

## Étude de la réponse des Lombricidés aux préparations mécaniques du sol dans un contexte de repeuplement forestier



Maitre de stage : **Pierre GANAULT**, PhD  
ECODIV (Laboratoire d'étude et compréhension de la biodiversité)  
Université de Rouen-Normandie

Tuteur pédagogique : **Nicolas DEGUINES**, PhD  
EBI (Laboratoire Ecologie et Biologie des Interactions)  
Université de Poitiers

*Pour toute diffusion, ce mémoire doit être obligatoirement accompagné de l'attestation de soutenance*



## Attestation de soutenance & Appréciations du jury

**Mlle Rousseau Céleste,**

étudiant(e) en M1 BEE, a soutenu ce jour le présent mémoire, devant un jury composé d'enseignants-chercheurs et de chercheurs de l'Université de Poitiers.



Le jury, après délibération, a donné les appréciations suivantes :

### ❖ **Qualité générale du mémoire :**

#### ◆ Rédaction

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

#### ◆ Richesse du contenu

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

#### ◆ Qualité de l'analyse

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

### ❖ **Qualité générale de la présentation orale :**

#### ◆ Prestation

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

#### ◆ Esprit de synthèse

- Excellent
- Très bon
- Bon
- Moyen
- Médiocre

#### ◆ Qualité de l'illustration

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

### ❖ **Déroulement du stage (Appréciations du Maître de stage) :**

#### ◆ Insertion dans l'équipe

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

#### ◆ Qualité d'assimilation

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

#### ◆ Implication personnelle

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre



En conséquence, les appréciations du jury, en l'état actuel du mémoire, sont les suivantes :

➤ Note sur le mémoire :            / 20 (coeff. 0.5)    ➤ Note sur l'oral : ..... / 20 (coeff. 0.5)

➤ Avis sur la divulgation du mémoire en l'état actuel :

- Autorisée sans modification.
- Autorisée après modifications mineures.
- Non divulgation pour clause de confidentialité
- Autorisée après modifications majeures.
- Non autorisée.

---

Fait à Poitiers, le : ..... Signature et cachet du président du Jury :



## Résumé

Pour faciliter le repeuplement forestier des préparations mécaniques du sol peuvent être faites. Elles permettent de contrôler la végétation concurrente et de décompacter le sol pour favoriser le développement des racines des jeunes plants. Les perturbations biotiques, abiotiques et structurelles du sol que ces préparations engendrent, peuvent être défavorables à la macrofaune du sol. Dans ce rapport, l'impact de trois préparations mécaniques du sol sur les communautés de vers de terre sera étudié. Trois aspects sont étudiés, l'abondance, la biomasse et la masse individuelle ; et ceux à trois échelles différentes, celle de la communauté des Lumbricidés, celle à la catégorie écologique et celle à l'espèce. La préparation du sol la plus intense est dite de « travail en plein », c'est celle qui a le plus d'impact sur la structure du sol, et c'est la seule à laquelle les vers de terre réagissent. Dans cette modalité on observe une légère diminution de l'abondance et de la biomasse des vers de terre, portée par la catégorie écologique épigée, dont l'abondance varie beaucoup, et qui est-elle même portée par son espèce dominante *Lumbricus rubellus*.

## Abstract

For forest restoration, Mechanical Site Preparation (MSP) can be used to control competing vegetation and reduced soil bulk density to increased rooting depth development. MSP changes the biotic, abiotic conditions of soil and causes structural disturbances of the soil, but these soil disturbances can be unfavorable for soil macrofauna. In this paper, we will consider the impact of three Mechanical Site Preparation on earthworm communities. Three aspects are studied, abundance, biomass and body mass; and those at three different scales, Lumbricidae community, ecological category and species. The most intense soil preparation has the greatest impact on the structure of the soil, and it is the only one to which earthworms react. In this modality we observe a low decrease in the abundance and biomass of earthworms, carried by the epigeic ecological category, whose abundance varies greatly, and which is even carried by its dominant species *Lumbricus rubellus*.

## Remerciements

Je tiens à remercier mon maître de stage Pierre Ganault, pour son aide précieuse tout au long du stage, et plus particulièrement pour les précieuses relectures de ce rapport.

Je tiens également à remercier mes co-stagiaires Nathanaël Almeida Streveler, avec qui j'ai pu identifier les vers de terre, merci également pour ton aide et pour m'avoir supporté quand je râlai parce que je n'arrivais pas à m'en sortir avec mes tableaux de données.

Je tiens à remercier à mes deux autres co-stagiaires Daphné Cordeiro Huon et Adrien Le Saux, pour les discussions sur les carabidae.

Je tiens à remercier les doctorants (et docteurs), Marcus Neupert, Chloé Folacher, Robinson Ribémont pour les conseils avisés sur Rstudio, et à Lucas Poullard pour les éclaircissements sur les préparations mécaniques du sol et pour les schémas.

Je tiens également à remercier les autres stagiaires, Claire, Lauréane, Valentin, Thomas et les autres, pour les pauses déjà fort sympathiques, et leur bienveillance.

Je tiens à remercier toute l'équipe du labo, toujours très accueillants et prêts à répondre à nos questions.

## Listes des abréviations

**ECODIV** : Laboratoire d'étude et compréhension de la biodiversité

**PL** : travail en plein

**PMS** : préparation(s) mécanique(s) du sol

**PT** : travail en potet

**SSM** : sous-solage multifonction

**T** : témoins

**VS** : végétation spontanée

## Avant-propos

J'ai effectué mon stage au sein du laboratoire ECODIV (Laboratoire d'étude et compréhension de la biodiversité) de l'université de Rouen-Normandie. Ce stage s'inscrit dans le projet CASTOR (Comportement du CARbone STOcké dans les sols lors de la Reconstitution des peuplements forestiers par plantation avec préparation mécanisée du site), dirigé par l'ONF et financé par l'ADEME. L'objectif du projet CASTOR est d'évaluer l'impact de plusieurs préparations mécaniques du sol sur les propriétés du sol forestier, tel que le stockage de carbone dans le sol, mais aussi sur la structure du sol, sur la microfaune, la mésofaune, la macrofaune et les communautés fongiques.

Lors de mon stage, j'ai étudié l'impact des préparations mécaniques du sol sur la macrofaune, et dans ce rapport de stage je traiterai plus spécifiquement l'impact sur les lombricidés. J'étais accompagnée de mon maître de stage Pierre Ganault, de mon co-stagiaire Nathanaël Almeida Streveler qui a également travaillé sur les vers de terre, mais avec une problématique sur les interactions interspécifiques au sein des communautés de Lombricidés, ainsi que deux co-stagiaires Daphné Cordeiro Huon et Adrien Le Saux, qui eux ont travaillé sur les Carabidés, Oniscidés et Chilopodes échantillonnés.

## Sommaire

<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>Matériel et méthode</b> .....	<b>5</b>
<b>Résultats</b> .....	<b>9</b>
<b>Discussion</b> .....	<b>14</b>
I. Réponse à l'échelle des communautés.....	14
a. Abondance totale .....	14
b. Biomasse totale.....	15
c. Masse individuelle totale .....	15
II. Réponse des catégories écologiques .....	15
a. Proportions des catégories .....	15
b. Anéciques .....	16
c. Endogés .....	16
d. Épigés .....	17
e. Ratio juvéniles et adultes.....	17
III. Réponse spécifique .....	18
a. <i>Lumbricus rubellus</i> .....	18
b. <i>Apporectodea caliginosa</i> et autres endogés .....	18
<b>Conclusion</b> .....	<b>19</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>20</b>

## Table des figures et des tableaux

<b>Tableau 1</b> : caractéristiques des 12 espèces de Lombricidés classées par ordre de dominance : pourcentage d'appartenance aux catégories écologiques, masse moyenne et écart-type, abondance (par modalité et totale). PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée. ....	8
<b>Figure 1</b> : Boxplot représentant l'abondance (individus/m <sup>2</sup> ) des vers de terre, en fonction des modalités de gestion (PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée). a) abondance par modalité des vers endogés ; b) des vers épigés ; c) des vers anéciques ; d) de l'ensemble des vers de terre. (L'effectif correspond au nombre de blocs d'échantillonnés : n=57). ....	9
<b>Figure 2</b> : Boxplot représentant la biomasse (g/m <sup>2</sup> ) des vers de terre, en fonction des modalités de gestion (PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée). a) biomasse par modalité des vers endogés ; b) des vers épigés ; c) des vers anéciques ; d) de l'ensemble des vers de terre. (L'effectif correspond au nombre de blocs d'échantillonnés : n=57). ....	10
<b>Figure 3</b> : Boxplot représentant la masse individuelle (g) des vers de terre, en fonction des modalités de gestion (PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée). a) masse par modalité des vers endogés (n=436) ; b) des vers épigés (n=360) ; c) des vers anéciques (n=35) ; d) de l'ensemble des vers de terre (n=738). ...	11
<b>Figure 4</b> : Boxplot représentant la masse individuelle (g) des vers de terre, en fonction des modalités de gestion (PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée). a) masse par modalité de <i>Lumbricus rubellus</i> ; b) d' <i>Aporrectodea caliginosa</i> ; c) d' <i>Aporrectodea rosea</i> ; d) d' <i>Allolobophora chlorotica</i> . L'effectif est affiché au-dessus de chaque boxplot. ....	12
<b>Figure 5</b> : Barplot représentant la moyenne des traits pondérée par l'abondance des espèces (CWM) exprimée en pourcentage d'anécicité, d'endogéicité, et d'épigéicité par modalité (PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée). ....	13
<b>Tableau 2</b> : récapitulatif des valeurs de degrés de liberté (df), de Chi <sup>2</sup> , de p-value et de la taille du jeu de données, des différentes analyses effectuées. Tous les test sont des tests de Kruskal-Wallis. ....	13

## Introduction

Les forêts couvrent en France 31 % du territoire et rendent de nombreux services écosystémiques, tel que le stockage du carbone. Ce stockage peut être *in situ*, c'est-à-dire dans les arbres vivants, 12 % des émissions de gaz à effet de serre seraient ainsi stockées dans la biomasse aérienne (ADEME 2019) ou dans le sol des forêts sous forme de matière organique morte ou de biomasse, notamment microbienne, mais également *ex situ*, comme le carbone stocké dans le bois qui servira de matériau de construction. Dans le cadre de la stratégie nationale bas-Carbone qui a pour objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050 (MTE 2020), un intérêt particulier est porté aux forêts et à leur exploitation. Les forêts sont également d'importants réservoirs de biodiversité abritant, à l'échelle mondiale, 80 % de la biodiversité terrestre ; une forte biodiversité forestière permet de maintenir les rôles fonctionnels que rendent les forêts (Aerts et Honnay 2011). Les forêts abritent une faune variée, allant de la microfaune à la mégafaune, ainsi que d'importantes communautés fongiques et bactériennes (Hunter 1999). Cette richesse spécifique et leur répartition dans le milieu dépend des facteurs biotiques comme les interactions entre les espèces, ou la capacité de dispersion et des facteurs abiotiques comme le pH du sol, sa structure et son humidité (Aubert et al. 2005). Les essences d'arbres choisies, la complexité structurale des forêts et les facteurs abiotiques, entre autres, sont à l'origine de différents microclimats, microhabitats, et qualités de litières, qui déterminent la composition des communautés de macrofaune du sol (Ganault et al. 2021).

Pour assurer le stockage de carbone et le maintien de la biodiversité, il est donc essentiel d'assurer un bon établissement des peuplements forestiers futurs. Et il est préférable que les jeunes plants des nouvelles forêts ne périssent par dès leur plus jeune âge à cause de la forte compétition avec la végétation déjà présente ou à cause d'une structure du sol peu adapté. Il existe de nombreuses méthodes pour préparer le sol avant la plantation d'une forêt, afin de faciliter la pousse des jeunes plants. Une des premières actions est d'éliminer, ou du moins de contrôler, la végétation concurrente. Des herbicides peuvent être utilisés pour cela mais, en Europe, la tendance est davantage à la préparation mécanique du sol (PMS) (Löf et al. 2012). Les plantes sollicitent de l'eau pour leur croissance et leur évapotranspiration ; éliminer une partie de la végétation permet d'augmenter la disponibilité en eau pour les jeunes plants, et limite également la compétition pour les nutriments et l'accès à la lumière (Prévost 1992).

Cette suppression de la végétation expose davantage le sol au soleil, qui réchauffe le sol, et la mise à nue de l'horizon minéral entraîne également une augmentation de la température plus ou moins importante en fonction du type de PMS effectué (Örlander, Gemmel, et Hunt 1990; Prévost 1992).

Une température plus élevée peut permettre aux racines de pousser plus tôt dans la saison, elles auront ainsi plus de temps pour se développer et aller puiser l'eau suffisamment loin ou en profondeur pour faire face à d'éventuelles sécheresses (Querejeta et al. 2001). Le développement des racines, indispensable pour capter l'eau et les nutriments du sol, peut également être favorisé par une action décompaction du sol. Cette décompaction va diminuer la densité du sol, et permettre aux racines de pénétrer dans le sol plus facilement (Kabrick et al. 2005). Les préparations mécaniques du sol permettent justement de décompacter le sol. Elles sont mises en place afin de modifier les conditions physiques du sol, pour faciliter la survie et la croissance des jeunes plants (Aust et al. 2004; Neaves III et al. 2018). Leur action de décompaction permet d'aérer le sol, d'augmenter la disponibilité des nutriments pour les racines, de modifier le régime hydrique du sol pour une meilleure infiltration de l'eau, qui sera davantage disponible pour les racines des jeunes plants (Neaves III et al. 2018; Löf et al. 2012).

Les effets des PMS dépendent toutefois du milieu. Sur un sol très humide par exemple, elles peuvent ne pas atteindre leur objectif, on peut même observer des effets inverses. Le sol va avoir tendance à se compacter davantage, notamment avec le passage répété des engins de PMS, qui provoquent un tassement du sol, un mauvais drainage de l'eau ou un lessivage trop important et une perte des nutriments (Aust et al. 2004; Neaves III et al. 2018; Löf et al. 2012). Dans ce cas, les racines des arbres absorbent moins les minéraux, les arbres poussent moins bien. Cela a aussi un impact sur la macrofaune, qui a tendance à diminuer avec le tassement du sol. Beaucoup d'études ont été faites sur les forêts de conifères. L'une d'elles aborde le fait qu'il est difficile de savoir si ce sont les PMS qui ont un impact direct sur la pousse des jeunes arbres, étant donné qu'il y a beaucoup d'autres facteurs qui entrent en jeu, d'autant que les PMS ne sont pas toujours assez efficaces pour éliminer toute la végétation concurrente (Löf et al. 2012). Il est donc important de bien choisir le mode de gestion du sol en fonction des conditions du milieu.

La PMS induit donc de nombreux changements dans les caractéristiques physiques, chimiques et biologique du sol pour favoriser la croissance des jeunes plants, mais qui ne seront pas sans conséquences pour les autres organismes du sol, connus pour répondre négativement au tassement du sol. Il est donc important de décrire de manière exhaustive les effets des modes de gestion du sol.

Des études faites sur différentes PMS en milieu forestier montrent une diminution de la diversité et de l'abondance des espèces d'arthropodes lorsque l'intensité de la gestion augmente, surtout quand la matière organique est mélangée à la matière minérale ou retirée. Une diminution des abondances

des collemboles et des acariens en fonction de l'augmentation de l'intensité de préparation du sol a été observée à plusieurs reprises (Berch, Battigelli, et Hope 2007; Bird, Coulson, et Fisher 2004). Cette diminution peut perdurer de nombreuses années comme le montre une étude sur les nématodes en forêt au bord de Mississipi, qui montre que leur diversité a diminué pendant 10 à 20 ans, suite à une grosse perturbation anthropique du sol, et a mis environ 50 ans à revenir à l'état initial (Thornton et Matlack 2002).

Beaucoup d'études traitent de l'impact des préparations mécaniques, notamment du labour, en milieu agricole sur la macrofaune, mais assez peu sur le travail du sol en forêt. Le labour décompacte le sol et mélange la matière organique à la matière minérale, et met à nu le sol, ce qui a pour impact de faire diminuer l'abondance de certains d'arthropodes comme les carabes, les coléoptères, les arachnides et bien d'autres (Manetti et al. 2013). L'effet négatif du labour sur la macrofaune est aussi visible chez les vers de terre, avec une diminution de l'abondance et de la biomasse totale des vers, due à la sensibilité de certains groupes en particulier (Pelosi 2008). En effet, le labour impacte différemment les catégories écologiques des vers de terre (Bouthier et al. 2014).

Dans le sol, de nombreux organismes interagissent avec leur milieu, dont les vers de terre, qualifiés d'ingénieurs du sol. Les vers de terre ingèrent de grandes quantités de sol et/ou de matière organique, ils en dégradent une partie et rejettent le reste sous forme de turricules, redistribuant ainsi la matière organique et minérale dans le profil de sol. De plus, ils forment des galeries qui permettent une aération et une structure du sol importante, ce qui facilite l'infiltration de l'eau et le développement des racines ; leurs galeries peuvent également servir d'abri à d'autres espèces (Kladivko 2001). Ces organismes sont également très diversifiés avec 5 000 espèces décrites dans le monde et probablement plus de 15 000 à découvrir (Schrama et Van Klink 2016; Misirlioğlu et al. 2023). Leur rôle et diversité font de ce groupe un modèle biologique central en écologie des sols et il est important de mieux décrire l'effet des pratiques de gestion des sols sur leur communautés.

Les vers de terre de terre sont généralement classés en 3 catégories écologiques, endogés, épigés, anéciques, définies par Bouché dans les années 70. Ces catégories ont été définies à partir des caractéristiques morpho-anatomiques et écologiques des espèces de Lombricidés de France. Bouché précise que ces catégories ne sont pas exclusives, et qu'il n'y a pas de limite nette entre elles. Assez peu d'espèces correspondent exactement à une seule catégorie, la plupart ont des caractéristiques associées à deux ou aux trois catégories écologiques (Bouché 1977). Bottinelli et collaborateurs ont repris les travaux de Bouché pour assigner statistiquement pour chaque espèce de vers un pourcentage d'appartenance aux différentes catégories à partir des informations morpho-

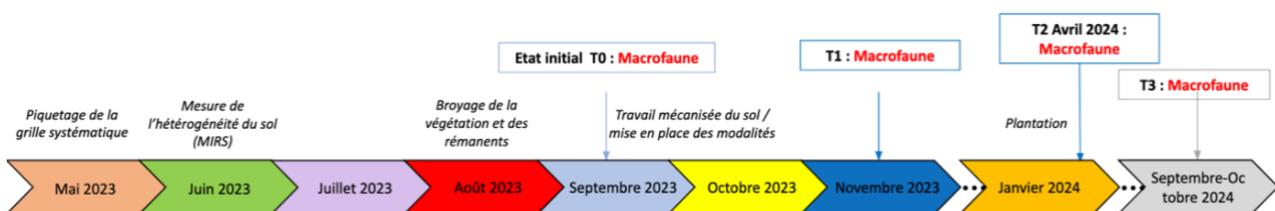
anatomiques et écologiques telles que la pigmentation, la taille du corps et la couleur de la peau. Ils proposent une nouvelle approche de ce regroupement et permettent donc d'associer une espèce à un pourcentage d'endogéité, anécité et d'épigéité (Bottinelli et al. 2020).

Plusieurs études sur les sol agricoles, comparant le labour, où le sol est retourné, et le travail du sol en surface, sans mélange des horizons, ou l'absence de travail du sol, ont montré qu'il y avait une diminution de l'abondance et de la biomasse des vers de terre lorsque le travail du sol était important et profond comme lors de labour conventionnel, et ce à court terme et long terme (Duchene et al. 2023; Peigné et al. 2009; Pelosi 2008). De manière générale, ce sont les organismes les plus grands qui sont le plus impactés par les perturbations physiques du sol (Kladivko 2001) ; ce sont donc les vers anéciques qui sont plus gros, qui sont le plus vulnérables. Cela s'explique par le fait que retourner la terre a modifié la structure du sol, détruisant l'habitat des vers, et par le fait que ce type de travail du sol favorise l'exposition des vers à la prédation et à la dessiccation (Peigné et al. 2009; Briones et Schmidt 2017). C'est le même constat pour les épigés, qui vivent en surface dans la litière et qui s'en nourrissent ; cette dernière est retirée par l'action des PMS, leur habitat et leur source de nourriture sont donc détruits (Bouthier et al. 2014). Pour les vers endogés, le constat est différent. Ces vers se nourrissant de la matière organique sont favorisés lorsque celle-ci est enfouie dans le sol par l'action de labour ; le sol est aussi moins dense, ce qui leur convient davantage (Ernst et Emmerling 2009; Bouthier et al. 2014; Peigné et al. 2009). Une diminution de la biomasse et de l'abondance des vers de terre est aussi visible dans les sols qui ont été décompactés, mais dont la matière organique et la matière minérale n'ont pas été mélangés. Cette diminution est en partie due à la diminution des anéciques (Lees et al. 2016). Ces modifications de la structure du sol peuvent limiter les mouvements des vers de terre dans le sol et entraîner une modification de la vitesse de dégradation de la matière organique. Ce qui pourrait rendre les nutriments moins disponibles pour les vers, et ainsi limiter leur croissance (Eriksen-Hamel et al. 2009). La masse individuelle des vers de terre peut être plus faible, surtout lors d'une forte intensité de PMS (Schreck et al. 2012).

Dans cette étude, nous étudierons l'effet de différentes PMS, qui ont pour action de décompacter le sol sans en mélanger les horizons, sur les communautés de vers de terre. Plusieurs hypothèses peuvent être émises, quant à leur réponse. i) Les PMS plus intenses entraîneraient une diminution de l'abondance de la biomasse et de la masse individuelle des vers de terres. ii) Cette diminution est notamment due à une forte réponse des vers anéciques et épigés. iii) L'effet des PMS sur la masse peut s'observer à l'échelle intraspécifique.

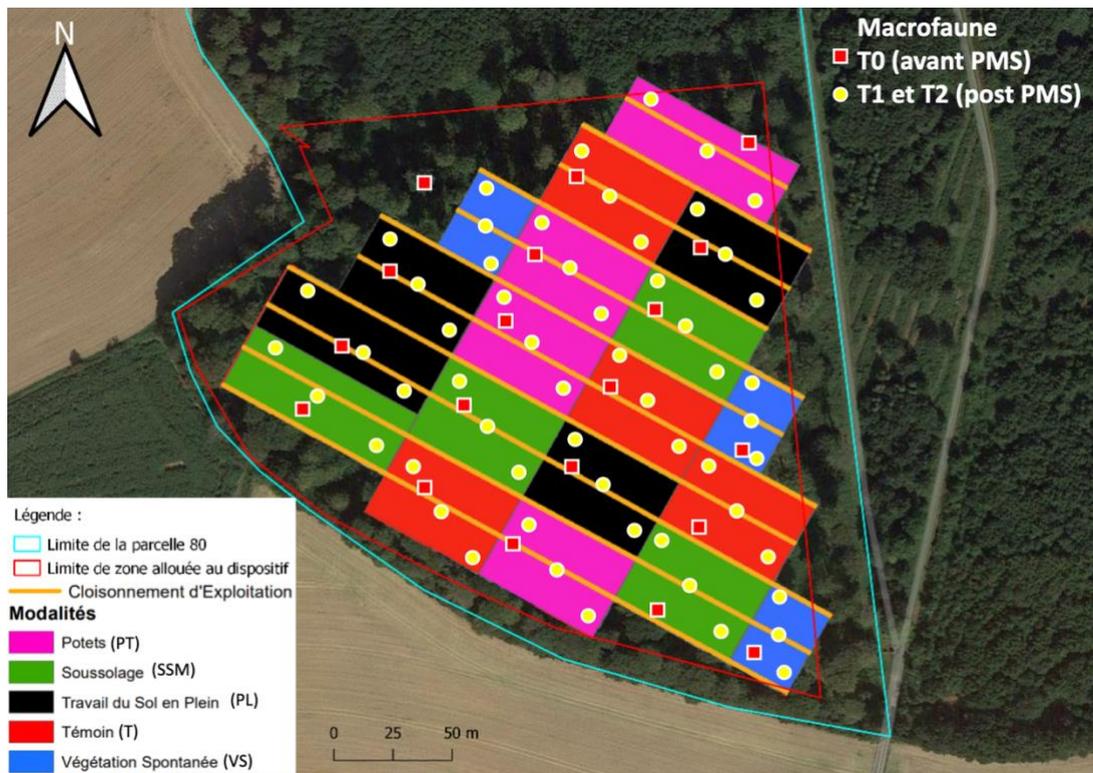
## Matériel et méthode

Le **site d'échantillonnage** se trouve dans la forêt d'Eu, proche de Melleville en Normandie (sur la parcelle 80p). En 2017, les hêtres âgés de 150 ans ont été coupés et une tentative de régénérescence naturelle a été faite, mais a échoué suite au gel en 2019. Le site est passé sous la juridiction de l'ONF (Office National des Forêts) qui en a fait un site expérimental, afin d'étudier les effets de différentes préparations mécaniques sur le sol et la régénérescence des arbres. Pour cela, il y a eu, en août 2023 (schéma 1), un broyage de la végétation et des rémanents à l'aide d'un broyeur-marteau, et en octobre 2023 a eu lieu la préparation mécanique du sol pour les placettes concernées. En janvier 2024, de jeunes chênes ont été plantés en ligne sur le site.

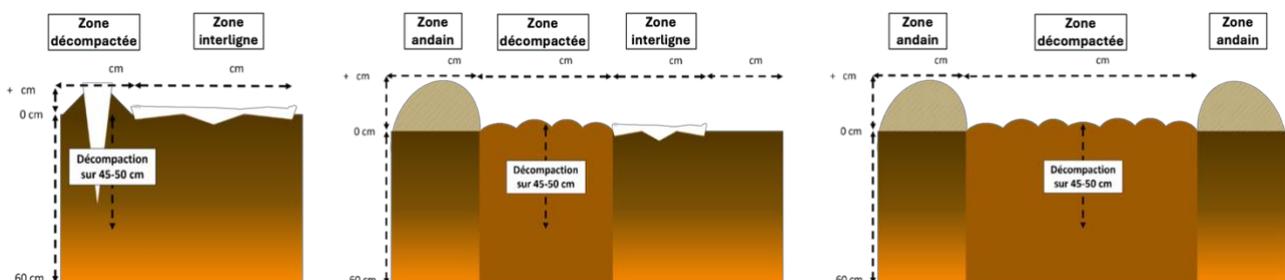


**Schéma 1** : frise chronologique, présentant les différents échantillonnages de la macrofaune.

Le site a été divisé en 19 placettes, 4 placettes par modalités ; sauf pour celle dite en « végétation spontanée » où il n'y en a que 3 (schéma 2). Il y a 5 modalités de gestion du sol sur le site, suivant un gradient d'intensité du travail du sol. Pour les deux premières modalités, aucun travail du sol n'a été fait, il y a des placettes en « végétation spontanée » (**VS**), en bordure de site où aucun arbre n'a été planté, et des placettes « témoins » (**T**), où les jeunes chênes ont été plantés en ligne. Il y a trois types de préparation mécanique du sol étudiés ici, celle dite « sous-solage multifonction » (**SSM**), où une dent de sous-solage de 50 cm a été tractée en ligne par un tracteur, c'est sur cette ligne que les arbres ont été plantés. Cette méthode permet de décompacter le sol sur une petite surface sans mélanger les horizons. Pour les deux dernières modalités, les outils utilisés sont une dent de sous-solage multifonction Becker de 50 cm, associée à un peigne qui permet de retirer la végétation et l'horizon de surface et les déposer sur le côté créant ainsi des andains (schéma 3). Le tout est monté sur une mini-pelle, assez légère, pour ne pas trop tasser le sol sur son passage. Pour la technique de « travail en potet » (**PT**), après l'action du peigne, le sol a été décompacté sur une surface d'un mètre carré pour chaque arbre planté, par trois coup de dent de sous-solage, et une ligne d'andain a été formée à côté de la ligne de décompaction (schéma 3). Pour la dernière modalité de « travail en plein » (**PL**), la même méthode que pour le travail en potet, mais la décompaction s'est faite sur une plus grande surface, laissant toutefois quelques zones d'andain et des zones de passage pour les machines.



**Schéma 2 :** plan de la parcelle représentant les 19 placettes et les points d'échantillonnages de T0 (en rouge), T1 et T2 (en jaune), forêt d'Eu, Normandie.



**Schéma 3 :** représentant l'action des différentes préparations mécaniques du sol, SST pour le sous-solage multifonctionnel, POT pour le travail en potet et PLE pour le travail en plein.

## Échantillonnage

Après le broyage de la végétation, une première session d'échantillonnage a été faite (T0), comprenant un point d'échantillonnage par placette. Après les différentes préparations du sol, une deuxième session (T1) a été faite en novembre 2023, avec 3 points d'échantillonnage par placette, comme pour la troisième session (T2) en avril 2024. Les 3 points ont été faits en diagonale de chaque placette du nord-ouest au sud-est. Selon les modalités, les échantillonnages ont été faits sur des zones spécifiques au sein des placettes, représentant l'hétérogénéité et les différents microhabitats créés par la PMS. Sur le travail en plein, deux échantillons ont été pris en zone décompactée, et le troisième en andain. Pour le travail en potet, un échantillon a été pris sur la zone d'andain, un sur la

zone décompactée, et un dernier sur la zone en interligne. Pour le sous-solage, deux échantillons ont été prélevés sur la partie décompactée, et un sur l'interligne (schéma 3). Pour les deux dernières modalités les échantillonnages ont été fait sur des zones représentatives de l'ensemble de la placette.

### **Échantillons**

Pour chaque échantillon, la litière, quand il y en avait, a été récupérée séparément, sur une aire de 25 cm x 25 cm, puis le sol a été prélevé sous forme de blocs de 25 cm x 25 cm x 15 cm, selon le protocole TSBF adapté à l'étude de la macrofaune du sol (Anderson et Ingram 1994). Pour les deux premières sessions d'échantillonnage, la macrofaune a été extraite sur site. Pour le troisième, les échantillons ont été transportés dans des sacs en plastique et conservés quelques jours en chambre froide, le temps d'être triés manuellement en laboratoire. La macrofaune a été extraite et conservée dans des piluliers contenant de l'éthanol à 70 %. L'éthanol a été changé au moins une fois pour assurer une bonne fixation des spécimens, notamment en présence de nombreux vers qui rejettent du mucus et diminuent la concentration en éthanol.

### **Traitement des données**

Le contenu des piluliers a été pris en photo, afin d'être analysé sur le logiciel BIIGLE. Ce logiciel peut détourer et assigner taxonomiquement chaque spécimen, ce qui a permis de définir leur surface (en cm<sup>2</sup>), ainsi que leur masse, avec la formule :  $\ln(\text{masse}) = 1,32 \times \ln(\text{surface}) - 0,97$  (formule issue d'une étude en cours de préparation, Mika Lemoine, communication personnelle). Une ou plusieurs étiquettes leur ont été assignées, telles que le groupe taxonomique auquel ils appartiennent ; le stade de vie : juvénile, subadulte ou adulte ; ainsi que l'état de leur corps : en entier, partie antérieure seulement, postérieure ou médiane. Dans ce rapport, seul les Lombricidés de la 3<sup>e</sup> session d'échantillonnage (T2) sont étudiés. Et seuls les vers dont la partie antérieure était présente ont été pris en compte (ainsi que ceux dont seul un petit bout de la partie antérieure manquait, s'ils restaient identifiables à l'espèce). Les vers de terre adultes ont ensuite été identifiés à l'espèce (Clé des vers de terre de France, Mickael Hedde 2023), il y en a 12 différentes, appartenant à 6 genres de la famille des Lombricidés. Les juvéniles ont été catégorisés en fonction de leur pigmentation, un gradient dorso-ventral pour les épigés, une absence de pigmentation pour les endogés et un gradient antéro-postérieur pour les anéciques. Sur les 738 vers de terre, 41,3 % sont des adultes, 3,0 % des subadultes, 53,5 % des juvéniles et 2,2 % indéterminés.

## Analyse statistiques

Comme vu précédemment, les vers de terre sont souvent regroupés par catégories écologiques : endogés, épigés, ou anéciques, en fonction de leurs caractéristiques morphologiques (Bouché 1977). Un nouveau modèle a été créé, reposant sur les observations de Bouché et les caractéristiques de chaque espèce, afin de leur attribuer un pourcentage d'endogéité, anécicité et d'épigéité. Par exemple pour l'espèce *Allolobophora chlorotica*, ses traits morphologiques la rapprochent autant des trois catégories, elle a donc été reclassée comme intermédiaire (Bottinelli et al. 2020). À partir de l'abondance des espèces et du pourcentage d'appartenance aux 3 catégories écologiques définies par Bottinelli et collaborateurs (tableau 1), un pourcentage de chaque catégorie a été calculé par modalités. Pour cela, la fonction « dbFD » du package « FD » a été utilisée, afin de calculer les CWM (Community Weighted Mean), qui correspond à la moyenne d'un trait (ici endogé, épigé ou anécique) pondéré par la fréquence des espèces, pour chaque catégorie écologique (Garnier et al. 2004).

**Tableau 1** : caractéristiques des 12 espèces de Lombricidés classées par ordre de dominance : pourcentage d'appartenance aux catégories écologiques, masse moyenne et écart-type, abondance (par modalité et totale). PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée.

Approche de Bottinelli basé sur un modèle, d'après Bouché					Nombre d'individus						
Espèce	Epigé (%)	Anécique (%)	Endogé (%)	Catégorie écologique	Masse moyenne (g)	PL	PT	SSM	T	VS	Total
<i>Lumbricus rubellus</i> (Hoffmeister, 1843)	85	15	0	Épigé	1,171 ± 0,476	11	29	28	42	10	120
<i>Aporrectodea caliginosa</i> (Savigny, 1826)	16	4	80	Endogé	0,779 ± 0,442	9	6	12	20	7	54
<i>Aporrectodea rosea</i> (Savigny, 1826)	15	0	85	Endogé	0,299 ± 0,153	0	11	6	9	7	33
<i>Allolobophora chlorotica</i> (Savigny, 1826)	31	31	38	Intermédiaire*	0,621 ± 0,266	10	1	3	6	9	29
<i>Lumbricus castaneus</i> (Savigny, 1826)	90	10	0	Épigé	0,631 ± 0,373	0	11	3	1	2	17
<i>Allolobophora icterica</i> (Savigny, 1826)	0	8	92	Endogé	1,047 ± 0,494	0	5	2	2	4	13
<i>Octolasion lacteum</i> (Orley, 1885)	14	20	66	Endo-anécique*	0,697 ± 0,314	0	1	3	4	4	12
<i>Dendrobaena octaedra</i> (Savigny, 1826)	97	0	3	Épigé	0,186 ± 0,074	2	4	3	0	2	11
<i>Bimastos rubidus</i> (Savigny, 1826)	93	7	0	Épigé	0,293 ± 0,322	2	3	2	0	1	8
<i>Dendrobaena cognetii</i> (Cognetti, 1901)	87	0	13	Épigé	0,061 ± 0,025	0	0	2	0	1	3
<i>Octolasion cyaneum</i> (Savigny, 1826)	21	24	55	Intermédiaire*	1,172 ± 1,001	0	1	0	0	1	2
<i>Dendrobaena attemsi</i> (Michaelsen, 1902)	83	0	17	Épigé	0,435	0	1	0	0	0	1

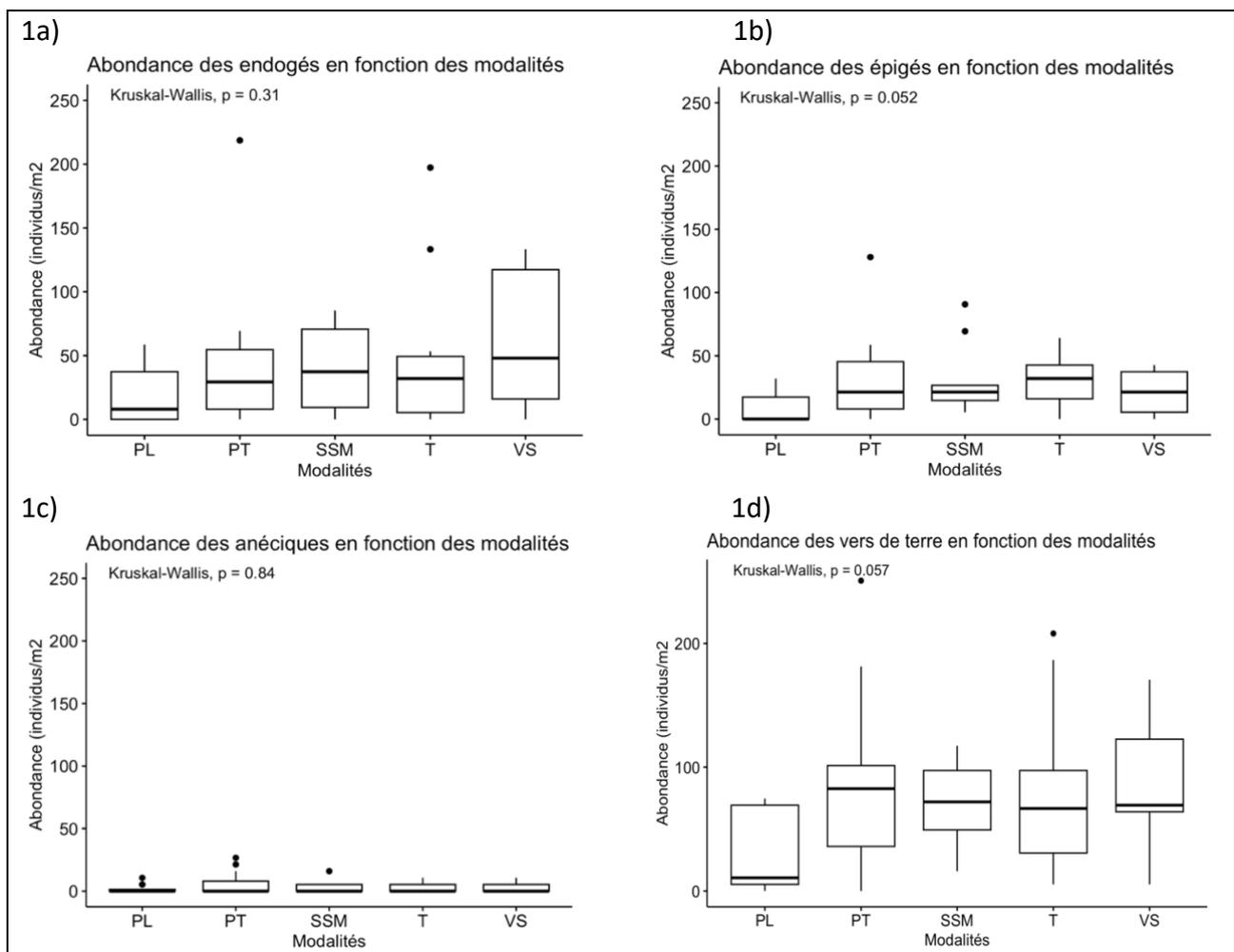
\* Endogé dans cette étude

Pour les analyses suivantes, la catégorie écologique de chaque espèce est celle attribué par Bottinelli, sauf pour celles marquées par un astérisque (\*) pour lesquelles nous avons uniquement considéré la catégorie dominante, à savoir « endogé ».

Les changements d'abondance, de biomasse totale et de masse individuelle en fonction des PMS, ont été étudiés pour l'ensemble des vers de terre, ainsi que pour chaque catégorie écologique. De plus, l'analyse de la masse des quatre espèces les plus abondantes (*Lumbricus rubellus*, *Aporrectodea caliginosa*, *Aporrectodea rosea*, et *Allolobophora chlorotica*) a été faite pour chaque

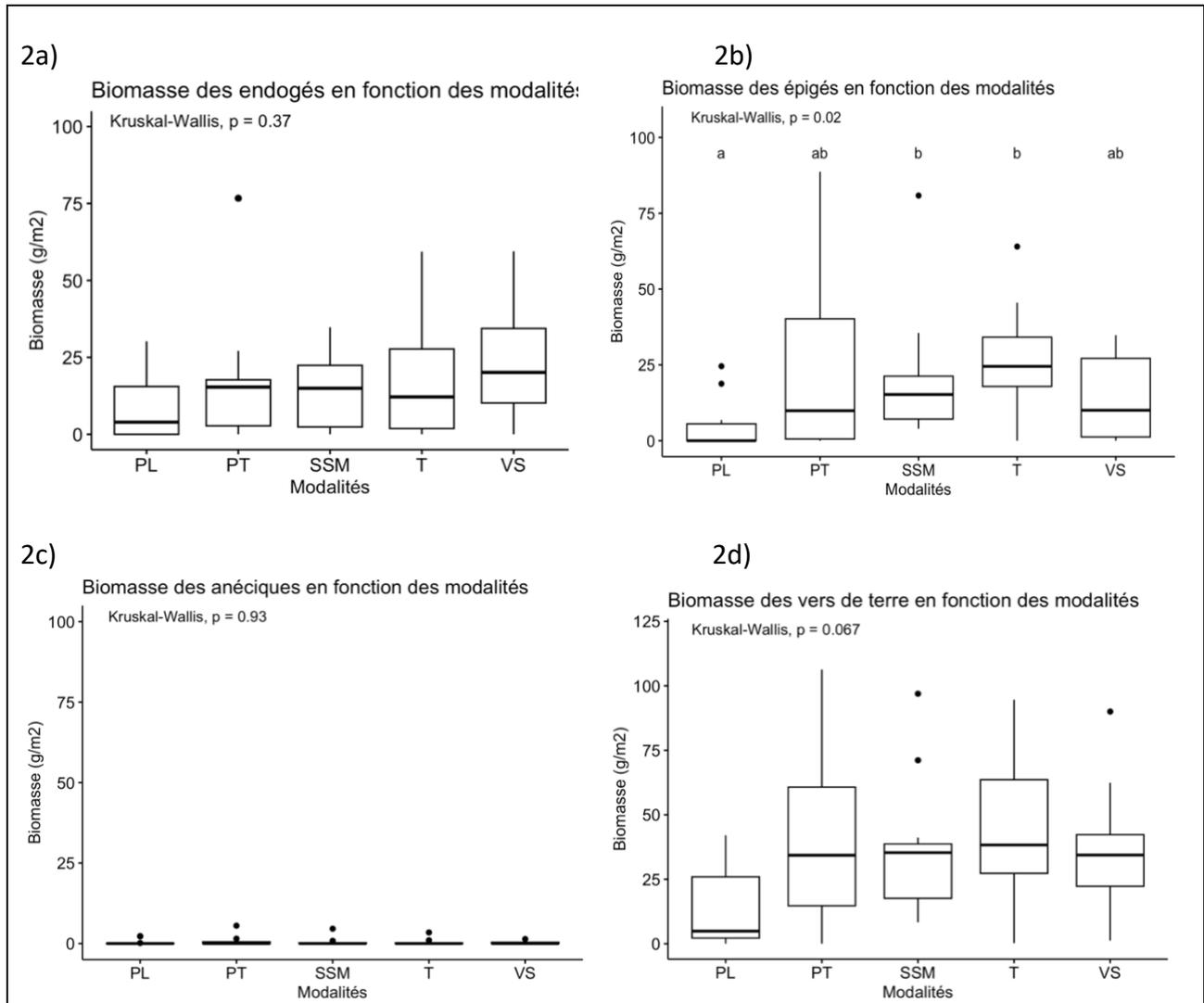
modalité. Des tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis ont été effectués, puisque les données ne permettaient pas de remplir les conditions paramétriques pour faire une ANOVA (normalité et homoscédasticité des résidus), sauf pour un jeu de donnée (celui de la masse de l'espèce *Lumbricus rubellus*). Mais pour une meilleure cohérence entre les analyses, un test de kruskal-wallis a aussi été fait sur ces données (les p-value étant similaires entre les deux tests). Pour le test où la p-value était supérieure à  $\alpha = 0.05$ , un test de wilcoxon par paire a été réalisé grâce à la fonction `pairwise.wilcox.test`, avec la correction de Holm, (légèrement moins sensible que celle de Bonferroni).

## Résultats



**Figure 1** : Boxplot représentant l'abondance (individus/m<sup>2</sup>) des vers de terre, en fonction des modalités de gestion (PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée). a) abondance par modalité des vers endogés ; b) des vers épigés ; c) des vers anéciques ; d) de l'ensemble des vers de terre. (L'effectif correspond au nombre de blocs d'échantillonnés :  $n=57$ ).

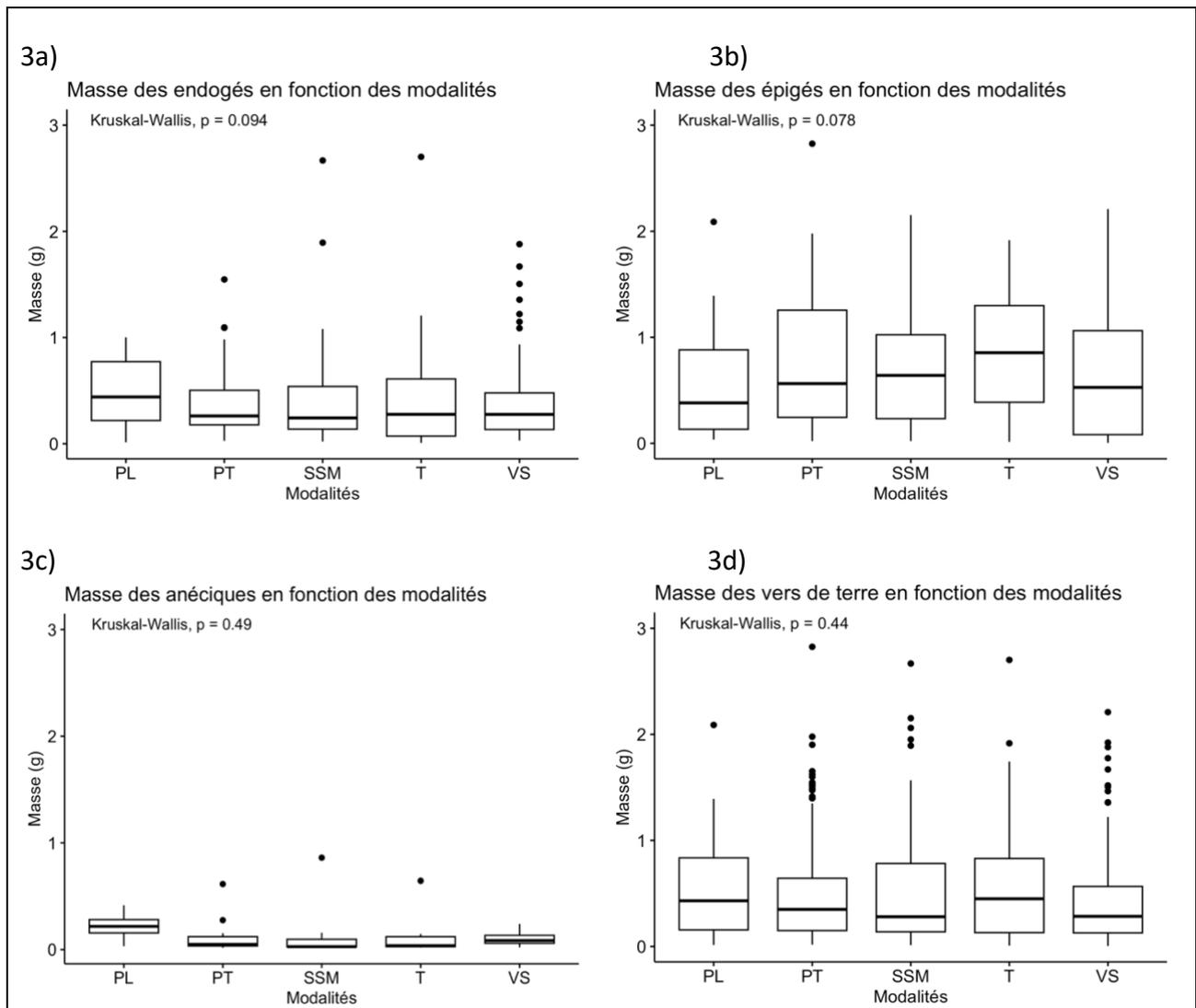
L'abondance des trois groupes écologiques ne diffère pas en fonction des modalités (figure 1), même si une différence presque significative est visible chez les épigés, avec une abondance un peu plus faible en PL (figure 1b). Si l'on regarde la biomasse de l'ensemble des Lombricidés, on remarque une différence presque significative ( $p$ -value = 0,057) entre la modalité PL, où l'abondance est plus faible et la modalité SSM où elle est plus forte (figure 1d).



**Figure 2 :** Boxplot représentant la biomasse ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) des vers de terre, en fonction des modalités de gestion (PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée). a) biomasse par modalité des vers endogés ; b) des vers épigés ; c) des vers anéciques ; d) de l'ensemble des vers de terre. (L'effectif correspond au nombre de blocs d'échantillonnés :  $n=57$ ).

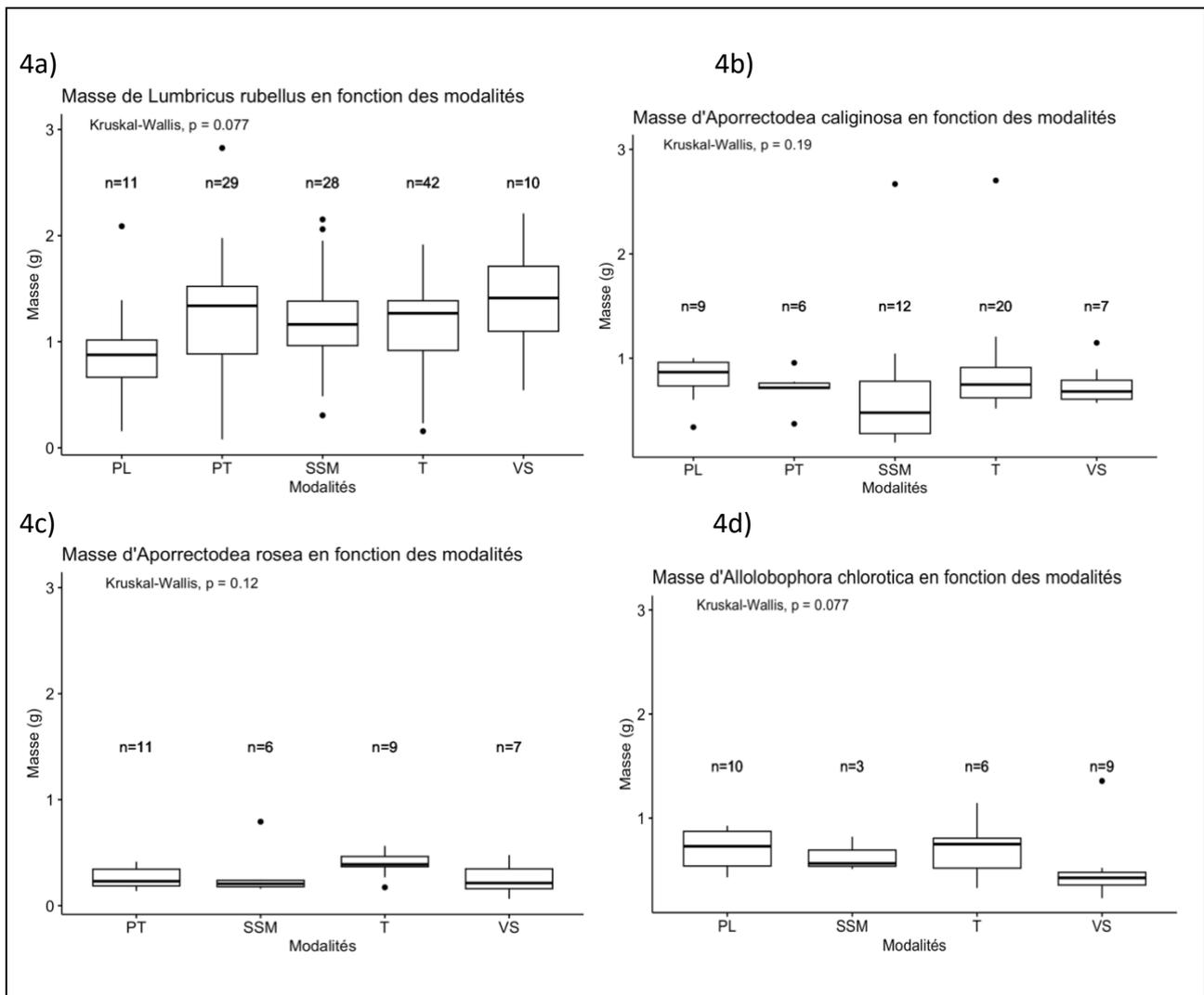
Il n'y a pas de différences significatives de la biomasse des endogés et des anéciques (figure 2a et 2c), ni de la biomasse totale des vers de terre (figure 2d), bien qu'on puisse voir en tendance, une biomasse plus faible en PL que pour les autres modalités. La biomasse des vers épigés est significativement plus faible en PL par rapport aux modalités SSM ( $p$ -value = 0,049) et T ( $p$ -value =

0,022), mais les biomasses pour ces trois modalités ne sont pas significativement différentes des deux autres modalités PT et VS (figure 2b).



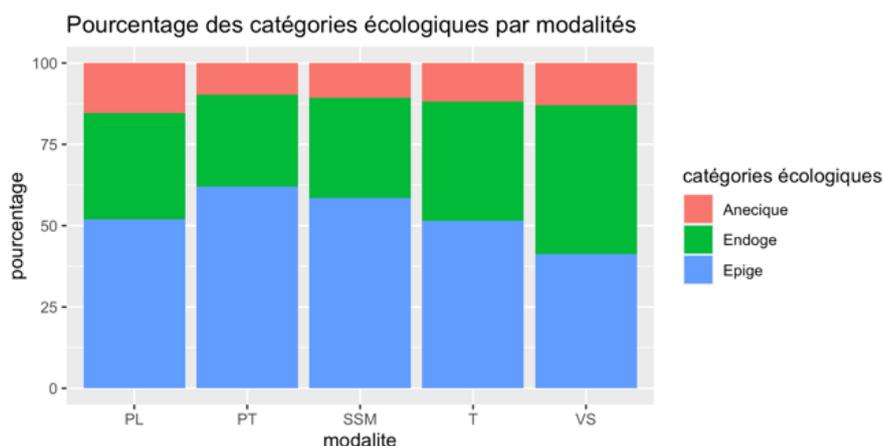
**Figure 3** : Boxplot représentant la masse individuelle (g) des vers de terre, en fonction des modalités de gestion (PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée). a) masse par modalité des vers endogés (n=436) ; b) des vers épigés (n=360) ; c) des vers anéciques (n=35) ; d) de l'ensemble des vers de terre (n=738).

Il n'y a pas de différences significatives de la masse individuelle des vers que l'analyse ait été faite par catégories écologiques ou pour l'ensemble des vers (figure 3). On peut toutefois noter une légère tendance de masse plus élevée chez les endogés pour le travail en plein (figure 3a), et une légère tendance de masse plus faible en PL des épigés et de masse plus forte en témoin (figure 3b), sans toutefois être significative.



**Figure 4 :** Boxplot représentant la masse individuelle (g) des vers de terre, en fonction des modalités de gestion (PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée). a) masse par modalité de *Lumbricus rubellus*; b) d'*Aporrectodea caliginosa* ; c) d'*Aporrectodea rosea* ; d) d'*Allolobophora chlorotica*. L'effectif est affiché au-dessus de chaque boxplot.

Pour les quatre espèces les plus abondantes, il n'y a pas de différences significatives de la masse individuelle en fonction des modalités (figure 4). On peut toutefois noter une légère tendance de masse plus faible de *L. rubellus* en PL (figure 4a). Et une masse un peu plus faible, en VS chez *A.chlorotica*, sans être pour autant significative (figure 4d). Les quelques valeurs aberrantes sous les boîtes à moustaches représentent la masse des individus qui ont été sectionnés, probablement au cours de l'échantillonnage, et auxquels il manque donc une partie postérieure de leur corps.



**Figure 5 :** Barplot représentant la moyenne des traits pondérée par l'abondance des espèces (CWM) exprimée en pourcentage d'anécicité, d'endogécité, et d'épigécité par modalité (PL : travail en plein ; PT : travail en potet ; SSM : sous-solage ; T : témoin ; VS : végétation spontanée).

On observe un pourcentage d'anécicité plus faible que le pourcentage d'endogécité et ou d'épigécité quelles que soient les modalités, (figure 5). En regardant les modalités PT, SSM, T et VS, dans cette ordre, on peut voir une diminution du pourcentage d'épigécité qui passe de 62 % à 41 %, et une augmentation du pourcentage d'endogécité de 28 % en PT à 46 % en VS, ainsi qu'une plus faible augmentation du pourcentage d'anécicité, passant de 10 % à 13 %. La modalité PL est celle qui a le pourcentage d'anécicité le plus important (15 %), mais avec un pourcentage d'épigécité (52 %) plus important que le pourcentage d'endogécité (33 %) contrairement à la modalité VS.

**Tableau 2 :** récapitulatif des valeurs de degrés de liberté (Df), de Chi<sup>2</sup>, de p-value et de la taille du jeu de données, des différentes analyses effectuées. Tous les test sont des tests de Kruskal-Wallis.

Analyse Kruskal-Wallis	Df	Chi <sup>2</sup>	P-value	Taille échantillon
Abondance (individus/m <sup>2</sup> )				
Endogé	4	4,794	0,309	57
Épigé	4	9,390	0,052	57
Anéciques	4	1,416	0,841	57
Vers de terre (total)	4	9,182	0,057	57
Biomasse (g/m <sup>2</sup> )				
Endogé	4	4,295	0,368	57
Épigé	4	11,683	<b>0,020</b>	57
Anéciques	4	0,829	0,935	57
Vers de terre (total)	4	8,785	0,067	57
Masse (g)				
Endogé	4	7,945	0,094	436
Épigé	4	8,391	0,783	360
Anéciques	4	3,409	0,492	35
Vers de terre (total)	4	3,757	0,440	738
L. rubellus	4	8,436	0,077	120
A. caliginosa	4	6,101	0,192	54
A. rosea	3	5,911	0,116	33
A. chlorotica	3	6,840	0,077	29

## Discussion

### I. Réponse à l'échelle des communautés

#### a. Abondance totale

Il y a une différence presque significative de l'abondance totale entre les modalités PL et SSM, il n'y a par contre pas de différence avec les trois autres modalités. La modalité PL est celle qui a le plus modifié la structure du sol en le décompactant sur la majorité de sa superficie, alors que la dent de sous-solage dans la modalité SSM n'a décompacté le sol que sur quelques centimètres le long de la ligne de plantation. Pour la modalité PT qui se trouve entre les deux, l'abondance n'est pas différente de l'une et l'autre des modalités de PMS.

Ces différences assez faibles sont peut-être dues au fait que les abondances des vers de terre sont assez hétérogènes au sein des parcelles, et entre les parcelles, il peut donc y avoir une grande variabilité d'abondance pour une même modalité, avec des échantillons sans aucun ver de terre par exemple. En PT, les échantillonnages ont été faits dans la zone décompactée, mais également dans la zone d'andain et dans une zone non travaillée (zone interligne) (schéma3), cette hétérogénéité permet de rendre compte de l'ensemble de la placette. On peut supposer que les zones d'andains formées par une accumulation de la litière riche en nutriment, favorisent le développement des vers de terre, masquant ainsi la diminution possible de ces derniers en zone décompactée (Briones et Schmidt 2017). Cela pourrait expliquer pourquoi on ne voit pas de diminution d'abondance en PL, mais que l'on en voit en PT. Les abondances en modalités témoins T et VS sont elles aussi très hétérogènes, avec une assez grande variance, on ne remarque donc pas de différence avec les autres modalités.

En PL, il est aussi possible qu'une plus faible abondance soit due à un sol trop tassé, c'est ce qui peut arriver sur un sol mis à nu dans une région où il pleut beaucoup, le sol va se recompacter en s'affaissant sur lui-même (Lees et al. 2016; Pelosi 2008). Il serait donc intéressant de créer des réplicats dans les différentes zones au sein des parcelles avec, par exemple pour la modalité PT : trois réplicats en zone d'andain, trois en zone décompactée et trois en interligne. Afin de pouvoir comparer cette hétérogénéité au sein de la parcelle et de voir s'il y a des différences d'abondance entre ces zones. Mais cela demande un temps supplémentaire que nous n'avons pas. Dans sa thèse Pelosi, évoque une diminution de l'abondance des vers de terre au bout de 5 ans, diminution qui n'était pas visible 6 mois seulement après le travail du sol (Pelosi 2008). La réponse des vers de terre

n'est pas toujours visible à très court terme, c'est pourquoi d'autres échantillonnages sont prévus dans les années à venir.

#### b. Biomasse totale

Il y a assez peu de différence de biomasse entre les modalités. Il y a de forte variabilités au sein des modalités, et en PL une biomasse légèrement plus faible par rapport aux autres modalités, ces tendances suivent celle de l'abondance. Une biomasse plus faible peut-être due à une abondance plus faible, comme c'est probablement le cas ici, mais peut-être aussi due à des espèces ou des individus plus petits.

#### c. Masse individuelle totale

À l'échelle de la communauté il n'y a pas de différence significative de masse individuelle entre les modalités, seulement une grande variabilité entre les masses. La croissance de l'ensemble des individus ne semble pas être affecté par les PMS. Les vers en PL ne sont pas plus petits que dans les autres modalités, cette PMS a tendance à défavoriser l'abondance et la biomasse mais pas la masse individuelle des vers de terre. On peut supposer que les espèces de vers de terre qui se développent en PL sont celles qui ne sont pas ou peu sensibles aux perturbations du sol, et que leur croissance n'est donc pas affectée.

## II. Réponse des catégories écologiques

#### a. Proportions des catégories

Certaines espèces, telles que *Apporectodea chlorotica*, peuvent avoir des caractéristiques propres aux trois catégories écologiques (Bouché 1977), elles partagent donc leur niche écologique avec les trois catégories, et ont sûrement des réponses intermédiaires entre les réponses plus distinctes de chaque catégories. Pour les analyses d'abondance, de biomasse et de masse *A. chlorotica*, a été qualifié d'endogé, car c'est la catégorie dont elle se rapproche le plus, et dans laquelle elle est le plus souvent citée (Bottinelli et al. 2020), or cette espèce participant sûrement à l'activité des trois catégories à la fois. C'est pourquoi une autre analyse a été faite, en prenant en compte des pourcentages d'appartenance des espèces aux trois catégories écologiques (tableau 1) défini par (Bottinelli et al. 2020), et l'abondance des espèces, afin de déterminer une proportion plus réaliste, de chaque catégorie dans les différentes modalités.

On peut voir que le pourcentage d'anécécité est plus élevé en PL, assez faible en PT et augmente en allant vers VS (figure 5), tout comme l'abondance de *A. chlorotica* (tableau1), qui est la plus forte en PL. *O.lacteum* qui correspond à 20% à la catégorie anécécique, a aussi une abondance qui augmente

de PT à VS, mais en moindre mesure. Si l'on compare cette figure à celles des abondances des catégories écologiques endogés (figure 1a) et épigés (figure 1b), on remarque que la tendance n'est pas exactement la même, même si l'on voit ici aussi, que la modalité PL se démarque un peu des autres.

#### b. Anéciques

L'abondance des anéciques est assez faible, et ce peu importe la modalité. Cette faible abondance peut être due au pH du sol qui est assez acide (pH estimé à 5,5), et qui semble ne pas être favorable aux anéciques. Une étude effectuée dans la même région, proche de la parcelle étudiée ne recensait que très peu d'anéciques (Mickaël Hedde et al. 2007), il est donc cohérent de ne pas en retrouver beaucoup.

La profondeur d'échantillonnage de cette étude est de 15 cm, or les anéciques creusent des galeries assez profondes, ce qui a pu permettre à certains de fuir en profondeur lors de l'échantillonnage, mais il est plus probable qu'il n'y en ait pas ou très peu. Une extraction chimique aurait pu être envisagée, mais son efficacité en milieu forestier est discuté (Ganault et al. 2024). Il est prévu de comparer les résultats du T2, aux échantillonnages fait en T0 avant préparation du sol et en T1 juste après, une fois que les individus seront identifiés. Cette comparaison permettra, entre autres, de confirmer ou non l'absence totale d'anéciques sur ce sol.

D'ailleurs, les quelques anéciques trouvés sont des juvéniles, la catégorie écologique anécique leur a été attribué au vu de leur gradient de pigmentation antéro-postérieur, mais il est possible que ce soit de jeunes épigés qui n'auraient pas encore développé de gradient de pigmentation dorso-ventral, il n'y aurait donc peut-être pas d'anéciques dans ce sol. La réponse des vers de terre aux perturbations se fera donc moins visible, surtout au niveau de la biomasse totale qui ne sera pas influencée par les anéciques.

#### c. Endogés

L'abondance et la biomasse des endogés ne varient pas entre les modalités, les vers ne semble ni restreints, ni avantagés par l'action des PMS. Dans la littérature il a été trouvé que le labour peut favoriser l'abondance des vers endogés, grâce à un enfouissement de la matière organique dans le sol, là où vivent les endogés (Ernst et Emmerling 2009; Pelosi 2008; Bouthier et al. 2014). Or ici, les PMS n'ont pas eu pour action de mélanger la matière organique à la matière minérale, les vers n'ont donc pas bénéficiés de surplus de nutriments et ne se sont pas développés davantage dans un milieu ou dans un autre. La masse individuelle ne varie pas non plus entre les modalités, mais on observe

quelques valeurs bien supérieures aux autres, il s'agit probablement de vers endogés adultes appartenant à l'espèce *Allolobophora icterica* principalement, qui est parmi la plus grande du jeu de données (tableau 1). Et qui n'est d'ailleurs pas présente en PL, on pourrait expliquer cela par le fait que les vers de terre les plus grands sont les plus sensibles au travail du sol (Briones et Schmidt 2017). Ils sont plus sensibles à la perturbation physique du sol, et c'est en PL qu'elle est la plus forte car elle la perturbation couvre une majeure partie de la parcelle.

#### d. Épigés

Tous comme l'abondance totale des vers de terre, on observe une abondance légèrement plus faible en PL pour les épigés. La biomasse des épigés en PL est significativement inférieure aux modalités SSM et T, probablement parce qu'en PL la litière a été retirée sur la majorité de la parcelle alors qu'elle compose l'habitat et la source de nourriture des épigés (Bouthier et al. 2014). Privé de ces deux besoins vitaux l'abondance des épigés, et par extension leur biomasse ont diminuées. En SSM le travail du sol est assez faible, puisque le sol n'est décompacté que sur quelques centimètres de largeur le long de la ligne de plantation. De plus la litière n'est pas retirée, les vers épigés peuvent donc s'y développer normalement. La modalité T n'est pas censée affecter l'abondance et la biomasse puisqu'il n'y a eu aucune PMS de faite dessus, c'est pourquoi l'écart avec la modalité PL se creuse. Les parcelles en PL quant à elles, comportent des zones décompactées affectant les épigés, des zones en interligne non travaillées, mais aussi des zones d'andain (schéma 3) fournissant abris et source abondante de nutriments. L'hétérogénéité du milieu peut permettre d'une part le déclin et d'autre part le développement des épigés sur une même parcelle, ce qui explique la forte variabilité de biomasse de ces vers et l'absence de différence avec les autres modalités. La masse individuelle des épigés ne varie pas selon les modalités, mais la variance au sein de chaque modalités est assez grande, la communauté épigé comporte donc des individus de taille assez différente. Tout comme à l'échelle des communautés l'abondance et la biomasse des épigés semblent diminuer en modalité PL, alors que l'abondance et la biomasse des endogés ne sont pas impactées. La réponse globale des vers de terre est fortement due à la réponse des épigés.

#### e. Ratio juvéniles et adultes

Si l'on compare la masse individuelle des endogés et des épigés, on remarque que les endogés sont un peu plus petits que les épigés où il y a beaucoup de vers plus gros que les endogés. Or dans la littérature on retrouve que les épigés sont les plus petits, les endogés sont petits à moyens et les anéciques sont assez grands (Bouché 1977; Bottinelli et al. 2020). Une des explications possibles, est qu'un tiers (32,8 %) des vers endogés de nos échantillons sont des juvéniles, ce qui fait que leur

masse est plus petite que si cela avait été des adultes. Et chez les épigés il y a deux tiers (62,3%) d'adultes, ce qui fait que l'on a beaucoup de vers ayant une masse assez élevée par rapport aux juvéniles plus petits. Cette différence dans les ratios adultes/juvéniles, est probablement due à leur cycle de reproduction, les épigés ont tendance à se reproduire tôt dans la saison, ils ont donc le temps de grandir, tandis que les endogés se reproduisent plus tard et mettent parfois plus d'un an à atteindre le stade adulte (Bouché 1977), cela expliquerait pourquoi il y a beaucoup de juvéniles ici. Il faudrait comparer ces masses et ces proportions de juvéniles et d'adultes avec les valeurs du T0, avant tout travail du sol, voir si cette différence est due à une perturbation, ou si de telles proportions se retrouvent à chaque fois.

### III. Réponse spécifique

#### a. *Lumbricus rubellus*

Bien que la masse individuelle de *L. rubellus* ne varie pas entre les modalités, on observe une variabilité plus importante chez *L. rubellus*, que chez les autres espèces. Il a été montré que chez *Lumbricus terrestris*, il existait une diminution de la croissance, entraînant une masse plus petite à l'âge adulte, dû à une augmentation de la température du sol (Daniel, Kohli, et Bieri 1996), or le travail du sol peut également entraîner une augmentation de la température du sol (Briones et Schmidt 2017). Il est possible que *L. rubellus* réagisse de la même façon, ce qui expliquerait sa masse quelque peu plus faible en PL, où le sol est le plus travaillé. Cette diminution de la masse en PL peut être due à une croissance plus faible à cause du manque de nutriment comme vu précédemment. Cette espèce faisant partie des plus grandes du jeu de données, il faudrait regarder son abondance et sa biomasse, voir si elles sont impactées par le travail du sol, notamment la perturbation physique du sol qui défavorise les grands vers de terre. Un premier élément de réponse peut être apporté par Ivask et collaborateurs (2007) qui stipule que *L. rubellus* est assez tolérante aux perturbations du sol, même si elle reste plus sensible que les vers endogés (Ivask, Kuu, et Sizov 2007).

*Lumbricus rubellus* appartient à la catégorie écologique épigé, qui est ici la plus sensible à la modalité PL et qui a le plus d'impact sur l'abondance, la biomasse et la masse totale des vers de terre. Cette espèce est également la plus abondante, 120 individus sur les 303 vers adultes échantillonnés (tableau 1), c'est donc elle qui influence probablement le plus les résultats des analyses d'abondance et de biomasse, que ce soit à l'échelle des épigés ou des communautés.

### b. *Apporectodea caliginosa* et autres endogés

Les masses des trois espèces d'endogés *A. caliginosa*, *A. chlorotica* et *A. rosea*, ne varient pas entre les modalités. Cela peut être dû à une sensibilité moindre des espèces *A. caliginosa*, et *A. rosea* aux changements de conditions du milieu. *A. caliginosa* serait quant à elle plus sensible (Ivask, Kuu, et Sizov 2007), mais moins que les gros anéciques (Briones et Schmidt 2017). La réponse des vers de terre peut également varier entre les modalités en fonction des espèces (Ernst et Emmerling 2009), c'est pourquoi là-encore il serait intéressant d'étudier l'abondance et la biomasse à l'échelle spécifique. On pourrait également comparer la masse individuelle en T0 et T2 afin de voir s'il y a une diminution ou une augmentation de la masse, qui indiquerait une modification de la croissance après les PMS.

## Conclusion

L'abondance, la biomasse et la masse des vers de terre semblent être moins importantes dans la modalité PL, surtout comparée à la modalité SSM. Cette différence, mesurée à l'échelle de l'ensemble des vers de terre, semble surtout être due aux différences entre les modalités des vers épigés, et plus particulièrement à son espèce la plus représentative et la plus grande *Lumbricus rubellus*. La modalité de travail en plein est probablement la plus impactante, laissant le sol à nu et décompacté sur la majorité de la superficie de la parcelle, au contraire des autres modalités. La modalité VS quant à elle n'est étudiée que pour la macrofaune, elle montre des résultats contrastés, le fait qu'elle soit en bordure de parcelle joue peut-être un rôle dans ces résultats.

Afin de mieux comprendre les impacts des PMS sur l'ensemble de la faune du sol, il faut également prendre en compte les autres taxons de la macrofaune du sol. Car leur réponse peut différer de celle des vers de terre. Il faudrait donc comparer ces résultats avec ceux des autres axes du projet castor, comme l'étude de la mésofaune et de la microfaune, des communautés fongiques ou encore de la structure du sol et du stockage du carbone, car tous ces éléments interagissent entre eux. Puisque leur réponse sera peut-être plus forte ou au contraire inexistante en fonction des teneurs en carbone dans le sol ont un impact sur l'abondance et la biomasse des vers de terre (Ernst et Emmerling 2009), il serait intéressant de voir comment se répartit le stockage du carbone et voir si cela explique les quelques différences entre modalités. Il est également prévu de continuer à échantillonner la macrofaune du sol dans les mois ou années à venir, afin de voir les éventuelles réponses qui ne seraient visibles qu'à plus long terme.

## Bibliographie

- ADEME. 2019. La forêt et le bois, un enjeu majeur pour atténuer le changement climatique. Ademe & Vous - La lettre Recherche n°28
- Aerts, Raf, et Olivier Honnay. 2011. « Forest Restoration, Biodiversity and Ecosystem Functioning ». *BMC Ecology* 11 (1): 29. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-11-29>.
- Anderson, Jonathan Michael, et John SI Ingram. 1994. « Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods ». *Soil Science* 157 (4): 265.
- Aubert, Michaël, Mickaël Hedde, Thibaud Decaëns, Pierre Margerie, Didier Alard, et Fabrice Bureau. 2005. « Facteurs contrôlant la variabilité spatiale de la macrofaune du sol dans une hêtraie pure et une hêtraie-charmaie ». *Comptes rendus. Biologies* 328 (1): 57-74.
- Aust, W Michael, Masato Miwa, James A Burger, Steve C Patterson, et Emily A Carter. 2004. « Wet-weather timber harvesting and site preparation effects on coastal plain sites: a review ». *Southern Journal of Applied Forestry* 28 (3): 137-51.
- Berch, Shannon Marie, Jeff P Battigelli, et Graeme D Hope. 2007. « Responses of soil mesofauna communities and oribatid mite species to site preparation treatments in high-elevation cutblocks in southern British Columbia ». *Pedobiologia* 51 (1): 23-32.
- Bird, Simon B, Robert N Coulson, et Richard F Fisher. 2004. « Changes in soil and litter arthropod abundance following tree harvesting and site preparation in a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ». *Forest Ecology and Management* 202 (1-3): 195-208.
- Bottinelli, Nicolas, Mickaël Hedde, Pascal Jouquet, et Yvan Capowiez. 2020. « An explicit definition of earthworm ecological categories—Marcel Bouché's triangle revisited ». *Geoderma* 372:114361.
- Bouché, M B. 1977. « Strategies lombriciennes ». *Ecological Bulletins*, n° 25, 122-32.
- Bouthier, A, J Cortet, A Bispo, et D Piron. 2014. « Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique ». *Faut-il travailler le sol*, n° 85, 108.
- Briones, María Jesús I, et Olaf Schmidt. 2017. « Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis ». *Global change biology* 23 (10): 4396-4419.
- Daniel, O., L. Kohli, et M. Bieri. 1996. « Weight Gain and Weight Loss of the Earthworm *Lumbricus Terrestris* L. at Different Temperatures and Body Weights ». *Soil Biology and Biochemistry* 28 (9): 1235-40. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(96\)00121-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(96)00121-6).
- Duchene, Olivier, Yvan Capowiez, Jean-François Vian, Vincent Ducasse, Adeline Cadiergues, Thomas Lhuillery, et Joséphine Peigné. 2023. « Conservation Tillage Influences Soil Structure, Earthworm Communities and Wheat Root Traits in a Long-Term Organic Cropping Experiment ». *Plant and Soil*, septembre. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06273-3>.
- Eriksen-Hamel, Nikita S, Alicia B Speratti, Joann K Whalen, Anne Légère, et Chandra A Madramootoo. 2009. « Earthworm populations and growth rates related to long-term crop residue and tillage management ». *Soil and Tillage Research* 104 (2): 311-16.
- Ernst, Gregor, et Christoph Emmerling. 2009. « Impact of Five Different Tillage Systems on Soil Organic Carbon Content and the Density, Biomass, and Community Composition of Earthworms after a Ten Year Period ». *European Journal of Soil Biology* 45 (3): 247-51. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.02.002>.

- Ganault, Pierre, Johanne Nahmani, Stephan Hättenschwiler, Lauren Michelle Gillespie, Jean-François David, Ludovic Henneron, Etienne Iorio, Christophe Mazzia, Bart Muys, et Alain Pasquet. 2021. « Relative importance of tree species richness, tree functional type, and microenvironment for soil macrofauna communities in European forests ». *Oecologia* 196 (2): 455-68.
- Ganault, Pierre, Christian Ristok, Helen R. P. Phillips, Mickaël Hedde, Yvan Capowiez, Nicolas Bottinelli, Thibaud Decaëns, et al. 2024. « Soil BON Earthworm - A Global Initiative on Earthworm Distribution, Traits, and Spatiotemporal Diversity Patterns ». <https://doi.org/10.25674/362>.
- Garnier, Eric, Jacques Cortez, Georges Billès, Marie-Laure Navas, Catherine Roumet, Max Debussche, Gérard Laurent, Alain Blanchard, David Aubry, et Astrid Bellmann. 2004. « Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession ». *Ecology* 85 (9): 2630-37.
- Hedde, Mickaël. 2023. « Clé des vers de terre de France ». 28 janvier 2023. <https://lombrics.identificationkey.org/mkey.html>. Consulté le 15/05/2024.
- Hedde, Mickaël, Michaël Aubert, Fabrice Bureau, Pierre Margerie, et Thibaud Decaëns. 2007. « Soil Detritivore Macro-Invertebrate Assemblages throughout a Managed Beech Rotation ». *Annals of Forest Science* 64 (2): 219-28. <https://doi.org/10.1051/forest:2006106>.
- Hunter, Malcolm L. 1999. *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge university press.
- Ivask, Mari, Annely Kuu, et Eduard Sizov. 2007. « Abundance of earthworm species in Estonian arable soils ». *European Journal of Soil Biology* 43:S39-42.
- Kabrick, John M, Daniel C Dey, JW Van Sambeek, Michael Wallendorf, et Michael A Gold. 2005. « Soil properties and growth of swamp white oak and pin oak on bedded soils in the lower Missouri River floodplain ». *Forest Ecology and Management* 204 (2-3): 315-27.
- Kladivko, Eileen J. 2001. « Tillage Systems and Soil Ecology ». *Soil and Tillage Research* 61 (1-2): 61-76. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00179-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00179-9).
- Lees, K.J., A.J McKenzie, J.P Newell Price, C.N. Critchley, C.M. Rhymer, B.J. Chambers, et M.J. Whittingham. 2016. « The Effects of Soil Compaction Mitigation on Below-Ground Fauna: How Earthworms Respond to Mechanical Loosening and Power Harrow Cultivation ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 232 (septembre):273-82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.026>.
- Löf, Magnus, Daniel C. Dey, Rafael M. Navarro, et Douglass F. Jacobs. 2012. « Mechanical Site Preparation for Forest Restoration ». *New Forests* 43 (5-6): 825-48. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>.
- Manetti, Pablo L, Ariel J Faberi, Natalia L Clemente, et Alicia N López. 2013. « Macrofauna activity density in contrasting tillage systems in Buenos Aires province, Argentina ». *Agronomy Journal* 105 (6): 1780-86.
- Misirlioglu, Mete, John Reynolds, Mirjana Stojanović, Tanja Trakić, Jovana Sekulić, Samuel James, Csaba Csuzdi, Thibaud Decaëns, Emmanuel Lapied, et Helen Phillips. 2023. « Earthworms (Clitellata, Megadrili) of the world: an updated checklist of valid species and families, with notes on their distribution ». *Zootaxa*.
- Ministère de la transition écologique (MTE) (2020) *Stratégie Nationale Bas Carbone*. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/19092\\_strategie-carbone-FR\\_oct-20.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/19092_strategie-carbone-FR_oct-20.pdf).
- Neaves III, Charles M, W Michael Aust, M Chad Bolding, Scott M Barrett, et Carl C Trettin. 2018. « Impacts of timber harvest soil disturbance and site preparation on soil properties and site productivity: literature review ». In , 244.

- Örlander, Göran, Per Gemmel, et J Hunt. 1990. Site preparation: a Swedish overview. 105 vol.
- Peigné, J., M. Cannavaciolo, Y. Gautronneau, A. Aveline, J.L. Giteau, et D. Cluzeau. 2009. « Earthworm Populations under Different Tillage Systems in Organic Farming ». *Soil and Tillage Research* 104 (2): 207-14. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.02.011>.
- Pelosi, Céline. 2008. « Modélisation de la dynamique d'une population de vers de terre *Lumbricus terrestris* au champ. Contribution à l'étude de l'impact des systèmes de culture sur les communautés lombriciennes ». Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech).
- Prévost, M. 1992. « Effets du scarifiage sur les propriétés du sol, la croissance des semis et la compétition: revue des connaissances actuelles et perspectives de recherches au Québec ». In , 49:277-96. EDP Sciences.
- Querejeta, José Ignacio, Antonio Roldán, Juan Albaladejo, et Víctor Castillo. 2001. « Soil water availability improved by site preparation in a *Pinus halepensis* afforestation under semiarid climate ». *Forest Ecology and Management* 149 (1-3): 115-28.
- Schrama, M, et Roel Van Klink. 2016. « Overgrazing ».
- Schreck, Eva, Laure Gontier, Camille Dumat, et Florence Geret. 2012. « Ecological and Physiological Effects of Soil Management Practices on Earthworm Communities in French Vineyards ». *European Journal of Soil Biology* 52 (septembre):8-15. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.05.002>.
- Thornton, C W, et G R Matlack. 2002. « Long-Term Disturbance Effects in the Nematode Communities of South Mississippi Woodlands ». *Journal of Nematology* 34 (2): 88-97.