oligochaeta, Lumbricidae). Hungarian Natural History Museum and Systematic Zoology Research Group of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 278 p.
- Cuendet G., Suter E., Stähli R., 1997 - Peuplements lombriciens des prairies permanentes du plateau suisse: rapport de synthèse: valeurs de comparaison pour l'interprétation des prélèvements de vers de terre. *Cahier de l'Environnement* 291, Berne: Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP.
- Dominguez-Haydar Y., Velasquez E., Zangerlé A., Lavelle P., Gutierrez-Eisman S., Jimenez J.J., 2020 - Unveiling the age and origin of biogenic aggregates produced by earthworm species with their NIRS fingerprint in a subalpine meadow of Central Pyrenees. *PLoS ONE*, 15, e0237115.
- Edwards C.A., Bohlen P.J., 1996 - Biology and Ecology of Earthworms. Chapman & Hall, London.
- Eisenhauer N., Straube D., Scheu S., 2008 - Efficiency of two widespread non-destructive extraction methods under dry soil conditions for different ecological earthworm groups. *Eur. J. Soil Biol.*, 44, pp. 141-145.
- Fernandez R., Kvist S., Lenihan J., Giribet G., Ziegler A., 2014 - Sine systemate chaos? A versatile tool for earthworm taxonomy: non-destructive imaging of freshly fixed and museum specimens using micro-computed tomography. *PlosOne*, 9, e96617.
- FRAPNA (2009 - Le Sol m'a dit – A la découverte du sol et de ses habitants. Fédération Rhône Alpes de Protection de la Nature, Kit pédagogique, ISBN 2-912552-11-7.
- Fründ H.-C., Graefe U., Tischer S., 2011 - Earthworms as bioindicators of soil quality. In: Karaca A., eds) *Biology of Earthworms. Soil Biology*, vol 24. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14636-7_16
- Guimarães R.M.L., Ball B.C., Tormena C.A., 2011 - Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use Manag.*, 27, pp. 395-403.
- Gunn A., 1992 - The use of mustard to estimate earthworm populations. *Pedobiol.*, 36, pp. 65-67.
- Hedde M., van Oort F., Lamy I., 2012 - Functional traits of soil invertebrates as indicators for exposure to soil disturbance. *Env. Poll.*, 164, pp. 59-65.
- ISO (2004 - Soil Quality - Sampling of soil invertebrates. Part 1: hand-sorting and formalin extraction of earthworms. ISO 23611-1. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO (2018 - Soil quality - Sampling of soil invertebrates. Part 1: hand-sorting and extraction of earthworms. ISO 23611-1. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO (2016 - Soil quality - Method for testing effects of soil contaminants on the feeding activity of soil dwelling organisms - Bait-lamina test. ISO 18311:2016. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- Jackson M., Myrholm C., Shaw C., Ramsfield T., 2017 - Using nested PCR to improve detection of earthworm eDNA in Canada. *Soil Biol. Biochem.*, 113, pp. 215-218.
- Jolivet C., Almeida-Falcon J.-L., Berché P., Boulonne L., Fontaine M., Gouny L., Lehmann S., Maître B., Ratié C., Schellenberger E., Soler-Dominguez N., 2018 - Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols. RMQS2: deuxième campagne métropolitaine, 2016 – 2027, Version 3, INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, France.
- Karberg N.J., Scott N.A., Giardina C.P., 2008 - Methods for estimating litter decomposition. *In* Field Measurements for Forest Carbon Monitoring, C.M. Hoover (ed.), Durham, USA, pp. 103-111.
- Keuskamp J.A., Dingemans B.J.J., Lehtinen T., Sarneel J.M., Hefting M.M., 2013 - Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods Ecol. Evol.* 4, pp. 1070-1075.
- Kibblewhite M.G., Ritz K., Swift M.J., 2008 - Soil health in agricultural systems. *Phil. Trans. R. Soc., B: Biological Sciences*, 363, pp. 685-701.
- Kohler-Milleret R., Le Bayon R.C., Chenu C., Gobat J.M., Boivin P., 2013 - Impact of two root systems, earthworms and mycorrhizae on the physical properties of an unstable silt loam Luvisol and plant production. *Plant Soil*, 370, pp. 251-265.
- Kratz W.R., 1998 - The bait-lamina test: general aspects, applications and perspectives. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 5, pp. 94-96
- Latter P.M., Bancroft G., Gillespie J., 1988 - Technical aspects of the cotton strip assay in soils. *Intern. Biodeter.*, 24, pp. 25-47.
- Lawrence A.P., Bowers M.A., 2002 - A test of the 'hot' mustard extraction method of sampling earthworms. *Soil Biol. Biochem.*, 34, pp. 549-552.
- Le Bayon R.C., Bullinger-Weber G., Schomburg A.C., Turberg P., Brunner P., Schlaepfer R., Guenat C., 2021 - Earthworms, plants, and soils. *In* Hydrogeology, Chemical Weathering, and Soil Formation. New-York, John Wiley and Sons, Inc. pp. 81-103.
- Le Bayon R.C., Guenat C., Schlaepfer R., Fischer F., Luiset A., Schomburg A.C., Turberg P., 2020 - Use of X-ray microcomputed tomography for characterizing earthworm-derived belowground soil aggregates. *Eur. J. Soil Sci. Special Issue*, pp. 1-15.
- Le Bayon R.C., Moreau S., Gascuel-Oudou C., Binet F., 2002 - Annual variations in earthworm surface-casting activity and soil transport by water runoff under a temperate maize agroecosystem. *Geoderma*, 106, pp. 121-135.
- Lee K.E., 1985 - Earthworms, their ecology and relationships with soils and land use. Academic Press, Sydney.
- Liernur A., Schomburg A.C., Turberg P., Guenat C., Le Bayon R.C., Brunner P., 2017 - Coupling X-ray computed tomography and freeze-coring for the analysis of fine-grained low-cohesive soils. *Geoderma*, 308, pp. 171-186.
- Marichal R., Praxedes C., Decaëns T., Grimaldi M., Oszwald J., Brown G.G., Desjardins T., Lopes da Silva Junior M., Martinez A.F., Oliveira M.N.D., Velasquez E., Lavelle P., 2017 - Earthworm functional traits, landscape degradation and ecosystem services in the Brazilian Amazon deforestation arc. *Eur. J. Soil Biol.*, 83, pp. 43-51.
- Mathieu J., 2018 - EGrowth: A global database on intraspecific body growth variability in earthworm. *Soil Biol. Biochem.*, 122, pp. 71-80.
- McCary M.A., Schmitz O.J., 2021 - Invertebrate functional traits and terrestrial nutrient cycling: Insights from a global meta-analysis. *J. Anim. Ecol.*, 90, pp. 1714-1726.
- MEA (2005 - Millennium Ecosystem Assessment - Ecosystems and human well-being: general synthesis. Island Press, Washington, DC.
- Milleret R., Le Bayon R.C., Lamy F., Gobat J.-M., Boivin P., 2009 - Impact of roots, mycorrhizas and earthworms on soil physical properties as assessed by shrinkage analysis. *J. Hydrol.*, 373, pp. 499-507. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.05.013
- Moretti M., Dias A. T.C., Bello F., Altermatt F., Chown S.L., Azcárate F.M., Bell J.R., Fournier B., Hedde M., Hortal J., Ibanez S., Öckinger E., Sousa J.P., Ellers J., Berg M.P., 2017 - Handbook of protocols for standardized measurement of terrestrial invertebrate functional traits. *Funct. Ecol.*, 31, pp. 558-567.
- Orgiazzi A., Ballabio C., Panagos P., Jones A., Fernández-Ugalde O., 2017 - LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. *Eur. J. Soil Sci.*, 69, doi: 10.1111/ejss.12499.
- Pham T., Rumpel C., Capowiez Y., Jouquet P., Pelosi C., Pando A., Boukbida H.A., Bottinelli N., 2021 - Mid-infrared spectroscopy of earthworm bodies to investigate their species belonging and their relationship with the soil they inhabit. *App. Soil Ecol.*, 162, 103894.
- Pelosi C., Bertrand M., Capowiez Y., Boizard H., Roger-Estrade J., 2009 - Earthworm collection from agricultural fields: comparisons of selected expellants in presence/absence of hand-sorting. *Eur. J. Soil Biol.*, 45, pp. 176-183.
- Pey B., Nahmani J., Auclerc A., Capowiez Y., Cluzeau D., Cortet J., Decaëns T., Deharveng L., Dubs F., Joimel S., Briard C., Grumiaux F., Laporte M.-A., Pasquet A., Pelosi C., Pernin C., Ponge J.-F., Salmon S., Santorulo L., Hedde M., 2014 - Current use of and future needs for soil invertebrate functional traits in community ecology. *Basic Appl. Ecol.*, 15, pp. 194-206. <https://doi.org/10.1016/j.baec.2014.03.00>
- Phillips H.R.P., Bach E.M., Bartz M.L.C. *et al.*, 2021 - Global data on earthworm abundance, biomass, diversity and corresponding environmental properties. *Sci Data* 8, 136. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00912-z>
- Ponge J.F., Chevalier R., Lousot P., 2002 - Humus Index: an integrated tool for the assessment of 14 forest floor and topsoil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, pp. 1996-2001.
- Pop A.A., Cech G., Win M., Csuzdi C., Pop V.V., 2007 - Application of 16S, 18S rDNA and COI sequences in the molecular systematics of the earthworm family Lumbricidae (Annelida, Oligochaeta). *Eur. J. Soil Biol.*, 43, pp. S43-S52.
- Pop A.A., Wink M., Pop V.V., 2003 - Use of 18S, 16S rDNA and cytochrome c oxidase sequences in earthworm taxonomy (Oligochaeta, Lumbricidae). *Pedobiol.*, 47, pp. 428-433.
- Pulleman M., Creamer R., Hamer U., Helder J., Pelosi C., Pérès G., Rutgers M., 2012 - Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—an overview of European approaches. *Cur. Op. Environ. Sustain.*, 4, pp. 529-538.
- Rutgers M., Orgiazzi A., Gardi C., Römbk J., Jänsch S., Keith A.M., Neilson R., Boag B., Schmidt O., Murchie A.K., Blackshaw R.P., Pérès G., Cluzeau D., Guernion M., Briones M.J.I., Rodeiro R., Piñeiro R., Díaz Cosin D.J., Sousan J.P., Suhadol M., Kos I., Krogh P.H., Faber J.H., Mulder C., Bogte J.J., van Wijnen H.J., Schouten A.J., de Zwart D., 2016 - Mapping earthworm communities in Europe. *App. Soil Ecol.*, 97, pp. 98-111.
- Römbke J., 2014 - The feeding activity of invertebrates as a functional indicator in soil. *Plant Soil*, 383, pp. 43-46.
- Sanyal D., Wolthuizen W., Bly A., 2020 - Cotton strip soil test: Rapid assessment of soil microbial activity and diversity in the field. Technical Report, doi:10.13140/RG.2.2.31527.98722.
- Schmidt O., 2001 - Appraisal of the electrical octet method for estimating earthworm populations in arable land. *Ann. appl. Biol.*, 138, pp. 231-241.
- Schomburg A.C., Brunner P., Turberg P., Guenat C., Riaz M., Le Bayon R.C., Luster J., 2019 - Pioneer plant *Phalaris arundinacea* and earthworms promote initial soil structure formation despite strong alluvial dynamics in a semi-controlled field experiment. *Catena*, 180, pp. 41-54.
- Schomburg A.C., Verrecchia E., Guenat C., Brunner P., Sebag D., Le Bayon R.C., 2018 - Rock-Eval pyrolysis discriminates soil macro-aggregates formed by plants and earthworms. *Soil Biol. Biochem.*, 117, pp. 117-124.
- Sebag D., Disnar J.R., Guillet B., Di Giovanni C., Verrecchia E.P., Durand A., 2006 - Monitoring organic matter dynamics in soil profiles by Rock-Eval

- pyrolysis: bulk characterization and quantification of degradation. *Eur. J. Soil Sci.*, 57, pp. 344-355.
- Sherlock E., 2018 - Key to the earthworms of the UK and Ireland. Second Edition, FSC Publications, Telford.
- Sims R.W., Gerard B.M., 1999 - Earthworms: note for the identification of British species, Field Studies Council, Shrewsbury.
- Singh J., Singh S., Vig A.P., 2016 - Extraction of earthworm from soil by different sampling methods: a review. *Environ. Dev. Sustain.*, 18, pp. 1521-1539.
- Singh J., Singh S., Bhat S.A., Vig A.P., Schädler M., 2018 - Eco-friendly method for the extraction of earthworms: comparative account of formalin, AITC and *Allium cepa* as extractant. *App. Soil Ecol.*, 124, pp.141-145.
- Starking M.D., Roloff J.R., 2019 - Evaluating a mustard extraction technique for sampling earthworms. *Wildlife Soc. Bull.* pp. 1-6.
- Tatti D., 2016 - Des formes d'humus au bois mort et du bois mort aux formes d'humus: contribution à l'étude des formes d'humus et des communautés lombriciennes en zone forestière subalpine, avec une emphase particulière sur le bois mort. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel.
- Tresch S., Frey D., Le Bayon R.C., Zanetta A., Rasche F., Fliessbach A., Moretti M., 2019 - Litter decomposition driven by soil fauna, plant diversity and soil management in urban gardens. *Sci. Total Env.*, 658, pp. 1614-1629.
- von Törne E., 1990 - Assessing feeding activities of soil-living animals. I. Bait-lamina-tests. *Pedobiol.*, 34, pp. 89-101.
- Violle C., Navas M.-L., Vile D., Kazakou E.C.F., Hummel I., Garnier E., 2007 - Let the concept of trait be functional. *Oikos*, 116, 882e892.
- Zaborski E.R., 2003 - Allyl isothiocyanate: an alternative chemical expellant for sampling earthworms. *Appl. Soil Ecol.*, 22, pp. 87-95.
- Zangerlé A., Hissler C., Blouin M., Lavelle P., 2014 - Near infrared spectroscopy (NIRS) to estimate earthwormcast age. *Soil Biol. Biochem.*, 70, pp. 47-53.
- Zangerlé A., Hissler C., McKey D., Lavelle P., 2016 - Using near infrared spectroscopy (NIRS) to identify the contribution of earthworms to soil macroaggregation in field conditions. *Appl. Soil Ecol.*, 104, pp. 138-147.
- Zorn M.I., Van Gestel C.A.M., Eijssackers H., 2005 - Species-specific earthworm population responses in relation to flooding dynamics in a Dutch floodplain soil. *Pedobiol.*, 49, pp. 189-198.

RÉFÉRENCES WEB

- BETSI., 2022 - Biological and Ecological Traits for Soil Invertebrates. Consulté le 2 février 2022. <https://portail.betsi.cnrs.fr/node/2>
- CRB., 2021 - Commission romande de biologie – Formation continue pour les enseignants. Consulté le 30 novembre 2021. <https://www.crbio.ch/>
- CARABES., 2021 - Comité Associatif de Recherche Appliquée dans la Biodiversité des Ecosystèmes. Consulté le 30 novembre 2021. <https://assocarabes.com/>
- CSCF, 2021 - Centre Suisse de Cartographie de la Faune. Consulté le 30 novembre 2021. <http://www.cscf.ch/>
- Csuzdi, C., 2021 - Consulté le 30 novembre 2021. <http://earthworm.uw.hu/index.php>
- Drilobase., 2021 - The world earthworm database. Consulté le 30 novembre 2021. <http://drilobase.org/>
- Nature France., 2021 - Le service public d'information sur la biodiversité. Consulté le 30 novembre 2021. <https://naturefrance.fr/indicateurs/abondance-des-vers-de-terre>
- EGrowth., 2022 - Consulté le 2 février 2022. [EGrowth \(jerome-mathieu.com\)](http://jerome-mathieu.com)
- ESB., 2021 - Earthworm Society of Britain. Consulté le 30 novembre 2021. <https://www.earthwormsoc.org.uk/sampling>
- Infoflora., 2021 - Centre national de données et d'informations sur la flore de Suisse. Consulté le 30 novembre 2021. <https://www.infoflora.ch/fr/>
- INRS., 2021 - Consulté le 30 novembre 2021. <https://www.inrs.fr/risques/formaldehyde/ce-qu-il-faut-retenir.html>
- OPVT., 2021 - Observation Participatif des vers de terre. Consulté le 30 novembre 2021. https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php
- Pronatura., 2011 - Animal de l'année 2011 : le lombric. Consulté le 30 novembre 2021. <https://www.pronatura.ch/fr/animal-de-l-annee-2011>
- TerresVivantes., 2021 - Programme de protection des ressources. Fondation Rurale Interjurassienne. Consulté le 30 novembre 2021. <https://www.frij.ch/PROJETS/Production-vegetale-et-environnement/Terres-vivantes>
- WWF., 2016 - Kit d'exploration "Le Sol" – Dossier pour les enseignants. Consulté le 30 novembre 2021. https://www.wwf.ch/sites/default/files/doc-2017-09/2016-02-materiel-pedagogique-kit-exploration-sol-dossier-enseignants_0.pdf