

Projet 11

Cartographie de l'abondance et de la diversité des vers de terre sur le campus de la faculté des sciences de Grandmont et étude de l'influence des paramètres environnementaux



Remerciements

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont accompagnés dans la réalisation de ce projet. Nous remercions nos tuteurs, Mr Graux et particulièrement Mr Boyer, qui nous a accompagnés tout au long de l'expérience, de la définition des objectifs du projet aux nombreuses séances en laboratoire.

Nous remercions tout le personnel de l'université de Tours qui a répondu à nos – nombreux – mails, nous a aidé au bon déroulement du projet et aux conseils, en particulier Mr Salvador, pour nous avoir montré comment réaliser des études de masse volumique de sols, Mr Bakyono, qui a su s'adapter aux contraintes de dernière minute de notre emploi du temps, et pour son calme même lorsque nous envahissions le laboratoire de géoscience. Nous remercions Mme Montes qui nous a fait confiance pour nos travaux en acceptant que nous fassions des espaces verts du campus de Grandmont notre terrain de jeu tout au long du semestre. Nous remercions plus largement tous les professeurs.es qui ont su être conciliants.es malgré les quelques retards en cours suite à des expériences qui ont duré plus longtemps que prévu.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	page 4
I. Écologie des vers de terre.....	page 5
1.1. Services écosystémiques	
1.2. Catégories écologiques	
1.3. Bioindication	
1.4. Spécificités du milieu urbain	
II. Contexte.....	page 8
2.1. Historique du projet	
2.2. Site d'étude	
III. Matériel et méthodes.....	page 11
3.1. Choix des aires de prélèvement	
3.2. Cartographie	
3.2.1. Calculs sur les zones d'échantillonnages	
3.2.2. Carte de répartition des vers de terre	
3.2.3. Carte du tassemement	
3.2.4. Distance aux bâtiments	
3.3. Paramètres mesurés	
3.4. Méthode de prélèvement	
3.5. Identification morphologique	
3.6. PCR et Séquençage ADN	
3.6.1. Présentation des échantillons	
3.6.2. Préparation du poste de travail	
3.6.3. Extraction de l'ADN	
3.6.4. Amplification	
3.6.5. Electrophorèse	
3.6.6. Séquençage	
3.7. Outils statistiques	
IV. Résultats.....	page 23
4.1. Observations de terrain des facteurs abiotiques	
4.2. Répartition de l'abondance, de la biomasse et des catégories écologiques	

4.2.1. Abondance et biomasse	
4.2.2. Diversité des vers de terre	
4.3. Tassement	
4.4. Analyses statistiques	
4.5. PCR et Séquençage	
4.5.1. PCR	
4.5.2. Séquençage	
V. Discussion	page 40
5.1. Facteurs influençant ou non la présence des vers de terre	
5.2. Comparaison des résultats à d'autres données	
5.3. Limites	
CONCLUSION	page 45
Bibliographie	page 46
Table des figures	page 49
Table des tableaux	page 50
Annexes	page 51

INTRODUCTION

L'impact de l'urbanisation des sols sur leurs communautés biologiques est peu documenté dans la littérature scientifique, ce qui entraîne un manque de connaissance de cette thématique chez les urbanistes, ainsi qu'une faible prise en compte juridique et, par conséquent dans les politiques publiques d'aménagement urbain (Guilland et al., 2018). Les publications existantes sont peu nombreuses et présentent souvent des résultats contradictoires, ne permettant pas de dégager de généralité sur les effets des aménagements urbains. Il est donc nécessaire de multiplier les analyses sur ce sujet afin de mieux comprendre ces phénomènes.

Dans ce contexte, un projet universitaire a été mené pour étudier l'abondance et la diversité des vers de terre en zone urbaine. Ce projet, dans la continuité d'une étude similaire réalisée l'année précédente, vise à cartographier la santé des sols sur le campus de Grandmont à Tours en utilisant les lombriciens comme bioindicateurs. Cette étude a vocation à être partagée aux gestionnaires des espaces verts de la faculté des sciences afin d'optimiser les pratiques de gestion et d'aménagement afin d'améliorer la qualité des sols et leur fonctionnalité écologique.

Pour identifier les facteurs influençant la qualité des sols, plusieurs paramètres environnementaux ont été mesurés et corrélés avec la diversité écologique observée.

I- Écologie des vers de terre

Les vers de terre sont des composantes essentielles des écosystèmes terrestres et des sociétés humaines ; notamment parce qu'ils accomplissent de nombreux services écosystémiques (Blouin et al., 2013). Leur rôle est étudié depuis longtemps (Darwin, 1881), mais les études restent principalement réservées aux milieux agricoles. Il est donc important d'étudier leur fonctionnement en milieu urbain.

1.1. Services écosystémiques

La présence des communautés lombriciennes jouent un rôle clé dans la formation et le fonctionnement des sols. Le paragraphe suivant présente un aperçu des paramètres pédologiques pouvant être influencés par la présence de vers de terre.

Les lombriciens influencent directement la structure et la composition des sols. Leurs déplacements et leurs galeries modifient les processus érosifs et contribuent à la formation de nouveaux horizons. De plus, certaines études suggèrent que le passage de matière dans le tube digestif des vers peut altérer les minéraux de certaines roches, bien que cet effet reste encore débattu (Blouin et al., 2013).

La densité des sols peut être modifiée par les vers de terre, qui peuvent l'augmenter ou la diminuer selon les conditions et les espèces présentes. Ces changements de densité et de porosité influencent la circulation de l'eau et la capacité de rétention du sol (Blouin et al., 2013).

Les cycles des éléments minéraux sont fortement influencés par l'activité des lombriciens. Ils jouent en effet un rôle déterminant dans l'humification et la minéralisation des litières, en fragmentant les matières végétales mortes, les rendant plus facilement accessibles aux microorganismes. Des études ont ainsi montré des modifications sur les cycles de l'azote, du phosphore, du potassium, calcium ou encore du magnésium en augmentant leur biodisponibilité pour les plantes ou en influençant leur lessivage par l'eau (Blouin et al., 2013, Le Bayon & Milleret, 2009).

Le cycle du carbone est également affecté : les vers de terre favorisent l'humification de la matière organique, contribuant à la séquestration du carbone dans le sol, mais augmentent aussi la minéralisation et la respiration microbienne, ce qui peut accroître les émissions de CO₂. Les émissions de N₂O , autre gaz à effet de serre, peuvent également être stimulées par leur activité (Blouin et al., 2013).

Enfin, les lombriciens influencent le devenir des polluants. Ils accélèrent la dégradation de certaines molécules en stimulant l'activité microbienne (Medina-Sauza et al., 2019) et favorisent l'absorption

des éléments traces par les plantes, tels que le cuivre ou le zinc (Hullot, 2023 ; Sizmur & Hodson, 2009).

1.2. Catégories écologiques

Dans son ouvrage de référence « Lombriciens de France : écologie et systématique », Marcel Bouché (1977) définit trois types de vers de terre qu'il nomme « catégories écologiques »: les endogés, les épigés et les anéciques en s'appuyant sur différents traits anatomiques, morphologiques, physiologiques et comportementaux. Cette classification a ensuite été reprise partout dans le monde et est aujourd'hui omniprésente dans les études scientifiques. Cela permet de classer les vers de terre selon des catégories spécifiques, bien que celles-ci ne soient pas forcément précises : il s'agit plutôt de différentes tendances qui permettent de regrouper les lombriciens, et ainsi de faciliter leur étude. Certains lombriciens sont ainsi caractérisés d' « épi-anéciques », qui montre bien le caractère continu de cette classification (Bottinelli & Capowiez, 2021). Cette classification est actuellement encore largement utilisée, et a été complétée plus récemment (Bottinelli et al., 2020), notamment avec une définition plus précise des différentes sous-catégories. Ainsi le classement des vers de terre dans ces différentes catégories est plus ou moins pertinent selon l'espèce étudiée (Figure 1).

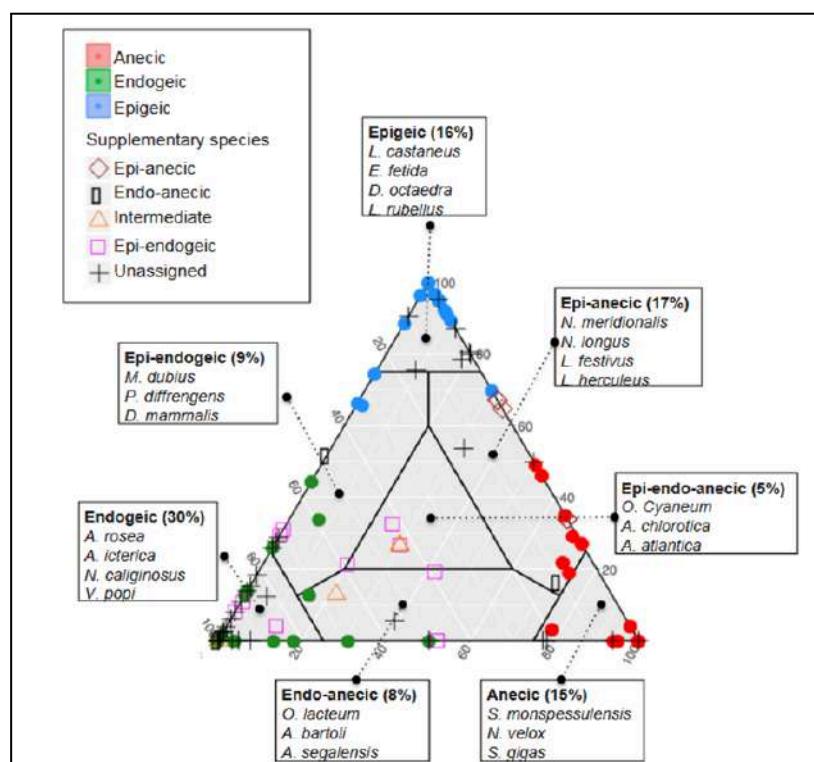


Figure 1 : Représentation du triangle écologique des vers de terre selon Bouché revisité par Bottinelli et al. (2020).

Voici une description des 3 grandes catégories écologiques (Bouché, 1977, Araujo, 2022).

Les *épigés* se développent en surface et se nourrissent principalement de la litière, on les nomme coprophages. De petite taille, ils ont développé une couleur brune-rouge afin de limiter la prédation importante. En effet, ces derniers se retrouvent parfois à l'air libre, subissant ainsi de la prédation par d'autres organismes. Ils ont une durée de vie courte et se reproduisent rapidement afin de tirer profit au maximum des apports irréguliers de matière organique en surface des sols. Notons qu'ils ont une activité respiratoire élevée.

Les *endogés* vivent dans les horizons les plus profonds du sol et se nourrissent de matière organique humifiée ou de racines mortes. Leur coloration est faible, blanchâtre ou rosée et leur activité respiratoire plus faible.

Les *anéciques* se retrouvent à différentes profondeurs dans le sol. Ils creusent des galeries verticales et sont ceux qui explorent le plus grand volume de sol. Ils consomment de la litière la nuit en surface et également de la matière minérale. Par conséquent, ce sont les principaux animaux responsables de la mobilité verticale de la matière dans les sols. Ils ont une taille assez importante et une coloration brune.

1.3. Bioindication

Au-delà de leur étude, les vers de terre renseignent sur de nombreux paramètres pédologiques et sont des indicateurs de la santé des sols (Paoletti, 1999). Étudier les populations lombriciennes permet, indirectement, d'étudier les sols qu'ils habitent. La facilité des méthodes d'échantillonnage, l'abondance des vers, leur diversité et leur sensibilité aux différents paramètres écologiques en font des indicateurs privilégiés. Ils peuvent ainsi renseigner sur la contamination aux éléments traces comme le cuivre ou le zinc, la teneur en matière organique, le pH du sol, etc. Ils sont également sensibles à de nombreux polluants chimiques, comme les produits phytosanitaires ou les microplastiques. (Paoletti, 1999, Pérès et al., 2011, Fusaro et al., 2018, Paoletti et al., 1998, Cui et al., 2022). Ces effets diffèrent selon les catégories écologiques de vers de terre. Cependant, d'autres facteurs, ne relevant pas des paramètres écologiques des sols à proprement parler, peuvent influencer leur présence. A titre d'exemple, la migration d'individus de certains sites vers d'autres, comprenant une part d'aléatoire, y participe. (Hodson et al., 2021, Maréchal, 2022, Eydoux et al., 2024).

1.4. Spécificité du milieu urbain

Le phénomène d'urbanisation a généré des villes de plus en plus grandes et une dégradation de nombreux paramètres écologiques de part la pollution, qu'elle soit lumineuse, chimique, sonore, etc. Cela a conduit à la destruction des milieux, notamment via l'artificialisation des sols. Ces paramètres impactent la biodiversité ainsi que les qualités de vie humaine. Les volontés politiques de renaturer l'espace urbain nécessitent donc un apport de connaissance et de recherche en écologie urbaine. Les études sur les communautés lombriciennes urbaines sont peu nombreuses, et les résultats parfois divergents (Maréchal, 2022). Une des particularités des milieux urbains est sa fragmentation. (Fahrig, 2003). On observe en effet une multitude d'espaces verts plus ou moins reliés les uns aux autres : c'est la Trame Brune. Elle permet de connecter les différentes populations de vers de terre entre elles. Ainsi des espaces séparés par des grandes surfaces asphaltées montrent une biodiversité de vers de terre plus faible que des espaces séparés par des faibles surfaces artificialisées. Ces mêmes surfaces artificialisées, lorsqu'elles sont étroites (pistes cyclables, routes étroites...) favorisent la migration des individus entre les surfaces qu'elles divisent. Il y a donc des effets opposés pour un même type d'aménagement sur les communautés de vers de terre (Maréchal et al., 2021). L'impact de la connectivité des zones de vie semble alors être un paramètre déterminant (Eydoux et al., 2024), à même titre que la durée depuis la dernière modification de l'occupation des sols (Maréchal, 2022). Enfin, la façon dont est reconstitué le sol après d'éventuels travaux influence la dynamique avec laquelle les populations se reconstruisent, par exemple avec l'ajout de terre en surface. (Vergnes et al., 2017).

II - Contexte

2.1. Historique du projet

Dans le cadre d'un projet similaire, en lien avec l'université de Tours, des étudiants de CPES Sciences de la transition écologique et sociétale ont, l'année dernière, cartographié l'abondance des vers de terre dans la ville de Chambray-lès-Tours afin de déterminer la santé des sols de cette dernière. Cette étude avait été réalisée dans le cadre du projet POPSU (POPSU, 2024), qui est une plateforme d'observation des projets et stratégies urbaines visant à accompagner les politiques territoriales de transition dans les domaines de la lutte contre le changement climatique. Ce projet s'inscrivant dans le principe de trame brune avait pour objectif de déterminer, à l'échelle de la ville de Chambray-lès-Tours, sa contribution aux politiques nationales de transitions par le biais d'indicateurs (les sols, les eaux, l'air), de l'artificialisation, de la renaturation, etc. De par leur travail sur la qualité des sols, les étudiants de Tours ont permis d'enrichir le projet POPSU.

Leur objectif général a donc été de faire un diagnostic des sols de Chambray-lès-Tours via un bio-indicateur, le vers de terre. Pour mener à bien cette étude, ils ont entamé une démarche scientifique. Une étude bibliographique sur la reconnaissance des espèces de vers de terre a été menée. Par la suite, ils ont choisi de caractériser les sols selon un critère majeur : leur isolement par rapport aux autres sites enherbés. Ils ont choisi une vingtaine de sites, dont la moitié étant isolés et l'autre non. Pour chaque site des paramètres plus spécifiques ont été pris en compte : la distance de la zone de prélèvement par rapport au goudron, la température, si la surface enherbée était supérieure ou non à 10 mètres carrés. Après prélèvement des vers de terre sur les vingt sites sélectionnés à l'aide de la méthode de la moutarde, et mise en place d'études statistiques à partir des données, il est ressorti de cette étude qu'il y a avait une tendance à ce que les sites non isolés présentent plus de vers que les sites isolés. Or cette tendance ne s'est pas révélée significative et les hypothèses de départ n'ont pas pu être confirmées. Ces dernières étant qu'il y a plus de vers sur les sites non isolés. Des études plus approfondies étaient nécessaires afin de mieux appréhender la complexité des phénomènes étudiés. En effet, le manque de résultats significatifs corrélé à un manque de données le confirme. De plus, les prélèvements n'avaient pas été effectués les mêmes jours, induisant une variabilité de la température non négligeable et impactant les résultats. Pour finir, seul l'isolement a été étudié comme paramètre influençant la présence ou non de vers.

Il paraît, dans ce contexte, intéressant de mener une étude avec une problématique similaire afin de pouvoir comparer les résultats, tout en se basant sur les erreurs faites l'an passé. Les paramètres choisis ne sont pas directement les mêmes, de manière à apporter si possible de nouveaux éléments de réponse face à la présence des vers de terre dans les sols.

2.2. Site d'étude

Les échantillonnages de terre et de vers de terre ont été réalisés sur le site de la faculté des sciences de Grandmont, situé au sud de la ville de Tours, dans la région Centre-Val de Loire (Figure 2).

Le site de Grandmont se situe sur un léger plateau, à environ 100 mètres d'altitude. Un faible relief est notable, tout comme la présence de pentes douces. La topographie favorise donc une répartition plutôt homogène de paramètres climatologiques et pédologiques tels que l'humidité et le tassemement des sols, conditions influençant l'activité des vers de terre, c'est-à-dire l'activité biologique du sol. Ces différents paramètres joueront sur l'étude menée.

Le site d'étude se trouvant sur un campus dit « vert » du fait de son implantation dans une forêt présentant une grande diversité de végétation aux alentours (arbres, haies, pelouse entretenues),

comporte malgré tout de nombreux espaces bétonnés et beaucoup de piétinement. Ces deux caractéristiques entraînent une diminution de l'activité biologique des sols à cause de la compaction de ce dernier, de son exposition au soleil ou encore de la barrière géographique engendrée. C'est pour cela qu'il est intéressant de choisir des sites de différentes surfaces et localisations, permettant la fluctuation des paramètres et d'en déduire des critères de qualité sur la santé des sols. Afin d'apporter d'éventuelles modifications, cette étude a pour objectif de fournir des informations nouvelles aux personnes gérant le campus et les espaces verts de la faculté. En effet, si dans le futur d'autres mesures ou travaux sont fait, ils pourront se baser et comparer avec les résultats trouvés sur l'étude actuelle et ainsi savoir quels sont les sites à préserver en priorité. Le fait de faire cette étude sur le site de l'université à également un but pédagogique. En effet, cela pourrait permettre aux étudiants, enseignants ou toutes personnes travaillant ici de prendre conscience de la santé des sols et l'importance des vers de terre comme indicateur de qualité des sols.

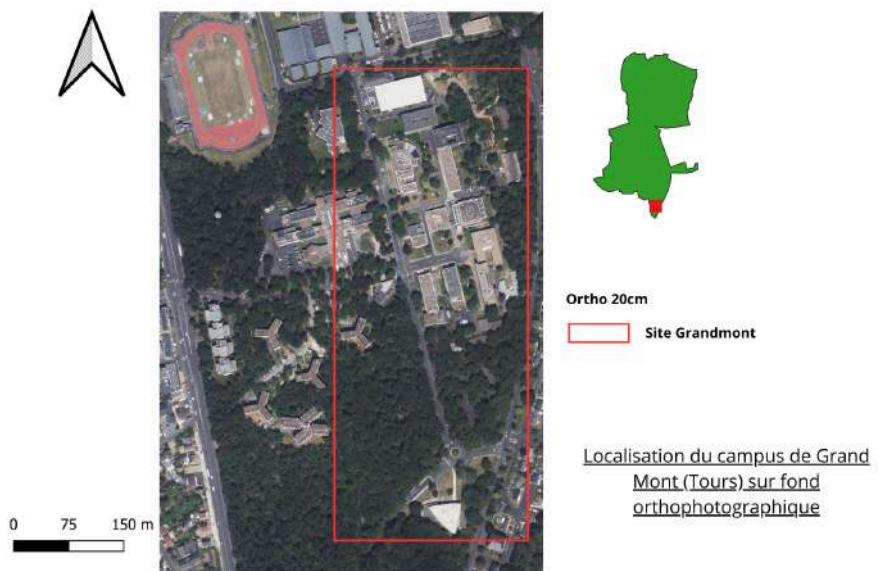


Figure 2 : Vue satellite du site d'étude sur le campus de Grandmont et sur la ville de Tours
(Orthophoto 2024 20cm - IGN)

III - Matériels et méthodes

3.1. Choix des aires de prélèvement

Cette étude vise à évaluer l'impact de la fragmentation des habitats sur les populations de lombrics. Notre démarche s'appuie sur le concept de « trame brune », en partant du principe que les surfaces artificialisées (béton, asphalte) agissent comme des barrières physiques qui limitent la dispersion des individus dans le sol. Nous avons donc cherché à tester si l'isolement au sein d'une matrice urbaine imperméable influence la présence des vers de terre.

Nous avons concentré nos recherches sur deux zones très fréquentées du campus : la Bibliothèque Universitaire et des bâtiments sciences (hors IUT/Pharmacie), ainsi que le secteur du restaurant universitaire. Ces espaces ont été préférés aux zones forestières périphériques, où la présence de lombrics est supposée négligeable, ce qui nous permet aussi de comparer des sols soumis à une forte activité humaine quotidienne. Nous avons constaté que bon nombre des parcelles sélectionnées étaient composées de bryophytes. Dans ces secteurs, nous avons sélectionné 22 îlots de végétation isolés par le béton. Pour avoir un échantillon représentatif, nous avons cherché à créer un gradient de surface important, avec des parcelles variant de 4,95 m² à près de 2 250 m², tout en prenant en compte leur degré d'isolement par rapport aux bâtiments environnants.

Une première identification des sites a été réalisée par photo-interprétation sur Google Maps pour estimer les surfaces enherbées. Cette étape a été complétée par une analyse sur QGIS : afin de standardiser les prélèvements et d'éviter les « effets de lisière », nous avons défini les points d'échantillonnage précisément au niveau du centroïde de chaque parcelle calculé par le logiciel. Enfin, une vérification systématique sur le terrain a permis de valider la conformité des zones vues par satellite et la réalité des obstacles physiques (voir Figure 3). Concernant les conditions locales de surface (piétinement étudiant, ombrage, type de végétation), nous avons choisi de ne pas les utiliser comme critères d'exclusion. Cela nous permet de conserver une image fidèle de l'hétérogénéité des espaces verts du site.

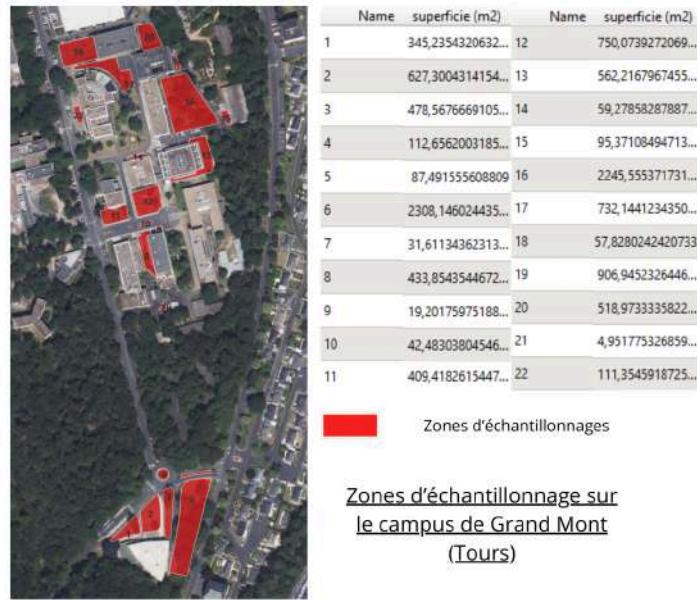


Figure 3 : Localisation des différentes zones d'échantillonnage

3.2. Cartographie

L'un des objectifs de ce projet est de représenter la distribution des vers de terre de manière cartographique, afin de visualiser les variations d'abondance entre les zones et de repérer les secteurs où le sol est fertile ou appauvri. Cette cartographie permet également de comparer les différentes zones entre elles et d'identifier les facteurs influençant la répartition, tant en termes d'abondance que de diversité des vers de terre.

Les 22 zones d'échantillonnage ont été délimitées sous forme de polygones à l'aide du logiciel Google My Maps, utilisé pour la saisie et la géolocalisation des données de terrain. Les fichiers ont ensuite été exportés au format KML et intégrés dans QGIS (version 3.44.6), logiciel SIG dédié à la cartographie et à l'analyse spatiale des données de l'étude.

Une orthophotographie à résolution de 20 cm a été utilisée comme fond de carte afin de faciliter la localisation et la visualisation des zones d'échantillonnage. Cette image a été intégrée dans QGIS via l'URL d'un service web (WMS), permettant de superposer les polygones des zones sur une vue aérienne précise et récente du terrain.

L'ensemble des traitements a été réalisé dans le système de coordonnées Lambert 93.

3.2.1. Calculs sur les zones d'échantillonnages

L'outil « Centroïdes » de QGIS a été utilisé afin de déterminer le point central de chaque zone d'échantillonnage. Cet outil permet de calculer automatiquement la position moyenne géométrique des entités polygonales et de générer une couche de points correspondante, avec leurs coordonnées X et Y. Les centroïdes obtenus ont servi de référence spatiale pour localiser les points de prélèvements sur le terrain (Figure 4).

La superficie de chaque zone a été calculée dans QGIS à partir des polygones d'échantillonnage. Pour cela, la table attributaire de la couche contenant les entités polygonales a été utilisée, et un nouveau champ a été créé pour stocker les valeurs de surface en mètres carrés, calculées automatiquement par l'outil géométrique `$area`. Ces valeurs (Figure 3) ont servi à comparer les dimensions des zones et à réaliser des analyses statistiques mettant en lien la superficie et l'abondance des vers.

3.2.2. Carte de répartition des vers de terre

Des cartes représentant la distribution de l'abondance (Figure 10) et de la biomasse (Figure 11) des vers de terre ont été réalisées. Pour ce faire, les données de nombre et de biomasse ont été saisies dans deux nouveaux champs respectifs de la table attributaire de la couche de polygones. Ainsi, pour chaque zone, le nombre de vers et la biomasse prélevés ont été associés. Ensuite, dans les propriétés de la couche de polygones, une symbolologie graduée a été appliquée, permettant de différencier les zones selon leurs valeurs, par un dégradé de couleurs allant des valeurs faibles aux valeurs élevées. La distribution du nombre et de la biomasse des vers de terre étant fortement asymétrique, avec une concentration de valeurs faibles et quelques valeurs élevées, une classification en cinq classes a été retenue afin de représenter de manière lisible les principaux niveaux d'abondance. La méthode des ruptures naturelles (Jenks) a été utilisée, car elle permet d'identifier les seuils correspondant aux discontinuités les plus marquées dans la distribution des données. Une classe spécifique a été attribuée à la valeur zéro afin de distinguer les zones caractérisées par une absence totale de vers de terre, situation écologiquement distincte des faibles abondances. Les autres classes ont été définies à partir des ruptures naturelles observées entre les groupes de valeurs, notamment entre les faibles, moyennes et fortes abondances ou biomasse.

Une carte de répartition des catégories écologiques (Figure 13) a été élaborée à partir des données de biomasse des vers de terre collectées dans chaque zone d'échantillonnage du campus. Les individus adultes ont été identifiés à l'espèce (*Lumbricus terrestris*, *Octolasmium terrestris* et *Aporrectodea rosea*), tandis que les individus juvéniles, non identifiables à l'espèce, ont été intégrés uniquement aux catégories écologiques.

Les biomasses ont été regroupées par groupes écologiques afin d'obtenir, pour chaque zone, une valeur totale (incluant les individus juvéniles et adultes). Une classification catégorisée des zones en quatre catégories (anéciques dominants, endogés dominants, équilibre entre groupes ou absence de biomasse) a ensuite été réalisée pour déterminer la dominance écologique. La carte permet ainsi de visualiser la répartition spatiale des catégories écologiques dominantes de vers de terre à l'échelle du campus.

3.2.3. Carte du tassemement

Les valeurs de masse volumique ont été attribuées à chaque zone dans un nouveau champ de la table attributaire. La classification par quantiles a été utilisée pour représenter le tassemement du sol, afin de répartir les valeurs de manière équitable entre les classes et de garantir que chaque classe contient un nombre similaire d'observations. Cette méthode a été retenue car elle évite que certaines classes soient sous-représentées et permet une comparaison visuelle équilibrée des sites (Figure 15), notamment lorsque les données sont homogènes ou présentent des valeurs manquantes, comme ce fut le cas pour les valeurs de masse volumique.

3.2.4. Distance aux bâtiments

L'utilisation du logiciel Qgis a également permis de mesurer la distance la plus courte entre une zone d'échantillonnage et le bâtiment le plus proche. Pour se faire, la couche vectorielle des bâtiments du département 37 a été importée depuis les bases de données de l'IGN. Une sélection spatiale a été effectuée sur Qgis afin de conserver uniquement les bâtiments situés sur le campus, qui ont été exportés dans une nouvelle couche. La distance minimale entre chaque bâtiment et les zones d'échantillonnage a été calculée à l'aide de l'outil "Lignes les plus courtes" de Qgis, en considérant la couche de polygones (zones d'échantillonnages) comme couche d'entrée et la couche des bâtiments des comme couche cible. L'outil a généré une couche de lignes contenant un nouveau champ représentant la distance minimale, exprimée en mètres, entre un polygone et le bâtiment le plus proche.

3.3. Paramètres mesurés

L'objectif de cette étude est d'utiliser l'abondance des lombries comme indicateur de la santé des sols du campus de Grandmont. Notre volonté première était d'avoir une réelle diversité de superficie dans le but de comparer le nombre de vers de terre à l'espace disponible. Au-delà de la seule superficie des îlots, nous avons cherché à comprendre l'influence de facteurs abiotiques et biotiques précis (tassemement, ensoleillement, structure de la végétation). Cette approche a été affinée en tenant compte des limites rencontrées lors de l'étude précédente : nous avons notamment accordé une

importance capitale aux conditions météorologiques. Pour éviter d'obtenir des résultats peu cohérents, les dates d'échantillonnage ont été choisies lors de journées sans froid particulier, garantissant des conditions favorables pour la capture de lombrics.

Le protocole de relevé sur le terrain, couplé aux mesures sur SIG, découle directement de nos hypothèses écologiques. Premièrement, nous avons mesuré le tassement du sol (lié au piétinement) et l'exposition (ombre/soleil). Nous faisons l'hypothèse que les sols meubles et ombragés sont plus favorables aux vers, car ils facilitent leurs déplacements et maintiennent une humidité constante, contrairement aux zones compactées ou trop exposées aux variations thermiques. Le tassement des sols a pu être mesuré en utilisant la méthode du cylindre. Nous avons introduit un cylindre de volume donnée dans les horizons les plus superficiels de sols de chaque site et prenant soin d'éliminer la litière en surface. Certains sites n'ont pas été prélevés car la trop forte présence d'éléments grossiers abimait le cylindre lorsqu'il s'enfonçait. Le cylindre a ensuite été retiré du sol à l'aide d'un couteau de pédologie et son contenu à été placé dans une barquette en aluminium. Ils ont été passés à l'étuve pendant 72 heures afin d'éliminer l'eau contenu dans le sol. Les échantillons séchés ont ensuite été pesés. En divisant la masse du sol par le volume prélevé, on a pu obtenir sa masse volumique, ce qui permet de comparer les sols des différents sites. Deuxièmement, via QGIS, nous avons calculé la distance aux bâtiments et l'isolement des parcelles. L'hypothèse est qu'une proximité entre les zones enherbées favorise la "trame brune", facilitant la dispersion et l'homogénéisation des populations de lombrics. Concernant la végétation, nous avons caractérisé chaque site selon la présence d'arbres ou de végétation basse uniquement. Nous supposons que les zones de végétation basse pourraient être plus riches en vers que les zones arborées, potentiellement grâce à une température de sol plus stable et un apport organique différent. Enfin, le paramètre central reste la surface de l'îlot : nous nous attendons à une corrélation positive entre la taille de la parcelle et l'abondance des vers, une grande surface offrant une diversité de ressources plus importante et donc au final sûrement un effet tampon contre les perturbations extérieures.

3.4. Méthode de prélèvement

Les centroïdes (Figure 4) ont été utilisés afin de déterminer de manière objective le point central de chaque zone d'échantillonnage. Ce point central a ensuite été utilisé comme lieu de prélèvement sur les sites. L'objectif était de positionner l'échantillonnage au cœur de la zone étudiée, de manière à s'éloigner au maximum des éléments susceptibles d'influencer les caractéristiques du sol comme les bâtiments, les routes, les zones artificialisées. Cette méthode limite l'influence des zones situées en bordure et permet d'obtenir un point de prélèvement plus représentatif de l'intérieur de la

surface enherbée. L'utilisation des centroïdes permet un positionnement des prélèvements plus cohérents et moins hasardeux, ce qui améliore la fiabilité des résultats et assure donc une meilleure comparaison entre les sites.

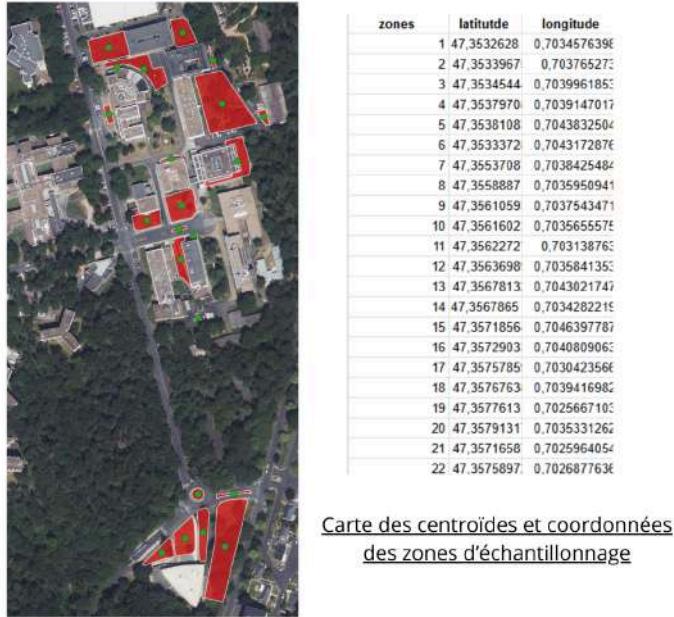


Figure 4 : Carte des centroïdes et coordonnées des zones d'échantillonnage

Il existe de nombreuses et diverses méthodes de prélèvement de vers de terre, mais la méthode retenue pour ce projet est celle utilisant une solution de moutarde. Elle consiste à appliquer une solution de moutarde diluée dans de l'eau sur une surface de un mètre carré pour que les vers de terre de cette zone remontent à la surface car la moutarde les irritent et les poussent à sortir de leur galerie (Figure 5). Cette méthode de prélèvement a été choisie étant donné qu'elle dispose de nombreux avantages qui font qu'elle est simple à mettre en place, rapide, ne détruit pas trop les sols, à un faible impact visuel car il s'agit d'une méthode superficielle. De plus, elle n'utilise pas de produits toxiques pour la biodiversité (contrairement aux méthodes utilisant du formol par exemple). Néanmoins, selon les protocoles existants, il existe quelques limites à cette méthode. En effet, son efficacité va dépendre des conditions météorologiques, de l'ensoleillement, de l'humidité du sol ainsi que de son tassemement ce qui peut fausser les résultats. De plus, elle ne va pas permettre la remontée de tous les vers présents car les espèces endogées enfouies dans le sous-sol, ne remontent pas toujours sous l'effet de la moutarde. Comme certains groupes ne réagissent pas à la moutarde, la méthode peut également sous estimer la diversité. Il est conseillé de ne pas utiliser cette méthode sur des sols engorgés ou trop secs

ainsi que de ne pas piétiner le sol lors du ramassage car cela peut modifier sa structure. Ces paramètres limitants peuvent donc rendre cette méthode moins fiable que des extractions chimiques ou manuelles.

Mme Montes, la responsable de la faculté, a donné son accord afin de faire ces prélèvements sur le campus à l'aide de cette méthode. Certaines n'auraient pas pu être applicables. De plus, il s'agit de la même méthode que celle utilisée en 2024 pour le projet se déroulant sur la ville de Chambray-lès-Tours. Cela permet de comparer les résultats entre sites et entre les deux années. Le matériel étant déjà disponible au laboratoire de la Faculté des sciences de Grandmont, le projet a pu rapidement commencer. Seule la moutarde a dû être commandée.

Le matériel nécessaire d'après cette méthode pour les 22 sites est 6600 g de moutarde. Chaque arrosoir contient 10 litres d'eau et 150 g de moutarde et deux arrosoirs étaient appliqués par site soit 300 g de moutarde par site. Il y avait en tout à disposition quatre arrosoirs et quatre bidons de 10 litres afin de pouvoir transporter la solution diluée et les bidons ont servi de réservoirs pour les arrosoirs. Il a également fallu avoir des pinces pour récolter les vers, des pots remplis d'eau pour rincer les vers afin d'enlever la moutarde sur eux et donc permet d'éviter la mort des individus, des sacs zip numérotés en fonction du site et contenant de la terre pour pouvoir stocker temporairement les vers puis les transporter au laboratoire dans le but de les identifier. Afin de délimiter la surface, il faut se munir ou créer une surface de un mètre carré, alors nous l'avons fabriqué à l'aide d'un mètre et d'une corde, qui sera maintenue sur le sol grâce à des crochets aux extrémités.

Pour la préparation de la solution et le protocole d'arrosage, il faut pour chaque arrosoir un mélange de 10 litres d'eau et de 150 grammes de moutarde. Pour chaque site, deux arrosoirs sont vidés en tout : un au début du chronomètre, puis un second identique 15 minutes après le premier. Il est essentiel que la solution soit parfaitement homogène et bien mélangée car la moutarde a tendance à se déposer au fond de l'arrosoir et donc ne sera pas versée sur le sol. La végétation doit être coupée au plus court afin de faciliter l'arrosage homogène et la collecte des individus. L'arrosage se fait donc sur les zones choisies auparavant au niveau des centroïdes et si possible sur une surface plane et homogène pour éviter que la moutarde ne soit plus sur la zone définie. Lors du ramassage des individus, il est important de bien attendre que le vers soit sorti entièrement du sol pour ne pas le découper.



Figure 5: Prélèvement des vers de terre sur le site numéro 8.

3.5. Identification morphologique

Dans un souci de continuité avec l'étude menée lors de l'année universitaire 2024-2025 et pour garantir la comparabilité des données, nous avons reconduit le même protocole d'identification en nous appuyant sur les référentiels taxonomiques et les clés de détermination utilisées l'an passé (Annexes I, II, III).

Chaque individu a d'abord été soigneusement rincé à l'eau claire. Cette étape préalable est indispensable pour éliminer le mucus et les particules de terre susceptibles de masquer les critères morphologiques externes. La procédure d'identification s'est ensuite déroulée en plusieurs phases successives. La première étape a consisté à séparer les adultes des juvéniles sur la base de la maturité sexuelle. Ce tri s'effectue par l'observation du clitellum, un renflement épidermique caractéristique. Les individus ne présentant pas de clitellum, ou dont celui-ci était à peine formé, ont été considérés comme juvéniles. Pour ces derniers, l'identification à l'espèce étant morphologiquement incertaine, voire impossible, nous nous sommes limités à déterminer leur catégorie écologique. Les adultes, quant à eux, ont fait l'objet d'une identification taxonomique complète.

L'ensemble des vers a ainsi été classé selon les trois grandes catégories écologiques, en observant principalement la pigmentation et la taille. Nous avons distingué les épigés, de petite taille et uniformément pigmentés (rouge-brun) ; les endogés, de taille variable mais caractérisés par une absence de pigmentation (teintes pâles, rosées ou grisâtres) ; et enfin les anéciques, reconnaissables à leur grande taille et à une pigmentation dorsale marquée à l'avant qui s'estompe vers l'arrière (gradient

antéro-postérieur). Pour l'identification spécifique des adultes, nous avons analysé une combinaison précise de traits morpho-anatomiques. Les critères déterminant ont été la position du clitellum, la forme de la tête (type de prostomium) ainsi que par la couleur générale. Enfin, les individus dont l'identification morphologique restait ambiguë (spécimens abîmés ou morphologie atypique) ont été isolés afin d'être soumis prioritairement à l'analyse moléculaire (PCR) décrite ci-après.

3.6. PCR et Séquençage ADN

Afin de vérifier l'exactitude de l'identification morphologique des vers de terre en laboratoire, d'identifier le groupe écologique ou l'espèce de certains individus juvéniles, et d'analyser des vers difficiles à échantillonner, une PCR suivie de séquençages a été réalisée. La PCR constitue une étape indispensable en amont du séquençage de l'ADN, car elle permet d'amplifier les fragments ciblés et de vérifier la présence d'une quantité suffisante d'ADN dans chaque échantillon, évitant ainsi l'envoi au laboratoire d'échantillons inexploitables.

3.6.1. Présentation des échantillons

L'étude a porté sur 12 échantillons (Tableau 1), dont un doublon (n° d'échantillon 4 et n° d'échantillon 12) destiné à équilibrer la centrifugeuse. Chaque échantillon correspond à un fragment de ver de terre prélevé individuellement. Pour chaque échantillon, les informations suivantes ont été renseignées dans le carnet de laboratoire : numéro d'échantillon, espèce présumée, stade de développement (adulte ou juvénile), site de prélèvement. Chaque individu a été manipulé séparément afin d'éviter toute contamination.

Numéro de l'échantillon	Hypothèse sur l'espèce	Numéro du site d'échantillonage
1	Octolasmium cyaneum	7
2	J Octolasmium cyaneum	16
3	J Octolasmium cyaneum	7
4	Endogé adulte ND	21
5	Lombricus terrestris	7
6	J Lombricus terrestris	7
7	Allolobophora rosea rosea	2
8	Allolobophora rosea rosea	21
9	Endogé adulte ND	2
10	Allolobophora c. chlorotica typica	2
11	Anécique tête noire	13
12	Endogé adulte ND	21

Tableau 1: Présentation des échantillons de vers étudiés

3.6.2. Préparation du poste de travail

Avant toute manipulation, la paillasse a été nettoyée avec de l'eau de Javel pour détruire tout ADN résiduel. Un rinçage à l'éthanol a ensuite été réalisé pour éliminer les traces de Javel. Le matériel de dissection (lame, scalpel) a été nettoyé à la Javel puis à l'éthanol entre chaque échantillon afin de limiter les risques de contamination croisée.

3.6.3. Extraction de l'ADN

L'extraction de l'ADN a été réalisée à l'aide d'une méthode sur colonne. Cette technique repose sur la fixation de l'ADN sur une membrane de la colonne, suivie de lavages successifs pour éliminer les contaminants, puis de l'élution de l'ADN purifié.

Les tissus sont dans un premier temps lysés. Les vers ont été découpés en petits fragments avec un scalpel stérile sur une lame de microscope. Chaque fragment a été placé dans un tube contenant: un tampon de lyse (Buffer AL), un réactif enzymatique (Protéinase K), le tissu de l'échantillon. Les tubes ont été mélangés puis incubés sur une plaque chauffante pour assurer la lyse des cellules et la libération de l'ADN.

L'ADN est ensuite fixé. Après la lyse, 200 µL de tampon AL supplémentaires et 200 µL d'éthanol ont été ajoutés. Le mélange a été transféré dans une colonne munie d'un filtre et centrifugé à 8 000 tours/min pendant 1 minute. L'ADN se fixe sur la membrane, tandis que le filtrat est éliminé. Puis deux lavages ont été réalisés pour éliminer les impuretés et l'alcool résiduel de l'ADN: un premier avec 500 µL de tampon AW1 puis un second avec 500 µL de tampon AW2 centrifugé tous deux pendant 3 minutes à 14 000 tours/min). Ces étapes permettent d'obtenir un ADN purifié prêt pour l'élution.

Les colonnes ont été placées dans de nouveaux tubes propres, et 200 µL de tampon d'élution ont été ajoutés sur la membrane. Une centrifugation finale (1 minute à 8 000 tours/min) a permis de récupérer l'ADN purifié dans le tube. Chaque tube a été étiqueté avec le type de manipulation (soit X ici pour extraction), la date et le numéro d'échantillon.

La concentration en ADN a été déterminée à l'aide d'un fluorimètre (type Qubit). Pour chaque échantillon, 2 µL d'ADN ont été prélevés, ainsi que 2 µL d'un témoin positif (concentration d'ADN connue) et d'un témoin négatif (absence d'ADN), puis mélangés à 198 µL de solution fluorescente préparée au préalable. Les échantillons ont été vortexés avant d'être analysés avec le Qubit pendant 2 minutes, en commençant par les témoins positif et négatif. Cette étape permet de vérifier que la quantité d'ADN est suffisante pour l'amplification par PCR.

3.6.4. Amplification

L'amplification de l'ADN de chaque échantillon se fait à l'aide d'un mélange de plusieurs réactifs issus du kit GoTaq et de l'ADN des vers. Pour les réactifs, un master mix a été réalisé. Cela signifie que les valeurs de solutions initiales à ajouter ont été multipliées par le nombre de tubes analysés. Pour ce faire, du DNTP (des bases azotées) a été mélangé avec des amores permettant de viser le gène d'intérêt, du BSA, du MGCL2, de l'eau pure, de la solution tampon ainsi que Taq polymérase, la solution contenant l'enzyme copiant le gène. Une fois la solution prête, 24 microlitres de cette dernière ont été incorporés dans des tubes très réduit, où au préalable 1 microlitre de chaque solution, contenant le gène d'intérêt, avait été placé. Toutes ces étapes ont été réalisées sous des hottes à UVs permettant de réduire les risques de contamination par des ADN extérieurs.

Lorsque les 14 tubes (12 échantillons + le contrôle positif et le négatif) se trouvaient à un volume de 25 microlitres, ils ont pu être placés dans le Thermo Cycler, une machine permettant d'amplifier de manière considérable les ADN recherchées. Pour ce faire, le programme "COI 45" a été choisi. Le nombre 45 correspond à la température à laquelle les amores s'accrochent à l'ADN. Plus la température est haute, plus les amores sont spécifiques. Un enchaînement de trois cycles de températures est alors répété 40 fois. A chaque cycle l'ADN se trouve être doublé. Le temps de séjour des échantillons dans le Thermo Cycleur a été de 3 heures.

3.6.5. Electrophorèse

Après amplification de l'ADN, il reste seulement une étape pour finaliser la PCR. Cette étape se nomme l'électrophorèse et nécessite la création d'un gel. Ce gel a été fabriqué à partir de gel d'Agarose et d'une solution tampon, ici la solution TAE. Pour chaque gel un pourcentage en Agarose est notifié. Pour la détermination de petits ADN, le gel nécessite d'être dense, donc très concentré en agarose. Ici ce n'était pas le cas, il a donc été réalisé à 0.8%. Avant d'être déposé dans un moule compatible avec le générateur de l'électrophorèse, le mélange a légèrement été chauffé au micro-onde afin d'être complètement clair, puis des intercalants ADN ont été rajoutés. Les intercalants vont permettre, au même titre que la solution master mix, de révéler l'ADN d'intérêt. Enfin des peignes ont été déposés sur le gel. Il a fallu attendre 20 minutes afin que ce dernier prenne.

Après le temps d'attente, les peignes ont été enlevées, le moule a été relié au générateur, et de la solution tampon a été placée dans le fond du moule. Par la suite, 5 microlitres de chaque échantillon d'ADN mélangé au master mix a été déposé dans les puits, creusés au préalable par les peignes. Un puit correspondant à un échantillon. La même quantité de "ladder", soit de produit de référence/d'échelle, a été disposée sur la même ligne que les échantillons.

Après, de nouveau, 20 minutes d'attente, le gel a été enlevé du moule afin d'être analysé.

3.6.6. Séquençage

Le séquençage est permis si la PCR a fonctionné. Pour ce faire, les échantillons préparés ont été dilués et envoyés en laboratoire. Ce dernier nous renvoie des séquences d'ADN qu'il faut comparer avec des bases de données existantes en ligne.

3.7. Outils statistiques

Dans le cadre de cette étude, des outils de programmation étaient nécessaires pour le traitement des données. L'environnement de développement intégré “RStudio”, conçu pour faciliter le langage “R” a été utilisé à des fins d’analyse. Cette plateforme préférée par rapport à Python pour ses analyses statistiques et sa visualisation de données, permet de modéliser des résultats obtenus lors d'études scientifiques et de mettre en avant des potentielles corrélations. Les principales fonctionnalités de RStudio, pour ce genre d'étude, sont l'éditeur de code, la console interactive et le visualiseur de graphique. Afin de permettre l'exploitation de fichiers externes à la plateforme il est nécessaire d'enregistrer les données sous format csv. Des formulations statistiques ont été nécessaires pour la conception de graphiques : boxplot, plot, barplot. Des tests statistiques tels que Pearson, Student, ANOVA ont été utilisés pour mettre en avant des corrélations possibles. L'outil “irec” a également été utilisé afin de renommer les paramètres des variables.

IV - Résultats

4.1 Observations de terrain des facteurs abiotiques

Le tableau ci-dessous (Tableau 2) présente pour chaque site les coordonnées GPS du centroïde, la superficie, le type de végétation observée, ainsi que plusieurs paramètres mesurés au moment de l'échantillonnage : présence de soleil, température, humidité, tassemement du sol, présence de cailloux et état de sécheresse du sol. Ces informations combinent des observations directes effectuées sur le terrain et des données mesurées ou estimées qui peuvent permettre d'identifier les raisons qui font que les vers de terre ne remontent pas à la surface et de la différence d'abondance de vers entre les sites. Dans le tableau, la lettre O signifie oui, la lettre N veut dire non.

Le tableau ci-dessous présente, pour chaque site, la superficie en mètres carrés ainsi que plusieurs paramètres environnementaux relevés au moment de l'échantillonnage réalisée entre le 9 et le 18 octobre. Les données incluent l'humidité, la température, l'exposition au soleil, l'état de sécheresse du sol et la présence de cailloux. Pour les variables de température et d'humidité, les valeurs ont été renseignées à partir de données météorologiques obtenues via le site MeteoHorizon, qui permet d'accéder aux conditions exactes d'un lieu donné en fonction du jour et de l'heure. Ces mesures n'ont donc pas été estimées à l'œil nu. Dans le tableau, O indique une présence observée, N une absence, et ND une donnée non déterminée. Les valeurs "ND" correspondent aux paramètres qui n'ont pas pu être évalués au moment de l'échantillonnage. Un retour sur le terrain à une date future n'aurait pas permis de les compléter de manière fiable car certaines caractéristiques comme la sécheresse du sol, varient rapidement au cours du temps. Les variables binaires (présence au soleil, sol sec, sol caillouteux) ont été renseignées à l'œil nu, ce qui implique une part de subjectivité et une fiabilité relative. Ces paramètres retranscrits ci-dessous permettent d'explorer les conditions locales susceptibles d'influencer la présence ou l'abondance des vers de terre en surface.

Sites	Superficie (m ²)	Humidité (%)	Température (°C)	Présence au soleil	Sol sec	Sol Caillouteux
1	345	72	13	O	O	O
2	627	77	11	O	O	N
3	478	72	13	N	O	N
4	113	77	11	O	O	O
5	87	59	15	O	O	N
6	2308	59	15	N	N	N
7	33	72	16	N	N	N
8	434	68	16	O	O	N
9	19.2	59	17	N	N	N
10	42	55	16	O	N	N
11	409	59	17	O	ND	ND
12	750	56	18	O	ND	ND
13	562	55	16	N	N	N
14	59	59	16	N	N	O
15	95	68	17	O	ND	ND
16	2246	68	17	N	ND	N
17	732	63	15	O	O	N
18	59	68	17	N	N	N
19	907	60	18	O	O	ND
20	519	60	18	N	ND	N
21	4.95	63	15	N	ND	N
22	111	59	16	O	O	N

O: présence

N: absence

ND: non déterminé

Tableau 2 : Paramètres abiotiques des sites échantillonnés

4.2. Répartition de l'abondance, de la biomasse et des catégories écologiques

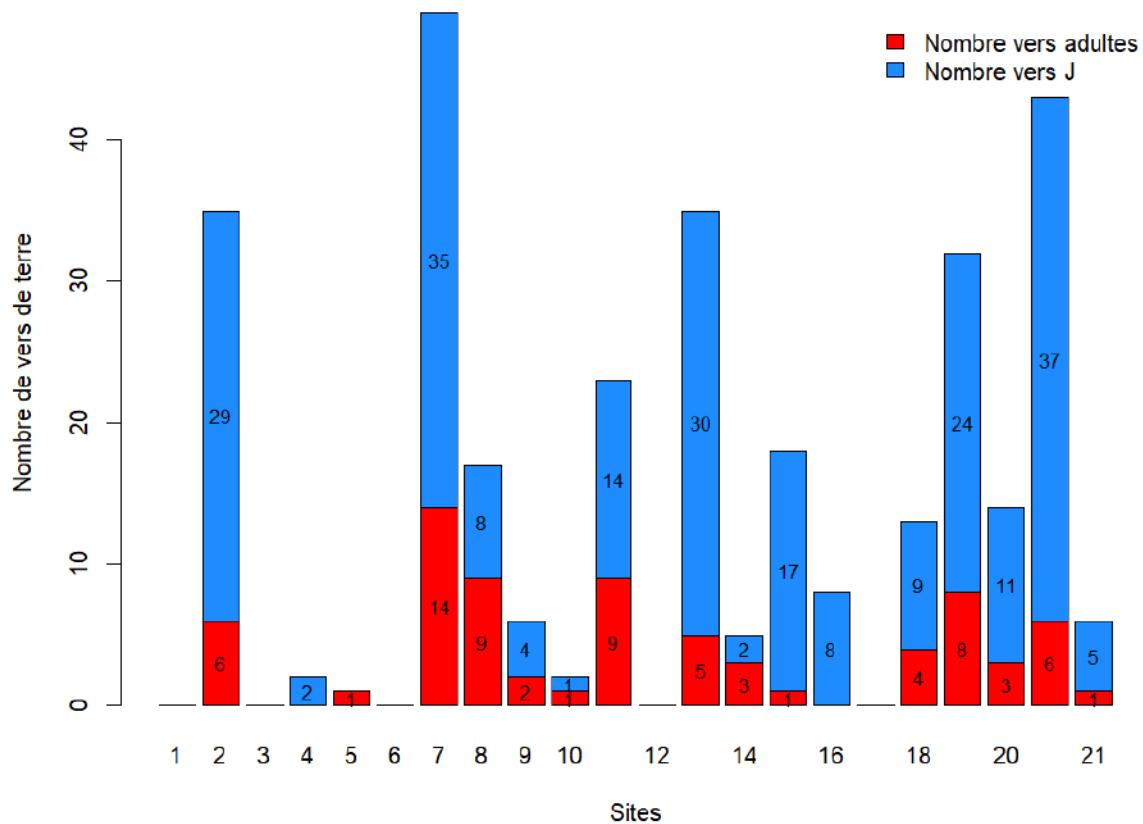
4.2.1. Abondance et biomasse

Un total de 309 lombriciens à été échantillonné avec une répartition très variables à l'échelle du campus avec un minimum de 0 et un maximum de 49 vers de terre (Tableau 3).

Sites	Nombre total vers	Nombre vers juvéniles	Nombre vers adultes	biomasse (g)
1	0	0	0	0
2	35	29	6	8,9
3	0	0	0	0
4	2	2	0	0,2
5	1	0	1	0,4
6	0	0	0	0
7	49	35	14	22,3
8	17	8	9	17,1
9	6	4	2	4,3
10	2	1	1	0,5
11	23	14	9	16,6
12	0	0	0	0
13	35	30	5	12,6
14	5	2	3	9,8
15	18	17	1	7,9
16	8	8	0	0,9
17	0	0	0	0
18	13	9	4	10,1
19	32	24	8	20,3
20	14	11	3	8,4
21	43	37	6	31,3
22	6	5	1	20,9

Tableau 3 : Résultats d'échantillonnages

Afin de permettre une visualisation plus aisée des données, la figure ci-dessous (Figure 6), met en avant la répartition du nombre de vers adultes et juvéniles (J) par site. Les juvéniles sont majoritairement plus présents en nombre sur la quasi-totalité des sites à l'exception des sites 5, 8,10 et 14.



J = Juvénile

Figure 6 : Répartition du nombre de vers de terre en fonction des sites

La carte ci-dessous (Figure 7) représente la distribution spatiale de l'abondance des vers de terre, selon une classification de Jenks. Les zones sont colorées selon une échelle de densité de l'abondance, allant de 0 (absence, zone en gris clair) à 35-49 individus (zones en rouge foncé). Les intervalles de la classification sont exclusifs à gauche et inclusifs à droite, c'est-à-dire que la borne inférieure n'est pas comprise dans l'intervalle, tandis que la borne supérieure l'est (par exemple, l'intervalle 1 – 8 comprend les valeurs >1 et ≤ 8). Deux zones présentent une abondance très élevée (entre 35 et 49 individus), la zone 7 et 21. Les zones 2, 13 et 19, affichent une abondance intermédiaire à élevée (entre 23 et 35 individus). Les zones 8, 11, 15, 18 et 20 ont une abondance modérée (entre 8 et 23 individus). Les zones 4, 5, 9, 10, 14, 16 et 22 ont une abondance faible (entre 1 et 8 individus). Tandis que certaines zones (1, 3, 6, 12, 17) n'ont aucun vers détecté.

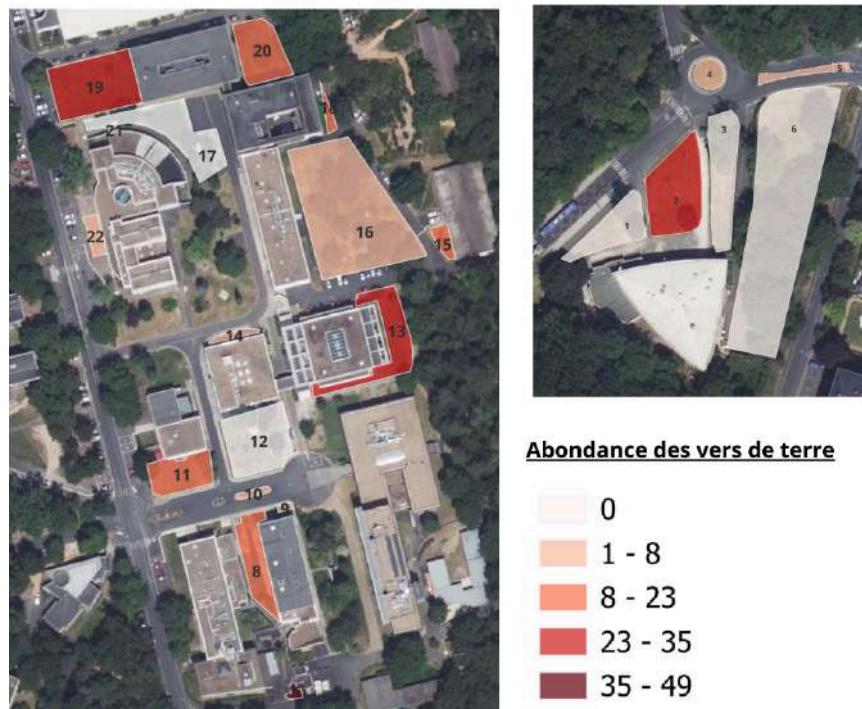


Figure 7 : Distribution spatiale de l'abondance des vers de terre (classification de Jenks)

La carte ci-dessous (Figure 8) représente quant à elle la distribution spatiale de la biomasse des vers de terre (masse totale des vers sur un site défini), selon une classification de Jenks allant de 0 à 31.3 grammes. Les zones présentant la biomasse la plus élevée sont principalement localisées aux mêmes endroits où l'abondance est élevée (zones 7 et 21) et inversement pour les zones à faible abondance (comme les zones 4 et 5). Certaines zones (comme la zone 11, 8 et 22) affichent une biomasse élevée malgré une abondance modérée à faible, ce que suggère la présence de vers soit plus gros ou plus développés. Sur la figure 6 on remarque une proportion importante de vers adultes par rapport aux autres sites sur ces zones. Les zones avec une faible biomasse correspondent pour la plupart à des zones avec une faible abondance. Cependant certaines zones qui avaient montré une abondance élevée comme la zone 13 montre une biomasse modérée ce qui s'explique par une proportion de juvéniles plus importante.

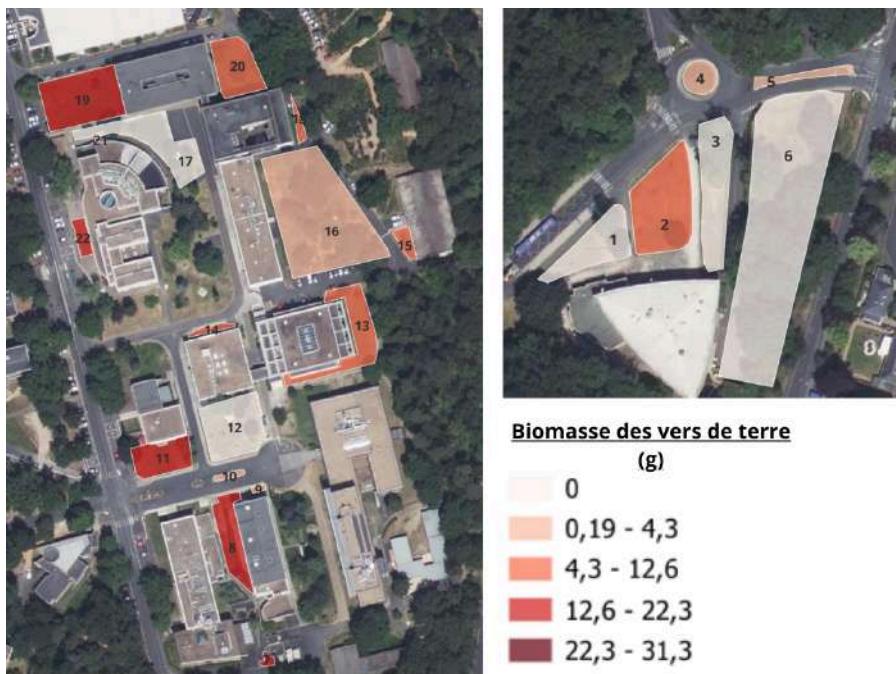


Figure 8 : Distribution spatiale de la biomasse des vers de terre (classification de Jenks)

4.2.3. Diversité des vers de terre

L'échantillonnage des 22 sites étudiés a permis d'identifier la présence de 2 groupes écologiques de lombriciens: les endogés et les anéciques (Figure 9). A l'échelle du campus, les anéciques présentent une biomasse plus importante avec une masse totale de 146.1 g d'anéciques identifiés sur toutes les zones, tandis que les endogés ont une masse totale 45.1 g. Cependant en terme d'abondance, ce sont les endogées qui dominent avec un total de

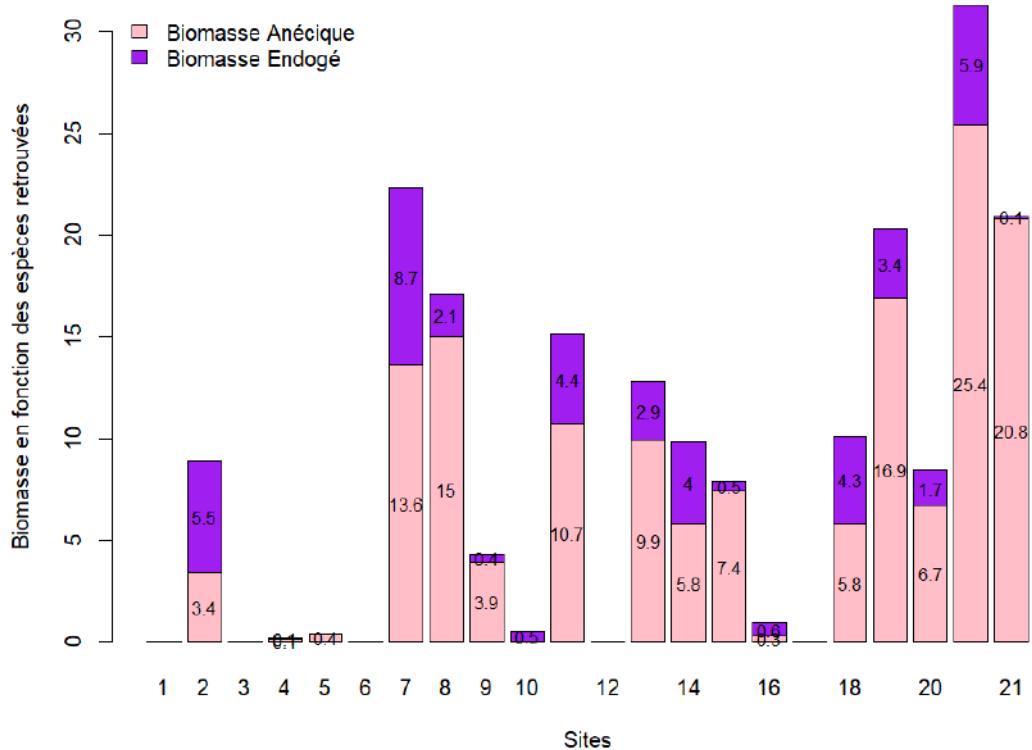


Figure 9 : Biomasse des groupes écologiques identifiés en fonction des sites de prélèvements

La carte ci-dessous (Figure 10) représente les groupes écologiques dominants de vers de terres en fonction de leur biomasse sur les zones d'échantillonnages étudiées. On remarque la dominance du groupes écologique anécique sur 13 sites, 3 sites (zones 2,10,16) présentent une biomasse plus importante d'endogés, le site 4 montre une biomasse équivalente entre les endogés et les anéciques, tandis que 5 sites ont une biomasse en vers de terre nulle.

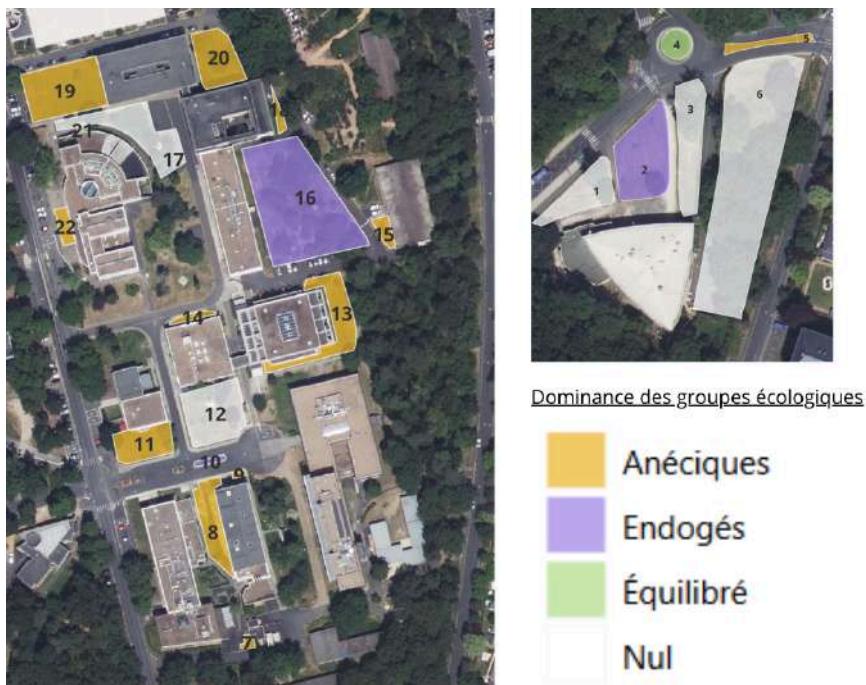


Figure 10 : Répartition spatiale des groupes écologiques des vers de terre en fonction de la biomasse

Les lombriciens adultes (présence de clitellum) ont pu être identifiés à l'espèce (Figure 11). Quatre espèces ont été identifiées, nommées: *Allolobophora rosea* sp., *Aporrectodea* sp. (*incertitude quant à l'espèce identifiée*), *Lumbricus terrestris*, *Octolasion cyaneum*. On dénombre sur les 22 sites échantillonnés un total de 22 *Lumbricus terrestris* répartie sur 11 sites, 5 *Allolobophora rosea* sur 3 sites, 43 *O. cyaneum* sur 11 sites et 1 *Aporrectodea* sp. sur 1 site.

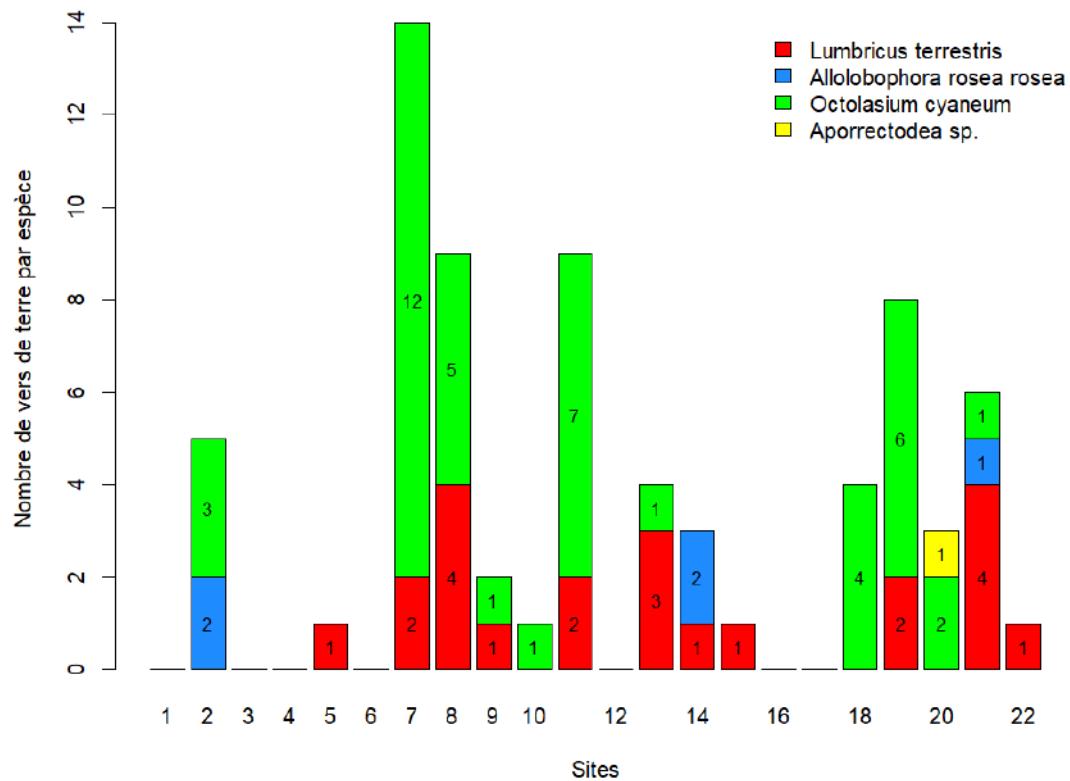


Figure 11 : Abondance des vers de terre adultes en fonction de l'espèces identifiées pour chaque site de prélèvement

4.3. Tassement

Sur la carte ci-dessous, (Figure 12) nous pouvons voir les différentes valeurs obtenues pour chaque zone. Certaines zones (ND) n'ont pas été mesurées car la présence d'éléments grossiers empêchaient l'enfoncement du cylindre. Les valeurs mesurées des autres sites vont de 1,166 à 1,502 g/cm³. Nous n'avons pu réaliser qu'un seul prélèvement par zone, ce qui limite les possibilités d'interprétation des résultats.

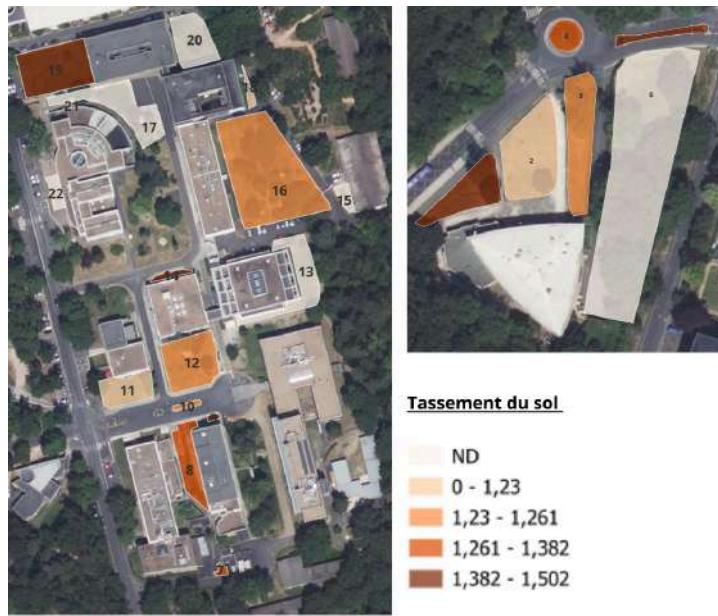


Figure 12 : Distribution spatiale du tassemement des sols (Nombre égal Quantiles)

4.4. Analyses statistiques

Lors d'études scientifiques, il est impératif de réaliser des graphiques afin de visualiser les résultats en croisant plusieurs paramètres. Par ailleurs, les analyses statistiques complètent les graphiques en permettant de mettre en avant ou non des corrélations significatives entre les variables.

Le principal paramètre étudié pour cette étude est la superficie. Il a été émis comme hypothèse que la superficie était corrélée de manière positive avec la biomasse des vers de terre, soit qu'il y aurait plus de vers lorsque celle-ci est grande, et vice versa. Pour déterminer la véracité de cette hypothèse un nuage de points a été effectué entre les variables "biomasse" et "superficie". Les valeurs se trouvent être très dispersées et ne permettent pas de confirmer visuellement une corrélation. Un test statistique de type Student est alors nécessaire. Ce test permet d'analyser une variance, soit de montrer si une variable explicative a un effet significatif sur une variable réponse. Ici la variable explicative est la superficie, et celle réponse la biomasse. Comme hypothèse initiale le test émet : la biomasse ne diffère pas de manière significative selon les superficies ; comme hypothèse secondaire : la biomasse diffère de manière significative selon les superficies. Ici le test donne une p-value de 0.306. N'étant pas inférieure à 0.05, l'hypothèse initiale est acceptée au risque de 5%. La superficie n'a donc aucun

effet significatif sur la biomasse. Au contraire, lorsqu'une droite de régression linéaire est tout de même tracée, il est possible d'observer une tendance négative. Pour approfondir ces résultats, il est intéressant de transformer la superficie en variable qualitative et de réaliser un graphique de type “boîte à moustache” (Figure 13). Pour ce faire, les valeurs de superficie des sites ont été séparées en trois catégories de manière équitable : superficie inférieure à 100 m², superficie se trouvant entre 100 et 500 m², et enfin superficie supérieure à 500 m².

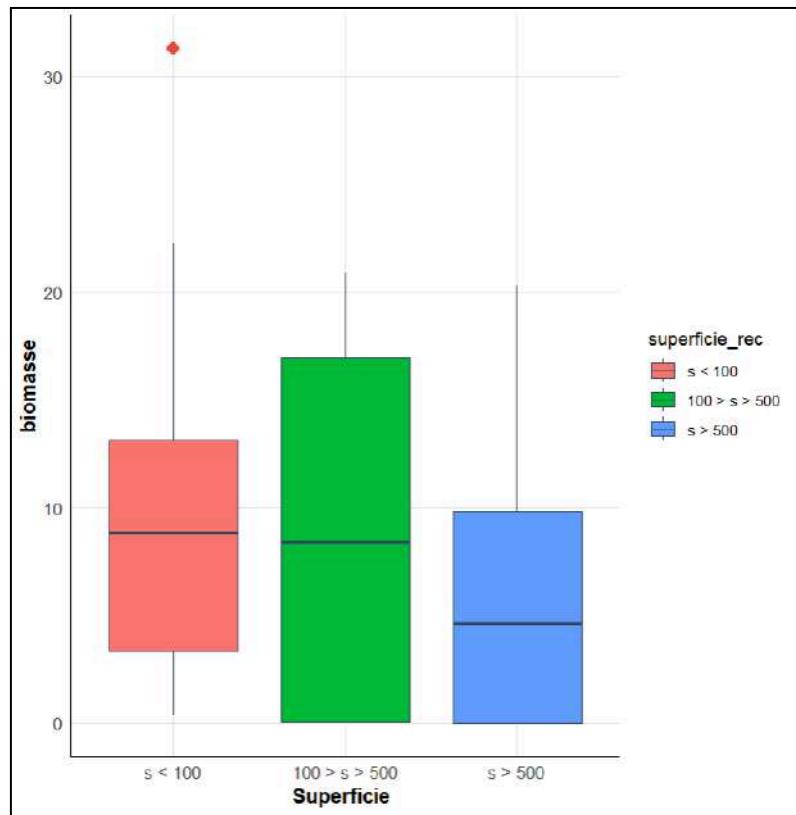


Figure 13 : Représentation de la variable biomasse en fonction de la variable superficie sur un graphique de type boîte à moustache

Un graphique de type “boîte à moustache” permet de mettre en avant la répartition et la dispersion des valeurs. L’étendue des valeurs de chaque catégorie se lit grâce au trait vertical fin (la moustache), la boîte représente le premier quartile sur le niveau inférieur et le troisième quartile sur le supérieur, on la nomme la boîte interquartile. La médiane se lit à l'aide du trait foncé horizontal dans les boîtes, et enfin les éventuels points rouges représentent les valeurs extrêmes.

Il est possible d'observer sur la figure 13, représentant la biomasse en fonction de la superficie, une importante dispersion pour les trois classes. En effet, pour toutes les superficies, les valeurs de biomasse se trouvent approximativement entre 0 et 23 grammes. Ce qui varie ce sont les premiers et troisièmes quartiles, les médianes elles, restent assez similaires, notamment pour les deux

premières catégories. Les superficies se trouvant être supérieures à 100 m², présentent un premier quartile à 0, mettant en avant qu'il y a 25 % des sites au minimum ayant une biomasse de zéro. Cela est en corrélation avec les résultats évoqués plus tôt dans ce rapport. La valeur extrême de biomasse pour les superficies inférieures à 100 m², prouve une nouvelle fois la dispersion des données. Par ailleurs, les valeurs de biomasse dans chaque catégorie présentent une répartition équilibrée s'expliquant par la médiane centrée dans chaque boîte. En revanche, il est tout de même possible d'observer une certaine tendance. Les superficies présentant une surface inférieure à 500 m² ont une biomasse globalement plus élevée. Cela s'observe avec la médiane et le troisième quartiles. Le test de Student ne s'applique pas ici car il ne permet pas de comparer plus de deux moyennes. Ici trois moyennes sont à comparer, le test utilisé est celui ANOVA. La p-value obtenue est de 0.649. Avec un risque de 5%, il n'y a pas de corrélation entre la biomasse et la superficie.

Il est également intéressant d'analyser des paramètres plus qualitatifs tels que l'ensoleillement (Figure 14) et la sécheresse (Figure 15). Cela étant toujours comparé à la biomasse dans un graphique de type "boîte à moustache".

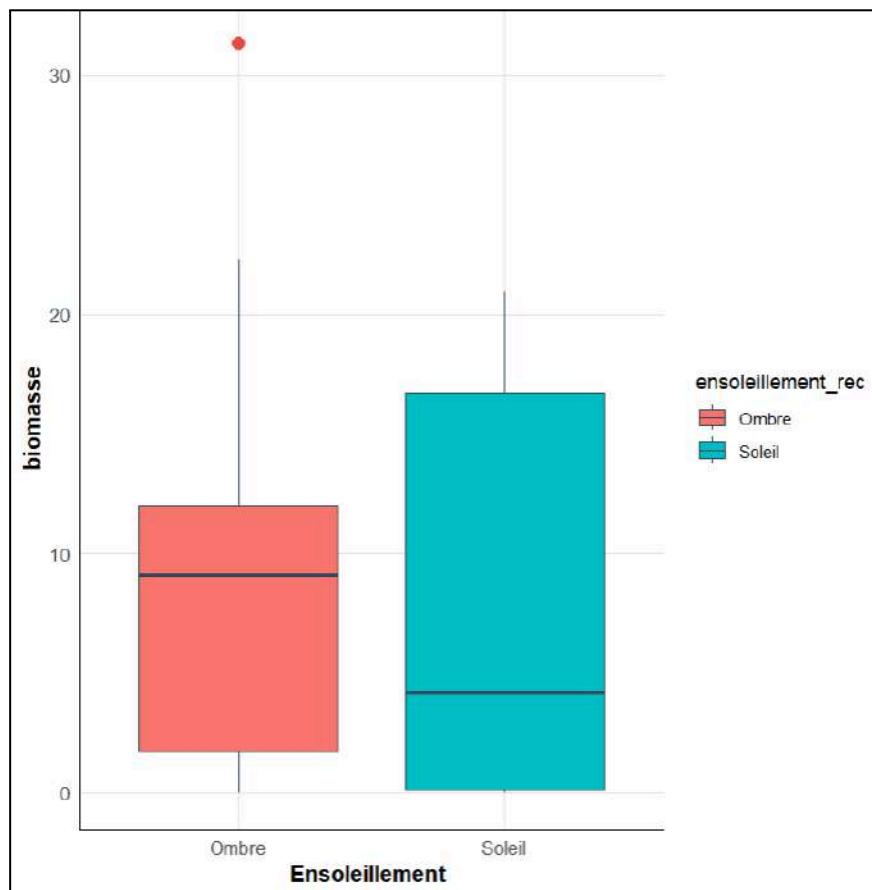


Figure 14 : Représentation de la variable biomasse en fonction de la variable ensoleillement sur un graphique de type boîte à moustache

Sur la figure 14, les sites ont été classés comme étant à l'ombre ou au soleil lors de l'échantillonnage des vers de terre sur le terrain. L'étendue des valeurs de biomasse pour l'ombre et le soleil sont assez similaires et peuvent se comparer avec la figure 13. Concernant l'ombre, il est possible d'observer le premier quartile vers 2 et le troisième vers 12. Cela implique que la biomasse des vers est plutôt homogène sur des sites d'échantillonnages à l'ombre. En revanche, notons quand même la présence d'une valeur aberrante autour de 32. Cette valeur représente une biomasse exceptionnellement élevée par rapport aux autres valeurs mesurées à l'ombre. Elle est en aucun cas à supprimer. Dans le contexte d'études plus approfondies il serait intéressant de l'interpréter.

Pour les sites se situant au soleil, au contraire de l'ombre, les valeurs sont très dispersées. En effet, la boîte interquartile est plus grande allant de 0 à environ 17 de biomasse. Cela implique une forte hétérogénéité de la biomasse sous le soleil. La biomasse est plus imprévisible, avec notamment beaucoup de petites et grandes valeurs.

La médiane à l'ombre semble être deux fois plus importante que celle au soleil, y induisant donc une biomasse plus élevée. Ces observations s'accompagnent d'un test statistique, ici le test de Student. La p-value obtenue est de 0.59, excluant, avec un risque de 5%, l'hypothèse indiquant que l'ensoleillement influence de manière significative la biomasse.

La sécheresse est également un paramètre noté sur le terrain. A l'aide de la figure 18, elle a été comparée elle aussi à la biomasse des vers.

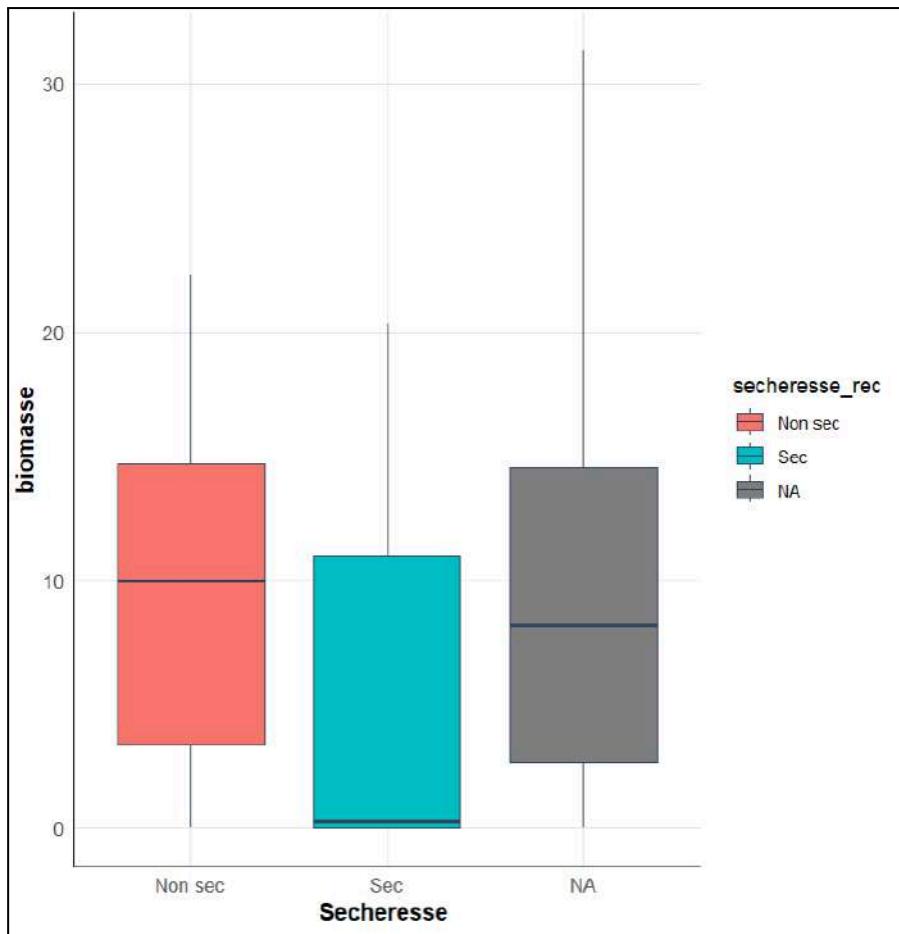


Figure 15 : Représentation de la variable biomasse en fonction de la variable sécheresse sur un graphique de type boîte à moustache

En premier lieu l’observation d’une catégorie “NA” est visible. Elle représente les sites où la sécheresse n’a pas réussi à être déterminée. Si l’on se concentre sur les sites où cela a pu être mesurable, on observe une légère différence entre “Sec” et “Non sec”. L’interval des valeurs pour les deux se trouve une nouvelle fois assez similaire, avec tout de même la catégorie “Non sec” allant jusqu’à 23 environ de biomasse. Toujours pour le même paramètre, la médiane se trouve à 10 avec une boîte interquartile étendue de 4 à 15. Cela indique une répartition homogène des données de biomasse sur les sites d’échantillonnages décrits comme étant peu secs. A l’inverse les sites dits “secs” ont une médiane étant proche de 0 avec le premier quartile à 0 et le troisième à 11. Ici il est donc possible d’observer une répartition asymétrique des données. Si l’on compare les deux paramètres, visuellement, une tendance indique que la biomasse des vers de terre est plus importante pour les sites dits “Non sec”. Cela reste à nuancer car les “NA” ne sont pas pris en compte. En effet,

pour ces sites, l'étendue des valeurs est bien plus importante que pour les autres (allant jusqu'à 32 de biomasse), la boîte interquartile est de même taille que pour les sites "Non sec", et la médiane se trouve être au centre à 8. D'après un test statistique d'ANOVA, la p-value obtenue est de 0.33. Elle indique qu'au risque de 5%, la sécheresse des sites n'influence pas la biomasse des vers de terre.

Il paraît intéressant de comparer les résultats de biomasse des vers de terre avec ceux de la masse volumique représentant le tassement (Figure 16). En effet, de part des observations sur le terrain notamment, induisant plus de vers de terre sur les sols moins tassé, la masse volumique semblait être indispensable à analyser.

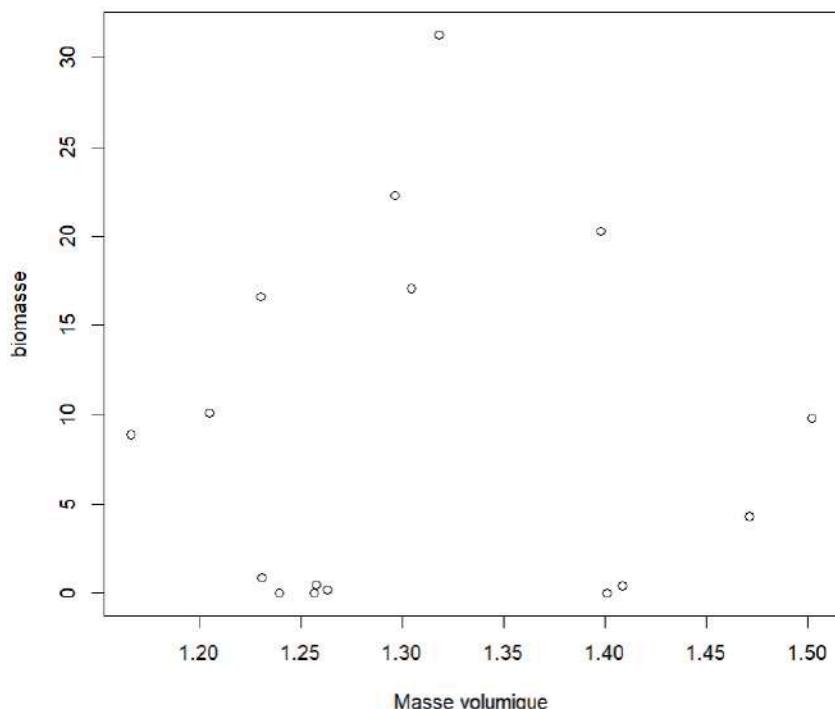


Figure 16 : Représentation de la variable biomasse en fonction de la variable masse volumique sur un graphique de type nuage de points

D'après la figure 16, l'observation d'une corrélation n'est pas flagrante. En effet les points varient de 0 à 32 en termes de biomasse et ne sont pas répartis de manière linéaire. Il est à noter que seulement 16 points, soit 16 sites, sont représentés sur ce graphique. En effet les 6 sites restants présentaient une texture trop caillouteuse rendant la mesure de la masse volumique impossible. Pour les graphiques de type "Nuage de points", il est intéressant de calculer le coefficient de Pearson. Ce dernier sert à montrer la présence ou l'absence d'une relation linéaire entre 2 variables quantitatives. Ce coefficient peut varier entre -1, représentant une forte corrélation négative, et 1, représentant à

l'inverse une forte corrélation négative. Ici le coefficient de Pearson vaut 0.039. Se trouvant très proche de 0, le test indique qu'il n'y a aucune corrélation entre la masse volumique et la biomasse.

Enfin, le dernier paramètre étudié concernait la distance aux bâtiments. Ce dernier a pu être représenté, comme il est possible de l'observer sur la figure 17, à partir d'un nuage de points.

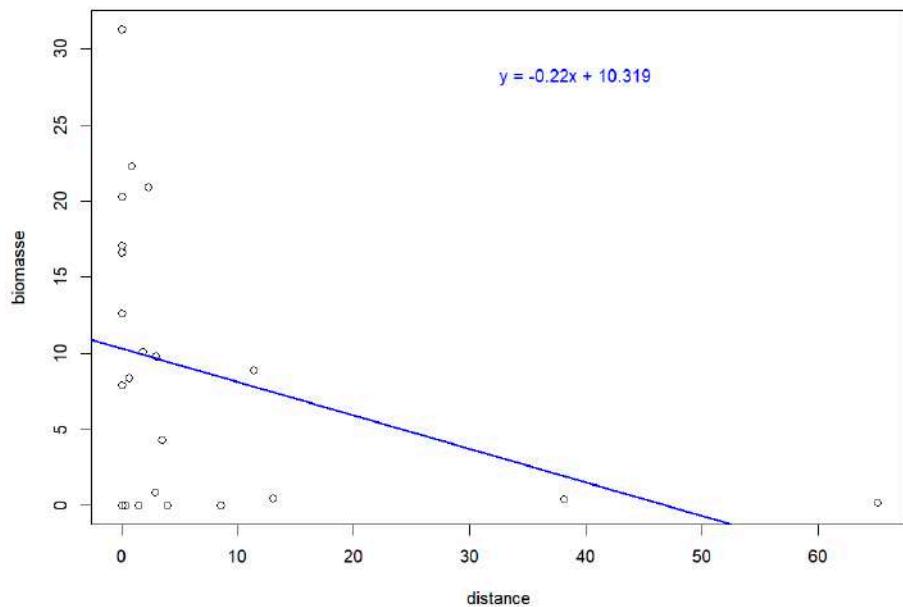


Figure 17 : Représentation de la variable biomasse en fonction de la variable distance aux bâtiments sur un graphique de type nuage de points

Visuellement, ce graphique ne permet pas d'affirmer une certaine tendance. En revanche, lorsque le traçage d'une droite de régression est forcée, cette dernière met en avant une légère corrélation négative entre la biomasse et la distance des zones d'échantillonnages par rapport aux bâtiments. En effet le coefficient directeur de la droite est de -0.22. De plus, lorsqu'un test statistique de type ANOVA est réalisé, la p-value obtenue vaut 0.0933, avoisinant les 5% attendu.

4.5. PCR et Séquençage

4.5.1. PCR

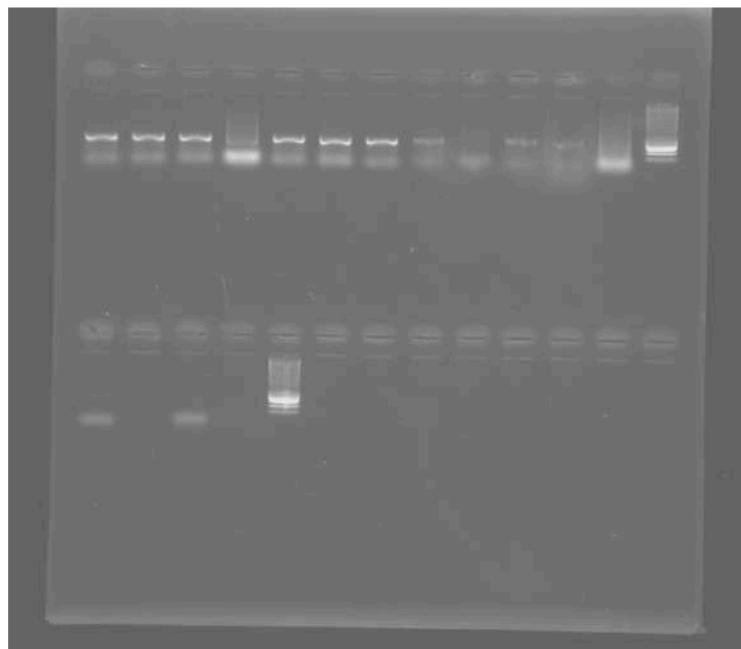


Figure 18: Révélation du gel réalisé par PCR

Il est possible d'observer sur la figure 18, au niveau de la première ligne, les 12 échantillons accompagnés du “ladder” en dernière position. Le “ladder” représente un échantillon de référence pour comparer ce qui est obtenu. Sur la deuxième ligne de peigne il y a le contrôle positif et le négatif accompagné d'un deuxième ladder, les trois étant distancés d'un peigne à chaque fois. Le trait horizontal retrouvé au niveau le plus inférieur pour chaque échantillon représente les amorces. Ce dernier ne détermine donc pas s'il y a présence d'ADN ou non. De l'ADN est présent seulement si le trait horizontal au-dessus de celui de l'amorce est présent. Plus ce trait est foncé, plus de l'ADN est présent en grande quantité. Donc l'observation d'ADN est possible pour les échantillons 1,2,3,5,6,7,8,10,11 ; au contraire de ceux 4, 9 et 12 pour qui aucun ADN n'est présent. Malgré un faible trait horizontal pour le contrôle positif et négatif, les résultats de la PCR restent valables. Cela n'aurait pas été le cas si aucun ADN n'avait été observé sur les échantillons. En résumé seuls les échantillons 4, 9 et 12 n'ont pas été envoyés pour être séquencé.

Notons qu'il aurait été judicieux d'attendre plus longtemps avant de révéler la PCR. En effet le “ladder” n'a pas migré complètement jusqu'en bas.

4.5.2. Séquençage

En raison d'un manque de temps pour la réalisation du projet, les résultats du séquençage, nous devant être envoyés par le laboratoire, ne sont pas arrivés à temps. Néanmoins, si ces derniers nous sont partagés dans les jours suivants le rendu de ce rapport, nous en discuterons dans la soutenance de projet. Ces résultats ne seront donc pas évoqués dans la discussion du rapport.

V - Discussion

5.1. Facteurs influençant ou non la répartition des vers de terre

D'après le tableau 4, l'analyse des différents paramètres environnementaux mesurés ne met en évidence aucune influence statistiquement significative sur la répartition ou la biomasse des vers de terre. Tous les tests réalisés (Student ou ANOVA) ont donné des p-values supérieures à 0,05, ce qui signifie que les variations observées ne sont pas significatives et peuvent être hasardeuses. En effet, il faut que les p-values soient inférieures à 0,05 pour considérer qu'il y a un effet significatif avec un risque de 5%, c'est à dire un risque très faible.

1ère variable	2 ème variable	Test réalisé	p-value obtenue	Significatif au risque de 5%
Biomasse	Superficie	Student	0,306	N
Biomasse	Superficie	Anova	0,649	N
Biomasse	Ensoleillement	Student	0,59	N
Biomasse	Sécheresse	Anova	0,33	N
Biomasse	Masse volumique	Anova	0,8765	N
Biomasse	Distance aux batiment	Anova	0,0933	N

Tableau 4 : Récapitulatif des différents tests statistiques réalisés

Pour la superficie, les tests Student ($p = 0,306$) et ANOVA ($p = 0,649$) ne montrent aucune influence significative par rapport à la biomasse. Les distributions sont similaires entre les trois classes, et aucune tendance claire n'apparaît clairement. La surface échantillonnée ne semble donc pas être un facteur déterminant. En ce qui concerne l'ensoleillement, le test Student donne une p-value de 0,59 ce qui est nettement au-dessus du seuil de 0,05. Il n'y a donc pas d'effet significatif. Toutefois, le graphique en barre représenté par la figure 14 montre une médiane de biomasse plus élevée en zone ombragée, ce qui suggère une tendance à une préférence pour les milieux moins exposés au soleil. Le test ANOVA afin de vérifier la masse volumique (le tassemement), donne une p-value de 0,8765, ce qui est encore largement supérieur au seuil de 0,05. Il n'y a toujours pas d'influence significative. Le nuage de points numéro 19 montre une dispersion importante, sans tendance linéaire. Quelques

valeurs élevées de biomasse apparaissent dans les sols plus tassés, mais elles ne suffisent pas à établir une influence significative.

Pour la distance aux bâtiments, le test ANOVA donne une p-value de 0,0933. Bien que cette valeur soit proche du seuil de significativité, elle reste non significative. La figure 16 montre une courbe avec une tendance décroissante, présentant une biomasse légèrement plus élevée à proximité des bâtiments. Cette tendance visuelle ne permet pas de conclure à un impact réel. Il est toutefois possible que cette absence de relation claire soit liée au fait que la majorité de nos sites se trouvaient relativement proches des bâtiments. Dans les cas où ils étaient plus éloignés, d'autres facteurs environnementaux ont probablement joué un rôle, comme par exemple le piétinement, l'ensoleillement ou d'autres paramètres locaux.

5.2. Comparaison des résultats à d'autres données

A l'échelle nationale en France métropolitaine , l'abondance moyenne de vers de terre mesurée dans des sols variés (urbains, prairies, agricoles, forêts) est d'environ 246 individus/m² selon les données compilées entre 2005 et 2015 par l'UMR EcoBio (Université de Rennes 1) dans le cadre de l'Observatoire Participatif des Vers de Terre (Cluzeau et al. 2025). Ces mesures ont été réalisées en utilisant divers protocoles standardisés (tri manuel du sol et de la litière, extraction par formol, méthode de la moutarde). En comparaison, l'abondance moyenne mesurée sur les 22 sites du campus universitaire de Tours lors de notre projet est beaucoup plus faible (14 individus/m²). Bien que les méthodes de prélèvements utilisées dans cette étude ne sont pas exactement les mêmes que celles utilisées dans ce projet, les différences peuvent s'expliquer par le type de milieu étudié, le campus universitaire étant soumis à un fort piétinement, à une compaction des sols, et à un remaniement des sols, moins favorables aux lombriciens.

Comparativement au projet de l'année dernière réalisé dans la commune de Chambray les Tours, certaines tendances générales sont similaires : les deux mêmes groupes écologiques : anéciques et endogés ont été identifiés, et la majorité des individus sont des juvéniles. Cependant, une différence notable apparaît au niveau des espèces dominantes : cette année, *Octolasion cyaneum* est la forme la plus abondante, alors que l'année dernière, *Lumbricus terrestris*, était prédominante. De plus, l'abondance des vers de terre est plus importante cette année ce qui peut être expliqué par des conditions environnementales différentes entre les deux sites étudiés mais également des conditions météorologiques plus favorables au moment des prélèvements, réalisés plus tôt dans le semestre.

Concernant les paramètres recherchés pouvant influencer la répartition des vers de terres, il se trouve être difficile de comparer les résultats avec ceux trouvés l'année précédente, du fait que les paramètres mesurés sont plus précis et que les sols sont très probablement différents. De plus, la sécheresse et l'ensoleillement sont des paramètres subjectifs, ils ne donnent pas d'indice quantitatif, ce qui limite leur utilisation dans les analyses comparatives.

5.3. Limites

Lors de ce projet, plusieurs limites ont été relevées et pourront potentiellement être évitées ou améliorées lors de prochaines études. Les limites concernent la réalisation des cartes, l'analyse des résultats et l'évaluation des paramètres abiotiques lors des prélèvements.

Les zones d'échantillonnage ont été tracées approximativement sur Google Maps à partir des vues aériennes, et ne sont donc pas aussi précises que si des relevés GPS exacts avaient été réalisés sur le terrain. Les cartes de répartition (biomasse, abondance, groupes écologiques et tassemement) ont été réalisées en utilisant une classification de Jenks, afin de rendre nos résultats plus lisibles. Cependant, cette classification dépend entièrement de la distribution statistique des données, et les seuils qu'elle délimite ne correspondent pas forcément à des changements écologiques réels, mais seulement à des ruptures naturelles dans la distribution des valeurs. Une représentation en cinq classes a été retenue pour faciliter la visualisation, mais ce nombre limité de classes peut masquer certaines tendances présentes dans le jeu de données. De plus, la présence de valeurs extrêmes peut influencer la délimitation des classes et fausser la perception des valeurs plus fréquentes.

La comparaison entre la carte de répartition de la biomasse et celle de l'abondance présente plusieurs limites liées à cette méthode de classification. Bien que les 2 cartes soient basées sur la classification de Jenks, les classes ne sont pas directement comparables d'une carte à l'autre. Par ailleurs, l'abondance et la biomasse représentent des aspects différents de la population : certaines espèces peuvent avoir une masse corporelle élevée mais être peu nombreuses, tandis que d'autres, plus petites, peuvent être très abondantes. C'est le cas pour la carte de dominance des groupes écologiques : le groupe anécique apparaît comme majoritaire en termes de biomasse sur le campus, car les individus identifiés comme *Lumbricus terrestris* ont une masse corporelle importante par rapport aux autres espèces échantillonnées. En revanche, en termes d'abondance, les endogés et les anéciques ont été dénombrés 154 fois chacun, et un individu n'a pas pu être attribué à un groupe écologique. Ainsi, une forte biomasse dans une zone ne signifie pas nécessairement une abondance importante, et

inversement. Cette limite souligne que ces cartes doivent être interprétées de manière complémentaire, et non comme des représentations identiques de la distribution des lombriciens.

Enfin, concernant les résultats d'abondance et de biomasse, certaines valeurs ont été qualifiées d'« élevées » et d'autres de « faibles ». Ces termes ont été utilisés pour décrire la distribution relative des données obtenues, et non par rapport à des données universelles issues de la méthode de prélèvement à la moutarde ni à des références écologiques sur la santé des sols.

Concernant les limites associées à l'évaluation des paramètres abiotiques lors des prélèvements, l'estimation du tassemement du sol représente une première source d'incertitude . La masse volumique, utilisée comme unique indicateur, ne suffit pas à décrire l'état physique du sol et aurait nécessité d'être couplée à d'autres données pédologiques pour être exploitées pleinement. En effet, l'étude de la texture de chaque sol, ou encore une analyse plus poussée, horizons par horizon, auraient pu compléter l'étude.

La seconde est du point de vue de l'ensoleillement. Dans cette étude, les valeurs indiquées se limitent à une catégorisation « ombre / soleil » au moment de l'échantillonnage. Il aurait été préférable de calculer le temps d'ensoleillement sur une journée pour chaque site, ce qui aurait été d'une plus grande précision et plus représentatif. En revanche, les prélèvements ont été effectués en début de saison, durant la même période allant du 9 au 18 octobre. Le choix de faire sur un temps restreint l'échantillonnage a été volontaire pour pallier les soucis de données rencontrés l'année précédente sur le projet similaire à Chambray-les-Tours.

Par ailleurs, il aurait été nécessaire d'étudier plus en détail le couvert végétal. En effet, il a été possible sur le terrain d'observer moins de vers de terre en présence de bryophytes, ces derniers obstruant l'accès aux lombrics. A cela s'ajoute l'indice de Braun-Blanquet. C'est un outil classiquement utilisé pour estimer la présence, la couverture et la dominance des espèces végétales au sein d'une zone donnée. Il consiste à relever l'ensemble des espèces présentes puis à attribuer, pour chacune, une classe d'abondance-dominance correspondant à la proportion de surface qu'elle occupe dans le relevé. Cet indice n'a finalement pas été retenu dans notre étude, car il est conçu pour être appliqué espèce par espèce. Dans le cadre d'un travail centré sur les vers de terre comme indicateurs de la santé des sols, l'utilisation d'un indice nécessitant une évaluation séparée pour chaque espèce végétale s'est révélée peu adaptée et peu pratique.

Une autre limite, également évoquée l'année dernière, concerne le nombre d'échantillonnage par site. Un seul prélèvement par zone ne permet pas d'être assez représentatif. Cette faible réplication peut expliquer la présence de valeurs extrêmes, ce qui est problématique pour les analyses statistiques et l'interprétation des résultats. Une répartition plus homogène de la superficie échantillonnée aurait été également préférable.

Concernant la sécheresse, certaines valeurs sont manquantes (noté ND) car l'état "sec" ou non du sol n'a pas été relevé au moment de l'échantillonnage. Lorsque cela a été constaté, les conditions saisonnières avaient déjà évolué ce qui n'aurait donc pas permis une comparaison fiable entre les sites. Enfin, la présence de valeurs manquantes, notamment pour la sécheresse ou la masse volumique sont difficiles à exploiter et cela rend les conclusions moins fiables. Étant donné le faible nombre de sites étudiés, l'exclusion de trop nombreuses valeurs réduit encore la solidité des conclusions.

Par ailleurs, une analyse du passé de chaque site pourrait nous éclairer sur les dynamiques d'installations des vers de terre. Il aurait pu être intéressant d'établir un lien entre la date des dernières modifications importantes de chaque site (derniers travaux d'aménagement) et les espèces et effectifs rencontrés.

Enfin, il serait pertinent d'étudier d'autres facteurs pouvant influencer la répartition des vers de terre, déjà identifiés dans la littérature scientifique, tels que le pH, la profondeur et la texture du sol (argile, sable, limon), l'épaisseur de la litière, ainsi que la présence de matière organique et de nutriments dans le sol (Mg, K, P, Zn, Ca).

CONCLUSION

Ce projet avait pour objectif d'analyser la répartition, l'abondance, la biomasse et la diversité des vers de terre sur le campus universitaire de Grandmont, en lien avec différents paramètres environnementaux et spatiaux. Les résultats obtenus mettent en évidence une faible abondance et diversité globale des lombriciens.

Les analyses statistiques réalisées n'ont pas permis de mettre en évidence des relations significatives entre la répartition des vers de terre et les paramètres étudiés (superficie, ensoleillement, sécheresse, masse volumique des sols et distance aux bâtiments). Malgré l'absence de corrélation significative, certaines tendances visuelles suggèrent une influence possible de conditions locales (comme l'ensoleillement et la sécheresse), sans que celles-ci puissent être confirmées dans le cadre de cette étude.

Ce projet souligne ainsi la complexité des facteurs contrôlant la répartition des vers de terre en milieu urbain et met en évidence les limites liées à la faible réplication et au nombre restreint de sites étudiés. Il constitue néanmoins une approche permettant de mettre en lumière la place des sols vivants en contexte urbain et peut servir de base pour des études ultérieures.

Bibliographie

Blouin, M., Hodson, M. E., Delgado, E. A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K. R., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J. E., Cluzeau, D., & Brun, J. J. (2013). *A meta-analysis of the effects of earthworms on soil fertility and plant nutrition*. European Journal of Soil Biology, 55, 77–87.

<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.01.005>

Bouché, M. B. (1977). *Les lombriciens de France : Écologie et systématique*. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).

Bottinelli, N., Hedde, M., Jouquet, P., & Capowiez, Y. (2020). An explicit definition of earthworm ecological categories – Marcel Bouché’s triangle revisited. *Geoderma*, 372, 114361.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114361>

Bottinelli, N., & Capowiez, Y. (2021). Earthworm ecological categories: A continuous rather than discrete classification. *Applied Soil Ecology*, 168, 104118.

<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104118>

Cluzeau. et al (16 juin 2025) - IBOSS, Fiche OPVT

https://asso.adebiotech.org/wp-content/uploads/2025/07/04-Daniel_CLUZEAU.pdf

Cui, S., Sun, X., Zhang, X., Li, Y., & Li, F. (2022). Earthworms as indicators of soil health in urban environments. *Science of The Total Environment*, 806, 150542.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150542>

Eydoux, G., Maréchal, P., & Cluzeau, D. (2024). Connectivity and urban soil biodiversity: The case of earthworm communities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 91, 128012. <https://doi.org/xxxx>

Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487–515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>

Fusaro, M., Ferrarini, A., & Landi, S. (2018). Earthworms as bioindicators of soil pollution by microplastics. *Environmental Pollution*, 242, 1870–1879. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.098>

Guilland, C., Cluzeau, D., & Maréchal, P. (2018). Urban soil ecology: A neglected but crucial discipline for sustainable cities. *Urban Climate*, 24, 1000–1010.

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.03.006>

Hullot, O. (2023). *Approche d'écotoxicologie fonctionnelle par l'étude des interactions sol-plante-annelides en sol contaminé* [Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay].

<https://www.theses.fr/>

Le Bayon, R.-C., & Milleret, R. (2009). Effects of earthworms on phosphorus dynamics – A review. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*, 3, 1–10.

Maréchal, P. (2022). Fragmentation des habitats urbains et communautés de vers de terre : Enjeux et perspectives. *Écoscience*, 29(1), 1–12.

Maréchal, P., Vergnes, A., & Cluzeau, D. (2021). Urban green spaces and earthworm connectivity: The role of artificial surfaces. *Landscape and Urban Planning*, 214, 104178.

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104178>

Medina-Sauza, R. M., Rodríguez-Villegas, J., & Geissen, V. (2019). Earthworms and the degradation of organic pollutants in soil. *Science of The Total Environment*, 650, 2644–2653.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.103>

Paoletti, M. G. (1998). Earthworms as useful bioindicators of agroecosystem sustainability in orchards and vineyards with different inputs. *Applied Soil Ecology*, 10, 137–150.

[https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(98\)00103-7](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(98)00103-7)

Paoletti, M. G. (1999). The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1–3), 137–155.

[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00027-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00027-9)

Pérès, G., Cluzeau, D., Laffont-Schwob, I., & Brussaard, L. (2011). Earthworms as ecosystem engineers: Their role in bioturbation and biogeochemical cycles. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(10), 2086–2099. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.06.006>

Sizmur, T., & Hodson, M. E. (2009). Do earthworms increase plant uptake of trace elements from contaminated soils? *Environmental Pollution*, 157(5), 1673–1681.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.022>

Vergnes, A., Maréchal, P., & Cluzeau, D. (2017). Soil reconstruction and earthworm recolonization in urban environments. *Pedobiologia*, 65, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2017.09.001>

Tours Métropole Val-de-Loire. (2024). *La grande trame brune : Du « sol foncier » à la protection juridique des « sols vivants » dans l’élaboration du PLU métropolitain* [Note d’orientation, août

2024]. POPSU – Plateforme d’Observation des Projets et Stratégies Urbaines.

<https://popsu.archi.fr/projet/tours-metropole-val-de-loire>

Table des figures

Figure 1 : Représentation du triangle écologique des vers de terre selon Bouché revisité par Bottinelli et al. (2020).

Figure 2 : Vue satellite du site d'étude sur le campus de grandmont et sur la ville de Tours (Orthophoto 2024 20cm - IGN)

Figure 3 : Localisation des différentes zones d'échantillonnage

Figure 4 : Carte des centroïdes et coordonnées des zones d'échantillonnage

Figure 5 : Prélèvement des vers de terre sur le site numéro 8

Figure 6 : Répartition du nombre de vers de terre en fonction des sites

Figure 7 : Distribution spatiale de l'abondance des vers de terre (classification de Jenks)

Figure 8: Distribution spatiale de la biomasse des vers de terre (classification de Jenks)

Figure 9: Biomasse des groupes écologiques identifiés en fonction des sites de prélèvements

Figure 10: Répartition spatiale des groupes écologiques des vers de terre en fonction de la biomasse

Figure 11: Abondance des vers de terre adultes en fonction de l'espèces identifiées pour chaque site de prélèvement

Figure 12: Distribution spatiale du tassemement des sols (Nombre égal Quantiles)

Figure 13 : Représentation de la variable biomasse en fonction de la variable superficie sur un graphique de type boîte à moustache

Figure 14 : Représentation de la variable biomasse en fonction de la variable ensoleillement sur un graphique de type boîte à moustache

Figure 15 : Représentation de la variable biomasse en fonction de la variable sécheresse sur un graphique de type boîte à moustache

Figure 16 : Représentation de la variable biomasse en fonction de la variable masse volumique sur un graphique de type nuage de points

Figure 17 : Représentation de la variable biomasse en fonction de la variable distance aux bâtiments sur un graphique de type nuage de points

Figure 18 : Révélation du gel réalisé par PCR

Table des tableaux

Tableau 1: Présentation des échantillons de vers étudiés

Tableau 2 : Paramètres abiotiques des sites échantillonnés

Tableau 3 : Résultats d'échantillonnages

Figure 4 : Récapitulatif des différents tests statistiques réalisés

Annexes

épigés	<i>Lumbricus castaneus</i>	<i>Satchellius mammalis</i>	<i>Eisenia fetida</i> = le Ver du fumier	<i>Dendrobaena octaedra</i>
taille (en cm)	3.5 à 6	3 à 4	5 à 12	3 à 6
couleur	rouge vineux	irisée de pourpre foncé	rouge/violacé zébré	rouge violacé avec un dégradé à l'avant
clitellum	bien vérifier la présence du clitellum sinon juvénile	de couleur jaune orangée plus ou moins violacé	de la même couleur que le reste du corps	tache ventrale claire
localisation	prairies avec présence de bétail, litières de graminés	prairies au sol humide	compost et fumier endémique d'Europe	sols forestiers et des terres humides et acides, climat tempéré et continental
images				

Annexe I: Tableau descriptif des épigés présents en France métropolitaine

Endogés	rosâtre		blanchâtre		verdâtre
espèces	<i>Aporrectodea caliginosa c. typica</i>	<i>Allolobophora rosea rosea</i>	<i>Octolasion cyaneum</i>	<i>Allolobophora icterica</i>	<i>Allolobophora c. chlorotica typica</i>
taille (en cm)	? (pas de données)	3 à 7	8 à 14 + épais que le <i>Allolobophora rosea rosea</i>	8 à 14	5 à 8
couleur	rose	tête rose pâle suivie d'une zone blanchâtre/ grise	rosâtre/gris clair jaune au niveau du bout de la queue	gris clair bout de queue plutôt jaune	vert avec petit anneau jaune sur le corps
clitellum	rose très clair	semble aplati, de couleur rose/ orangé	un peu orangé	annulaire	jaune
localisation	dans champs cultivés en région tempérée	champs, jardins, pâturage, forêt => sous les pierres et les feuilles	prairies et cultures plutôt rare en forêt	sites très humides => terres de jardin, prairies, vergers	prairies humides avec faible teneur en MO
images					

Annexe II: Tableau descriptifs des endogés présents en France métropolitaine

Anéciques	A tête noires		A tête rouges	
espèces	<i>Aporrectodea giardi</i>	<i>Aporrectodea longa</i> = le Lombric à tête noire	<i>Lumbricus terrestris</i>	<i>Lumbricus rubellus rubellus</i>
taille (en cm)	> 10	> 10	15 à 25	6 à 13
couleur	dégradé très prononcé marron clair/ foncé	tête grise foncée et corps plus clair au bout	marron orangé (plutôt couleur dégradée)	marron orangé
clitellum	marron clair	jaune "sale"	orange	orange
localisation	? (pas de données)	grande culture ou prairie avec faible teneur en MO	dans terriers jusqu'à 2, 5 mètres de profondeur	sols meubles et riches en MO => fumier et matières fécales
images				

Annexe III: Tableau descriptif des anéciques présents en France métropolitaine