

Faculté des bioingénieurs

Écouter les sols pour le suivi de l'activité de la macrofaune des sols : développement d'une méthodologie éco-acoustique

Autrice : Morgane Clicque

Promoteurs : Yannick Agnan et Corentin Caudron

Lecteur·ices : Sophie Opfergelt et Sébastien Lambot

Année académique 2025-2026

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : Sciences et technologies de l'environnement, orientation
Sustainability

Remerciements

Je tiens à remercier profondément toutes les personnes qui m'ont aidée dans la réalisation de ce mémoire et à achever mon parcours universitaire.

Je remercie tout particulièrement mon promoteur de l'UCLouvain, Yannick Agnan, pour son superbe encadrement, son enthousiasme, ses conseils avisés, ses encouragements, sa disponibilité et surtout pour le chocolat prévu à chaque réunion.

Je remercie également mon promoteur de l'ULB, Corentin Caudron, qui a généreusement fourni tout le matériel nécessaire aux expérimentations, sans lequel ce mémoire n'aurait pas été réalisable.

Un grand merci à Julien Govoorts, aussi affilié à l'ULB, pour ses nombreux conseils de prise en main des instruments, de m'avoir facilité l'accès aux données, de m'avoir consacré son temps lors de mes difficultés et surtout d'avoir répondu à mes nombreuses questions. Merci également à Jonas Pätzelt et Alexander Yates d'avoir répondu à mes questions durant cette année.

Merci à Hugues Falys d'avoir mis à contribution ses parcelles à la ferme de Marbaix et pris du temps pour me montrer les endroits les plus adaptés à mes expérimentations.

Merci à Romain Duquenne, pour m'avoir énormément aidée dans le choix des tests statistiques et pour son enthousiasme.

Merci à mes cokoteurs qui ont généreusement fourni leurs pelures de fruits et de légumes pour m'aider à la création d'un compost dans le but de nourrir mes vers de terre.

Je remercie énormément mes amis, Olivia, Thomas et Loris qui sont vaillamment venus m'aider sous une chaleur écrasante d'été à creuser une après-midi pour m'aider dans l'avancement de mes expérimentations.

Un grand merci à mes parents, mon frère et ma sœur de m'avoir encouragée, donné des conseils pertinents et qui ont participé à la relecture de mon mémoire.

Merci surtout à mon papa et l'équipe lteam pour m'avoir laissé l'accès à ses serveurs et espaces de stockage, me permettant de faciliter le travail.

Enfin, je remercie tout particulièrement mon compagnon, Florent, sans qui la réalisation de ce mémoire aurait été bien plus difficile. Merci de m'avoir donné plein de conseils pertinents, de m'avoir écoutée, accompagnée et motivée. Merci de m'avoir remonté le moral, d'être allé t'occuper des vers de terre quand je ne le pouvais pas, et merci d'avoir passé plein de moments ensemble, autant à travailler dur sur notre mémoire qu'à rigoler, se balader et se changer les idées.

Pour finir, le plus important, merci à mes vers de terre qui m'ont tenu compagnie tout ce semestre et sans qui, aucun résultat n'aurait été possible. Je tiens à préciser qu'ils ont été nourris, encouragés et bien traités durant toute la durée des expérimentations et qu'ils ont retrouvé leur liberté.

CRediT

CRediT	Clicque Morgane	Contributeur-ices*	Intelligence artificielle
Conceptualisation	X	Y.A / C.C	
Méthodologie	X	Y.A / C.C / J.G	
Investigation	X	Y.A / J.G	Consensus / Claude
Analyse formelle	X	Y.A / R.D / J.G	Claude
Validation	X		Claude
Rédaction – version originale	X		
Rédaction – révision et édition	X	Y.A / C.C / J.G	Reverso / Claude
Visualisation	X	Y.A	
Supervision		Y.A / C.C / J.G	

*Y. A : Yannick Agnan / C.C : Corentin Caudron / R.D : Romain Duquenne / J.G : Julien Govoorts

Usage de l'intelligence artificielle

L'usage de Consensus et de Claude a facilité la recherche bibliographique pour des sujets distincts. Claude a été utilisé pour la finalisation de la méthodologie et de la quantification de l'activité de la macrofaune, ainsi que pour les codes associés. Claude a aussi permis la recherche de différents types de statistiques adaptés aux tests et données variées, ainsi que de leur interprétation. Finalement, Reverso et Claude ont aidé à la vérification de l'orthographe, de la grammaire et de la conjugaison.

Table des matières

Remerciements.....	1
CRedit.....	2
Table des matières.....	3
Liste des figures	5
Liste des tableaux	7
1. Introduction.....	8
2. État de l’art.....	9
2.1. La biodiversité des sols	9
2.1.1. Les organismes du sol	9
2.1.2. Le sol comme milieu de vie.....	11
2.1.3. Le diagnostic des sols.....	16
2.2. Mesurer la biodiversité des sols	20
2.2.1. Pourquoi surveiller la biodiversité des sols ?	20
2.2.2. Les méthodes standard pour mesurer la macrofaune	20
2.2.3. Méthodes physiques et instruments	21
2.2.4. Limites des méthodes de mesures.....	25
3. Objectifs et démarche	26
4. Matériels et méthodes	28
4.1. Site d’étude et contexte	28
4.2. Instruments de mesures et paramétrage.....	29
4.3. Étape 1 : Conditions contrôlées en intérieur.....	31
4.3.1. Échantillonnage, tri et installation	31
4.4. Étape 2 : Conditions contrôlées en extérieur	33
4.4.1. Installation	33
4.4.2. Les tests réalisés sur la macrofaune	33
4.4.3. Calendrier des expériences réalisées	35
4.5. Étape 3 : Conditions réelles sur milieu contrasté.....	35
4.5.1. Sites d’études.....	35
4.5.2. Installation des instruments.....	36
4.5.3. Calendrier des expériences réalisées	36
4.6. Traitement des données et méthodologie de détection	37
4.6.1. Les microphones	37
4.6.2. Les géophones	39

4.6.3. Analyses statistiques des données.....	40
5. Résultats et discussion	42
5.1. Validation de la méthodologie	42
5.1.1. La signature acoustique des vers de terre	42
5.1.2. La quantification de l'activité des vers de terre	43
5.1.3. Validation de la méthodologie	45
5.2. Analyse au microphone de l'activité des vers de terre	46
5.2.1. Un cycle circadien	46
5.2.2. Une influence de la température.....	47
5.2.3. Une influence de l'humidité.....	49
5.2.4. Une influence du bruit de fond.....	50
5.2.5. Une influence de la matière organique.....	50
5.2.6. Influence de la population sur l'activité	52
5.2.7. Récapitulatif des résultats statistiques	53
5.3. Utilisation du microphone en milieu réel.....	54
5.4. Conditions d'application de la méthodologie de détection	56
6. Conclusion et perspectives	58
6.1. Conclusions tirées.....	58
6.2. Perspectives.....	59
6.2.1. Hypothèses d'amélioration	59
6.2.2. Perspectives d'utilisation de la méthodologie	60
6.2.3. Perspectives sur l'utilisation d'autres instruments de mesure	61
7. Annexes.....	62
Références.....	65

Liste des figures

Figure 1: Représentation des groupes taxonomiques d'organismes du sol classés selon la taille	10
Figure 2: Répartition des interactions fonctionnelles entre les groupes d'organismes du sol	11
Figure 3: Distribution de la faune du sol en fonction de la granulométrie du substrat (Charles G. , 2023)	12
Figure 4: Distribution verticale des organismes du sol selon les horizons (Jeffery C., 2013)..	13
Figure 5: Diagramme radar comparant l'abondance des principaux groupes d'organismes du sol, selon une occupation des terres en culture, prairie et forêt (Cluzeau <i>et al.</i> , 2012)	14
Figure 6: Variabilité saisonnière de l'activité de la microfaune du sol mesurée par respiration (production de CO ₂) (rouge = faible activité, orange = activité modérée, vert = activité élevée) (Vincent <i>et al.</i> , 2019)	15
Figure 7: Variabilité saisonnière de la densité de vers de terre en sol agricole (rouge = faible activité, orange = activité modérée, vert = activité élevée) (Vincent <i>et al.</i> , 2019).....	16
Figure 8: Classification des services écosystémiques fournis par la biodiversité des sols (source : aquaportail.com)	17
Figure 9: Gammes de valeurs de densité de vers de terre (individus/m ²) en Wallonie (Vincent <i>et al.</i> , 2019).....	18
Figure 10: Classement des menaces pesant sur la biodiversité des sols européens selon leur pondération par des experts (Jeffery C., 2013).....	19
Figure 11: Principe global de l'éco-acoustique et l'influence de facteurs biophysiques sur la transmission du son (Stroud <i>et al.</i> , 2025b)	22
Figure 12: Spectrogramme et paramètres acoustiques associés à quatre organismes de la macrofaune (Robinson <i>et al.</i> , 2024b).....	23
Figure 13: Schéma récapitulatif de la démarche expérimentale en trois étapes, à l'aide de microphones et de géophones.....	27
Figure 14: Carte pédologique de la Wallonie représentant les principaux types de sols type de sols (zone d'étude encadrée) (SPW – DEMNA).....	28
Figure 15: Microphone Song Meter Mini 2 Li-ion	29
Figure 16: Géophone - SmartSolo (geobit-instruments.com).....	30
Figure 17: Échantillon de sol prélevé sur la prairie de la ferme de Marbaix	31
Figure 18: Tri manuel de la macrofaune pour le remplissage des pots expérimentaux	32
Figure 19: Pots d'expérimentation installés en conditions contrôlées en intérieur (porcherie vide de la ferme)	32
Figure 20: Pots expérimentaux en conditions contrôlées en extérieur	33
Figure 21: Ajout de matière organique dans le pot contenant les vers de terre (gauche)	34
Figure 22: Parcelle en prairie permanente	36
Figure 23: Parcelle en champ cultivé	36
Figure 24: Schéma décisionnel de traitement audio pour la détection automatique des cliquetis de vers de terre.....	38

Figure 25: Signal filtré et enveloppe autour d'un signal audio	39
Figure 26: Visualisation du spectre audio via Audacity d'un enregistrement au microphone dans le pot avec vers – (a) signal brut, (b) spectrogramme avec mise en évidence des évènements acoustiques produits par les vers de terre.....	42
Figure 27: Visualisation du spectre audio via Audacity d'un enregistrement au microphone dans le pot sans vers – (a) signal brut, (b) spectrogramme avec mise en évidence des évènements acoustiques manquant par rapport à la Figure 26.....	43
Figure 28: Structure du traitement audio appliqué à un enregistrement au microphone – (a) signal brut, (b) signal filtré après passe-bande 2-10 kHz, (c) signal filtré avec enveloppe glissante de 5 ms	44
Figure 29: Détection automatique des cliquetis sur signal filtré et avec seuils – (a) application des seuils et mise en évidence des évènements acoustiques créés par les vers de terre, (b) représentation par bandes rouges des cliquetis validés.....	45
Figure 30: Comparaison de la quantité de cliquetis détectés entre le pot avec et sans vers de terre.....	45
Figure 31: Évolution temporelle de l'activité acoustique des vers de terre sur une semaine type (29 avril au 4 mai 2026).....	46
Figure 32: Décomposition STL du signal d'activité en fonction de la température – (a) activité et température, (b) tendance, (c) saisonnalité circadienne, (d) résidus de corrélation de Sperman en fonction de la température.....	48
Figure 33: (a) Évolution des cliquetis lors d'un épisode pluvieux, (b) composante circadienne, (c) décomposition STL et résidus (c)	49
Figure 34: Évolution de l'activité acoustique des vers de terre et du bruit de fond sur la semaine type.....	50
Figure 35: Évolution de l'activité acoustique des vers de terre avant (bleu, 29 avril - 4 mai) et après (vert, 7 - 11 mai) l'ajout de matière organique (zone orange = période d'ajout et d'acclimatation).....	51
Figure 36: Distribution des cliquetis par période diurne et nocturne avant et après l'ajout de matière organique.....	51
Figure 37: Évolution de l'activité acoustique de 10 vers de terre (22 - 24 mai 2026)	52
Figure 38: Comparaison de l'activité acoustique de la macrofaune sur deux parcelles contrastées : un champ cultivé (cyan) et prairie permanente.....	54
Figure 39: Distribution des cliquetis champ/prairie	55
Figure 40: Nuage de points de la corrélation temporelle entre l'activité détectée au champ et à la prairie.....	55
Figure 41: Comparaison de l'activité acoustique détectée dans le pot avec et sans vers de terre lors d'un épisode de pluvieux	56
Figure 42: Cliquetis et précipitations observé dans le pot témoin	56

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques physiques des microphones et géophones	30
Tableau 2: Calendrier des expériences réalisées en conditions contrôlées, à l'extérieur.....	35
Tableau 3: Récapitulatif et justification des tests statistiques utilisés pour chaque étape.....	41
Tableau 4: Comparaison des médianes d'activité diurne et nocturne des vers de terre.....	47
Tableau 5: Récapitulatif des tests statistiques, résultats et interprétations	53

1. Introduction

Il suffit de retourner une botte de terre pour s'apercevoir des quelques vers, cloportes ou larves qui s'agitent sous nos pieds. Et pourtant, ce que nous observons de la biodiversité des sols est en réalité bien plus riche que ce que nous pensons. Au moins 59 % des espèces terrestres vivent dans le sol. Ce milieu abrite une richesse d'organismes indispensables, du fait de leurs fonctions essentielles : décomposition de la matière organique, régulation du cycle des nutriments et de l'eau, structure des sols et séquestration de carbone.

Parmi ces organismes, la macrofaune, notamment les vers de terre, joue un rôle clé d'ingénieur écologique. Les vers de terre créent des galeries, améliorent la structure, l'infiltration de l'eau ainsi que la répartition des nutriments dans le sol. L'abondance des vers de terre est également un bon indicateur de santé des sols en raison de leur grande sensibilité aux aléas environnementaux. Dans un sol agricole, l'abondance de vers de terre peut, à elle seule, augmenter le rendement du sol jusqu'à 25 %.

Pourtant, cette biodiversité est aujourd'hui menacée par les pratiques humaines. L'intensification agricole, l'artificialisation des terres, la pollution chimique et le changement climatique augmentent les pressions sur ces organismes. Rien qu'en Wallonie, l'artificialisation des sols a augmenté de 45 % entre 2013 et 2019. Ces observations alarmantes ont conduit à une priorité dans le scan horizon 2024 pour les enjeux de conservation biologique mondiaux et à la surveillance de la biodiversité des sols. Malgré cela, les méthodes actuelles de suivi de la macrofaune du sol restent limitées. Bien que fiables, elles sont généralement destructives, locales et ne fournissent que des informations ponctuelles.

C'est dans ce contexte que l'éco-acoustique des sols émerge. Ce domaine se base sur le principe que les organismes du sol produisent des sons lorsqu'ils se déplacent, communiquent, ou creusent. Ces sons sont produits par la friction de leur corps avec les particules de sol et peuvent être captés par des sondes piézoélectriques, des microphones ou des géophones. Cependant, la plupart des travaux publiés se limitent à la détection de la présence ou à des comparaisons acoustiques de diversité sonore.

Ce mémoire vise donc à contribuer à l'automatisation des outils de monitoring non invasifs et continus afin de répondre à ce besoin croissant d'évaluation de la santé de nos sols. L'objectif exploré est le suivant : utiliser le principe de l'éco-acoustique pour développer une méthodologie capable de repérer et de quantifier l'activité de la macrofaune des sols.

La démarche suivie se déroulera en trois étapes. La première consiste à identifier la signature acoustique d'une macrofaune choisie et à développer une méthode capable d'identifier les sons produits par la friction de la terre. La deuxième étape est l'analyse de certains paramètres écologiques sur l'activité enregistrée. La troisième partie consistera en l'évaluation de l'application de la méthodologie à un cas pratique.

Ce travail est réalisé en collaboration avec le département de sismologie et de géophysique de l'ULB qui assure la bonne prise en main des instruments fournis.

2. État de l'art

2.1. La biodiversité des sols

Le sol est souvent perçu comme un support physique inerte, utile aux plantes ou à la construction. Pourtant, il constitue l'un des milieux les plus riches et complexes de la biosphère. Nous avons tous déjà, en travaillant le sol ou simplement lors d'une promenade, observé quelques insectes, vers ou larves qui s'agitent à nos pieds. Toute cette faune visible ne représente pourtant qu'une infime portion des organismes qui l'habitent vraiment. Le sol abrite au moins 25 % des espèces sur Terre et plus de 50 % en dépendent pour une partie de leur cycle de vie. Ce qui fait du sol, l'un des réservoirs écologiques les plus riches de la planète (Anthony, Bender et van der Heijden, 2023).

La biodiversité du sol désigne l'ensemble des formes de vie animales, végétales ou microbiennes présentes dans le sol. Elle inclut une grande diversité de groupes biologiques : bactéries, champignons, nématodes, protistes, mollusques et bien d'autres organismes (Quentin, 2022). Cette biodiversité se caractérise notamment par une forte hétérogénéité à la fois dans leurs abondances, leurs fonctions biologiques ainsi que leurs niveaux d'organisation.

Afin de mieux saisir la complexité des organismes de ce milieu, il est courant de différencier la biodiversité du sol selon deux aspects. La biodiversité taxonomique fait référence à la diversité des espèces ou des familles, soit un niveau de classification par groupe. En revanche, la biodiversité fonctionnelle s'intéresse aux rôles que chaque organisme assure au sein de l'écosystème (Quentin, 2022).

2.1.1. Les organismes du sol

- **Classification taxonomique des organismes**

Il existe une très grande diversité d'espèces qui vivent dans le sol ; une classification courante de ces organismes est leur répartition en quatre groupes selon leur taille, illustrée à la Figure 1. Cette distinction reflète notamment une capacité différente des organismes à circuler entre les pores du sol et à occuper différents types de niches écologiques (Quentin, 2022).

Les plus petits, la microfaune et la microflore sont généralement visibles au microscope et sont de taille inférieure à 0,2 mm et principalement représentés par les bactéries, les champignons, les algues et les protozoaires. Concernant les champignons, ceux-ci peuvent former des réseaux mycéliens de plus grande étendue mais sont classés dans ce groupe en raison du diamètre de leurs hyphes.

La mésofaune est comprise de 0,2 à 4 mm et comprend les nématodes, acariens et collemboles.

La macrofaune atteint jusqu'à 80 mm, comprenant les plus grands organismes, larves, cloportes, diplopodes, etc. Quant à la mégafaune, ce sont tous les organismes plus grands

vivant partiellement ou temporairement dans le sol comme les vers de terre ou taupes, qui peuvent selon les classifications être groupés avec la macrofaune (Figure 1).

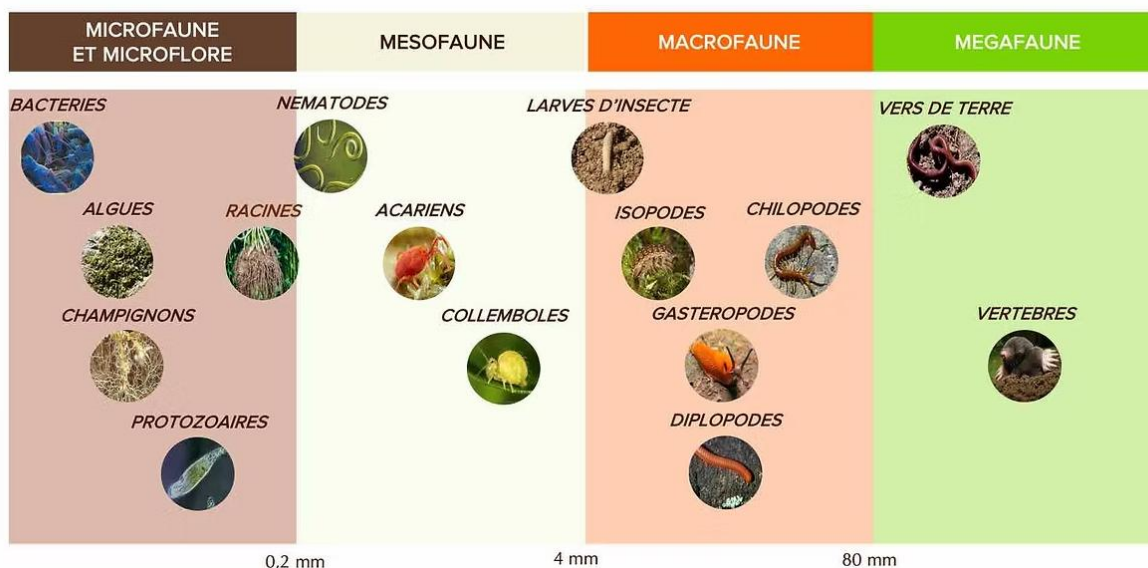


Figure 1: Représentation des groupes taxonomiques d'organismes du sol classés selon la taille¹

En plus de cette classification par taille, les organismes du sol se distinguent également par leur abondance (nombre d'individus par unité de surface ou de volume) et leur biomasse (masse totale de matière vivante par unité de surface). La diversité et l'abondance des organismes du sol sont bien supérieures à celles observées en surface ; un seul gramme de sol peut contenir jusqu'à un milliard de micro-organismes et possiblement des milliers d'espèces différentes (Torsvik et Øvreås, 2002).

• Classification fonctionnelle des organismes

Le fonctionnement global du sol repose sur l'activité d'une grande diversité d'organismes, notamment les ingénieurs (fragmenteurs) de l'écosystème, les prédateurs et les décomposeurs, qui contribuent ensemble au recyclage de la matière organique, à la structuration du sol et à la régulation des communautés biologiques (Geisen *et al.*, 2019) (Figure 2).

Les fragmenteurs sont considérés comme les ingénieurs des sols, les vers de terre, les fourmis ou les termites en font partie. Ils créent des galeries, modifient la porosité et participent à l'aération et à la redistribution des ressources dans le sol. Les prédateurs jouent également un rôle essentiel, notamment dans la régulation des populations. Finalement, les décomposeurs sont principalement les microorganismes, les bactéries et les champignons qui dégradent chimiquement la matière organique en éléments assimilables par les plantes (Pulleman *et al.*, 2012).

¹ <https://www.terreom.fr/post/matiere-organique-sol>

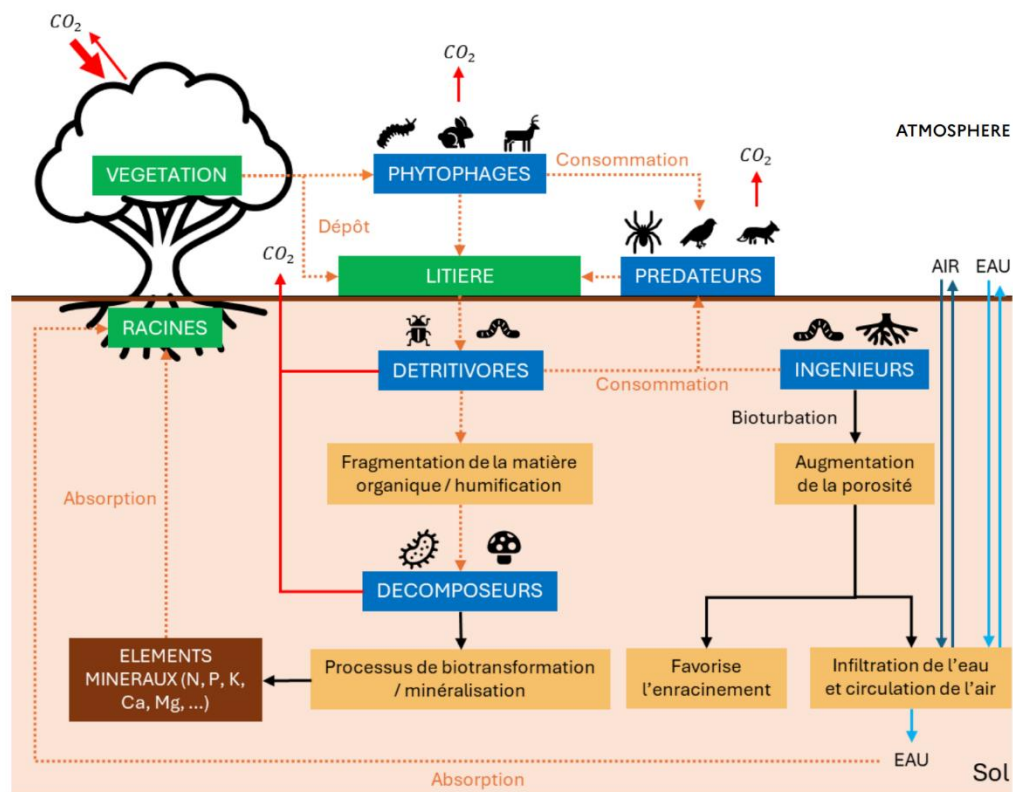


Figure 2: Répartition des interactions fonctionnelles entre les groupes d'organismes du sol ²

2.1.2. Le sol comme milieu de vie

Le sol est l'un des supports fondamentaux à la vie sur Terre, il fournit notamment des services écosystémiques essentiels allant de la production de nos aliments à un milieu vital pour ses habitants (Lehmann *et al.*, 2020).

Le sol est un support d'une structure complexe ; on y retrouve des agrégats, des galeries, des pores variés et une stratification des horizons. Chaque hétérogénéité participe à la création de niches écologiques essentielles à la biodiversité du sol. Plusieurs aspects du sol vont notamment conditionner la présence de certains organismes.

- **La texture du sol**

La texture du sol, déterminée par des proportions relatives en sable, limon et argile, va influencer ses propriétés physiques et biologiques (Jeffery C., 2013). Les sols sableux ont une macroporosité plus élevée, avec une bonne aération mais une faible rétention d'eau et de nutriments. À l'inverse, les sols argileux ont une granulométrie plus fine et donc une meilleure rétention d'eau et de nutriments (Charles G. , 2023). Ces caractéristiques conditionnent donc le type d'organismes qui s'y retrouvent.

• ²https://www.consultations-publiques.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/25017_plan.sols_forestiers_batweb2.pdf

La Figure 3 illustre la distribution de ces organismes. Un habitat compact et avec une petite granulométrie, comme un sol argileux, aura plus tendance à abriter une microfaune avec une majorité de bactéries, archées ou champignons (Bardgett et van der Putten, 2014). Tandis qu'un sol sableux qui présente une fraction grossière plus importante sera plus communément occupé par des organismes de plus grande taille, tels que les acariens, les araignées, les collemboles, les larves et les vers de terre. Toutefois, cette relation entre granulométrie et faune n'est pas systématique. D'autres facteurs tels que le pH, la teneur en matière organique et l'humidité influencent la distribution des organismes indépendamment de la granulométrie (Bardgett et van der Putten, 2014).

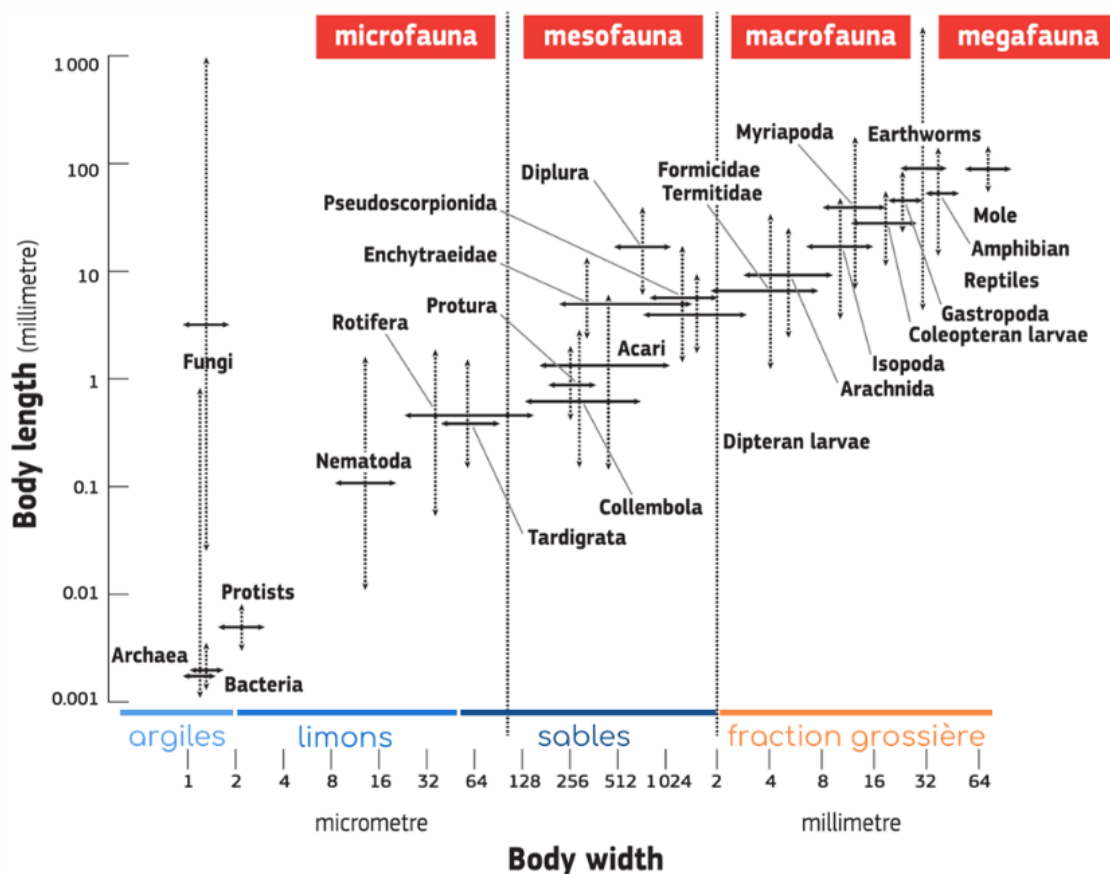


Figure 3: Distribution de la faune du sol en fonction de la granulométrie du substrat (Charles G. , 2023)

• Stratification des organismes dans les horizons du sol

Les organismes du sol ne vivent pas tous à la même profondeur. Certains vivent essentiellement à la surface, soit les 5 premiers centimètres comme la mésofaune, d'autres étant plus actifs dans les 20 cm suivants (soit les vers de terre endogés) et certains se plaisent plus dans les profondeurs jusqu'à 2 mètres (par exemple les vers de terre anéciques) (Jeffery C., 2013).

Ces différences mènent donc à une spécialisation des organismes dans leur milieu, bien qu'ils se répartissent tout de même sur l'ensemble du profil, comme représenté à la Figure 4.



Figure 4: Distribution verticale des organismes du sol selon les horizons (Jeffery C., 2013).

Dans le premier horizon de surface, la biomasse est la plus abondante, car on y trouve une concentration plus importante de matière organique et de nutriments essentiels à la vie.

La macrofaune, notamment les vers de terre (d), ainsi que la mésofaune comme les collemboles (a), sont des organismes très abondants dans cette couche du sol, où ils participent activement à la décomposition de la matière organique. Leur présence en surface est également expliquée par une macroporosité plus élevée qui permet un déplacement plus aisé des grands organismes. Pour certains d'entre eux, leur cycle de vie nécessite une étape en surface donc leur présence à proximité facilite cette étape. Les micro-organismes (c), quant à eux, sont les plus diversifiés et abondants dans les horizons les plus profonds.

- **Distribution de la faune selon différentes occupations des sols**

Les différentes occupations du sol amènent à une forte variabilité de la biodiversité, autant en termes d'abondance que de variabilité des espèces présentes.

La faune de sol constitue la partie majoritaire de la biomasse et de la diversité présente dans les sols. On y trouve une forte discordance au niveau des espèces et de l'abondance selon les types de milieux. Cette tendance varie selon de nombreux critères ; la teneur en matière organique, la composition minérale, le pH, les pratiques agricoles, les conditions environnementales et davantage de facteurs contribuent à cette hétérogénéité (Ponge, 2000).

La Figure 5 illustre cette variabilité en fonction de l'occupation des sols ; une représentation graphique en plot radar permet une comparaison de ces données biologiques. Chaque

catégorie est placée sur un axe du graphique et y est attribuée une proportion d'abondance d'individus, sur une échelle allant de 0 à 1 et en fonction des trois types de milieux (Quentin, 2022).

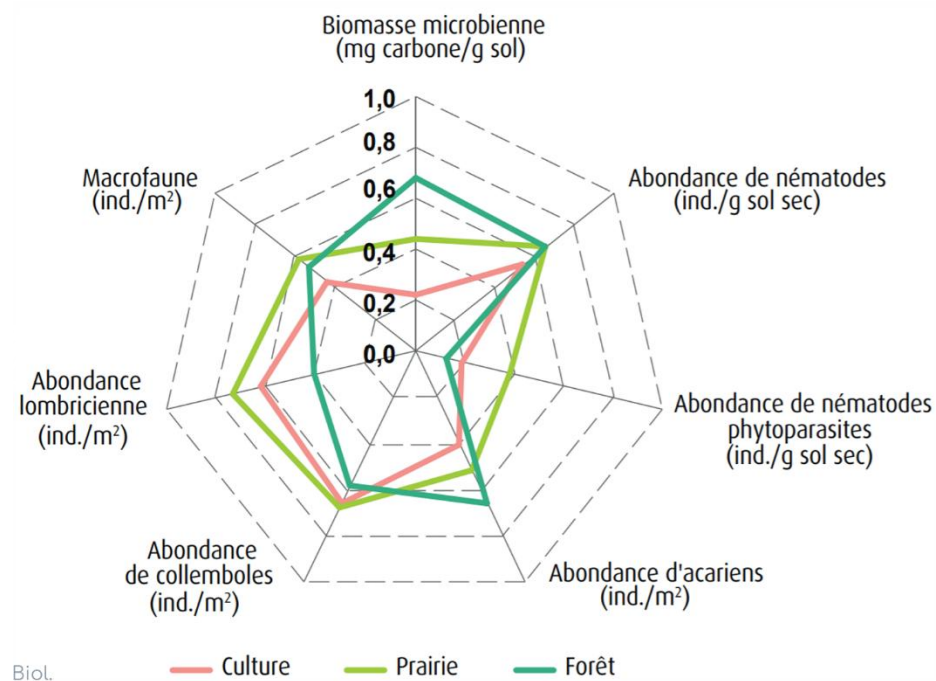


Figure 5: Diagramme radar comparant l'abondance des principaux groupes d'organismes du sol, selon une occupation des terres en culture, prairie et forêt (Cluzeau *et al.*, 2012)

Dans une parcelle en culture, de nombreux facteurs nuisibles à la vie vont faire varier la composition de la faune. Si le travail est intensif ou qu'il y a une forte utilisation de pesticides, alors on observe une forte réduction de la diversité et de l'abondance de la faune (Ponge, 2000). L'abondance en collemboles, nématodes et lombrics sera quand même bien présente contrairement à la biomasse microbienne et d'acariens qui diminuent de près de moitié par rapport à un sol forestier.

Les prairies ont des sols riches en nutriments issus de la décomposition des organismes morts, qui constituent la matière organique. La biomasse des prairies surpasse de loin celle d'autres milieux. Les décomposeurs, comme les vers de terre ou les collemboles, sont des organismes fondamentaux à la santé des prairies.

Les sols forestiers sont couverts d'un feuillage qui se renouvelle à chaque saison. Environ 70 % de toute la biomasse produite : les feuilles, fruits, branches, etc., vont tomber et seront décomposés par les micro-organismes. De ce fait, les forêts tempérées auront une litière plus facilement décomposable alors que les forêts de conifères, composées d'aiguilles riches en lignine et de brindilles, sont plus difficiles à décomposer (Bhörn, 2014). Les rôles de la masse microbienne, notamment des champignons, sont très importants puisqu'ils sont capables de dégrader les polymères complexes du bois, dans une plus grande mesure que les vers de terre par exemple (Jeffery C., 2013).

- **Les conditions climatiques**

Un facteur supplémentaire qui influence l'activité de la faune du sol est les conditions climatiques incluant la température et les précipitations. Elles peuvent créer des conditions qui affectent directement la densité et la diversité des espèces présentes dans le sol (Li *et al.*, 2024).

Une mesure qui permet de comprendre l'influence des conditions climatiques est l'activité de la communauté microbienne via la respiration du sol. Au cours de la décomposition de la matière organique, la concentration de CO₂ produite par les organismes peut être mesurée pour évaluer leur présence. Selon Vincent *et al.*, 2019, la microfaune est la plus active à plus hautes températures, notamment en juin et août (en vert sur la Figure 6) où les quantités de CO₂ sont les plus importantes. Lorsque la température chute en octobre, la concentration en CO₂ indique que l'activité de la microfaune diminue fortement (en rouge sur la Figure 6).



Figure 6: Variabilité saisonnière de l'activité de la microfaune du sol mesurée par respiration (production de CO₂) (rouge = faible activité, orange = activité modérée, vert = activité élevée) (Vincent *et al.*, 2019)

Cette diminution des activités est en concordance avec celle des vers de terre, étant particulièrement affectés par les conditions trop sèches ou trop froides. Puisque le lombric respire par sa peau, il dépend des conditions météorologiques³. Son activité est diminuée par temps chaud ou sec. Il préfère les conditions fraîches mais sans trop d'eau, sinon il risque de s'y noyer.

Certains individus descendent dans des couches plus profondes du sol et entrent en diapause, soit un arrêt temporaire de leurs activités (Edwards et Bohlen, 2022). La Figure 7 indique les différences significatives entre les moyennes de densité de vers analysées sur un sol agricole au fil des saisons (Vincent *et al.*, 2019). Les sols deviennent trop froids à partir d'octobre où les vers de terre vont diminuer leur activité alors qu'au retour de températures plus douces, l'activité reprend.

³ <https://renature.brussels/fr/hotel/animaux/lumbricus-terrestris>

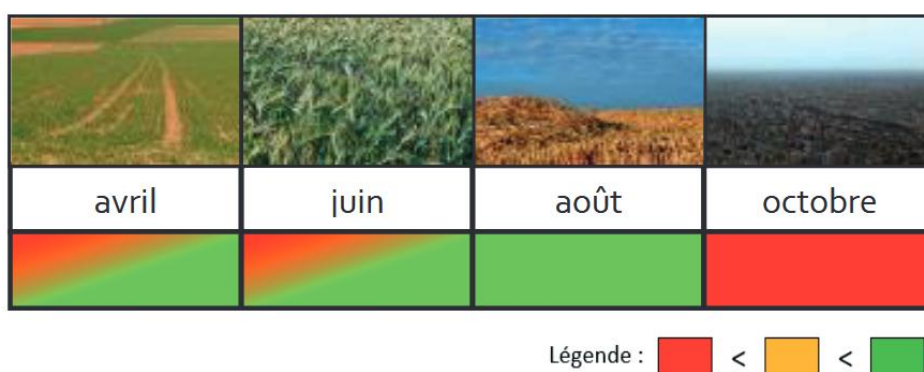


Figure 7: Variabilité saisonnière de la densité de vers de terre en sol agricole (rouge = faible activité, orange = activité modérée, vert = activité élevée) (Vincent *et al.*, 2019)

2.1.3. Le diagnostic des sols

- **Les services écosystémiques fournis par les sols**

Les sols représentent bien plus que le support de nos maisons ou le milieu de vie de la biodiversité. Ils occupent une place centrale dans notre vie quotidienne où l'humain dépend d'eux pour de nombreux aspects. La Figure 8 reprend les quatre principaux services que nous fournissent nos sols : la régulation, le soutien, la culture et l'approvisionnement.

En effet, un des services écosystémiques fondamentaux qu'assure la biodiversité du sol est la formation et le renouvellement des sols. Les décomposeurs, comme les vers de terre ou les termites, fragmentent la matière organique et sont relayés par les champignons et bactéries qui continuent le processus de minéralisation (Quentin, 2022). Cette activité biologique assure le cycle des nutriments et minéraux directement disponibles et assimilables par d'autres espèces de la chaîne alimentaire.

Ces organismes rendent possible le développement des plantes, ce qui conditionne les services d'approvisionnement du sol dont la totalité de l'humanité dépend. Ils incluent l'alimentation, l'eau potable, l'énergie, les fibres naturelles, le carburant ou le support d'infrastructures (Logeais, C, 2019).

Les sols assurent aussi une régulation globale du climat avec une filtration de l'air et de l'eau. Les organismes y contribuent à la structure, porosité et cohésion du sol, ce qui tend à améliorer la circulation et la réalisation des cycles biogéochimiques (Eglin et Cousin, 2021).

Dans un objectif de maintien durable des sols, ils permettraient d'atteindre certains objectifs du développement durable (voir Annexe 2). Parmi eux, le sol n'est pas mentionné directement mais les services qu'ils fournissent permettraient l'élimination de la faim, la bonne santé, l'eau potable, l'action pour le climat, vie aquatique et vie terrestre.

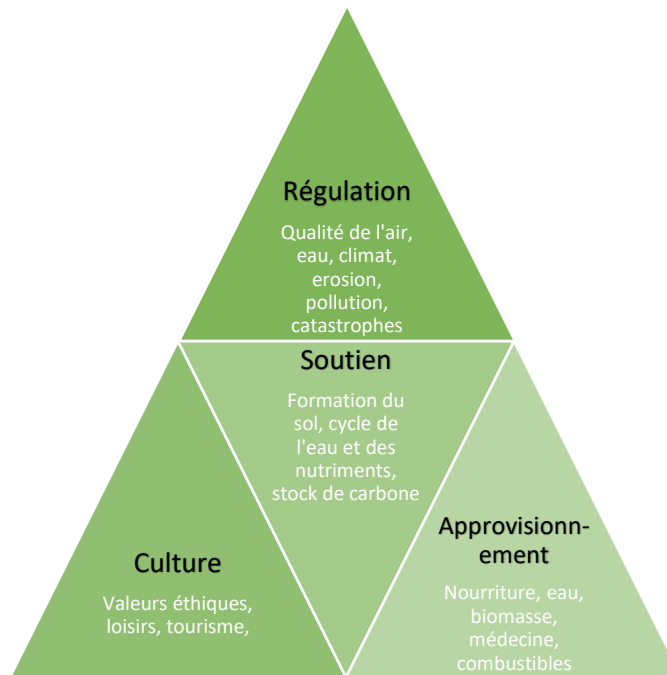


Figure 8: Classification des services écosystémiques fournis par la biodiversité des sols (source : ccsols.ch)

- **La qualité et santé des sols**

Selon son usage, le fonctionnement et les caractéristiques d'un sol peuvent être totalement différents. Un sol agricole, un sol forestier ou un sol destiné à la construction, ne partagent ni les mêmes propriétés ni la même communauté biologique. Pour distinguer au mieux ces différences, les concepts de qualité et santé des sols sont utilisés.

La notion de qualité d'un sol correspond au niveau absolu de son aptitude à fournir un service écosystémique donné (Vincent *et al.*, 2019), tandis que la santé évalue ce niveau de manière relative, par rapport au potentiel du sol (Kibblewhite, Ritz et Swift, 2007). Dans les deux cas, l'évaluation repose sur des critères plutôt anthropocentrés et mesurables, tels que les propriétés physiques, chimiques et biologiques. Parmi ces critères, les indicateurs biologiques restent largement sous-représentés, seuls 4 contre 13 chimiques et 10 physiques (Bünemann *et al.*, 2018).

- **Les indicateurs de qualité des sols**

Les indicateurs sont regroupés en trois grandes catégories : les indicateurs physiques, chimiques et biologiques. Ces derniers sont ceux qui ont le lien le plus direct avec la biodiversité. Vincent *et al.*, (2019), reprennent 8 indicateurs de qualité biologique des sols et l'Annexe 2 reprend un tableau succinct de certains indicateurs avec leurs définitions et méthodes de mesure.

Parmi les indicateurs biologiques, les vers de terre sont largement considérés comme un indicateur de référence (Al-Maliki, Al-Taey et Al-Mammori, 2021). L'évaluation de la santé des

sols peut se réaliser via l'abondance et l'activité des populations de vers de terre. En effet, les galeries qu'ils creusent, créent une aération du sol qui permet l'infiltration de l'eau, la répartition des nutriments et autres qui impactent directement sur le fonctionnement de l'écosystème (Chaussod, 1996).

La population de vers de terre constitue un indicateur lorsque l'on considère l'abondance (nombre d'individus par m²), biomasse (masse par m²), proportion de juvéniles et si possible les différentes espèces. Toutefois, ces métriques ne suffisent pas à elles seules pour évaluer de la santé globale d'un sol, qui nécessite l'intégration des indicateurs chimiques et physiques.

La Figure 9 désigne les gammes de densité de vers de terre attendues dans un sol agricole en Wallonie. Une agriculture de type conventionnelle aura typiquement des densités plus faibles en vers de terre qu'une agriculture de conservation ou biologique. Une densité élevée de vers peut signifier qu'un écosystème est peu perturbé. Il aurait une bonne aération du sol, un bon accès à l'eau et aux nutriments qui seraient correctement répartis et donc les plantes y auraient facilement accès (Vincent *et al.*, 2019). Ces écarts traduisent des différences réelles de santé biologique des sols, avec des conséquences directes sur leur productivité : l'abondance de vers de terre peut ainsi augmenter le rendement d'un sol agricole jusqu'à 25 % (Hedde, 2020).

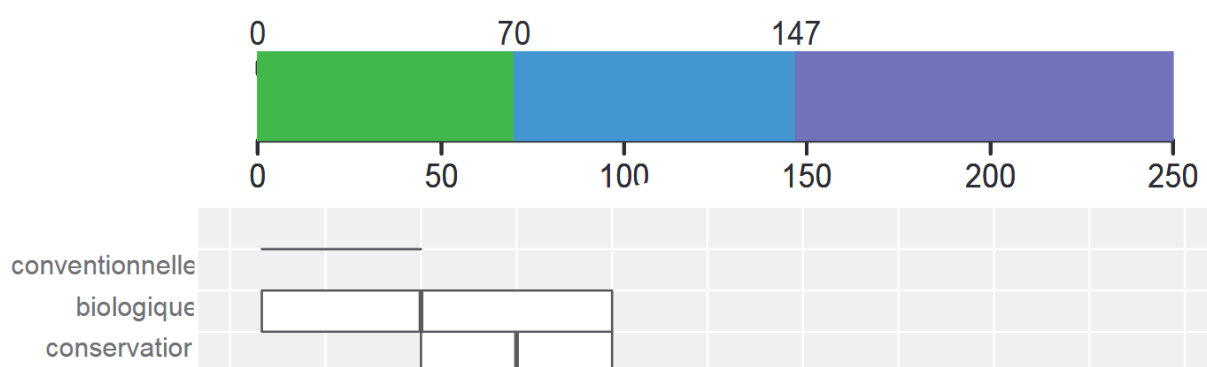


Figure 9: Gammes de valeurs de densité de vers de terre (individus/m²) en Wallonie (Vincent *et al.*, 2019)

La qualité d'indicateur que représentent les vers de terre est également due à leur sensibilité aux changements environnementaux. Ils sont très sensibles aux modifications de structure du sol, d'humidité, de localisation, de quantité de matière organique et autres. Cette spécificité les rend très intéressants en agriculture où leur abondance peut être le signe d'un sol en bonne santé⁴.

⁴ <https://agriculture-de-conservation.com/L-importance-de-la-biodiversite-du.html>

- **Les menaces à la biodiversité du sol**

Les activités humaines constituent l'un des facteurs principaux du déclin de la biodiversité des sols, entraînant des pertes croissantes et des taux d'extinctions alarmants partout dans le monde (Jeffery C., 2013). Pour l'Europe, plusieurs facteurs ont été identifiés par des experts comme étant des menaces à la biodiversité des sols. La Figure 10 est une pondération subjective de chaque menace par ces experts. Chaque individu a attribué une note de 1 à 10 à chaque menace. La barre la plus haute est la menace dont les experts s'accordent à dire qu'elle est la plus dangereuse pour la biodiversité de nos sols (Jeffery C., 2013).

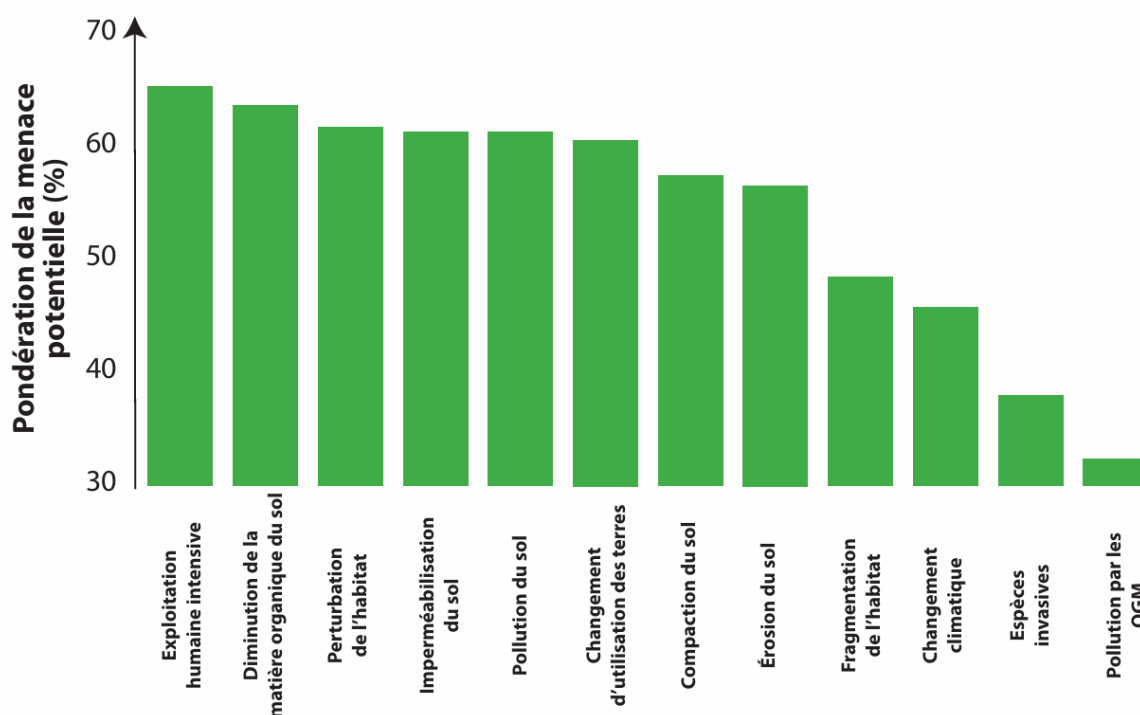


Figure 10: Classement des menaces pesant sur la biodiversité des sols européens selon leur pondération par des experts (Jeffery C., 2013)

Le changement d'utilisation des terres a remplacé nos forêts, prairies, zones humides en espaces de constructions de bâtiments et de routes. Entre 2013 et 2019, en Wallonie, l'artificialisation des terres a augmenté d'environ 45 %, ce qui équivaut à 4,3 ha/jour recouverts de béton (Kerkhofs, 2025).

L'agriculture représente 12 % des surfaces utilisées et est la première utilisation des sols (Logeais, C, 2019). L'augmentation des besoins alimentaires due à la croissance démographique a poussé le développement de l'agriculture intensive, notamment par l'utilisation de lourdes machines agricoles. Leur passage provoque une compaction empêchant le passage correct de l'eau, de l'air et de la faune de grande taille. En plus des dommages causés par les machines, les champs agricoles sont fréquemment laissés à nu une partie de l'année. C'est une négligence qui implique une plus grande érosion des sols par le vent et la pluie, emportant avec eux, une couche fertile du sol (Logeais, C, 2019).

2.2. Mesurer la biodiversité des sols

2.2.1. Pourquoi surveiller la biodiversité des sols ?

Le sol est considéré comme une ressource à protéger de même importance que l'eau et l'air depuis 2002 (Logeais, C, 2019). La surveillance de la biodiversité est identifiée en tant que priorité face aux problèmes de conservation de la biodiversité des sols depuis 2024 (Stroud *et al.*, 2025a). Son suivi apporterait une amélioration des diagnostics de santé des sols, faciliterait sa conservation et la gestion des écosystèmes du sol.

Malgré les efforts de conservation existants, il reste encore beaucoup à réaliser pour supprimer le déclin de la biodiversité en Belgique (Kerkhofs, 2025). L'objectif est donc d'intégrer une démarche de développement durable pour assurer la santé et la qualité des sols avec un maintien de leurs services écosystémiques à long terme. Cette surveillance repose sur des indicateurs capables de refléter l'état des fonctions et des services écosystémiques du sol (Eglin et Cousin, 2021).

Parmi les trois catégories d'indicateurs de qualité des sols : chimiques, physiques et biologiques, ces derniers se démarquent notamment par leur facilité d'observation des organismes. Plusieurs groupes d'organismes parmi la macrofaune sont proposés comme bioindicateurs : les nématodes, les collemboles, les acariens et les vers de terre. Chaque groupe apporte une information supplémentaire à l'état global du sol qu'il est important de savoir évaluer (Bünemann *et al.*, 2018).

2.2.2. Les méthodes standard pour mesurer la macrofaune

- **Capture et observations**

Pour étudier la macrofaune, un grand nombre d'approches existe au vu de leur abondance, biodiversité et habitats variables. Il n'y a donc pas de méthode unique mais plutôt un ensemble de méthodes, chacune avec ses propres spécificités, avantages et limites.

Pour ces organismes de plus grande taille, comme les vers de terre, une approche répandue est celle de la capture et des observations via un tri manuel. Il suffit d'excaver un petit bloc de terre à partir duquel un tri manuel est effectué. Cette méthode permet d'éviter l'utilisation de produits chimiques, toxiques et d'éviter le transport d'eau (Singh, Singh Kahlon et Vig, 2015). Elle a également l'avantage d'obtenir des informations concernant les densités et les espèces. En revanche, elle entraîne une forte perturbation du milieu et nécessite beaucoup de temps et de travail.

Une seconde procédure serait l'extraction à la moutarde. Elle consiste à verser une solution de poudre de moutarde diluée, et arroser la surface étudiée avec 10 à 20 litres de la solution par mètre carré. Cette solution irrite la peau des vers de terre, les forçant à remonter à la surface, où ils peuvent être collectés (Chan et Munro, 2001). C'est une méthode sans danger pour l'environnement et s'avère également efficace pour extraire les espèces anéciques se logeant en profondeur. En revanche, elle nécessite de grandes quantités d'eau.

2.2.3. Méthodes physiques et instruments

- **Principe de l'éco-acoustique**

Au cours de ces dernières années, les pratiques utilisées pour réaliser un suivi de la macrofaune du sol ont évolué grâce à l'utilisation de l'éco-acoustique (Taylor *et al.*, 2026).

L'éco-acoustique a pour principe d'étudier les bruits produits par un milieu dans son ensemble. Les sources de bruits détectées dans le sol peuvent provenir de plusieurs origines ; que ce soit (i) biologique due aux activités des espèces animales, (ii) géologique avec l'activité des mouvements de la terre ou (iii) anthropique soit les bruits produits par l'humain via des machines, train, avion... Ils peuvent être utilisés pour réaliser un suivi de la santé du sol.

La macrofaune du sol a une activité importante, en se déplaçant ou en mangeant, elle produit diverses modifications de son environnement qui peuvent être enregistrées via divers instruments de mesures (Stroud *et al.*, 2025b). La Figure 11 illustre le principe global utilisé par l'éco-acoustique. Un capteur installé dans le sol peut percevoir toutes les modifications de son environnement ; du mouvement des insectes aux gouttes de pluie qui touchent le sol. La perception de ces bruits va d'ailleurs dépendre de plusieurs facteurs. On peut espérer percevoir plus d'activité dans un sol compact, bien humidifié et où la biodiversité y est abondante. Trois types de capteurs ont été explorés dans le but de détecter la présence de macrofaune du sol ; soit les microphones, sondes piézoélectriques et les géophones.

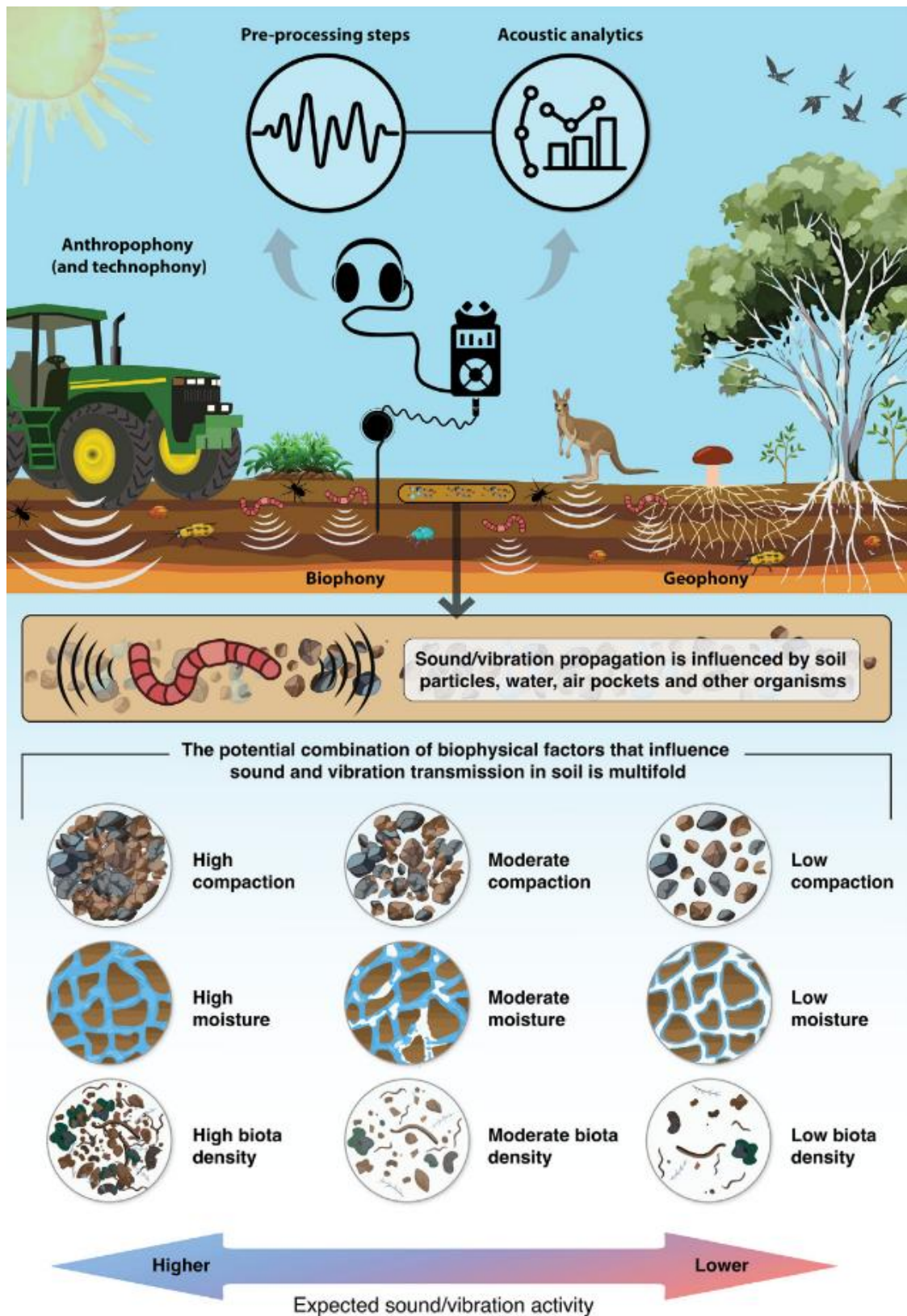


Figure 11: Principe global de l'éco-acoustique et l'influence de facteurs biophysiques sur la transmission du son (Stroud *et al.*, 2025b)

Deux paramètres fondamentaux d'un signal sonore sont sa fréquence et son amplitude. La fréquence correspond au nombre d'oscillations par seconde et s'exprime en Hertz (Hz). Chaque espèce possède sa propre signature acoustique, peu importe l'instrument utilisé (Robinson *et al.*, 2024a). Quant à l'amplitude, elle indique l'intensité du signal et s'exprime en décibels (dB).

Par son émergence récente, la fréquence de la signature acoustique provoquée par la macrofaune en contact avec les particules des sols demeure mal définie. Selon Catania, 2008, les vers de terre produisent une basse fréquence, de 80 à 100 Hz. Cette étude a été réalisée dans une forêt de Floride, utilisant les géophones pour détecter la fréquence des vibrations. Un deuxième auteur, Robinson *et al.*, (2024a), appuie ce résultat à l'aide de sondes piézoélectriques, évoquant une basse fréquence pour les vers de terre d'environ 74 Hz, allant jusqu'à 392 Hz pour les fourmis (Figure 12).

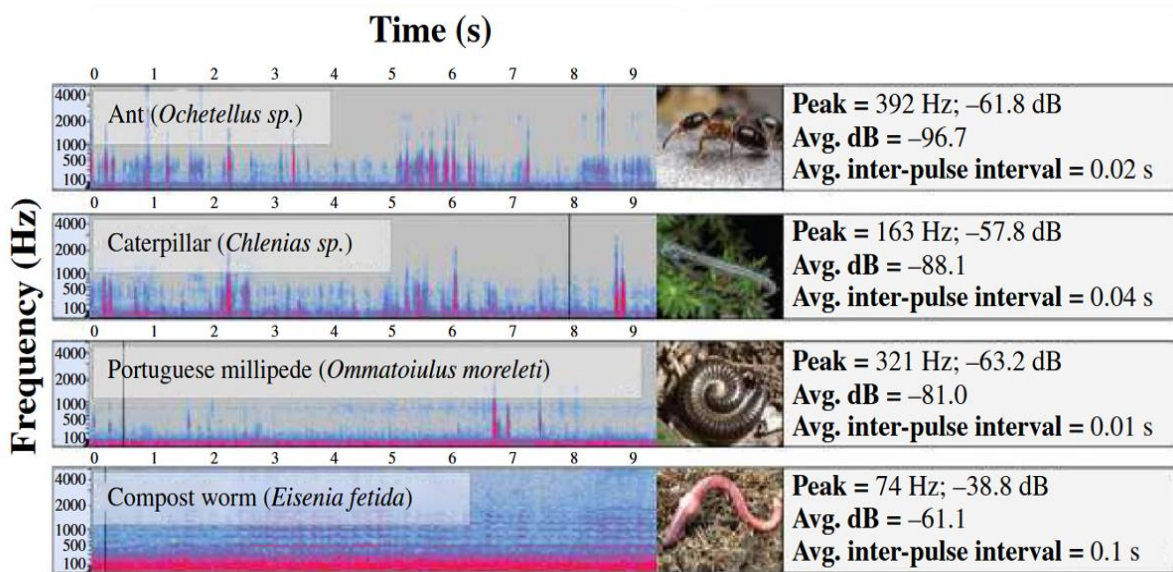


Figure 12: Spectrogramme et paramètres acoustiques associés à quatre organismes de la macrofaune (Robinson *et al.*, 2024b)

Pourtant, une autre étude (Lacoste, Ruiz et Or, 2018a), évoque que le signal produit par le frottement de la faune avec les particules du sol serait de plus haute fréquence, allant de 10 kHz à 100 kHz. Mankin *et al.*, (2021), appuient également ce résultat, suggérant que les insectes sont identifiés dans une plage de 80 à 8000 Hz.

Les résultats controversés dans ce domaine laissent donc une certaine part d'incertitude dans les connaissances autour de la signature acoustique produite par la macrofaune des sols.

- **Les microphones**

Le microphone est un transducteur, soit un appareil qui va transformer le son en un signal électrique (Stroud *et al.*, 2025a). Le fonctionnement du microphone repose sur trois étapes fondamentales. D'abord, une onde de pression fait vibrer une membrane très fine qui permet la conversion de ce signal sonore en un champ électrique. Ensuite, ce signal est amplifié et converti en valeurs numériques pour une fréquence donnée, ce qui finalement permet un stockage numérique du son.

L'utilisation de l'éco-acoustique pour surveiller les sols est une pratique émergente dans l'utilisation des microphones. Ils ont d'abord été utilisés pour détecter des infestations de larves dans les vignobles américains et aujourd'hui les microphones sont capables de détecter toutes sortes d'organismes (Robinson *et al.*, 2024b). Lors de leur déplacement, les macro-organismes produisent un signal acoustique, soit une vibration mécanique, provenant de la friction de leur corps avec les particules du sol ou de cliquetis produits en mangeant (bioturbation) (Robinson *et al.*, 2024a).

Le son est une onde mécanique longitudinale qui nécessite un support de propagation, ici l'air ou le sol, et qui dépend des variations de pressions. Comme représenté à la Figure 11, en plus de dépendre du milieu, la vitesse de propagation de l'onde dépend également de l'humidité du sol et de sa porosité. Un sol plus compact et plus humide saura davantage transmettre un signal acoustique alors qu'un sol sec et poreux atténue la propagation des ondes (Oelze, O'Brien et Darmody, 2002a).

- **La sonde piézoélectrique**

La sonde piézoélectrique est une sorte de microphone de contact (Robinson *et al.*, 2024b). Elle utilise le même principe physique qu'un microphone classique mais la différence majeure se trouve à l'endroit qui capte la déformation. La sonde contient en général une matière piézoélectrique, le plus souvent du PZT (titane zirconate de plomb) combiné à une sonde en aluminium, qui va faciliter la propagation du son jusqu'au capteur. C'est le matériau piézoélectrique lui-même qui se déforme par les vibrations mécaniques et qui génère directement un signal électrique, stocké sur carte SD ou directement écoutable (Lacoste, Ruiz et Or, 2018a).

- **Les géophones**

Semblables au microphone, les géophones ont été utiles à l'enregistrement des mouvements des vers de terre pour évaluer une technique de collecte de vers (Catania, 2008). Grâce à leur grande sensibilité, les géophones sont le plus communément utilisés pour la détection de signaux sismiques, mais leurs gammes de fréquences basses, atteignant 2 kHz, suggèrent l'utilisation émergente de cet instrument pour l'éco-acoustique.

Un géophone est un transducteur mais au lieu de convertir une variation de pression de l'air, comme le microphone, il convertit une variation des mouvements du sol en un signal électrique (Wang, 2023). Les mouvements du sol sont des ondes sismiques qui indiquent un déplacement du sol, comme des glissements de terrain ou le déplacement de la macrofaune du sol. Le principe physique derrière le géophone fonctionne à l'aide d'une bobine et d'un aimant. Selon

la loi de Faraday (Wang, 2023), le mouvement entre ces deux composantes crée une variation du flux magnétique et induit une tension électrique proportionnelle à la vitesse relative, soit au mouvement du sol.

Le géophone est un appareil avec des axes de détection distincts, contrairement au microphone qui est omnidirectionnel. Tout comme le microphone, il nécessitera un pré-traitement ainsi qu'une analyse approfondie des données enregistrées.

2.2.4. Limites des méthodes de mesures

Les avantages des méthodes manuelles seraient le coût peu élevé et la possibilité de connaître le nombre d'individus et les espèces présentes sur la zone étudiée. Leurs limites sont cet aspect ponctuel de l'échantillonnage qui est destructif et limité dans le temps (Robinson *et al.*, 2024b). Or, ces organismes sont mobiles et se déplacent continuellement dans leur environnement. En effet, d'après Mitra *et al.*, (2009), la seule action d'enfoncer une bêche dans le sol peut faire fuir les vers de terre et biaiser les prélèvements. Ainsi, un prélèvement à un instant et à un endroit donné ne sera pas totalement représentatif de la population réelle. En plus, il est également difficile d'y observer la variabilité journalière ou l'influence de certaines conditions météorologiques (Stroud *et al.*, 2025b).

Quant aux méthodes physiques, ce sont des outils non invasifs, autonomes et capables d'enregistrer les sons dans toutes les dimensions (Lacoste, Ruiz et Or, 2018a). Cette particularité signifie que le microphone capte les sons aériens et souterrains, ce qui inclut le bruit de fond produit par le vent, la pluie ou les voitures qui ne sont pas forcément recherchés lorsque l'on s'intéresse à la faune du sol. Le signal produit par les organismes nécessite donc un prétraitement et une analyse acoustique du signal. En revanche, une fois les outils pris en main, ils peuvent s'avérer très utiles pour fournir des bilans continus et précis de ce que la macrofaune trame dans nos sols.

3. Objectifs et démarche

L'évaluation de la faune des sols représente un enjeu majeur à la compréhension et à la conservation de nos écosystèmes. Parmi les organismes du sol, la macrofaune, et en particulier, les vers de terre, constitue un indicateur clé de la santé de nos sols, de par son rôle d'ingénieur écologique et de sa sensibilité aux perturbations environnementales.

Or, les méthodes standard de suivi ont leurs limites, notamment par la manutention et le manque de suivi temporel et spatial. Elles ouvrent donc la voie vers un besoin de nouvelles méthodes de suivi, davantage continues et automatisables.

Dans ce contexte, l'éco-acoustique peut offrir une alternative prometteuse. Les méthodes utilisant les microphones et les géophones ont encore peu été explorées dans le but d'étudier les dynamiques de macrofaune du sol.

Ce mémoire vise donc à suivre l'objectif suivant :

Utiliser le principe de l'éco-acoustique pour quantifier et suivre l'activité de la macrofaune des sols.

Pour répondre à cet objectif, la démarche expérimentale se réalise au cours de trois étapes successives, allant du milieu le plus contrôlé vers des conditions réelles.

- 1) Conditions contrôlées en intérieur : Deux pots, l'un témoin, le second contenant des vers de terre, sont remplis du même type de sol et sont placés dans un milieu isolé du bruit ambiant. Cette démarche a pour but d'identifier la signature acoustique des vers de terre et d'y développer une méthodologie capable de détecter leur activité.
- 2) Conditions contrôlées en extérieur : Les deux pots sont déplacés en extérieur pour exposer les vers de terre le mieux possible aux conditions environnementales (ensoleillement, pluie, température, etc.). La méthodologie de détection est appliquée et le milieu contrôlé permet l'exploration de la dynamique des vers de terre sous diverses conditions.
- 3) Conditions réelles sur milieu contrasté : La méthodologie développée est ensuite appliquée à deux parcelles contrastées de la ferme universitaire de Marbaix, une prairie et un champ. Cette étape vise à évaluer l'applicabilité de la méthode à un cas réel et à vérifier si le suivi acoustique est pertinent.

Ainsi, les résultats obtenus permettront d'identifier et de comparer les apports et limites de chaque méthode en vue d'un suivi de l'activité de la macrofaune du sol. La Figure 13 reprend les objectifs guidant la démarche d'étude au sein des trois étapes réalisées.

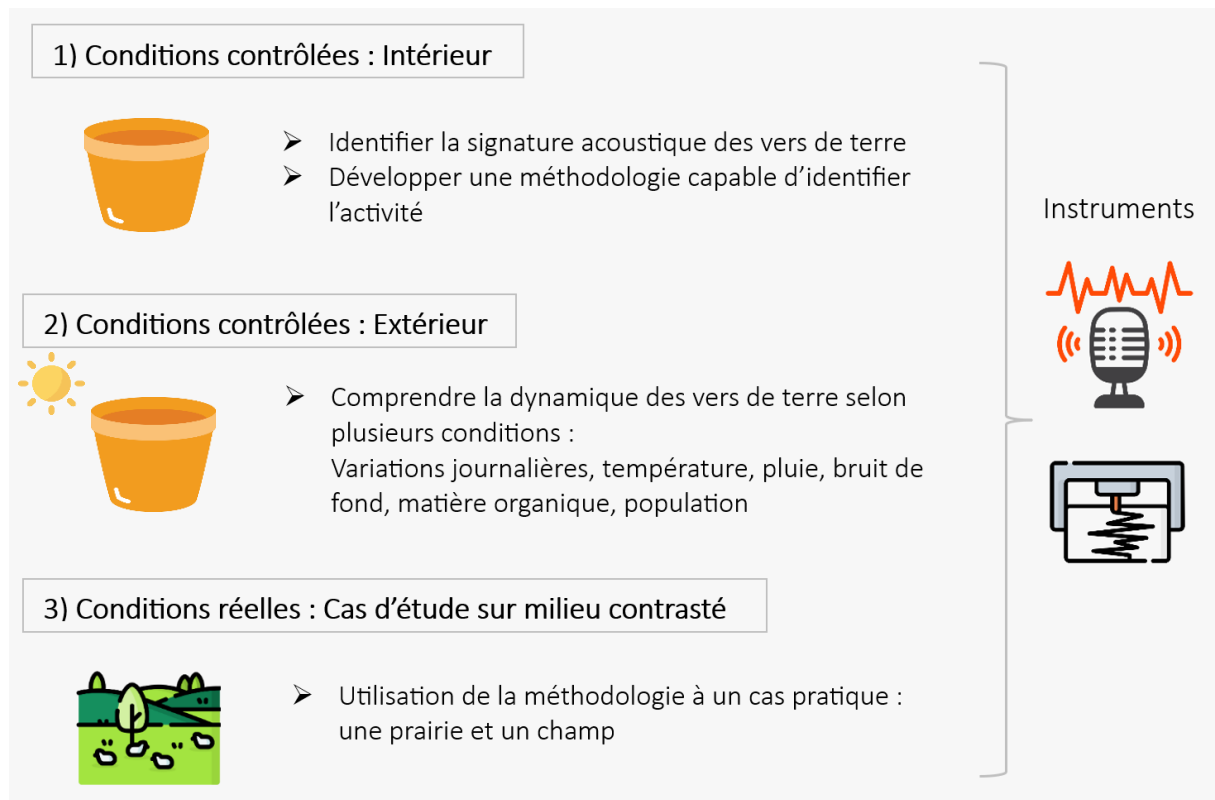


Figure 13: Schéma récapitulatif de la démarche expérimentale en trois étapes, à l'aide de microphones et de géophones

4. Matériels et méthodes

4.1. Site d'étude et contexte

Le projet se déroule dans la commune de Chaumont-Gistoux, à la ferme universitaire de Marbaix, un espace d'expérimentation de l'UCLouvain. Le climat y est tempéré océanique, avec une température annuelle moyenne de 11°C et des précipitations moyennes de 837 mm·an⁻¹ ⁽⁵⁾.

Le type de sol principal dans la région de Chaumont-Gistoux un sol limoneux à drainage naturel favorable (Figure 14). Ces sols présentent une texture limoneuse (une fraction de 2 à 50 µm), une bonne capacité de rétention d'eau, une porosité favorable à l'enracinement, ce qui en fait une combinaison idéale pour l'agriculture ⁶.

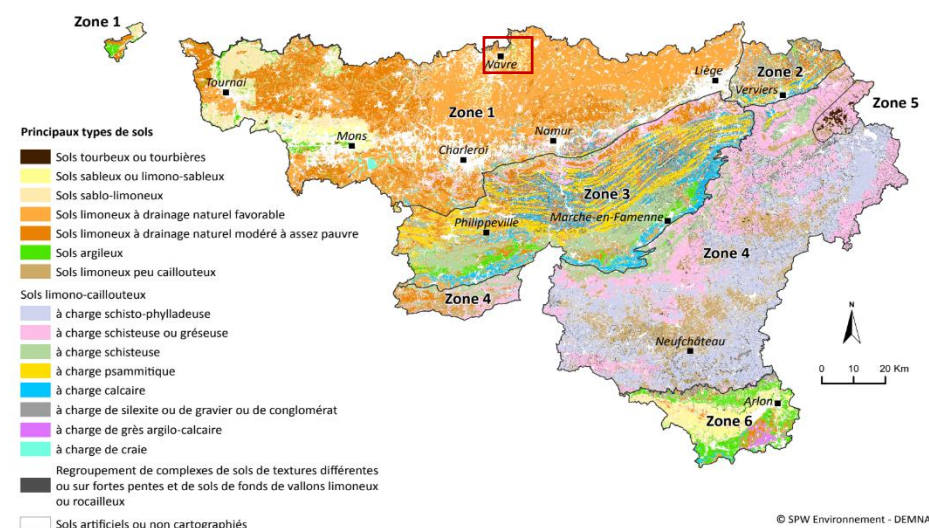


Figure 14: Carte pédologique de la Wallonie représentant les principaux types de sols (zone d'étude encadrée) (SPW – DEMNA)

Dans le contexte d'une étude acoustique, il est important de situer les éventuelles perturbations sonores aux environs de la ferme de Marbaix. En effet, l'autoroute E411 se situe à environ 270 mètres⁷ de l'espace d'expérimentations. Selon l'échelle du niveau sonore moyen provenant des axes routiers principaux selon l'indice Lden⁸, les points d'écoute se situent dans une plage allant de 65 à 69 dB (Annexe 3), soit un bruit similaire à celui d'une rue passante.

⁵ Meteo.be (2025)

⁶ Idverde, La nécessité d'avoir des sols en bonne santé – La journée mondiale des sols, 27 septembre 2024

⁷ geoportail.wallonie.be

⁸ L'indice Lden (L=level, d=day, e=evening, n=night) est un indicateur du niveau de bruit global pendant une journée (jour, soirée et nuit), moyenné sur une année entière. Il représente le niveau d'exposition total au bruit et est utilisé pour qualifier la gêne liée cette exposition (<https://metawal.wallonie.be/geonetwork/srv/api/records/c90878ba-eb80-467e-a410-2ade159cd7b3>)

4.2. Instruments de mesures et paramétrage

Pour cette étude, les deux types d'instruments d'enregistrement utilisés ont été recommandés et fournis par le département de sismologie et de géophysique de l'ULB. Leur expertise a permis un choix approprié aux objectifs de surveillance entrepris par ce mémoire. Chaque instrument possède ses propres spécificités techniques reprises ensemble au Tableau 1.

- **Le microphone**

Le *Song Meter Mini 2 Li-ion* utilisé (Figure 15) est un enregistreur acoustique qui permet de stocker les signaux sonores durant de longues durées. Cet appareil est idéal pour sa petite taille, sa facilité d'utilisation et sa capacité à résister aux aléas environnementaux. L'appareil est muni d'une carte microSD, de LEDs indicatrices aux statuts de l'appareil et fonctionne à l'aide de 1 à 6 batteries Lithium-ion.



Figure 15: Microphone Song Meter Mini 2 Li-ion⁹

Les configurations sont réalisées via l'application Song Meter Configuration, disponible sur smartphone ou ordinateur.

La plage de fréquences enregistrables par ce type de microphone peut aller jusqu'à 48 kHz. Son taux d'échantillonnage est réglable parmi 9 options, allant de 8000 à 96 500 Hz. Ce paramètre est lié à la fréquence émise par l'organisme cible, dans ce cas-ci, les vers de terre. La fréquence d'échantillonnage doit être paramétrée de manière à suivre la règle du Nyquist (Sanchez-Gendriz, 2021). Celle-ci impose que la fréquence d'échantillonnage doit être au minimum deux fois supérieure à la fréquence émise par la cible. Par exemple, pour détecter le chant d'un oiseau se situant aux environs de 10 kHz, il faut au minimum un taux d'échantillonnage de 20 kHz. La littérature étant partagée sur la plage de fréquence à rechercher, les experts de l'ULB ont proposé un taux d'échantillonnage de 96,5 kHz, afin d'assurer la détection du signal.

- **Le géophone**

Le modèle utilisé (Figure 16), le *SmartSolo IGU-16HR 3C 5Hz*, est un appareil qui enregistre et stocke les informations grâce à sa batterie. Il est composé de trois capteurs orthogonaux (3C) qui permettent une détection tridimensionnelle.

⁹ <https://www.wildlifeacoustics.com/>



Figure 16: Géophone - SmartSolo (geobit-instruments.com)

Le paramètre 5 Hz indique la fréquence propre de l'appareil, il est donc conçu pour détecter au-dessus de cette fréquence¹⁰. Les fréquences d'échantillonnage vont de 50 à 4000 Hz, permettant ainsi la détection de sons allant au maximum à 2000 Hz.

- **Table comparative des paramètres techniques propres aux instruments**

Tableau 1: Caractéristiques physiques des microphones et géophones

Instrument Modèle	Microphone Wildlife Acoustics Song Meter Mini 2 Li-ion	Géophone SmartSolo IGU-16HR 3C 5Hz
Dimensions (hauteur - largeur - longueur)	120x177x40 mm	187x95x103 mm
Bande passante	0 - 48 kHz	0 - 2 kHz
Taux d'échantillonnage	96,5 kHz	4 kHz
Autonomie	1330 heures (6 batteries Li-ion)	30 jours
Prix indicatif	640 ¹¹ €	1000 - 2000 ¹² €

¹⁰ Smartsolo.com

¹¹ Prix sur devis, variable selon les fournisseurs

¹² Prix sur devis, variable selon les fournisseurs

4.3. Étape 1 : Conditions contrôlées en intérieur

4.3.1. Échantillonnage, tri et installation

Deux pots ont été utilisés, l'un contenant une population de vers de terre, l'autre comme témoin, sans macrofaune. Les pots font 50 centimètres de diamètre et ont une contenance de 90 litres.

La terre est récoltée sur le terrain adjacent au champ, soit une vingtaine de mètres plus loin, donc il est supposé que la terre soit similaire à celle de la ferme. Cette supposition est importante pour l'interprétation des résultats puisque les conditions du sol vont influencer la propagation des ondes ou déformations du sol (Oelze, O'Brien et Darmody, 2002b).

Les échantillons de terre provenant de la prairie confirment bien le caractère limoneux du sol (Figure 17). Le sol, lorsque humidifié, se compacte bien mais pas suffisamment que pour satisfaire le test du boudin qui indique un sol argileux (Collin et Lelievre, 2022).



Figure 17: Échantillon de sol prélevé sur la prairie de la ferme de Marbaix

Pour les deux pots, la terre a d'abord été triée manuellement (Figure 18) pour retirer la macrofaune présente. Parmi les individus présents, les vers de terre sont la quasi-totalité des individus repérés, bien que des cloportes ou araignées s'y trouvaient occasionnellement. Les vers de terre retrouvés à la ferme de Marbaix sont des lombrics communs, *Lumbricus terrestris*. Ils vivent dans les villes, forêts et campagnes et ont une longévité de 3 à 4 ans¹³.

Les organismes autres que les vers de terre ont donc été négligés au vu de leur grande minorité. Tous les individus retrouvés ont été mis de côté pour effectuer un comptage et les replacer dans le pot destiné à la macrofaune. Au total, une quarantaine de vers ont été collectés dans les 15 premiers centimètres du sol et sur l'ensemble des deux volumes de terre. Afin de maximiser la chance de repérer les individus dans les conditions contrôlées, d'autres vers venant de plusieurs zones de la ferme ont été ajoutés. Au total, environ 100 vers de terre ont été placés dans le pot expérimental, et il est supposé que ce nombre reste constant.

¹³ <https://renature.brussels/fr/hotel/animaux/lumbricus-terrestris>



Figure 18: Tri manuel de la macrofaune pour le remplissage des pots expérimentaux

Une fois les pots remplis, ils sont placés en premier temps dans un hangar de la porcherie (vide) afin d'isoler les pots du bruit ambiant (Figure 19). Placer les pots d'abord en intérieur permet une facilitation de la création de la méthodologie en diminuant les effets dus au vent et aux bruits externes. La pièce possède deux larges fenêtres qui laissent la lumière passer en journée. Une couche de paille est déposée à la surface des pots dans le but d'améliorer l'isolation. Enfin, les instruments seront placés de la même manière, à une profondeur minimale de 15 cm.



Figure 19: Pots d'expérimentation installés en conditions contrôlées en intérieur (porcherie vide de la ferme)

4.4. Étape 2 : Conditions contrôlées en extérieur

4.4.1. Installation

En second temps, les pots sont déplacés en extérieur pour la suite des expérimentations (Figure 20). Ce changement d'environnement permet à la macrofaune d'avoir des conditions climatiques similaires à celles connues dans leur milieu naturel.



Figure 20: Pots expérimentaux en conditions contrôlées en extérieur

4.4.2. Les tests réalisés sur la macrofaune

Les instruments sont placés au minimum durant 4 journées complètes afin de laisser aux vers de terre une période d'acclimatation après la perturbation liée à la pose des instruments. Ce délai permet aux vers de terre de reprendre un comportement représentatif de leur état naturel (Fründ *et al.*, 2010). Les données sont stockées sur carte SD et traitées ultérieurement à l'aide de Python.

- **La dynamique journalière**

Les instruments sont placés et enregistrent 24h/24h dans les pots.

- **La température**

La température extérieure est déterminée par la station météo *Agromet* de Louvain-la-Neuve, se situant à environ 100 mètres des pots. Les données sont collectées via la sonde de température de l'air et comparées avec l'activité détectée par la méthodologie développée. La température de l'air est préférée à la température du sol puisque les instruments sont placés juste en dessous de la surface de la terre. En effet, dans les premiers centimètres du sol, la

température est étroitement liée à celle de l'air, avec un léger amortissement et un décalage temporel (Hillel, 2003).

- **Précipitations**

L'effet de l'humidité est également observé par la station météo *Agromet* de Louvain-la-Neuve. Les événements de pluie sont enregistrés plusieurs fois afin de permettre la validation des résultats.

- **L'effet du bruit de fond**

Le niveau sonore du bruit de fond est évalué par RMS (Root Mean Square). C'est une mesure standard du bruit de fond qui mesure l'énergie moyenne du signal¹⁴. Cette méthode permet de vérifier si les bruits ambiant comme le vent, la pluie, le trafic ou les activités humaines, ont une influence sur la détection de l'activité des vers de terre.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

Où,

- N : est le nombre d'échantillons
- x_i : représente l'amplitude du $i^{\text{ème}}$ échantillon

- **L'ajout de matière organique**

Des pelures de fruits et de légumes ont été ajoutées uniquement dans le pot contenant les vers de terre (Figure 21).



Figure 21: Ajout de matière organique dans le pot contenant les vers de terre (gauche)

¹⁴ <https://www.peak-studios.de/fr/rms/>

- **Quantification de l'activité des vers de terre**

Une fois que toutes les expérimentations nécessitant la comparaison à un pot témoin sont réalisées, le dernier test consiste en l'ajout de 10 vers de terre au pot témoin. Cette manipulation a pour objectif d'évaluer si l'activité acoustique est proportionnelle à l'abondance de la macrofaune. Les résultats détermineront si la méthode peut servir d'indicateur de quantité ou uniquement de détection.

4.4.3. Calendrier des expériences réalisées

Le Tableau 2 reprend les étapes de prises de données ainsi que les informations recherchées pour chaque enregistrement.

Tableau 2: Calendrier des expériences réalisées en conditions contrôlées, à l'extérieur

	Date	Test
1	04/03/2026 – 11/03/2026	Trouver la fréquence propre aux vers de terre et développement méthodologie
2	10/03/2026 – 15/03/2026	Dynamiques journalières
3	27/03/2026 – 31/03/2026	Dynamiques journalières
4	29/04/2026 – 04/05/2026	Effet de la pluie
5	06/04/2026 – 11/05/2026	Ajout de matière organique
6	18/05/2026 – 21/05/2026	Témoin avec 10 vers de terre

4.5. Étape 3 : Conditions réelles sur milieu contrasté

L'expérience en terrain se réalise sur un milieu contrasté : une parcelle en prairie et l'autre en champ cultivé. La variabilité des milieux permet potentiellement d'obtenir des signaux variables et d'y effectuer une comparaison entre les milieux étudiés.

4.5.1. Sites d'études

La parcelle en prairie est conservée en tant que prairie permanente depuis au moins 1975. Elle est pâturée chaque saison, sans travail du sol, et l'hiver, les animaux sont rentrés dans les bâtiments (Figure 22). La parcelle en champ est utilisée tout au long de l'année avec des rotations de cultures très diversifiées (Figure 23). L'historique des pratiques indique un travail

du sol réalisé en surface à l'aide d'un déchaumeur, qui est privilégié par rapport à un labour classique.



Figure 22: Parcelle en prairie permanente



Figure 23: Parcelle en champ cultivé

4.5.2. Installation des instruments

Au total, deux microphones et deux géophones sont utilisés. Chaque parcelle est équipée d'un point d'écoute composé d'un microphone et d'un géophone, enfouis à 15 cm dans le sol et espacés d'environ 30 centimètres. Les deux points d'écoute sont placés de manière aléatoire dans la prairie et le champ.

4.5.3. Calendrier des expériences réalisées

Deux campagnes de collectes de données ont été réalisées en milieu réel. Une première le 07/08/2025 au 13/08/2025 et une seconde du 13/05/2026 au 17/07/2026.

4.6. Traitement des données et méthodologie de détection

4.6.1. Les microphones

- **La visualisation des enregistrements**

Les enregistrements obtenus ont été visualisés à l'aide du logiciel de traitement audio *Audacity*. L'interface propose un affichage de l'onde sonore et de nombreux outils facilitant son interprétation. Des commandes simples permettent une vue spectrogramme, un nettoyage du bruit de fond ou l'application de bandes de fréquences choisies. Un spectrogramme est une visualisation d'un signal au cours du temps et de la fréquence (Constantinescu et Brad, 2023a).

L'avantage de ce logiciel est la variabilité des types de format pouvant être exportés. Dans le cas des microphones, les fichiers récupérés étant en format 'WAV', ils permettent une compatibilité directe avec le logiciel.

Le même traitement est appliqué à plusieurs fichiers sonores dans le but de mettre en évidence les perturbations créées par les vers de terre. La première étape consiste à déterminer la bande de fréquence où l'activité est la plus présente. Le spectrogramme permet d'afficher la fréquence en fonction du temps ainsi que l'amplitude du signal. Cette étape, en plus de la comparaison avec le pot témoin, a permis l'identification de la signature acoustique des organismes présents dans le pot expérimental. Les bruits parasites venant d'origine anthropique, comme l'autoroute à proximité, le passage des tracteurs dans la ferme ou les vaches à proximité, doivent être exclus. Ce nettoyage du bruit de fond a été réalisé via les commandes suivantes :

- Réduction du bruit de fond : l'utilisateur sélectionne d'abord un segment où seul le bruit de fond est présent, ce qui permet au logiciel d'identifier les fréquences appartenant au bruit ambiant (dominé par les basses fréquences < 1 kHz). Le logiciel applique ensuite une atténuation en fonction du segment sélectionné pour soustraire le bruit de fond à l'enregistrement audio¹⁵.
- Égalisation et filtres : un filtre passe-bande est appliqué afin d'atténuer les bruits hors de la bande de fréquence recherchée.

La visualisation des enregistrements via Audacity a permis la vérification des bandes de fréquences d'intérêt à l'aide de spectrogrammes, en plus d'améliorer la compréhension du signal perçu.

- **Développement de la méthodologie**

Un des objectifs étant la compréhension des dynamiques de la macrofaune, une méthodologie est donc développée dans le but de repérer automatiquement l'activité des organismes. Cette méthode est basée sur la détection des bruits faits par les vers de terre lorsqu'ils déplacent les particules de terre. En se déplaçant, ce bruit distinct de frottement est décrit comme des

¹⁵ https://manual.audacityteam.org/man/noise_reduction.html

‘cliquetis’. Au cours d’un enregistrement réalisé à l’aide des microphones, de nombreux bruits interférant avec les cliquetis sont également identifiés. Le flux de traitements et de décisions suivi pour isoler les cliquetis est présenté selon un schéma décisionnel (Figure 24) où le signal est d’abord nettoyé puis des seuils sont appliqués pour identifier les sons recherchés.

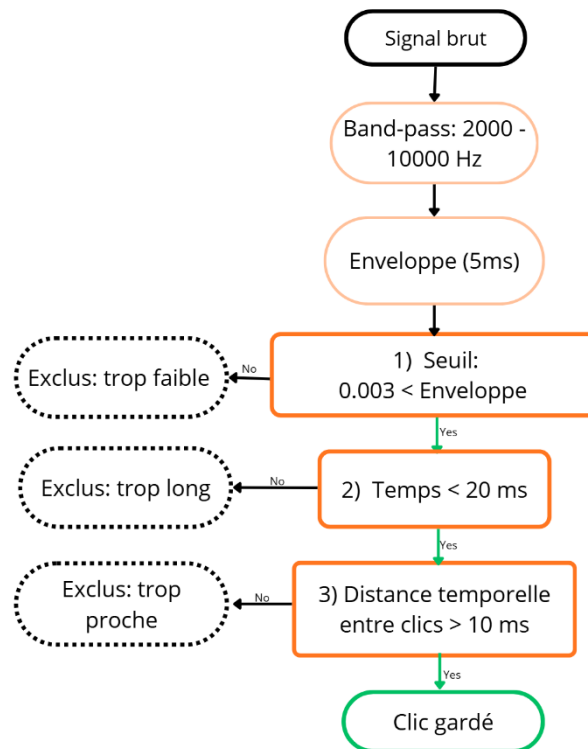


Figure 24: Schéma décisionnel de traitement audio pour la détection automatique des cliquetis de vers de terre

La première étape du traitement audio est d’atténuer et de retirer les bruits et bandes de fréquences non recherchées. Un filtre passe-bande de type *Butterworth* d’ordre 4 est implémenté avec la librairie *SciPy* de Python. Le filtre permet de ne laisser passer qu’une bande de fréquences définie entre deux bornes et l’ordre détermine la raideur de la pente d’atténuation¹⁶, soit la coupure due à la transition avec les fréquences hors de la bande passante.

La seconde étape est de rechercher les cliquetis parmi le signal filtré. Un signal audio est conformément représenté selon l’amplitude en fonction du temps. L’amplitude représente l’intensité du signal sonore. Plus l’amplitude est grande, plus le son est fort, et inversement (Constantinescu et Brad, 2023a). Une particularité de l’amplitude est que le signal est oscillant, donc il sera alternativement positif et négatif.

Afin de faciliter le traitement du son, une enveloppe autour du signal d’amplitude est souvent effectuée. On applique une fenêtre de taille fixe pour calculer une moyenne sur une section du

¹⁶ <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.butter.html>

signal et elle permet une courbe plus lissée, suivant l'amplitude générale, mais sans tenir compte des oscillations (Figure 25). Une enveloppe permet une visualisation continue et une interprétation de l'intensité et durée du signal perçu (Constantinescu et Brad, 2023b).

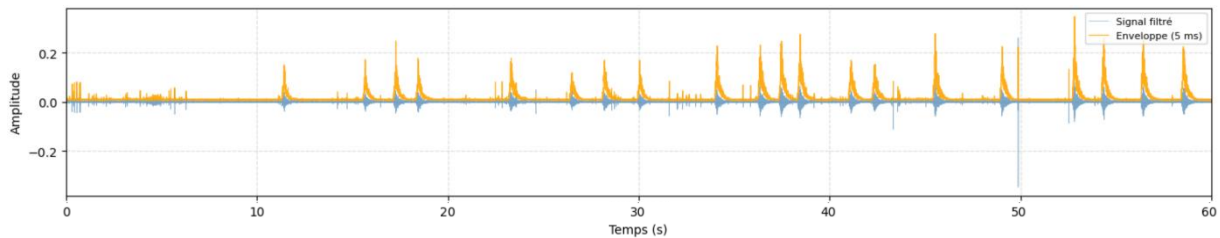


Figure 25: Signal filtré et enveloppe autour d'un signal audio

Une fois le signal filtré et l'enveloppe créée, la détection des cliquetis dépend d'un ensemble de trois paramètres complémentaires : un seuil d'amplitude, une durée maximale et une distance minimale. Ces paramètres ont été déterminés empiriquement par vérification visuelle et auditive sur un ensemble d'enregistrements représentatifs. La validation des trois paramètres permet la conservation d'un événement étant considéré comme un bruit produit par les mouvements de vers de terre.

Le premier seuil de détection correspond à la valeur minimale d'énergie de l'enveloppe où un événement est considéré comme potentiellement biologique. Si un signal est trop faible alors il n'est pas comptabilisé pour éviter la détection de fausse activité (Mankin *et al.*, 2021). La particularité des bruits entendus est que le frottement des vers de terre contre les particules de terre produit des événements impulsifs et très brefs (Lacoste, Ruiz et Or, 2018b).

Le second seuil est la durée maximale d'un événement, signifiant que le son doit être assez bref pour ne pas être confondu avec un son dont la signature est plus longue (Mankin *et al.*, 2021). Ce critère est essentiel puisqu'il permet d'exclure les bruits plus longs provenant de l'environnement tels que les chocs mécaniques, les vibrations et les bruits d'oiseaux ou de bovins.

Le troisième seuil est une distance minimale entre deux événements, basé sur le principe du Hit Lockout Time, standard en émission acoustique (Ghadarah et Ayre, 2023). En raison des oscillations résiduelles de l'enveloppe après un signal, le paramètre de distance minimale vise à éviter la comptabilisation d'un même événement acoustique.

4.6.2. Les géophones

La visualisation des enregistrements audio via les microphones a permis une distinction de la trace acoustique laissée par la macrofaune se trouvant dans les pots expérimentaux. Ainsi, la plage de fréquence propre aux vers de terre a exclu l'utilisation des géophones, dont les limites physiques ne permettent pas la détection. Puisque la fréquence propre dépend uniquement de l'émetteur, et non de l'instrument qui la mesure (Knight *et al.*, 2024), le géophone a dû être

exclus. En effet, le seuil maximal de détection des géophones se trouve en dessous de la plage de fréquence d'intérêt repérée par les microphones.

4.6.3. Analyses statistiques des données

Les données récoltées de l'activité de la macrofaune sont analysées en nombre de cliquetis par demi-heure. Ce sont des données asymétriques et dispersées, excluant les tests paramétriques classiques, tels que l'Anova ou t-test qui supposent une distribution normale et homogène. En conséquence, les tests statistiques utilisés sont non paramétriques et différents selon les jeux de données.

Les statistiques descriptives, incluant les moyennes, les écarts-types et les médianes sont calculés à l'aide du langage de programmation Python (version 3.10) et des bibliothèques NumPy (Harris et al., 2020) et SciPy (Virtanen et al., 2020). La p-valeur est calculée pour chaque étape. Celle-ci indique pour un résultat donné, quelle est la probabilité que le hasard seul explique ce résultat. Une valeur de $p < 0,05$ est considérée comme statistiquement significative. Ce test n'est cependant pas entièrement fiable à lui seul donc davantage de tests statistiques sont utilisés pour permettre la meilleure comparaison entre les jeux de données.

Le choix des tests statistiques est guidé par la nature des données et les objectifs de chaque étape. Le Tableau 3 résume l'ensemble des tests utilisés pour chaque étape.

Lors de la première étape, la comparaison d'activité entre le pot témoin et expérimental vise à évaluer que les détections correspondent bien à l'activité des vers de terre et non à des erreurs de la méthodologie. Le test de Mann-Whitney est utilisé pour comparer deux jeux de données indépendants et sans distribution normale. Le résultat de ce test est quantifié par le coefficient rank-biserial (r), soit une taille d'effet, qui interprète la probabilité d'un groupe à être supérieur à l'autre. La taille d'effet s'interprète de la façon suivante : (1) $|r| < 0,1$: négligeable, (2) $0,1 - 0,3$: faible, (3) $0,3 - 0,5$: moyen, (4) $|r| > 0,5$: fort.

La deuxième étape nécessite une analyse via d'autres statistiques étant donné la diversité des types de tests effectués. Pour la variation intra-journalière, le test de Mann-Whitney compare la distribution par conditions de nuit (20 à 8h) et de jour (8 à 20h) dans le but de détecter un rythme circadien. La part de variance expliquée dans un cycle jour/nuit est quantifiée par un facteur de saisonnalité F_s . Si ce facteur est supérieur à 0,5, alors il indique que plus de la moitié de la variance du signal est expliquée par ce rythme circadien.

Ensuite, l'activité des vers de terre est comparée à des variables continues, soit la température, la précipitation, et le bruit de fond. Afin d'éviter de confondre la part de variance expliquée par le rythme circadien, une décomposition STL (Seasonal Trend decomposition using LOESS) est appliquée (Cleveland, Cleveland et Terpenning, 1990). Cette étape permet la décomposition du signal en trois composantes : la tendance, la saisonnalité et les résidus. Elle est primordiale par son isolement du rythme circadien, facilitant l'interprétation de l'influence des variables continues sur l'activité des vers de terre. La corrélation de Spearman (ρ (rho)) est calculée en deux temps : avant et après STL. Si le coefficient est proche de 0, la corrélation est négligeable,

au contraire plus elle est proche de 1, plus elle est forte. Ce choix permet de valider que la corrélation est bien due à l'influence des variables et non par le rythme circadien. Uniquement la corrélation sur les résidus après décomposition STL permet de révéler l'effet de chaque variable.

Concernant l'effet d'un ajout de matière organique, les périodes avant et après l'ajout seront comparées via un test de Mann-Whitney. Les médianes et variances entre périodes diurnes et nocturnes seront également comparées.

Le dernier test au sujet de l'influence de la densité de population a pour objectif d'évaluer si le signal acoustique est proportionnel à l'abondance de la macrofaune. Le test de Mann-Whitney sera utilisé pour comparer l'activité dans le pot de 100 individus à celui de 10 individus.

Enfin, la troisième étape reprend le même test de Mann-Whitney pour comparer l'activité entre champ et prairie. La corrélation de Spearman est également appliquée dans le but d'évaluer si les dynamiques observées sont synchrones ou non, pouvant potentiellement révéler un biais.

Tableau 3: Récapitulatif et justification des tests statistiques utilisés pour chaque étape

Étape	Type de données comparées	Test statistique	Justification
1	2 groupes d'activité	Mann-Whitney (r)	2 groupes indépendants, non normal
2	Variation intra-journalière/rythme circadien	Mann-Whitney (r) + F_s	2 groupes indépendants, non normal + Quantification de la saisonnalité (F_s)
2	Activité et température/précipitations/bruit de fond	Spearman + STL	Variable continue + contrôle du circadien
2	Activité et matière organique	Mann-Whitney (r) + F_s	2 groupes indépendants, non normal + Quantification de la saisonnalité (F_s)
2	Activité et population	Mann-Whitney (r)	2 groupes indépendants, non normal
3	2 groupes d'activité	Mann-Whitney (r)	2 groupes indépendants, non normal

5. Résultats et discussion

5.1. Validation de la méthodologie

5.1.1. La signature acoustique des vers de terre

La première étape du traitement des résultats est le repérage de la bande de fréquence à laquelle les mouvements des vers de terre vont émettre. L'utilisation d'Audacity permet la visualisation du spectre audio pour en repérer les fréquences d'intérêt (Figure 26).

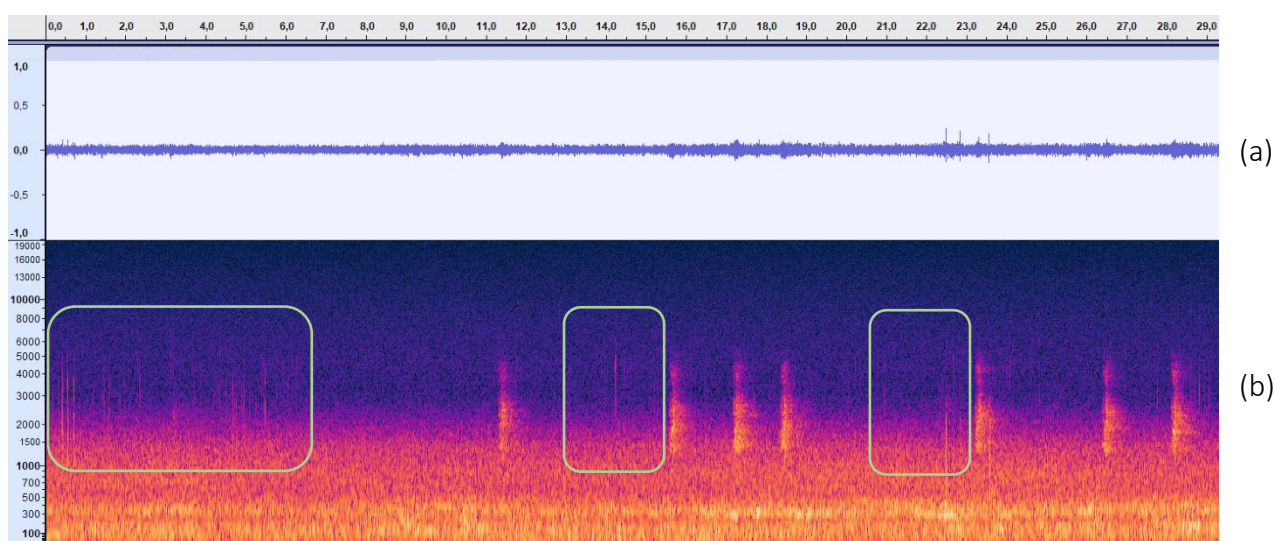


Figure 26: Visualisation du spectre audio via Audacity d'un enregistrement au microphone dans le pot avec vers – (a) signal brut, (b) spectrogramme avec mise en évidence des évènements acoustiques produits par les vers de terre

Le signal brut est affiché selon l'amplitude en fonction du temps (a), en secondes, et de son spectrogramme associé (b). Le spectrogramme donne les informations des bandes de fréquences actives. De 0 à 2 kHz, le bruit de fond y est élevé et constant : vent, trafic, etc. À partir de 2 kHz et allant jusqu'à 10 kHz, deux types de signaux sont observés, certains sont brefs et soudains et d'autres ont une signature plus longue. Les sons brefs observés en début d'enregistrements correspondent aux descriptions de la littérature d'un mouvement de vers de terre dans le sol. Auditivement, ces pics sont similaires à des enfouissements dans la terre. Les seconds pics, plus longs et larges, sont ceux appartenant à la pie bavarde.

Cette hypothèse que la signature acoustique des vers de terre appartient à la bande de fréquence allant de 2 à 10 kHz est également soutenue par la visualisation de la même séquence audio venant du pot sans vers de terre. Les pics appartenant aux pies sont bien visibles alors que ceux plus courts, visibles précédemment à la Figure 26 dans les cadres verts, sont ici absents à la Figure 27.

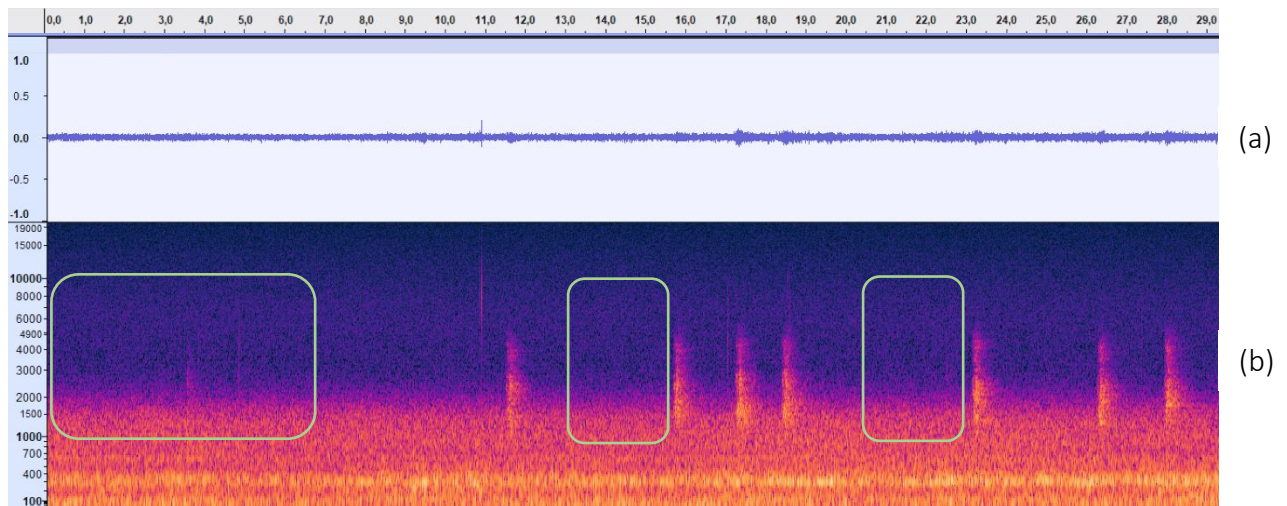


Figure 27: Visualisation du spectre audio via Audacity d'un enregistrement au microphone dans le pot sans vers – (a) signal brut, (b) spectrogramme avec mise en évidence des évènements acoustiques manquant par rapport à la Figure 26

5.1.2. La quantification de l'activité des vers de terre

Pour les enregistrements du microphone, la quantification de l'activité se fait d'abord par un nettoyage du bruit de fond (Figure 28). Le signal brut (Figure 28a) des microphones est traité avec un filtre passe-bande, soit en dessous de 2 kHz et au-dessus de 10 kHz (Figure 28b). Un filtre passe-bande laisse uniquement passer les fréquences de la zone d'intérêt et atténue tout ce qui se trouve en dehors.

Ensuite, le signal filtré est bordé d'une enveloppe fixée à 5 ms (Figure 28c). Ce choix expérimental est motivé par plusieurs contraintes de durée et de résolution. D'abord, les cliquetis produits par la friction des corps de vers de terre sur les particules de sol sont des événements impulsifs de l'ordre des millisecondes. La fenêtre choisie doit être capable de lisser les oscillations à basse amplitude tout en préservant la résolution temporelle nécessaire à la distinction entre deux événements. Le choix de 5 ms a ensuite été validé visuellement en essayant différentes tailles de fenêtre.

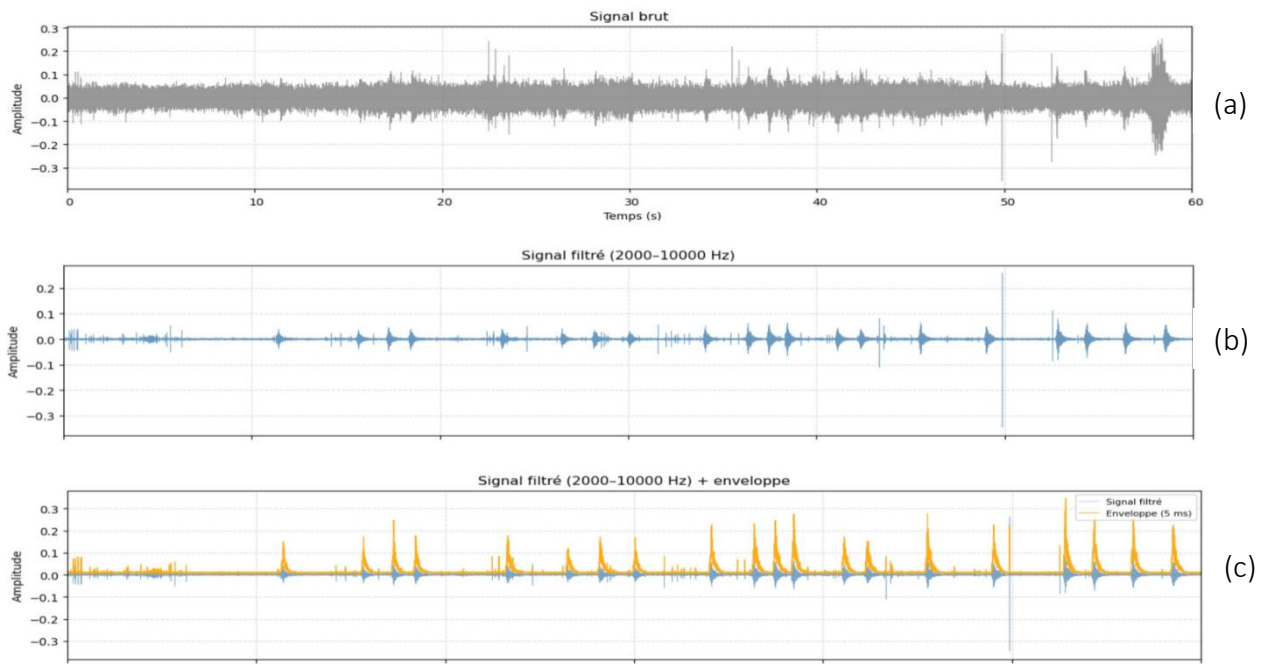


Figure 28: Structure du traitement audio appliqué à un enregistrement au microphone – (a) signal brut, (b) signal filtré après passe-bande 2-10 kHz, (c) signal filtré avec enveloppe glissante de 5 ms

Une fois le traitement audio réalisé, les paramètres de détection sont déterminés expérimentalement par validation visuelle du signal enveloppé et sur plusieurs fichiers audio représentatifs. Trois contraintes doivent être chacune respectées pour valider un son comme étant celui appartenant au mouvement des particules de terre (Figure 29).

La première contrainte est une limite de l'amplitude du signal (Figure 29a). Le seuil bas, fixé à 0,003 est la valeur minimale qu'un événement doit atteindre, sinon il est considéré comme un signal résiduel ayant peu d'intérêt. Lacoste, Ruiz et Or, (2018a), indiquent que le principe de seuil bas est standard en détection acoustique pour distinguer un signal du bruit de fond. Tandis que le seuil haut de 0,02 exclut les pics de trop grande énergie qui peuvent ne pas appartenir à un bruit biologique. En effet, Stroud *et al.*, (2025b) soulignent que les signaux biotiques fluctuent dans une gamme d'émissions alors que les événements abiotiques correspondent à des événements de plus haute amplitude. Ce double seuil permet le contrôle des types d'événements que l'on souhaite étudier.

La seconde contrainte est une limite de temps. La signature recherchée est brève et soudaine donc une limite expérimentale fixée à 20 ms permet l'exclusion des longs événements comme les chants d'oiseaux, les perturbations mécaniques ou autres. En effet, Mankin *et al.*, (2021), rapportent que la détection acoustique des insectes du sol repose sur un filtre passe-bande suivi de la détection d'impulsions brèves de 3 à 30 ms produites par le mouvement des insectes. La durée expérimentale de 20 ms semble cohérente avec la littérature.

La dernière contrainte est une distance minimale de 10 ms entre chaque événement pour assurer qu'ils sont bien distincts et non un bruit résiduel. Mankin, (2000), utilisent ce même principe de séparation temporelle entre impulsions afin de distinguer les signaux d'insectes de celui du bruit de fond.

Enfin, la Figure 29 représente l'application de la méthodologie sur le fichier audio sélectionné. Les cercles verts (a) indiquent les zones où l'activité des vers de terre est enregistrée et les bandes rouges (b) correspondent aux signaux qui valident l'ensemble des conditions.

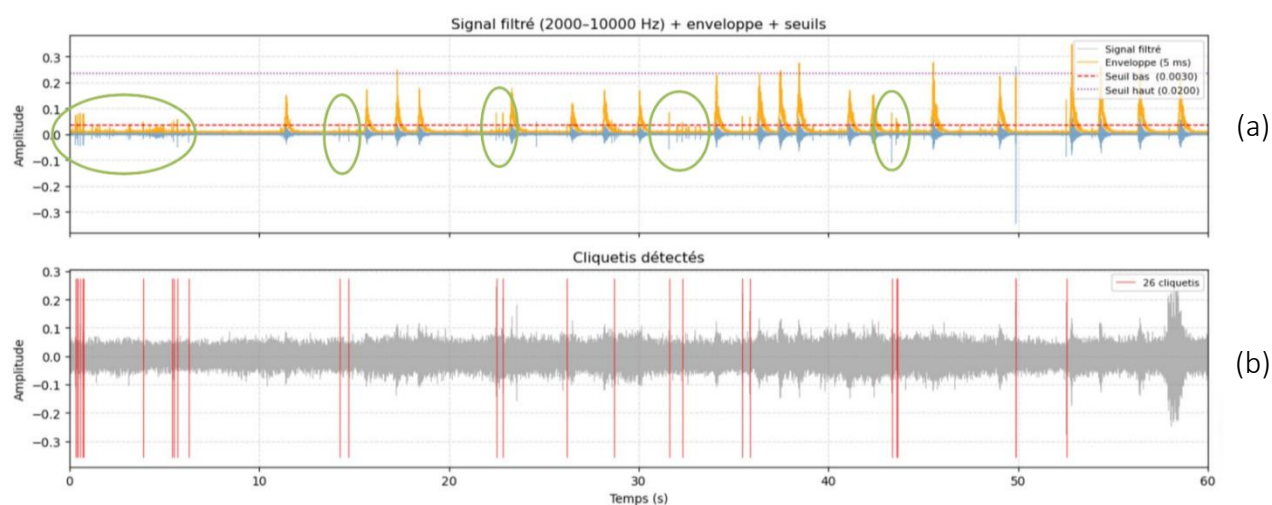


Figure 29: Détection automatique des cliquetis sur signal filtré et avec seuils – (a) application des seuils et mise en évidence des évènements acoustiques créés par les vers de terre, (b) représentation par bandes rouges des cliquetis validés

5.1.3. Validation de la méthodologie

La Figure 30 représente la comparaison de l'activité entre le pot expérimental (environ 100 vers de terre) et le pot témoin, obtenue par la méthodologie développée.

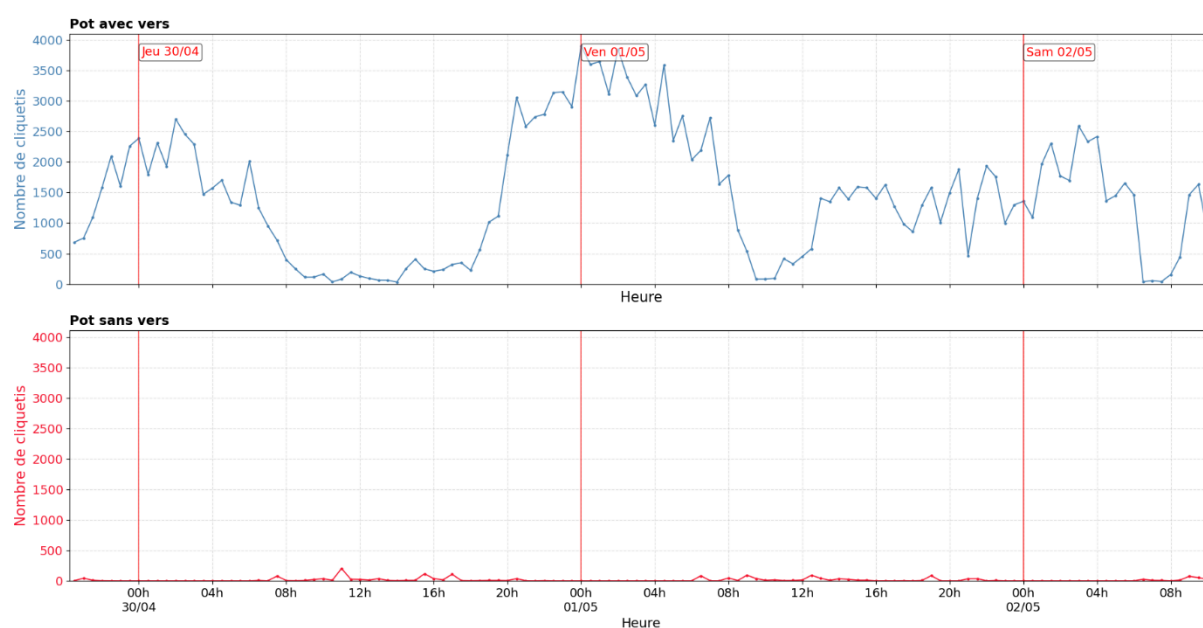


Figure 30: Comparaison de la quantité de cliquetis détectés entre le pot avec et sans vers de terre

Cette comparaison indique une variation de l'activité au sein du pot contenant les vers de terre alors que le pot témoin ne présente que peu de réponse. Ces détections au sein du pot témoin peuvent être dues à la méthodologie qui n'est pas totalement adaptée ou peut-être à quelques individus ayant été ratés lors du tri manuel de la terre.

La différence d'activité entre les pots suggère tout de même que la méthodologie utilisée pour quantifier l'activité de la macrofaune est adaptée au cas d'étude. Le pot sans vers ne représente que 0,8 % du signal repéré par le pot avec vers. En moyenne, 1623 clics/30 min avec vers, contre seulement 13 pour le pot sans vers. Cette différence est hautement significative, la probabilité d'observer une différence semblable si les deux pots étaient identiques est de $p = 2.3 \times 10^{-24}$. Les faux positifs de la méthode de détection peuvent donc être considérés comme négligeables.

5.2. Analyse au microphone de l'activité des vers de terre

5.2.1. Un cycle circadien

La Figure 31 reprend la variation de l'activité au cours d'une semaine type du mois de mai à la ferme de Marbaix. La courbe grise visualise la totalité des cliquetis enregistrés sur un fichier de 30 minutes et la courbe bleue en fait une moyenne glissante sur 4 heures, ce qui permet de mieux comprendre la tendance globale.

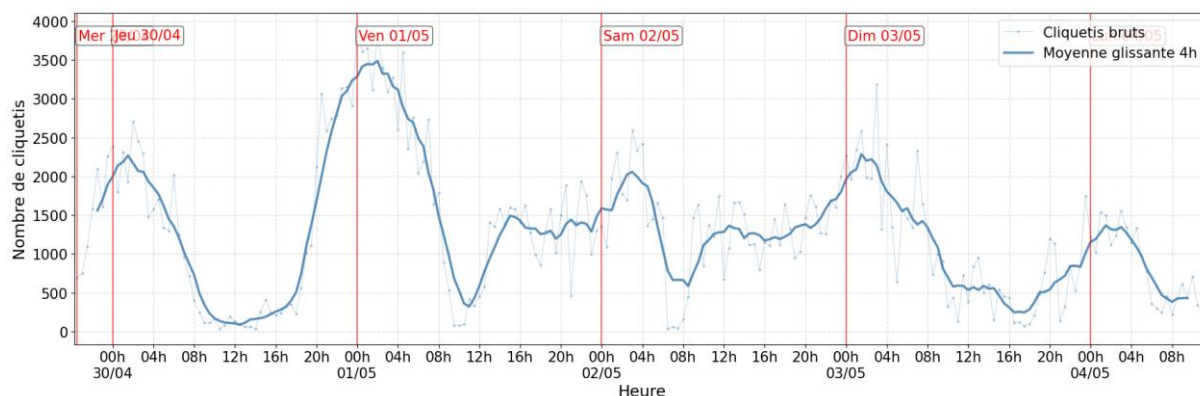


Figure 31: Évolution temporelle de l'activité acoustique des vers de terre sur une semaine type (29 avril au 4 mai 2026)

L'activité des vers de terre semble avoir des variations journalières. Tous les jours ne sont cependant pas semblables à cause de facteurs externes comme par exemple, la température. Afin de repérer la présence d'un rythme circadien, chaque enregistrement est classé par période diurne (8h – 19h59) et nocturne (jour précédent 20 – 7h59) en fonction de son heure. La médiane des cliquetis est préférée à la moyenne afin d'éviter que les valeurs extrêmes ne

prennent le dessus sur la tendance générale. Le Tableau 4 indique la médiane observée sur chaque période nuit/jour sur l'ensemble de la semaine étudiée. Les journées du 29 avril et 04 mai sont exclues afin d'éviter les disparités entre les données puisque les journées ne sont pas complètes.

Tableau 4: Comparaison des médianes d'activité diurne et nocturne des vers de terre

Jour	Période	Médiane	Différence : Nuit > Jour
30/04	Jour	216,5	+ 641,3%
	Nuit	1605	
01/05	Jour	1142	+ 161,3 %
	Nuit	2984,5	
02/05	Jour	1138,5	+ 30 %
	Nuit	1480	
03/05	Jour	465,5	+ 258,4 %
	Nuit	1668	

L'analyse entre le jour et la nuit indique que pour la totalité des 4 cycles étudiés, tous présentent une activité supérieure la nuit à celle de la journée. Un test de Mann-Whitney indique une différence significative ($p < 0,001$) et un effet élevé de corrélation ($r = 0,77$). Le cycle jour/nuit explique à lui seul 44,6 % de la variance totale, suggérant une certaine influence d'un rythme circadien.

En effet, la littérature indique une variation de l'activité au fil des saisons (Bennett, 1968) ainsi qu'une variation circadienne des vers, *Lumbricus terrestris*. Ces vers de terre sont hautement sensibles à la lumière donc ils sont actifs durant la nuit, où ils remontent en surface pour récupérer de la matière organique et s'enfouissent plus profondément pendant la journée (Cai, Bennie et Gaston, 2026).

5.2.2. Une influence de la température

La représentation brute de l'activité des vers de terre en fonction de la température de l'air suggère que ceux-ci y sont fortement influencés (Figure 32a). Ces résultats suggèrent que la nuit, lorsque la température baisse, l'activité des vers de terre augmente et inversement en journée. Pourtant, cette observation est biaisée par le rythme circadien vu précédemment. Il faut donc décomposer le signal et isoler le rythme circadien pour observer les vraies corrélations.

Afin de quantifier la part de la température dans l'activité des vers de terre et indépendamment de ce rythme, une décomposition STL est appliquée au signal brut (Cleveland, Cleveland et

Terpenning, 1990). Cette méthode permet une décomposition du signal en trois composantes clés :

- La tendance : l'évolution de l'activité au cours de l'enregistrement (Figure 32b).
- La saisonnalité : le motif périodique correspondant au rythme circadien (Figure 32c).
- Les résidus : la part du signal qui n'est expliquée ni par la tendance ni par le rythme circadien, donc potentiellement l'effet dû à une variable extérieure (Figure 32d).

Le facteur de saisonnalité (F_s) est défini comme le rapport entre la variance de la composante saisonnière et la variance du signal brut (source), soit $F_s = 0,679$. Ce résultat indique que 67,9 % du signal est expliqué par le rythme circadien.

Pour expliquer les 30 % restants, la corrélation de Spearman est appliquée aux résidus de la décomposition STL, donnant $\rho = -0,031$ et une p-valeur, $p = 0,64$. La relation est donc non significative et on ne peut pas déduire que la température est responsable de l'activité des vers de terre sur l'enregistrement réalisé.

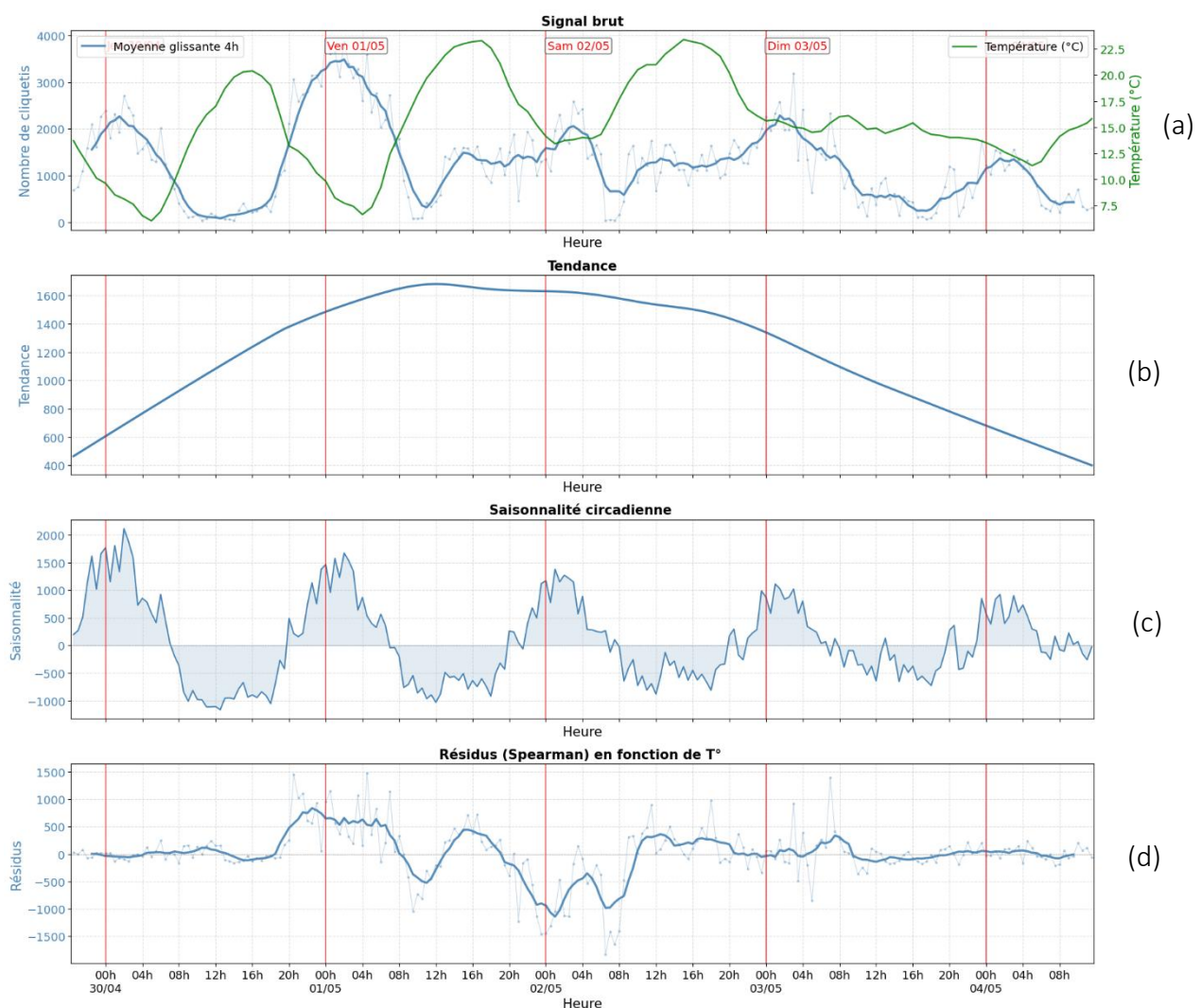


Figure 32: Décomposition STL du signal d'activité en fonction de la température – (a) activité et température, (b) tendance, (c) saisonnalité circadienne, (d) résidus de corrélation de Spearman en fonction de la température

5.2.3. Une influence de l'humidité

Un épisode pluvieux a été enregistré le dimanche 3 mai 2026, la Figure 33a affiche une chute de l'activité des vers de terre lors de la pluie. Cette observation doit être interprétée avec prudence en raison du rythme circadien (Figure 33b) où l'activité diminue naturellement en journée. Pour distinguer les éventuels effets des précipitations sur l'activité des vers de terre, l'analyse sur les résidus et la décomposition STL est réalisée à la Figure 33c.

L'analyse des résidus révèle que les résidus tendent à diminuer lors du pic de pluie de 10 à 12h. Cela signifie que l'activité est inférieure à ce que le modèle basé sur le cycle circadien prédit. En revanche, les pics suivants indiquent des résidus proches de zéro ou même positifs, rendant l'effet global non significatif.

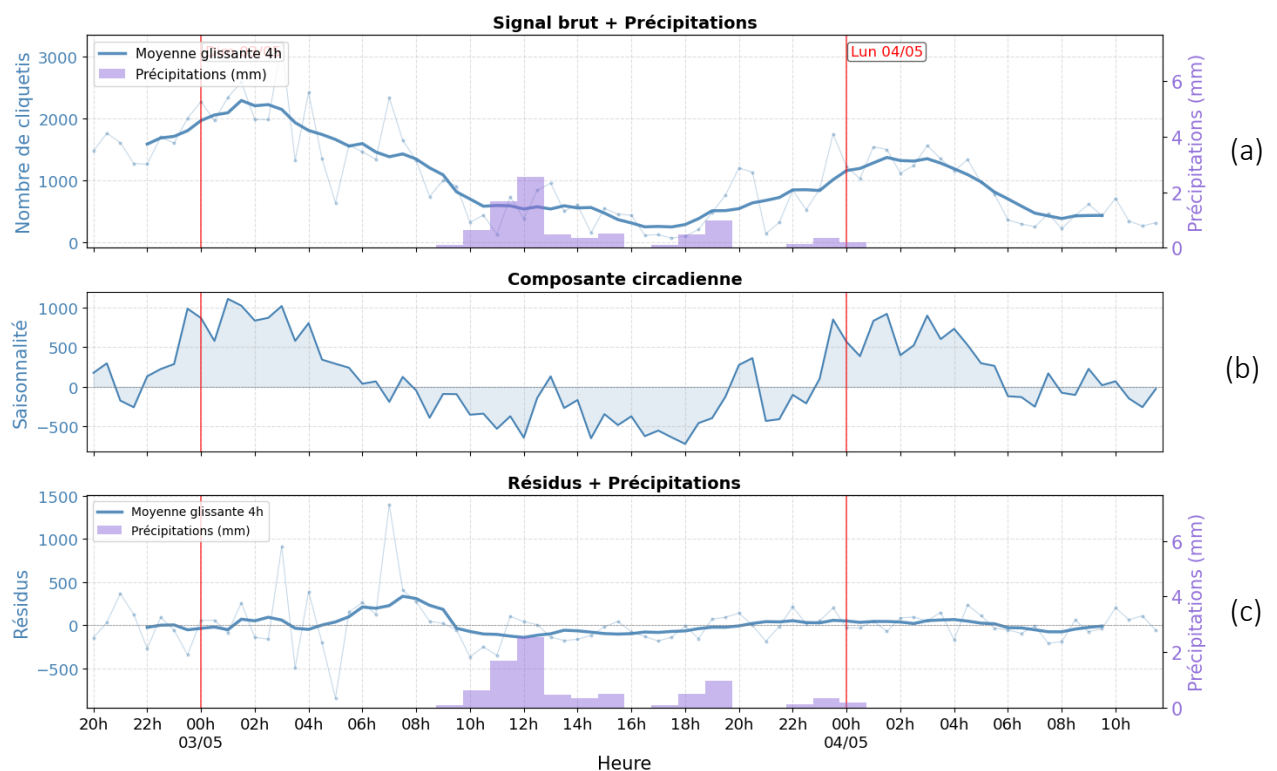


Figure 33: (a) Évolution des cliquetis lors d'un épisode pluvieux, (b) composante circadienne, (c) décomposition STL et résidus (c)

La corrélation de Spearman entre les résidus et l'intensité des précipitations est faible et non significative ($\rho = -0,109$, $p = 0,106$). Il en va de même pour le test de Mann-Whitney sur les résidus, ne montrant pas de différence significative ($p = 0,688$, $r = -0,07$). La baisse d'activité observée est expliquée par la tendance générale décroissante du signal liée à l'activité circadienne. Une limite identifiée serait qu'un seul épisode pluvieux a été observé, ce qui ne permet pas de généraliser les résultats.

5.2.4. Une influence du bruit de fond

L'allure de la courbe correspondant au bruit de fond reflète une influence jour/nuit marquée (Figure 34). Le RMS est toujours plus élevé en journée (médiane = 0,054) que la nuit (médiane = 0,035). Cette différence peut s'expliquer par une augmentation de l'activité anthropique et naturelle en journée.

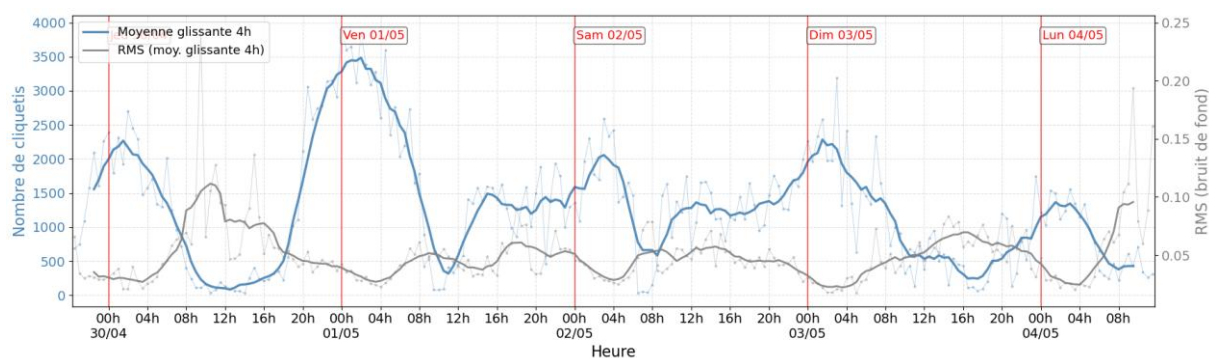


Figure 34: Évolution de l'activité acoustique des vers de terre et du bruit de fond sur la semaine type

Cependant, l'activité des vers de terre semble être en opposition de phase avec le bruit de fond. Sur les données brutes, la corrélation entre cliquetis et RMS est significative et négative ($\rho = -0,629$, $p < 0,001$). Deux scénarios sont envisageables : soit le bruit de fond (vent, trafic routier, activité agricole) dérange fortement l'activité des vers de terre d'où la diminution d'activité lorsque le bruit augmente. Soit, le bruit masque les événements en diminuant le rapport signal/bruit qui rendrait les événements les plus faibles indétectables.

Après traitement STL pour retirer l'effet du rythme circadien, cette corrélation chute et devient non significative ($\rho = -0,105$, $p = 0,118$). Ce résultat indique que le bruit de fond n'a pas d'effet significatif sur l'activité des vers. La corrélation observée précédemment serait un artefact lié au fait que le bruit de fond est plus élevé le jour (activités humaines) et l'activité des vers de terre plus élevée la nuit, d'où l'opposition de phase.

5.2.5. Une influence de la matière organique

De la matière organique fraîche a été ajoutée à partir du 06 mai 2026 et s'est poursuivie jusqu'au 11 mai, permettant une comparaison avec la semaine précédente. Contrairement aux conditions naturelles où la litière est déposée en surface, ici la matière organique est insérée dans le sol, la rendant directement accessible aux vers de terre.

Après l'ajout de la matière organique, l'activité globale est légèrement plus élevée de + 10,7 % mais la différence notable est le changement de la répartition de l'activité dans le temps (Figure 35). La variabilité du signal causée par le rythme circadien s'atténue fortement : le coefficient de variation passe de 70 à 32 %. L'amplitude du signal diminue avec une réduction de l'écart entre minimum et maximum de 88 %.

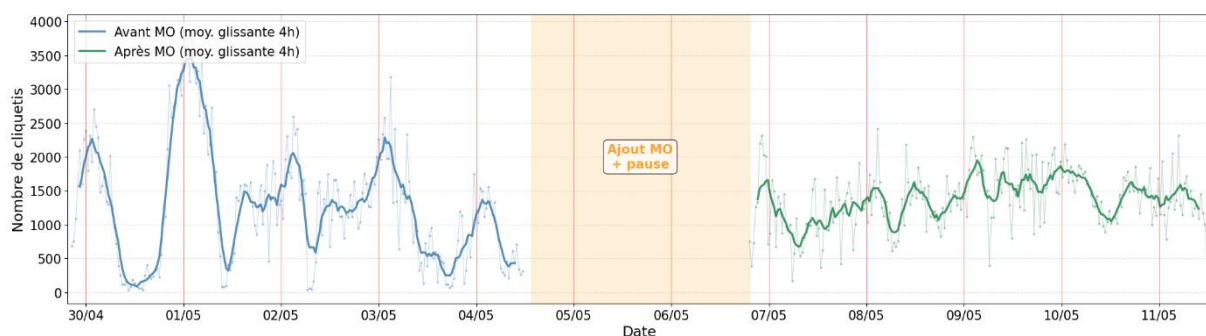


Figure 35: Évolution de l'activité acoustique des vers de terre avant (bleu, 29 avril - 4 mai) et après (vert, 7 - 11 mai) l'ajout de matière organique (zone orange = période d'ajout et d'acclimatation)

L'analyse séparée des périodes diurne et nocturne met en évidence cette atténuation du rythme circadien (Figure 36). L'activité diurne augmente particulièrement de 126 %, et de manière significative (Mann-Whitney $p < 0,001$, $r = 0,585$). À l'opposé l'activité nocturne diminue légèrement de 12 % mais avec un effet faible (Mann-Whitney $p = 0,002$, $r = -0,233$).

La décomposition STL confirme cette observation. Le facteur de saisonnalité, F_s , passe d'une variance de 67,9 % expliquée par un rythme circadien à 60,4 % après l'ajout de la matière organique.

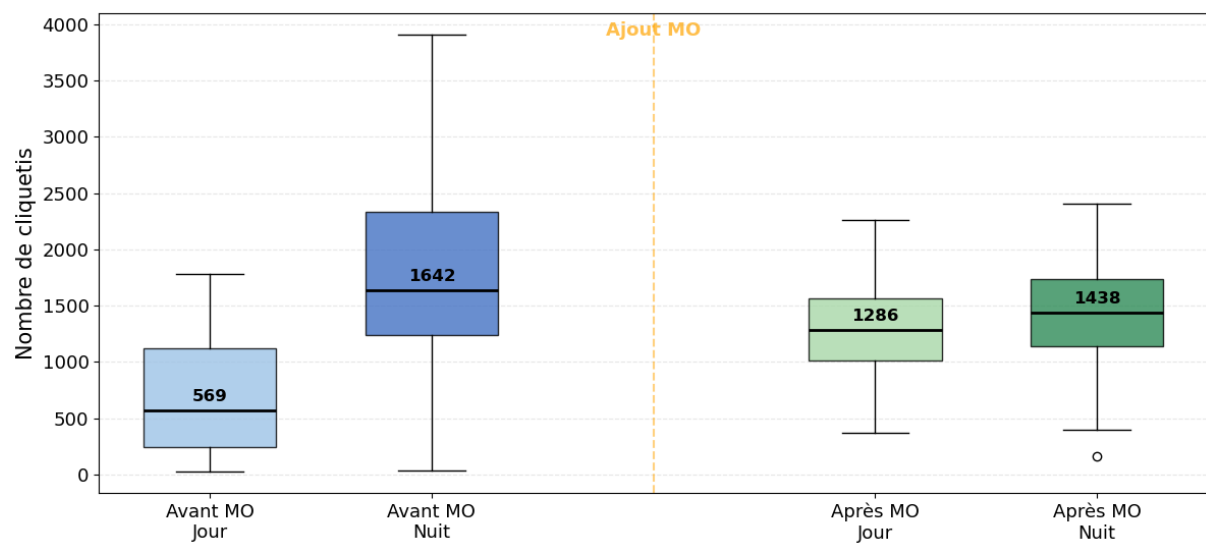


Figure 36: Distribution des cliquetis par période diurne et nocturne avant et après l'ajout de matière organique

Ces résultats peuvent être expliqués par l'hypothèse de la diminution de la migration nocturne vers la surface. Dans les conditions initiales, les vers de terre présentaient une activité circadienne marquée et caractéristique des espèces anéciques et épigées qui remontent en surface la nuit pour collecter la matière organique (Cai, Bennie et Gaston, 2026). Puisque celle-ci a été rendue directement accessible, l'activité est devenue plus homogène mais pas significativement plus importante.

5.2.6. Influence de la population sur l'activité

L'activité acoustique enregistrée lors du passage de 100 à 10 individus entraîne une chute massive de l'activité détectée (Figure 37). La médiane de l'activité est de 7 clics/30 min pour 10 individus. En comparaison à la semaine type du 29 avril au 4 mai avec 100 individus, la médiane était de 1246 clics/30 min. Le signal à 10 vers est environ 110 fois plus faible qu'avec une population de 100 vers de terre (Mann-Whitney, $p < 0,001$, $r = 0,997$, soit un effet fort).

Concernant l'activité circadienne, la différence est encore plus marquée. En journée, de 8 à 20h, la médiane chute de 569 à 9 clics. La nuit, de 20 à 8h, elle passe de 1642 à 3 clics. Ces écarts sont très prononcés et indiquent que les dynamiques ne sont pas semblables. Cette différence peut être expliquée par un bruit biologique beaucoup plus faible donc les tendances peuvent être plus difficiles à interpréter.

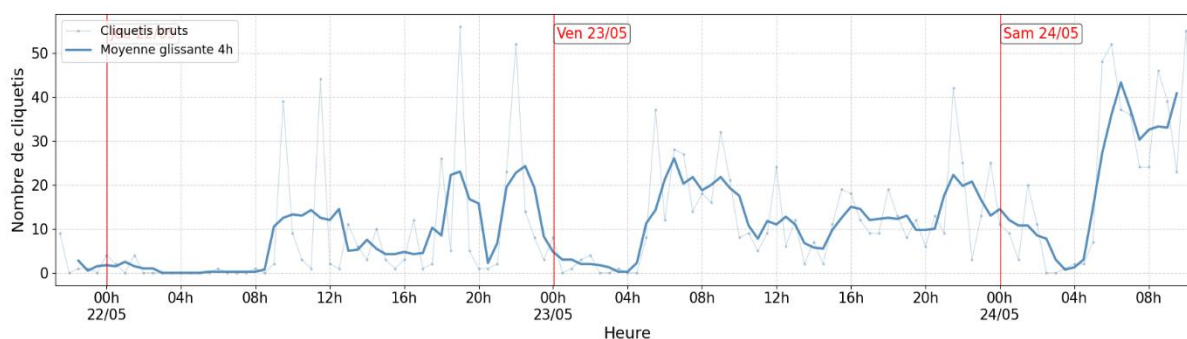


Figure 37: Évolution de l'activité acoustique de 10 vers de terre (22 - 24 mai 2026)

L'activité par individu est de 1,15 clics/vers/30 min pour 10 vers de terre, alors qu'elle est de 12,73 clics/vers dans la modalité avec 100 vers de terre. Si la relation était proportionnelle, les 10 vers de terre devraient produire 127 clics/30 min alors qu'ils n'en font que 7. Les résultats indiquent que l'activité en fonction de la population n'est pas directement linéaire. L'activité ne peut donc pas directement être liée à un certain nombre d'individus. Avec seulement 2 points de référence (10 et 100 vers de terre), il est difficile d'évaluer le type de relation qui influence l'activité. Un minimum de 3 populations permettrait de constituer un modèle d'activité.

Enfin, l'approche de comparaison utilisée présente plusieurs limites. En premier lieu, les données comparées sont distantes de trois semaines donc les conditions météorologiques peuvent avoir changé entre-temps. Ensuite, des problèmes techniques ont limité la période d'enregistrement à seulement 2 jours et demi, limitant les données récoltées. De plus, les 10 vers de terre introduits n'ont pas bénéficié d'une période d'acclimatation similaire au pot avec 100 vers de terre, influençant directement leur comportement.

De plus, pour la population de 10 vers de terre, 18 % des fichiers ne contiennent aucun cliquetis alors que 0 % avec 100 vers, créant un biais dans l'activité recensée.

5.2.7. Récapitulatif des résultats statistiques

Le Tableau 5 synthétise l'ensemble des résultats statistiques réalisés pour l'ensemble des données obtenues au cours de l'étape 1 et 2. La méthodologie a en premier lieu été validée par les différences significatives d'activité entre le pot avec et sans vers de terre. La présence d'un rythme circadien a également été identifiée. Ensuite, les décompositions STL ont mis en évidence qu'il n'y avait pas de paramètre, parmi la température, les précipitations et les bruits de fond qui modifie significativement l'activité des vers de terre (résidus $p > 0,05$). L'ajout de matière organique a modifié la tendance du rythme circadien sans changement dans l'activité globale. Enfin, la relation entre la population de vers de terre et l'activité acoustique n'est pas linéaire.

Tableau 5: Récapitulatif des tests statistiques, résultats et interprétations

Condition	Médiane cliquetis	p-value	Mann-Whitney (r)	Spearman (ρ)	Interprétation
Comparaison témoin et pot avec vers (100)	1246	$2,3 \times 10^{-24}$	0,98	-	Méthodologie validée
Jour/nuit	569/ 1642	$3,5 \times 10^{-20}$	0,77	-	Présence d'un rythme circadien ($F_s = 0,679$)
Température (résidus STL)	-	0,64	-	-0,031	Pas d'effet
Précipitations (résidus STL)	-	0,106	-	-0,109	Pas d'effet
Bruit de fond (résidus STL)	-	0,118	-	-0,105	Pas d'effet
Après ajout de matière organique (jour/nuit)	1286/ 1438	$< 0,001/$ 0,002	0,58	-	Répartition de l'activité jour/nuit mais pas d'augmentation ni diminution significative
Population de 10 vers	7	$< 0,001$	0,997	-	Relation non linéaire

5.3. Utilisation du microphone en milieu réel

Afin d'évaluer la pertinence de la méthodologie à un cas pratique, deux microphones sont répartis au même moment sur deux parcelles de la ferme de Marbaix. Le premier micro est installé dans un champ cultivé et travaillé, alors que le deuxième est placé dans une prairie permanente. La Figure 38 représente l'utilisation de la méthodologie de détection de cliquetis aux deux parcelles.

La prairie permanente présente une activité acoustique significativement plus élevée que le champ cultivé, notamment sur la journée du 16/05. Le rythme circadien repéré précédemment dans les conditions contrôlées est beaucoup moins marqué ici. Cette raison peut s'expliquer par le fait que le microphone capte l'activité d'un écosystème dans son ensemble et non uniquement les vers de terre. L'activité diurne pourrait aussi inclure d'autres types de macrofaune, comme les fourmis, larves, collemboles, etc. Enfin, le comportement des vers de terre en milieu naturel pourrait aussi différer de celui observé dans un pot de 90 litres.

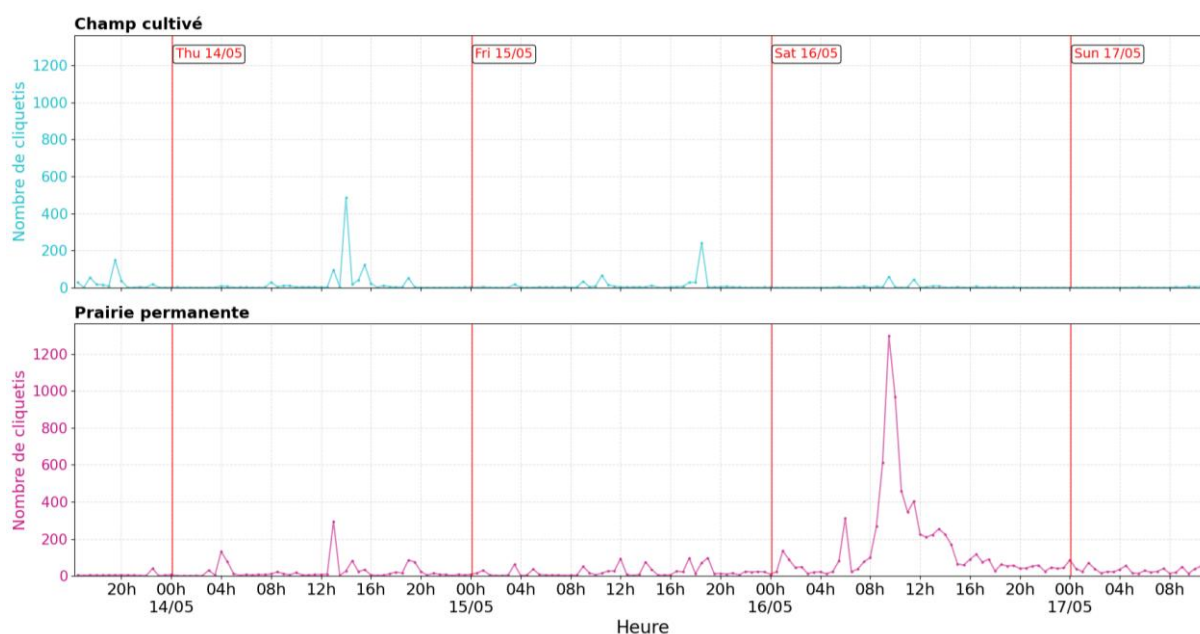


Figure 38: Comparaison de l'activité acoustique de la macrofaune sur deux parcelles contrastées : un champ cultivé (cyan) et prairie permanente

La Figure 39 représente la comparaison de la distribution des cliquetis sur les deux parcelles. La médiane des cliquetis détectés sur fichier de 30 minutes est de 1 en champ, contre 20 en prairie. La moyenne confirme des résultats similaires, la prairie produit en moyenne 58,8 clics par fichier contre 10,9 pour le champ, soit une activité 5,4 fois plus grande lorsqu'on considère la moyenne. Cette différence se repère également sur la proportion de fichiers ne contenant aucune activité. Pour le champ, 46,7 % des enregistrements ne contiennent aucune détection alors que pour la prairie, seulement 2,2 % n'en ont pas.

Cette différence d'activité peut s'expliquer du fait que la prairie n'est pas travaillée depuis au moins 1975, ce qui favorise la structure du sol et de la biodiversité (Blouin *et al.*, 2013). Tandis, que le champ est soumis à un travail régulier qui est défavorable aux vers de terre.

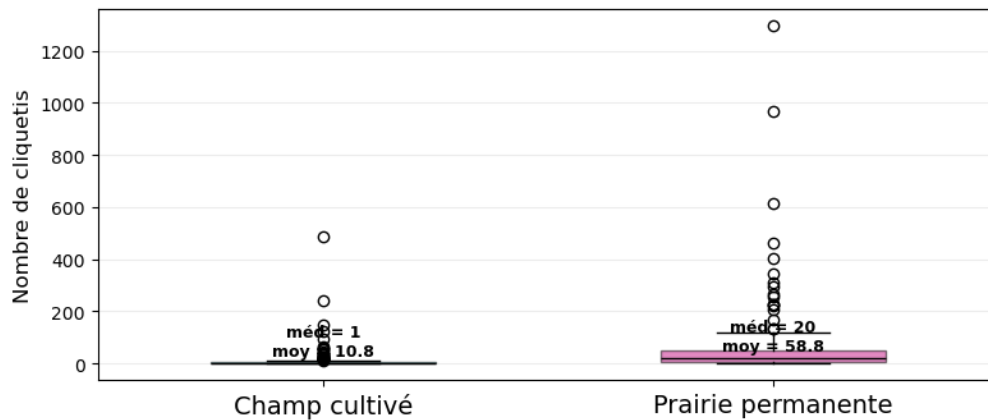


Figure 39: Distribution des cliquetis champ/prairie

Finalement, la corrélation de Spearman entre les deux séries de données est faible, indiquant que les dynamiques acoustiques sont indépendantes entre le champ et la prairie ($\rho = 0,086$, $p = 0,25$). La corrélation entre les deux séries est illustrée à la Figure 40 où chaque point correspond à un fichier de 30 minutes enregistré simultanément pour le champ et la prairie. Ce résultat est essentiel puisque l'absence de structure le long de la diagonale confirme l'indépendance des détections et donc exclut l'hypothèse des erreurs de détection dues aux bruits anthropiques ou naturels. Les deux points d'écoute étant distants d'une cinquantaine de mètres, les mêmes dynamiques se seraient retrouvées sur chaque enregistrement.

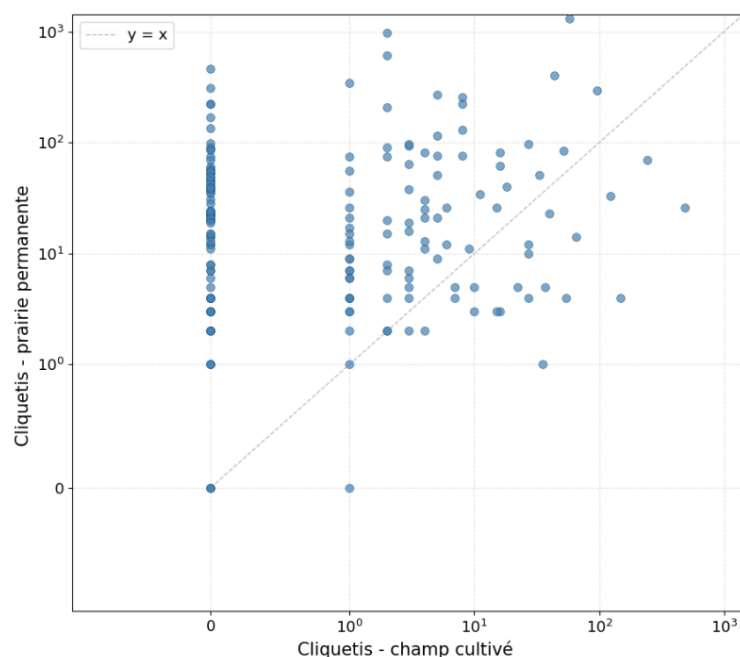


Figure 40: Nuage de points de la corrélation temporelle entre l'activité détectée au champ et à la prairie

5.4. Conditions d'application de la méthodologie de détection

- **Limite de la méthodologie à l'humidité**

Bien que la méthodologie de détection semble être adaptée par temps sec, la détection de cliquetis par temps de pluie augmente significativement dans le pot témoin (Figure 41). La pluie multiplie les détections dans le pot sans vers de terre par 4,3x.

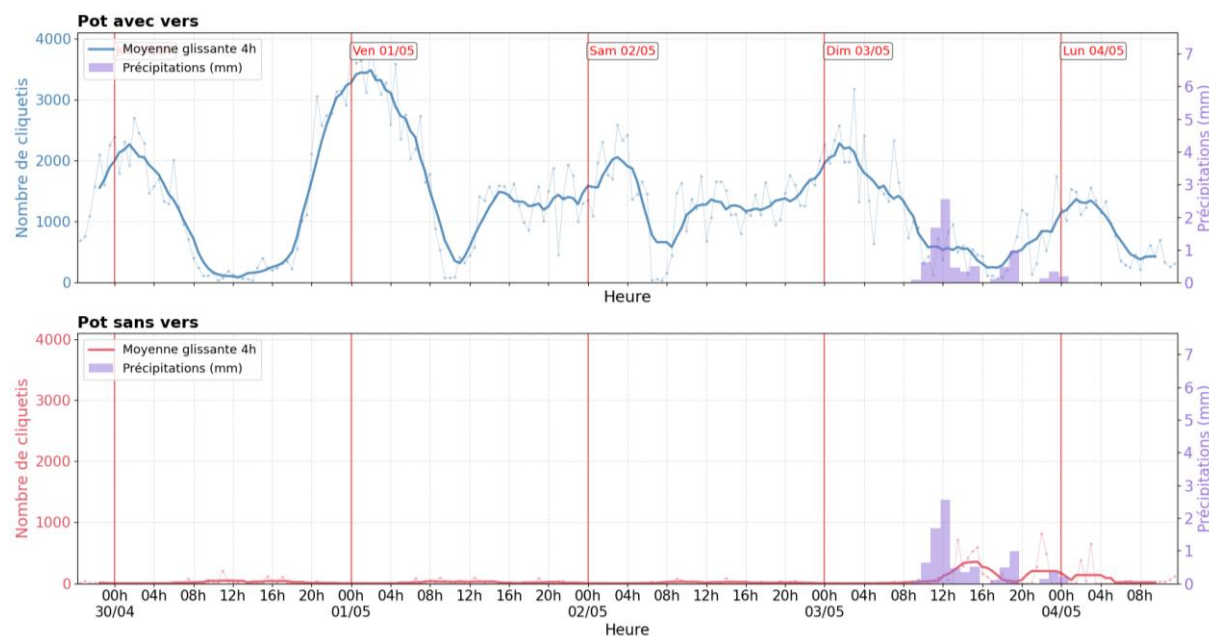


Figure 41: Comparaison de l'activité acoustique détectée dans le pot avec et sans vers de terre lors d'un épisode de pluvieux

La vérification auditive via Audacity et le décalage des cliquetis (Figure 42) suggèrent que les détections ne sont pas totalement dues à l'impact des gouttes de pluie sur le sol mais à l'infiltration de celle-ci. L'eau qui percole à travers les pores du sol pourrait générer des événements acoustiques comme le déplacement des particules ou l'éclatement de bulles d'air, expliquant l'augmentation des cliquetis par temps de pluie (Fomenko et Jana, 2024).

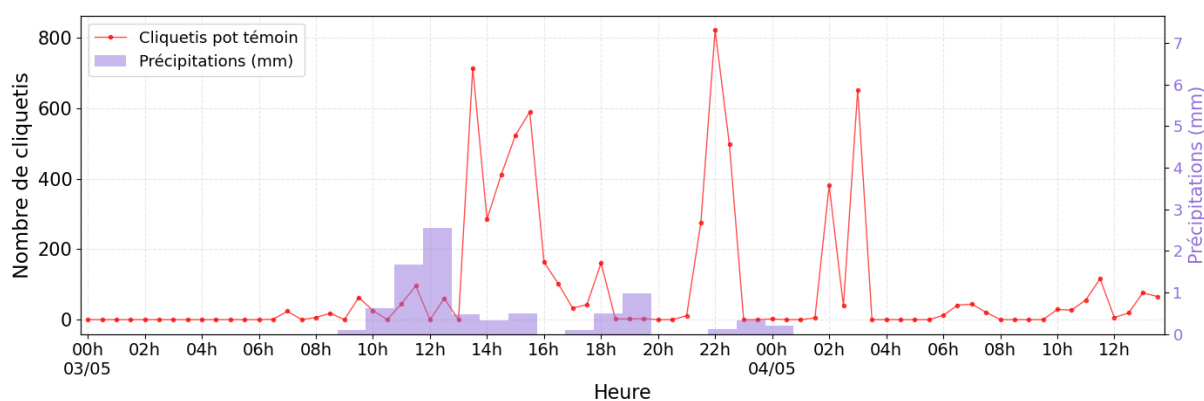


Figure 42: Cliquetis et précipitations observé dans le pot témoin

- **Limites de la méthodologie à un cas concret**

L'expérimentation de terrain présente plusieurs limites. D'abord, la détection de faux événements produits par l'infiltration de l'eau dans le sol peut constituer un biais majeur. La méthodologie semble adaptée par temps sec mais par temps de pluie, l'activité des vers de terre est confondue avec l'infiltration de l'eau.

Ensuite, la méthodologie a été développée sous conditions contrôlées avec essentiellement des vers de terre comme représentants de la macrofaune. Ce choix va naturellement limiter la détection d'autres organismes capables de produire une diversité de sons, qui ne seront peut-être pas compris dans le filtre de la méthodologie de détection.

- **Une influence du milieu**

Un aspect peu exploré dans ce mémoire, mais sans aucun doute fondamental, est la propagation du son selon la texture du sol déterminée par les proportions relatives en sable, limon et argile. Cette texture a une influence majeure sur la propagation des ondes acoustiques dans le milieu (Oelze, O'Brien et Darmody, 2002c). Ces chercheurs ont mesuré l'atténuation et la vitesse du son dans 231 échantillons de sols aux textures, humidité et compaction variées. Les résultats indiquent que la propagation des sons dans la bande de 2 à 6 kHz peut varier d'un facteur 8 selon la composition. Elle augmente avec la teneur en eau et la densité, tandis que la vitesse de propagation diminue avec la porosité.

Ces résultats sont validés par Lo, Yeh et Tsai, (2007), qui ont similairement démontré que la propagation du son est sensible à la texture et à la saturation en eau. Un sol sableux a une atténuation plus élevée qu'un sol compact mais une trop grande compaction peut aussi générer des ondes de cisaillement qui atténuent le son. Le passage d'un sol sablo-limoneux à sableux peut réduire la portée de la transmission de 90 à 55m en raison de la teneur en argile qui atténue plus rapidement le son.

Les deux parcelles étudiées à la ferme de Marbaix peuvent présenter des propriétés physiques distinctes malgré leur proximité. En prairie permanente, le sol présente d'une plus grande teneur en matière organique par les déjections animales et le couvert herbacé. La compaction de la prairie améliore la transmission du son et réduit l'atténuation.

Le champ cultivé est travaillé par un déchaumeur donc la couche de surface est plus meuble et la porosité est augmentée. L'air présent dans les pores atténue davantage une partie de l'énergie sonore.

Il est donc possible qu'une certaine part des différences d'activités mesurées entre la prairie et le champ ne soit pas uniquement des différences d'abondance de macrofaune, mais peut-être aussi des différences liées à la structure des sols.

6. Conclusion et perspectives

6.1. Conclusions tirées

L'éco-acoustique des sols est un domaine en pleine émergence, s'alignant sur les objectifs des enjeux de conservation biologique mondiale (Sutherland *et al.*, 2024). L'objectif de ce mémoire était d'utiliser le principe de l'éco-acoustique pour suivre et quantifier l'activité de la macrofaune du sol, à l'aide de microphones et de géophones. La démarche entreprise s'est axée autour de 3 étapes progressives, allant d'un milieu contrôlé en intérieur à un cas d'étude en extérieur.

La première étape a consisté en l'identification de la signature acoustique des vers de terre dans la bande de 2 à 10 kHz via Audacity. Ensuite, une méthodologie a été développée via Python dans le but de détecter leur activité. La détection se réalise en 3 étapes : (1) retirer les bandes de fréquences non recherchées, (2) appliquer une enveloppe autour du signal, (3) extraire les signaux recherchés par seuils. La comparaison de l'activité entre un pot contenant une centaine d'individus et un pot témoin a permis la validation de la méthode. En effet, le pot sans vers ne représente que 0,8 % du signal détecté dans le pot avec vers (Mann-Whitney, $p = 2,3 \times 10^{-24}$, $r = 0,98$ donc très significatif avec un effet fort).

Cependant, cette étape a rapidement exclu l'utilisation du géophone pour la suite des expérimentations. La raison s'explique par la limite maximale de détection allant jusqu'à 2 kHz. Cette limite étant inférieure aux fréquences recherchées, l'utilisation du géophone n'a donc pas été approfondie. Cependant, cette conclusion ne signifie pas que le géophone ne peut s'appliquer aux applications de l'éco-acoustique des sols, uniquement à des signaux se trouvant dans sa bande de fréquence. En effet, d'après Mankin et Benshemesh, (2006)) l'utilisation du géophone semble être pertinente pour repérer les termites.

Le microphone, lui, s'est montré plus adapté aux objectifs entrepris, notamment par sa large bande passante (0-48 kHz) qui lui permet autant la détection de basse, que de hautes fréquences. Son coût de 640 € est relativement faible, son déploiement est simple et son autonomie lui permet de rester jusqu'à 1330 heures sans charge. En revanche, sa sensibilité aux bruits anthropiques et naturels (vent, oiseaux, pluie, trafic) nécessite un prétraitement des enregistrements audio. Ensuite, sa capacité de détection est limitée : le capteur est enfoui à une quinzaine de centimètres sous la surface du sol, limitant la portée de détection. Malgré ses limites, l'utilisation du microphone a été conservée pour toutes les expérimentations.

La deuxième étape consistait en mieux comprendre les dynamiques de l'activité des vers de terre sous influence de plusieurs facteurs.

Ces analyses ont révélé des dynamiques circadiennes de l'activité des vers de terre. L'activité la nuit étant environ trois fois supérieure à celle de la journée. Ensuite les paramètres de

température, précipitations et bruits de fond n'ont révélé aucune corrélation significative avec les variations de l'activité des vers de terre.

Une limite liée à l'infiltration de l'eau de pluie dans le sol a cependant été identifiée. En effet, par temps pluvieux, la détection de cliquetis est multipliée par 4,3 dans le pot témoin. Ce résultat indique que la méthodologie est plus adaptée par temps sec.

Concernant l'ajout de la matière organique, l'activité n'a ni baissé ni augmenté significativement mais la dynamique journalière était plus constante. Finalement la tentative de quantifier l'activité pour un certain nombre de vers de terre indique que l'activité n'est pas fixée à une relation linéaire. En effet, 10 fois moins de vers de terre produisent 110 fois moins d'activité, suggérant un effet de groupe où les interactions entre individus augmentent l'activité acoustique.

La troisième étape suggère que la méthode peut être transposable à des conditions réelles. La prairie permanente indique une activité 5,4 fois plus grande que celle en champ cultivé (médiane 20 vs 1 clic/30 min, Mann-Whitney $p < 0,001$, $r = 0,689$), soit un résultat cohérent avec les différences connues de macrofaune dans ces milieux.

En conclusion, la méthodologie permet répondre à l'objectif initial qui était la détection et la quantification de l'activité de la macrofaune du sol. La méthode est la plus fiable par temps sec où seulement 0,8 % de faux positifs sont identifiés. Elle a permis d'identifier des rythmes circadiens et comment les vers de terre ont réagi par rapport à plusieurs tests. Elle a également permis de mettre en évidence les différences de densité de population entre des milieux contrastés.

Cependant, la méthode présente tout de même ses limites : sensibilité aux précipitations, relation non linéaire entre population et activité ce qui limite l'usage quantitatif et limites de distinctions des espèces à partir du signal acoustique.

6.2. Perspectives

6.2.1. Hypothèses d'amélioration

La plus grande limite des expérimentations réalisées est peut-être la durée des tests. L'ensemble des analyses en conditions contrôlées ont été faites sur une semaine de référence où toutes les autres conditions sont comparées. Ce choix apporte peut-être des biais venant de facteurs non considérés comme les conditions météorologiques particulières, des perturbations ou la santé des vers de terre. L'idéal serait de répéter sur plusieurs semaines et l'ajout de répliques.

Pour améliorer l'aspect de quantification de la méthode, une troisième population aurait pu être étudiée pour apporter des informations supplémentaires sur la dynamique de l'activité en fonction de la population. Si un modèle existe alors, une prédiction de la population en fonction du signal pourrait être envisagée.

6.2.2. Perspectives d'utilisation de la méthodologie

L'outil de détection développé ne se limite pas seulement à la détection de la présence ou de l'absence de vers de terre. Les informations contenues dans leurs signaux acoustiques peuvent représenter une réelle porte ouverte vers un suivi plus global d'un des écosystèmes les plus abondants de la Terre.

Une première application serait l'utilisation du signal acoustique comme indicateur de santé biologique des sols. Cette approche est déjà opérationnelle via la start-up Soil Acoustics. Elle a développé un appareil (Soil Acoustic Meter – SAM) permettant le calcul d'un indice de qualité acoustique du sol (SAQI) à partir d'enregistrements de quelques minutes (Renardson, 2025). Leur démarche de monitoring s'adresse aux chercheurs, agronomes, fermiers ou quiconque aurait un intérêt dans la santé des sols.

Le projet Suisse, *Sounding soil*¹⁷, entreprend également cette démarche via la science participative. Les enregistrements collectifs permettent la découverte de plusieurs types de profils sonores, permettant une comparaison des sons pris dans des écosystèmes différents. Une première découverte implique que les sols agricoles gérés de manière intensive sont bien plus silencieux, suggérant qu'un certain niveau d'activité pourrait servir d'indicateur de santé.

Une seconde approche intéressante serait le suivi continu, permettant d'évaluer l'impact de différentes pratiques agricoles sur la faune des sols. On pourrait comparer des parcelles en agriculture conventionnelle ou régénérative, avant/après un labour, évaluer l'effet de couverts végétaux et de la rotation de cultures sur l'activité de la biologie du sol. Ce suivi continu pourrait aussi s'adapter au monitoring à long terme adapté à des travaux de renaturation écologique. L'activité de la macrofaune pourrait être documentée sur plusieurs années afin d'observer et quantifier le retour progressif de la faune (Robinson *et al.*, 2024b).

Une troisième application à une méthodologie de quantification de l'activité, serait des études approfondies *in situ* du comportement de la macrofaune des sols. Au cours de ce mémoire, les vers de terre ont largement été étudiés mais le comportement de centaines d'autres espèces est encore à comprendre.

¹⁷ <https://www.biovision.ch/en/soundingsoil/discover/>

6.2.3. Perspectives sur l'utilisation d'autres instruments de mesure

Une perspective qui a tenté d'être explorée dans ce mémoire mais qui n'a pas abouti est l'utilisation de la fibre optique couplée à un DAS (Distributed Acoustic Sensing) pour un objectif de détection de la macrofaune des sols.

Cet appareil est le couplage d'un interrogateur avec une fibre optique, qui se transforme en une chaîne de capteurs grâce au signal envoyé par le DAS. Contrairement aux microphones et géophones, qui enregistrent ponctuellement les données, ici la fibre devient un capteur sur une longueur définie par l'interrogateur. Le DAS fonctionne comme un émetteur et récepteur qui envoie des impulsions lumineuses dans la fibre afin d'y capter les compressions dans le sol, ce sont donc des déformations mécaniques qui sont perçues (Xenaki *et al.*, 2025).

Le DAS est initialement utilisé pour la distribution de télécommunications, pour augmenter la résolution et le temps de recevoir une information (Ip *et al.*, 2022). Son potentiel a été prouvé également dans les industries et surveillances d'infrastructures par exemple pour détecter des fuites, ou contrôler les constructions. Enfin, son utilisation en sismologie permet également de repérer les mouvements profonds du sol et le changement d'activité des volcans.

En 2025, Turov *et al.*, (2025) parviennent à prouver l'utilisation d'un DAS dans le but de détecter la blatte de Madagascar. Ces chercheurs ont démontré qu'il était possible d'enregistrer le sifflement caractéristique de cet insecte à l'aide de la fibre. Cette avancée majeure ouvre donc la voie à l'utilisation du DAS à de nouvelles perspectives de détection de l'activité de la macrofaune du sol.

Les spécificités techniques du DAS présentent l'avantage d'une fréquence d'échantillonnage totalement ajustable, couvrant les basses comme les très hautes fréquences. La fibre optique possède aussi l'avantage de pouvoir couvrir une distance importante, jusqu'à 20 kilomètres, ce qui est impossible avec des capteurs ponctuels. La fibre est également insensible aux bruits aériens puisqu'elle ne mesure que les contraintes mécaniques dans le sol. Cette méthode présenterait l'avantage de réaliser des suivis continus et sur de longues périodes et sans maintenance.

Pour conclure, le DAS peut représenter une perspective ambitieuse aux objectifs de monitoring de la macrofaune des sols. Il existe des premières pistes à ce sujet qui peuvent mener la voie vers cette exploration. L'utilisation couplée des microphones et géophones pourrait permettre d'exploiter la complémentarité de chaque instrument pour atteindre cet objectif.

7. Annexes

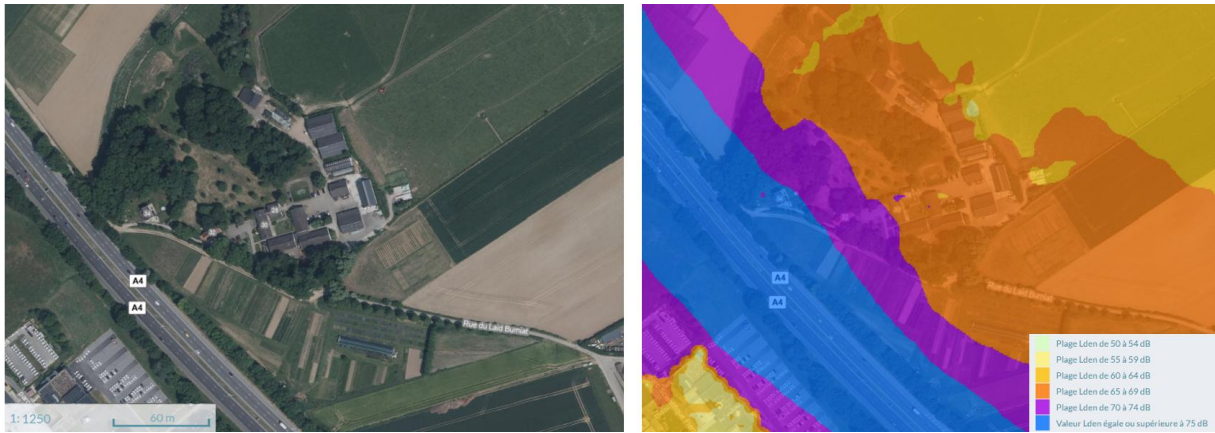
OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE



Annexe 1: Les 17 objectifs du développement durable (ODD) (un.org)

	communauté microbienne en bactéries et en champignons		
Potentiel métabolique	Mesure de la diversité fonctionnelle de la communauté microbienne du sol. Elle mesure la capacité des bactéries du sol à dégrader différents substrats carbonés.	Un extrait de sol est incubé dans une plaque contenant des puits avec 31 substrats carbonés différents. Les puits deviennent mauve lorsque le substrat est décomposé.	avril≤août=octobresjuin
Respiration potentielle	Mesure de la vitesse de la minéralisation du carbone organique en CO ₂ lors de la décomposition de la matière organique par les micro-organismes.	La respiration potentielle est mesurée comme production de CO ₂ d'un échantillon de sol frais dans une bouteille hermétiquement fermée dans des conditions définies.	octobre<avril<juin=août
Minéralisation nette de l'azote	Transformation de l'azote sous forme organique en azote minéral (NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻). Elle donne des informations sur la disponibilité de l'azote pour les plantes, indispensable à leur croissance.	Différence entre la quantité d'azote minéral (NH ₄ ⁺ et NO ₃ ⁻) avant et après une incubation de 28 jours à 25°C en absence de racines et de lessivage.	avril≤août=octobresjuin
Densité des vers de terre	Nombre de vers de terre échantillonné par mètre carré.	Le contact avec une solution de moutarde cause des irritations aux vers de terre qui les font remonter à la surface du sol. Les vers de terre peuvent alors être échantillonnés de manière non-destructive pour le sol.	octobre ≤ avril=juinsaoût
Quotient métabolique	Quotient éco-physiologique correspondant au rapport entre la respiration potentielle et le carbone microbien. Il représente la quantité de CO ₂ respiré par unité de biomasse microbienne.	Calculé à partir des mesures du carbone microbien et de la respiration potentielle.	aucune
Quotient microbien	Quotient éco-physiologique correspondant au rapport entre le carbone microbien et le carbone organique total. Il donne des renseignements sur la disponibilité de substrat pour les micro-organismes.	Calculé à partir des mesures de carbone microbien et de carbone organique total.	aucune

Annexe 2: Tableau des indicateurs biologiques de qualité des sols (Vincent *et al.*, 2019)



Annexe 3: Niveau sonore moyen, (indice Lden) autour de la ferme de Marbaix (geoportail.wallonie.be)

Références

Al-Maliki, S., Al-Taey, D.K.A. et Al-Mammori, H.Z. (2021) « Earthworms and eco-consequences: Considerations to soil biological indicators and plant function: A review », *Acta Ecologica Sinica*, 41(6), p. 512-523. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2021.02.003>.

Anthony, M.A., Bender, S.F. et van der Heijden, M.G.A. (2023) « Enumerating soil biodiversity », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(33), p. e2304663120. Disponible sur: <https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>.

Bardgett, R.D. et van der Putten, W.H. (2014) « Belowground biodiversity and ecosystem functioning », *Nature*, 515(7528), p. 505-511. Disponible sur: <https://doi.org/10.1038/nature13855>.

Bennett, M.F. (1968) « Persistent seasonal variations in the diurnal cycle of earthworms », *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, 60(1), p. 34-40. Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/BF00737093>.

Bhörn, B. (2014) « Plant Litter. Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration | Request PDF », *ResearchGate* [Preprint]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/268809759_Plant_Litter_Decomposition_Humus_Formation_Carbon_Sequestration (Consulté le: 3 juin 2026).

Blouin, M. *et al.* (2013) « A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services », *European Journal of Soil Science*, 64(2), p. 161-182. Disponible sur: <https://doi.org/10.1111/ejss.12025>.

Bünemann, E.K. *et al.* (2018) « Soil quality – A critical review », *Soil Biology and Biochemistry*, 120, p. 105-125. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.

Cai, J., Bennie, J. et Gaston, K.J. (2026) « Brightened nights, altered earth: Artificial light reshapes activity rhythms in an earthworm and soil processes », *Biological Conservation*, 313, p. 111616. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111616>.

Catania, K.C. (2008) « Worm Grunting, Fiddling, and Charming—Humans Unknowingly Mimic a Predator to Harvest Bait », *PLOS ONE*, 3(10), p. e3472. Disponible sur: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003472>.

Chan, K.-Y. et Munro, K. (2001) « Evaluating mustard extracts for earthworm sampling », *Pedobiologia*, 45(3), p. 272-278. Disponible sur: <https://doi.org/10.1078/0031-4056-00084>.

Charles G. (2023) Disponible sur: https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2023/04/6.-Faune-du-sol-_V2.pdf (Consulté le: 18 novembre 2025).

Chaussod, R. (1996) « La qualité biologique des sols », *Étude et Gestion des Sols* [Preprint].

Cleveland, R.B., Cleveland, W.S. et Terpenning, I. (1990) « STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess », *Journal of Official Statistics*, 6(1), p. 3. Disponible sur:

Cluzeau, D. *et al.* (2012) « Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types », *European Journal of Soil Biology*, 49, p. 63-72. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.003>.

Collin, F. et Lelievre, M. (2022) « Les études scientifiques menées pour comprendre, améliorer le sol et augmenter son rendement malgré un contexte environnemental actuel défavorable. »

Constantinescu, C. et Brad, R. (2023a) « An Overview on Sound Features in Time and Frequency Domain », *International Journal of Advanced Statistics and IT&C for Economics and Life Sciences*, 13(1), p. 45-58. Disponible sur: <https://doi.org/10.2478/ijasitels-2023-0006>.

Constantinescu, C. et Brad, R. (2023b) « An Overview on Sound Features in Time and Frequency Domain », *International Journal of Advanced Statistics and IT&C for Economics and Life Sciences*, 13(1), p. 45-58. Disponible sur: <https://doi.org/10.2478/ijasitels-2023-0006>.

Edwards, C.A. et Bohlen, P.J. (2022) « Biology and Ecology of Earthworms », *Springer eBooks* [Preprint]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74943-3>.

Eglin, T. et Cousin, I. (2021) « Éditeurs invités du numéro spécial « Fonctions des sols et services écosystémiques » », 2021 [Preprint].

Fomenko, S.I. et Jana, R.B. (2024) « Surface acoustic waves in porous soils with two-layered infiltration », *Journal of Physics: Conference Series*, 2822(1), p. 012172. Disponible sur: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2822/1/012172>.

Fründ, H.-C. *et al.* (2010) « Using earthworms as model organisms in the laboratory: Recommendations for experimental implementations », *Pedobiologia*, 53(2), p. 119-125. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2009.07.002>.

Geisen, S. *et al.* (2019) « A methodological framework to embrace soil biodiversity », *Soil Biology and Biochemistry*, 136, p. 107536. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107536>.

Ghadarah, N. et Ayre, D. (2023) « A Review on Acoustic Emission Testing for Structural Health Monitoring of Polymer-Based Composites », *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23(15), p. 6945. Disponible sur: <https://doi.org/10.3390/s23156945>.

Hedde, M. (2020) *Faune du sol et production végétale | Planet-Vie*. Disponible sur: <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/production-agricole-agrosystemes/faune-du-sol-et-production-vegetale> (Consulté le: 28 février 2026).

Hillel, D. (2003) *Introduction to Environmental Soil Physics*. Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/monograph/9780123486554/introduction-to-environmental-soil-physics> (Consulté le: 31 mai 2026).

Ip, E. *et al.* (2022) « Using Global Existing Fiber Networks for Environmental Sensing », *Proceedings of the IEEE*, 110(11), p. 1853-1888. Disponible sur: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2022.3199742>.

Jeffery C., G.C. (2013) *Atlas Européen de la biodiversité des sols*. Disponible sur: <https://www.afes.fr/ressources/atlas-europeen-de-la-biodiversite-des-sols/> (Consulté le: 22 novembre 2025).

Kerkhofs, P. (2025) *Mise à jour de la stratégie nationale belge pour la biodiversité à l'horizon 2030 | Convention de la Diversité Biologique*. Disponible sur: <https://www.biodiv.be/fr/POLICY-%26-IMPLEMENTATION/National-Strategy/updated-belgian-national-biodiversity-strategy-2030> (Consulté le: 4 juin 2026).

Knight, E. *et al.* (2024) « Individual identification in acoustic recordings », *Trends in Ecology & Evolution*, 39(10), p. 947-960. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2024.05.007>.

Lacoste, M., Ruiz, S. et Or, D. (2018a) « Listening to earthworms burrowing and roots growing - Acoustic signatures of soil biological activity », *Scientific Reports*, 8. Disponible sur: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28582-9>.

Lacoste, M., Ruiz, S. et Or, D. (2018b) « Listening to earthworms burrowing and roots growing - acoustic signatures of soil biological activity », *Scientific Reports*, 8(1), p. 10236. Disponible sur: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28582-9>.

Lehmann, J. *et al.* (2020) « The concept and future prospects of soil health », *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), p. 544-553. Disponible sur: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>.

Li, Z. *et al.* (2024) « Temperature Mainly Determined the Seasonal Variations in Soil Faunal Communities in Semiarid Areas », *Land*, 13(4), p. 505. Disponible sur: <https://doi.org/10.3390/land13040505>.

Lo, W.-C., Yeh, C.-L. et Tsai, C.-T. (2007) « Effect of soil texture on the propagation and attenuation of acoustic wave at unsaturated conditions », *Journal of Hydrology*, 338(3), p. 273-284. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.034>.

Logeais, C (2019) « Service écosystémique des sols, pourquoi les préserver ? - Haemers Technologies », 12 avril. Disponible sur: <https://haemers-technologies.com/service-ecosystemique-des-sols-pourquoi-les-preserver/> (Consulté le: 9 mars 2026).

Mankin, R. (2000) « Eavesdropping on Insects Hidden in Soil and Interior Structures of Plants », *ResearchGate* [Preprint]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1603/0022-0493-93.4.1173>.

Mankin, R. *et al.* (2021) « Automated Applications of Acoustics for Stored Product Insect Detection, Monitoring, and Management », *Insects*, 12(3), p. 259. Disponible sur: <https://doi.org/10.3390/insects12030259>.

Mankin, R.W. et Benshemesh, J. (2006) « Geophone Detection of Subterranean Termite and Ant Activity », *Journal of Economic Entomology*, 99(1), p. 244-250. Disponible sur: <https://doi.org/10.1093/jee/99.1.244>.

Mitra, O. *et al.* (2009) « Grunting for worms: seismic vibrations cause Diplocardia earthworms to emerge from the soil », *Biology Letters*, 5(1), p. 16-19. Disponible sur: <https://doi.org/10.1098/rsbl.2008.0456>.

Oelze, M.L., O'Brien, W.D. et Darmody, R.G. (2002a) « Measurement of Attenuation and Speed of Sound in Soils », *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), p. 788-796. Disponible sur: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.7880>.

Oelze, M.L., O'Brien, W.D. et Darmody, R.G. (2002b) « Measurement of Attenuation and Speed of Sound in Soils », *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), p. 788-796. Disponible sur: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.7880>.

Oelze, M.L., O'Brien, W.D. et Darmody, R.G. (2002c) « Measurement of Attenuation and Speed of Sound in Soils », *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), p. 788-796. Disponible sur: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.7880>.

Ponge, J.-F. (2000) « Biodiversité et biomasse de la faune du sol sous climat tempéré », *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 86(8), p. 129-135. Disponible sur: <https://hal.science/hal-00503100> (Consulté le: 7 octobre 2025).

Pulleman, M. *et al.* (2012) « Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services— an overview of European approaches », *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4, p. 529-538. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.009>.

Quentin, V. (2022) « La biodiversité des sols », *Encyclopédie de l'environnement*, 24 janvier. Disponible sur: <https://www.encyclopedie-environnement.org/sol/biodiversite-sols/> (Consulté le: 7 octobre 2025).

Renardson, R. (2025) « Shop Now Open: Get Your Hands on a SAM », *Soil Acoustics*, 6 juin. Disponible sur: <https://soilacoustics.com/2025/06/06/buy-a-soil-acoustic-meter-from-soil-acoustics-shop/> (Consulté le: 17 mai 2026).

Robinson, J.M. *et al.* (2024a) « Monitoring soil fauna with ecoacoustics », *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 291(2030), p. 20241595. Disponible sur: <https://doi.org/10.1098/rspb.2024.1595>.

Robinson, J.M. *et al.* (2024b) « Monitoring soil fauna with ecoacoustics », *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 291(2030), p. 20241595. Disponible sur: <https://doi.org/10.1098/rspb.2024.1595>.

Sanchez-Gendriz, I. (2021) « Signal processing basics applied to ecoacoustics », *Ecological Informatics*, 66, p. 101445. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101445>.

Singh, J., Singh Kahlon, S. et Vig, A. (2015) « Extraction of earthworm from soil by different sampling methods: a review », *Environment Development and Sustainability*, 18, p. 1521-1539. Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9703-5>.

Stroud, J.L. *et al.* (2025a) « The Use of Ecoacoustics to Monitor Soil Ecology: A Critical Review With Reference to Earthworms », *European Journal of Soil Science*, 76(6), p. e70229. Disponible sur: <https://doi.org/10.1111/ejss.70229>.

Stroud, J.L. *et al.* (2025b) « The Use of Ecoacoustics to Monitor Soil Ecology: A Critical Review With Reference to Earthworms », *European Journal of Soil Science*, 76(6), p. e70229. Disponible sur: <https://doi.org/10.1111/ejss.70229>.

Sutherland, W.J. *et al.* (2024) « A horizon scan of global biological conservation issues for 2024 », *Trends in Ecology & Evolution*, 39(1), p. 89-100. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.11.001>.

Taylor, A.F. *et al.* (2026) « Hums in the humus: opportunities and challenges for soil ecoacoustics », *Trends in Ecology & Evolution*, p. S016953472500357X. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2025.12.007>.

Torsvik, V. et Øvreås, L. (2002) « Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems », *Current Opinion in Microbiology*, 5(3), p. 240-245. Disponible sur: [https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(02\)00324-7](https://doi.org/10.1016/S1369-5274(02)00324-7).

Turov, A.T. *et al.* (2025) « Registration of Sounds Emitted by the Madagascar Hissing Cockroach Using a Distributed Acoustic Sensor », *Sensors*, 25(7), p. 2101. Disponible sur: <https://doi.org/10.3390/s25072101>.

Vincent, Q. *et al.* (2019) « SPW AGRICULTURE, RESSOURCES NATURELLES ET ENVIRONNEMENT ».

Wang, J. (2023) « Principe de l'aimant géophone : fréquence, types et pourquoi l'AlNiCo est préféré », *Hangzhou HS Magnet Co., Ltd.*, 8 février. Disponible sur: <https://hsmagnet.com/fr/2023/02/08/le-principe-de-laimant-geophone/> (Consulté le: 20 mars 2026).

Xenaki, A. *et al.* (2025) *Distributed acoustic sensing for ocean applications*. Disponible sur: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.18344>.

Liens internet

- <https://www.terreom.fr/post/matiere-organique-sol>
- https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/25017_plan.sols_forestiers_batweb2.pdf
- <https://renature.brussels/fr/hotel/animaux/lumbricus-terrestris>
- <https://agriculture-de-conservation.com/L-importance-de-la-biodiversite-du.html>
- https://etat.environnement.wallonie.be/files/Infographie_2021/PDF/8.Sols.pdf
- <https://www.meteo.be/fr/belgique>
- <https://geoportail.wallonie.be/home.html>
- <https://metawal.wallonie.be/geonetwork/srv/api/records/c90878ba-eb80-467e-a410-2ade159cd7b3>
- <https://www.wildlifeacoustics.com/>
- <https://smartsolo.com/>
- <https://renature.brussels/fr/hotel/animaux/lumbricus-terrestris>
- <https://www.peak-studios.de/fr/rms/>
- <https://agromet.be/fr/pages/home/>
- https://manual.audacityteam.org/man/noise_reduction.html
- <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.butter.html>
- <https://www.biovision.ch/en/soundingsoil/discover/>
- <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>
- <https://www.proquest.com/docview/1266805989/abstract/9588B49E2634418CPQ/1>

Écouter les sols pour le suivi de l'activité de la macrofaune des sols : développement d'une méthodologie éco-acoustique

Morgane Clicque

Le sol est l'un des écosystèmes les plus riches de la planète, abritant plus de 59 % des espèces terrestres connues. La macrofaune du sol, et en particulier les vers de terre, y joue un rôle fondamental dans le maintien de la santé des sols. Cependant, cette biodiversité souterraine est menacée par l'intensification des activités humaines. Ces pressions impliquent qu'il est de priorité de suivre l'état de santé des sols. Or, les méthodes de suivi actuelles sont destructives, ponctuelles et ne permettent pas de capturer les dynamiques temporelles de ces organismes. L'éco-acoustique offre une alternative prometteuse, consistant à écouter les sons produits par la macrofaune de manière non invasive et continue.

Dans cette optique, l'objectif du mémoire est de développer une méthodologie utilisant le principe de l'éco-acoustique pour détecter et quantifier l'activité de la macrofaune du sol. L'approche expérimentale est réalisée à l'aide de microphones et de géophones et s'articule autour de trois étapes complémentaires : (1) l'identification de la signature acoustique des vers de terre et le développement de la méthodologie, (2) l'analyse de facteurs environnementaux sur l'activité détectée, (3) l'application de la méthodologie en conditions réelles et contrastées.

Les résultats obtenus indiquent que les vers de terre produisent des sons caractéristiques dans la bande de 2 à 10 kHz, détectables de manière fiable par le microphone. La comparaison des instruments a démontré que le microphone était le plus adapté à l'objectif, tandis que le géophone est limité par une bande de fréquence insuffisante. Un rythme circadien a été mis en évidence, avec une activité nocturne dominant largement l'activité diurne. La décomposition du signal a permis de démontrer que les corrélations apparentes entre la température, les précipitations et le bruit de fond n'étaient que des artefacts liés au cycle circadien. Sur le terrain, le suivi acoustique a confirmé la transposabilité de la méthode à un cas réel, révélant les différences acoustiques entre un champ cultivé et une prairie. L'ensemble des résultats obtenus démontre que l'éco-acoustique constitue un outil robuste, non invasif et continu pour le monitoring de la macrofaune du sol, ouvrant la voie à des applications en agriculture de conservation et en suivi de la biodiversité.