



Évaluation de la santé des sols d'exploitations intensives bio québécoises par l'application du bio-indicateur lombricien

Nathan Rondeau

► To cite this version:

Nathan Rondeau. Évaluation de la santé des sols d'exploitations intensives bio québécoises par l'application du bio-indicateur lombricien. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02372024

HAL Id: dumas-02372024

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02372024>

Submitted on 20 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AGROCAMPUS OUEST CFR Rennes
Année universitaire : 2018 – 2019
Spécialité : « Agroecology »
Mémoire de fin d'études d'ingénieur
de l'institut supérieur des sciences agronomiques

Évaluation de la santé des sols d'exploitations intensives bio québécoises par l'application du bio-indicateur lombricien

Par : Nathan RONDEAU
(nathan.rondeau@agrocampus-ouest.fr)



Soutenu à Rennes le 10 septembre 2019

Devant le jury composé de :

Rapporteur : HOFFNER Kevin

Maître de stage : HALDE Caroline

Enseignant référent : MENASSERI Safya

Présidente du Jury : PERES Guénola et LECADRE Edith

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Patrimoine-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



« Nous n'avons pas hérité la terre de nos ancêtres, mais l'empruntons à nos enfants »

Antoine de Saint-Exupéry (1939)

Liste des figures

- Figure.1 : Définition de la santé/qualité des sols. Definition of soil health/quality.
- Figure.2 : L'intérêt double des amendements organiques pour les vers de terre. Double benefits of organic amendements to earthworms.
- Figure.3 : L'influence de différentes variables sur les vers de terre au sein d'un sol cultivé. Impact of different variables on earthworms in arable soil.
- Figure.4 : Objectifs généraux du projet GRAPPE BIO. General objectives of the GRAPPE BIO project.
- Figure.5 : Les objectifs globaux du stage : L'effet du climat, de la gestion des cultures et des propriétés du sol sur les communautés de vers de terre. Internchip global objectives : Effect of the climate, farming practices and soil properties on earthworm populations.
- Figure.6 : Carte pédologique du Québec présentant la répartition des 11 fermes participantes au projet de recherche. Québec soil map with the distribution of the 11 farms contributing to the research project.
- Figure.7 : Dispositif expérimental et de la méthode d'échantillonnage des vers de terre. Experimental design and sampling methodology for earthworms.
- Figure.8 : Boîte à moustache [a : Abondance des vers de terre (i.m-2), b : Biomasse sèche des vers de terre (g.m-2)]. Boxplot [a : Earthworm abundance (i.m-2), b : Earthworm dry biomass (g.m-2)].
- Figure.9 : Matrice de corrélation des données mesurées (AB : Abondance des vers de terre, DB : Biomasse sèche des vers de terre, T : Température du sol, BD : Densité apparente du sol, Hu : Teneur en eau du sol), les coefficients de corrélation colorés ont passé le test de significativité à 95%. Correlation matrix of measured data (AB : Earthworm bundance, DB : Earthworm dry biomass, T : Soil temperature, BD : Soil bulk density, Hu : Soil water content), colored correlation coefficients are significant at 95%.
- Figure.10 : Influence du taux de matière organique du sol sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne. Influence of soil organic matter on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c).
- Figure.11 : Influence du pH sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne. Influence of pH on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c).

- Figure.12 : Influence de la classe de sol sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité lombricienne (c) [G1 : argiles, G2 : loams, G3 : sables]. Influence of soil class on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c) [G1 : clays, G2 : loams, G3 : sands].
- Figure.13 : Effet de la culture en 2018 sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne [Clo : Trèfle, FC : Céréale d'automne, GP : Pois vert, M : Maïs, S : Soja, SP : Céréale de printemps]. Effect of 2018 crop on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c) [Clo : Clover, FC : Fall cereal, GP : Green pea, M : Corn, S : Soybean, SP : Spring cereal].
- Figure.14 : Effet de la profondeur de travail de sol entre le printemps 2018 et 2019 sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne. Effect of tillage depth between spring 2018 and 2019 on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c).
- Figure.15 : Influence de la fréquence de travail de sol entre le printemps 2018 et 2019 sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne. Influence of tillage frequency between spring 2018 and 2019 on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c).
- Figure.16 : Influence du travail de sol du printemps 2018 sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne [0 : Pas de travail de sol, 1 : Un passage cultivateur, vibroculteur ou herse à disque à 5-10 cm, 2 : Un passage de déchaumeur ou labour à 5-10 cm, 3 : >=2 passages de cultivateur, vibroculteur ou herse à disque à 5-10 cm, 4 : Un passage de chisel >= 15 cm, 7 : Un passage de sous soleuse, déchaumeur ou labour à >= 20 cm]. Influence of tillage frequency between spring 2018 and 2019 on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c) lombricienne.
- Figure.17 : Modèle M2 liant l'abondance totale lombricienne (logAB) avec le travail de sol au printemps 2018 (Wprn18) (a), la température de l'air au printemps 2019 (TmoyPRN19) (b) et le type d'amendement au printemps 2019 (Amprn19 [non : pas d'amendement, Lpc : Lisier de porc, Fpl : Fumier de poule, Fpc : Fumier de porc, Fd : Fumier de dinde] (c)). M2 model connecting earthworm total abundance (logAB) with 2018 spring tillage management (Wprn18) (a), air temperature in spring 2019 (TmoyPRN19) (b) and the type of animal manure applied in spring 2019 (Amprn19 [non : no amendment, Lpc : swine slurry, Fpl : hen manure, Fpc : swine manure, Fd : turkey manure] (c)).

- Figure.18 : Modèle M5 liant l'abondance juvénile lombricienne ($\log AB_j$) avec le travail de sol au printemps 2018 (W_{prn18}) (a), la température moyenne au printemps 2019 ($T_{moyPRN19}$) (b) et le type d'amendement au printemps 2019 (Am_{prn19} [non : pas d'amendement, Lpc : Lisier de porc, Fpl : Fumier de poule, Fpc : Fumier de porc, Fd : Fumier de dinde]) (c). M5 model connecting earthworm juvenile abundance ($\log AB_j$) with 2018 spring tillage management (W_{prn18}) (a), mean of the 2019 spring temperature (b) and the type of 2019 spring animal fertilisation (Am_{prn19} [non : no amendement, Lpc : swine slurry, Fpl : hen manure, Fpc : swine manure, Fd : turkey manure]) (c).
- Figure.19 : Modèle M8 liant la biomasse sèche des vers juvénile ($\log BMS_j$) avec la gestion des cultures de couverture 2018 ($CC18$ [0 : pas de culture de couverture, 1 : culture de couverture dérobée détruite, 2 : culture de couverture intercalaire détruite, 3 : culture de couverture dérobée conservée ou fauchée, 4 : culture de couverture intercalaire conservée ou fauchée, 5 : Céréale d'automne qui ne passe pas toujours l'hiver et qui sert d'engrais vert]) (a) et la classe de sol ($Classesol$ [G1 : argileux, G2 : loams, G3 : sableux]) (b). M5 model connecting dry biomass of juvenile earthworms ($\log BMS_j$) with 2018 cover crops management ($CC18$ [0 : no cover crop, 1 : catch crop plowed, 2 : relay crop plowed, 3 : catch crop conserved or cut, 4 : relay crop conserved or cut, 5 : fall cereal used as a green manure or incorporated]) (a) and soil classes ($Classesol$ [G1 : clays, G2 : loams, G3 : sands]) (b).
- Figure.20 : Modèle M9 liant la biomasse sèche des vers endogés ($\log BMS_{en}$) avec le type d'amendement appliqué au printemps 2019 (Am_{prn19} [non : Pas d'amendement, Lpc : Lisier de porc, Fpl : Fumier de poule, Fpc : Fumier de porc, Fd : Fumier de dinde]) (a) et le type de sol ($typesol$) (b). M9 model connecting dry biomass of the endogeic earthworms ($\log BMS_{en}$) with the type of 2019 spring animal fertilisation (Am_{prn19} [non : no amendement, Lpc : swine slurry, Fpl : hen manure, Fpc : swine manure, Fd : turkey manure]) (a) and soil type ($typesol$) (b).

Liste des tableaux

- Tableau.1 : Le statut de l'agriculture biologique en grandes cultures au Québec. Organic agriculture status in Quebec.
- Tableau.2 : Les espèces de vers de terre au Québec. Earthworm species in Quebec.
- Tableau.3 : Le rapport C/N de différents résidus de cultures. C/N ratio of different crop residues.
- Tableau.4 : Caractéristiques des fermes et des champs sélectionnés. Characteristics of selected farms and fields.
- Tableau.5 : Modèles sélectionnés, des AIC (Akaike Information Criterion), de l'estimation pour chaque variable quantitative explicative et des P value pour chaque variable explicative. Selected models, theirs AIC, the estimate for each quantitative explanatory variable and P value for each explanatory variable.

Liste des abréviations

AIC : Akaike Information Criterion

ACM : Analyse de Correspondances Multiples

ACP : Analyse en Composantes Principales

g.m^{-2} : Gramme(s) par mètre carré

g.L^{-1} : Gramme(s) par litre

ha : Hectare(s)

i.m^{-2} : Individu(s) par mètre carré

mm : Millimètre(s)

OGM : Organisme génétiquement modifié

PAEF : Plan AgroEnvironnemental de Fertilisation

Liste des annexes

- Annexe.1 : version anglaise : « Assesment of soil health by earthworm bioindicator on intensive organic farms in Quebec ».
- Annexe.2 : Protocole d'échantillonnage de l'abondance et de la biomasse des vers de terre. Sampling protocol for earthworm abundance and biomass.
- Annexe.3 : Fiche d'aide à l'identification des vers de terre du Québec. Sheet for the identification of Quebec earthworms.
- Annexe.4 : Fiche explicative du jeu de données. Explanatory document of the dataset.
- Annexe.5 : Présentation des résidus et de leur répartition pour les 9 modèles étudiés. Presentation of residuals and their distribution for the 9 studied models.
- Annexe.6 : Fiche de confidentialité. Privacy card.

Table des matières

Liste des figures	1
Liste des tableaux	1
Liste des abréviations	1
Liste des annexes	1
I. Introduction.....	1
1. L'agriculture biologique intensive en grandes cultures au Québec	1
1.1. L'agriculture biologique au Québec	1
1.1.1. <i>Le cahier des charges en régie biologique</i>	<i>1</i>
1.1.2. <i>L'agriculture biologique en grandes cultures au Québec</i>	<i>2</i>
1.2. Des systèmes intensifs qui posent question.....	2
2. La santé des sols au cœur des enjeux agricoles	3
2.1. Une définition de la santé des sols	3
2.2. Un enjeu agricole majeur : préserver et améliorer la santé des sols.....	5
2.3. Les vers de terre et la santé des sols.....	6
3. Le bio-indicateur ver de terre.....	7
3.1. Les vers de terre de bons bio-indicateurs	7
3.2. La biologie et l'écologie lombricienne.....	8
3.2.1. <i>Les groupes de vers de terre</i>	<i>8</i>
3.2.2. <i>Les espèces de vers de terre au Québec.....</i>	<i>9</i>
3.2.3. <i>Le cycle de vie des vers de terre.....</i>	<i>10</i>
3.3. La dynamique des communautés de vers de terre.....	10
3.3.1. <i>L'effet des conditions climatiques sur la dynamique des populations de vers de terre.....</i>	<i>10</i>
3.3.2. <i>L'effet des propriétés des sols sur la dynamique des populations de vers de terre.....</i>	<i>11</i>
3.3.3. <i>L'effet des pratiques culturales sur la dynamique des populations de vers de terre.....</i>	<i>12</i>
4. Les objectifs et les hypothèses de cette étude.....	16
4.1. Les objectifs du projet GRAPPE BIO	16
4.2. Les objectifs du stage	17
4.3. Les hypothèses du stage	18
II. Matériels et Méthodes	19
1. La présentation des fermes adhérentes au projet	19
1.1. L'étude de 11 fermes biologiques intensives en grandes cultures	19
1.2. Le contexte pédoclimatique.....	20

2. Le dispositif expérimental	20
3. L'échantillonnage des vers de terre	21
3.1. Un échantillonnage par extraction physique et chimique in situ	21
3.2. Une identification et mesures de biomasses en laboratoire.....	21
3.3. Une mesure de la densité apparente, de l'humidité et de la température du sol.	22
4. La construction du jeu de données et la méthode statistique	22
III. Résultats et Discussion	23
1. Une présentation générale des données relatives aux vers de terre ...	23
2. Une analyse univariée de l'impact du contexte pédoclimatique et des pratiques culturales sur les vers de terre	24
3. Une analyse multivariée de l'impact du contexte pédoclimatique et des pratiques culturales sur les vers de terre.....	25
IV. Conclusion	27
Bibliographie.....	
Sitographie	
Annexes.....	

I. Introduction

À l'échelle mondiale, la révolution verte a été associée à une large utilisation d'intrants de synthèses qui ont permis une augmentation des rendements et de la productivité ; Mais à quel prix ? On constate depuis les années 1980 une diminution de l'efficacité et de la résilience des sols (*Datta et al. 2016*).

Les techniques agricoles modernes, associées à une gestion intensive des terres arables et un changement climatique marqué ont causé une profonde dégradation des écosystèmes et notamment une importante baisse de la biodiversité et de la santé générale des sols (*Beketov et al. 2013 ; Singh 2018*).

1. L'agriculture biologique intensive en grandes cultures au Québec

1.1. L'agriculture biologique au Québec

1.1.1. Le cahier des charges en régie biologique

L'agriculture certifiée biologique au Canada est née des suites de la création de l'IFOAM (International Federation of Organic Agriculture Movements). Cependant le Québec, depuis 2000, a développé un cahier des charges pour les productions biologiques plus restrictif que dans les autres provinces canadiennes. Ainsi les productions végétales biologiques au Québec sont soumises à une réglementation ce qui leur permet d'être certifiés biologiques. Cette réglementation interdit l'utilisation de pesticides ou d'engrais de synthèse, d'organismes génétiquement modifiés (OGM), d'antibiotiques, d'hormones de croissance et de divers agents chimiques de conservation. De plus les semences utilisées doivent également être certifiées biologiques. Dans un souci de durabilité, le gouvernement canadien et les organismes de certification encouragent la mise en place de pratiques culturales respectueuses de la santé des sols c'est-à-dire des pratiques qui préservent ou améliorent l'état physique, chimique et biologique du sol. Ils motivent donc les rotations de cultures, les amendements organiques, l'utilisation de couverts végétaux et d'engrais verts ainsi que l'utilisation d'un travail du sol adapté au contexte (*CARTV 2018 ; MAPAQ 2017 ; ONGC CAN/CGSB-32.310 2015 ; ONGC CAN/CGSB-32.311 2015*).

- Tableau.1 : Le statut de l'agriculture biologique en grandes cultures au Québec. Organic agriculture status in Quebec.

(Adapté de *Institut de la statistique du Québec* et *Portail Bio Québec*)

Crop Type	Total Area (ha)	Certified organic land (ha)	Percentage of certified organic land (%)
Maize	378 000	4 903	1,30
Soybean	396 000	9 386	2,37
Mixed Grain	11 500	4 213	36,63
Wheat	91 500	3 429	3,75
Barley	51 500	1 282	2,49
Oat	58 000	3 205	5,53

1.1.2. L'agriculture biologique en grandes cultures au Québec

Les exploitations de grandes cultures se définissent comme des exploitations produisant des céréales, des protéagineux et des oléagineux. Ce type d'agriculture suppose une utilisation généralisée d'outils mécaniques. À l'échelle de la province du Québec les productions de maïs grain et de soja sont dominantes en grandes cultures. En 2018, elles représentaient plus de 350 000 ha chacune soit 75% de la surface dédiée aux grandes cultures au Québec. Le dernier quart correspond aux céréales tels que le blé, l'avoine ou l'orge (Tableau.1). Ce type de production est principalement valorisée au sein d'industries bioalimentaires à destination de l'alimentation animale et humaine. L'agriculture biologique québécoise suit la tendance mondiale et a connu une augmentation du nombre d'exploitations et de sa production. Entre 2015 et 2017 la surface cultivée et le nombre d'exploitation en régie biologique ont quasiment doublé. En 2017, la province comptait 1124 exploitations biologiques réparties sur 99 000 ha. Parmi ces fermes biologiques 519 d'entre elles étaient des exploitations de grandes cultures. L'ensemble des terres cultivées en grandes cultures en 2018 sur la province du Québec représentent 1 millions d'hectares, et 2,8% de cette surface est dédiée à la production de grandes cultures certifiées biologiques. Les types de productions en grandes cultures biologiques suivent la même tendance que les productions conventionnelles de grandes cultures (Tableau.1).

Les productions issues des grandes cultures du Québec ont généré 1,232 milliards de dollars canadiens en 2017 (soit 820 millions d'euros). Ce type de cultures est donc au cœur d'enjeux économiques et environnementaux au Canada (*CARTV ; Institut de la statistique du Québec ; Portail Bio Québec ; Sall et al. 2015*).

1.2. Des systèmes intensifs qui posent question

Les cultures intensives au Québec se définissent principalement par la production de maïs-grain et de soja inclus dans des rotations courtes (2-4 ans). Ce type de culture se base donc sur un travail du sol, le plus souvent marqué, que ce soit pour l'implantation et le désherbage à différents stades de développement (*Ecological agriculture project 1991*). De plus les exploitations québécoises en grandes cultures se basent sur des parcelles ouvertes drainées et nivelées. Bien que ce type de champs présentent des avantages, à l'usage, pour la mise en œuvre des travaux relatifs à la culture ; d'un autre côté cela modifie le paysage et peut entraîner des modifications du micro-climat mais surtout impacter les paramètres du sol et sa qualité générale. En effet, les travaux de nivellement vont surtout diminuer la stabilité des agrégats, déséquilibrer la micro- et macro-faune en place et donc les cycles biogéochimiques en place. Il est important de noter un possible retour à un état de

fonctionnement normal du sol dépendant du contexte et notamment des pratiques agricoles (*MAPAQ 2017*). Les systèmes intensifs en grandes cultures même biologiques présentent donc une menace de long terme pour la préservation des sols.

2. La santé des sols au cœur des enjeux agricoles

2.1. Une définition de la santé des sols

Le sol est une importante composante de la biosphère. Il n'est pas seulement le support à la production de biens alimentaires et textiles, il permet aussi le maintien d'une qualité environnementale que ce soit pour les microbiotes, mais aussi les végétaux, les animaux et l'homme. Il est dynamique, vivant et joue un rôle très important au sein des écosystèmes. Le système sol est composé de matière minérale, de matière organique, d'eau, de gaz et d'organismes vivants (*Doran 2002 ; Doran et Parkin 1994*).

Au cours des années 1980 est apparu, après quelques décennies d'agriculture intensive, le concept de « qualité/santé » des sols avec notamment la volonté de gérer durablement les agroécosystèmes au sein desquels le sol prend une place majeure. Le changement climatique de plus en plus marqué, couplé à une utilisation intensive des terres sont des facteurs marquants de la dégradation des écosystèmes et notamment des sols. De plus, au-delà de cette forte dégradation, on constate une augmentation de la demande en ressources et notamment alimentaire quand aujourd'hui 11% de la population mondiale est en état de malnutrition (*ICI Radio-Canada 2019*). La détérioration des sols, due à l'intensification des systèmes, est le point névralgique auquel doit faire face l'agriculture. Dans ce contexte, les agriculteurs doivent répondre à des besoins sans compromettre l'intégrité de l'environnement et tout en préservant la santé publique (*Acton et Gregorich 1995 ; Doran et Parkin 1994, 1996 ; Pankhurst et al. 1997 ; Tilman et al. 2002*). Malgré ces enjeux, les Nations Unies, dans son rapport sur les objectifs de durabilité, n'évoquent les sols que dans une sous-partie de l'un des 17 objectifs du développement durable. Selon elle il est important de « préserver et restaurer les écosystèmes terrestres en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des terres et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité » (*Nations Unies 2017*).

La qualité d'un sol a d'abord été définie sous l'axe de la performance agronomique, c'est-à-dire la production en grosses quantités de ressources de bonne qualité (*Mausel 1971*). La qualité des sols est définie comme l'interaction entre les propriétés inhérentes relatives au

contexte climatique, pédologique, topographique et hydrographique, ainsi qu'aux pratiques culturelles auxquelles il est soumis.

La qualité des sols est une notion complexe. Il est important de se baser sur des connaissances permettant une aide à la décision et la mise en place d'une gestion durable (*Acton et Gregorich 1995 ; Bünemann et al. 2018 ; Drobnick et al. 2018*). Le sol dans un cadre plus large :

- Permet la production de biomasse et est au cœur des cycles de la matière,
- Est un réservoir de carbone important,
- Permet la protection humaine et environnementale,
- Est le support de la biodiversité, un réservoir important de gènes,
- Est un support physique pour les activités humaines,
- Est une source de matière première,
- Est un héritage géogénique et culturel.

Cette notion de qualité définit le sol comme le support de systèmes de production qui doivent répondre à des besoins, mais ne prend pas en considération une composante de la durabilité : la nécessité de produire sur le long terme (*Pankhurst et al. 1997*).

La santé d'un sol est une notion apparue après celle relative à la qualité d'un sol mais qui vient l'appuyer en incluant une dimension de durabilité spatio-temporelle. La santé d'un sol est sa capacité à supporter une culture et à la maintenir dans le temps et l'espace. De plus la santé d'un sol met l'accent sur la condition générale du sol ainsi que sur la qualité des ressources qui lui sont directement et indirectement associées. Cette caractéristique est liée aux différents indicateurs physiques, chimiques et biologiques du sol et leurs interactions (*Acton et Gregorich 1995 ; Bünemann et al 2018 ; Kibblewhite et al 2008 ; Pankhurst et al 1997*).

La santé d'un sol rend compte de la santé des écosystèmes et de la santé humaine. En effet, la santé humaine est intimement liée à la santé des sols. Une bonne santé pour l'humain passe par une alimentation saine et diversifiée, c'est-à-dire des aliments cultivés sur des sols sains. Cela rend compte de l'importance de l'éducation et de la culture relative à la nutrition et par prolongation à la préservation et l'amélioration de la santé des sols (*Acton et Gregorich 1995 ; Haberern 1992*).

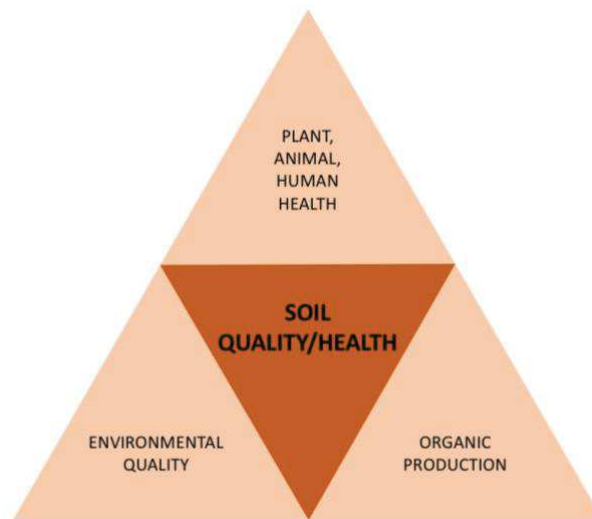


Figure.1 : Définition de la santé / qualité des sols.

Definition of soil health/quality.

(Adapté de *Doran et Parkin 1994*)

Ainsi dans cette étude nous considérons la santé et la qualité des sols comme étant des synonymes qui peuvent être définis comme (Figure.1):

« La capacité d'un sol à fonctionner dans les limites d'un écosystème pour soutenir une culture, maintenir une qualité environnementale et promouvoir la santé végétale et animale (donc humaine) » (*Doran 2002*).

Porter un intérêt au concept « qualité/santé » des sols revient à s'intéresser à leurs performances mais surtout à leurs capacités à soutenir une production de manière durable, notamment par la préservation des écosystèmes et de la biosphère (*Doran et Parkin 1994, 1996*).

2.2. Un enjeu agricole majeur : préserver et améliorer la santé des sols

Les objectifs d'une agriculture durable soulignent la nécessité de maintenir ou d'améliorer la santé des sols et donc de favoriser la résilience des systèmes (*Kibblewhite et al. 2008 ; Pankhurst et al. 1997*).

Le sol a une valeur naturelle au regard des nombreux services écosystémiques qu'il fournit. Vu le contexte actuel où l'on constate une profonde dégradation des écosystèmes et une grande pression sociale et démographique, l'agriculture doit entamer une transition durable (*FAO 2015*). Dans le but de préserver et d'améliorer la santé des sols, il est important de mettre en avant des pratiques culturales qui minimisent les perturbations et qui maximisent la biodiversité, la couverture des sols et l'activité racinaire (*Stewarts et al. 2018*). Le gouvernement canadien a donc remis en cause les pratiques intensives courantes de ces dernières décennies (travail du sol profond, intrants chimiques, ...) et encourage les rotations, les amendements organiques adaptés, et les cultures de couverture et d'engrais verts (*Acton et Gregorich 1995*).

La santé des sols peut donc être évaluées par l'utilisation de différents indicateurs qui rendent compte de son état. On distingue 3 types d'indicateurs : les indicateurs chimiques, physiques et biologiques. Les deux premiers types d'indicateurs ont été les premiers à être utilisés et permettent de donner de l'information respectivement sur la fertilité et sur les propriétés du sol qui vont faciliter la prolifération des racines et l'accès aux éléments nutritifs. Le troisième type d'indicateur rend compte du fonctionnement biologique des sols, que ce soit à l'échelle des microorganismes ou des macroorganismes tels que les vers de terre (*Champagne et Gauthier 2017 ; FAO ; Ivask et al. 2007*).

2.3. Les vers de terre et la santé des sols

La faune du sol et sa diversité sont les acteurs d'un grand nombre de services écosystémiques qui participent notamment à :

- La dynamique chimique des sols associée au cycle de la matière organique,
- La régulation des pollutions,
- L'efficacité de la nutrition végétale,
- La filtration de la ressource en eau,
- La résilience globale d'un écosystème.

Le sol est un milieu de vie pour une faune diversifiée mais l'intensification des pratiques agricoles a globalement entraîné une sélection des espèces adaptées à de haut niveau de perturbation (*Kibblewhite et al. 2008*).

Parmi cette macrofaune, les vers de terre sont des espèces « ingénieurs » qui contribuent grandement à différents services écosystémiques : pédogénèse, évolution et stabilité de la structure d'un sol, cycle des nutriments, régulation climatique, production primaire, réduction des substances polluantes, régulation de l'eau et d'autres services bénéfiques aux cultures ... (*Blouin et al. 2013 ; Bouché 1977 ; Jones et al. 1994 ; Pelosi 2008 ; Reynolds 1977*). Ils jouent donc des rôles majeurs au sein des sols. Les lombrics ont en effet la capacité de maintenir la fertilité d'un sol, un élément central de sa santé et donc de sa durabilité. L'activité des lombrics, c'est-à-dire l'humification, la minéralisation, la formation de galeries et le rejet de turricules, joue un rôle important dans la dynamique physique et chimique des sols. En effet, ils ont un rôle à jouer dans l'amélioration de la structure du sol. Ils participent également à la dégradation de la matière organique, la rendant mobilisable pour les plantes et les microorganismes. (*Pérès et al. 1998 ; Singh 2018*). Les lombrics interviennent également dans la relation santé humaine – santé des sols en réduisant la quantité de polluants des sols et en limitant la prolifération d'éléments pathogènes (*FAO 2015 ; Frazao et al. 2018*).

D'après *Singh 2018*, une solution à long terme et peu coûteuse pour limiter et remédier aux effets négatifs des pratiques agricoles modernes, serait de développer des systèmes durables, viables économiquement et basés sur des pratiques d'introduction et de préservation des vers de terre. Il souligne donc l'importance des vers de terre qui sont des acteurs fondamentaux au fonctionnement des systèmes sols.

3. Le bio-indicateur ver de terre

3.1. Les vers de terre de bons bio-indicateurs

Un bon indicateur de sol est inclus dans des processus écosystémiques et est associé aux propriétés physiques, chimiques et biologiques. Il doit être facilement accessible et mesurable par différents acteurs. Il doit être sensible aux variations climatiques ainsi qu'au changement de pratiques. L'idée de gérer des bases de données partagées et accessibles se basant sur des méthodologies communes est également intéressante (*Doran et Parkin 1994, 1996*).

La faune et la micro faune sont considérées comme de bons indicateurs de la gestion durable des systèmes agricoles et notamment de la santé des sols. Un indicateur doit être sensible aux changements de pratiques. De plus la mesure d'un bon indicateur de sol doit permettre une approche des fonctions bénéfiques ou non du sol. Il peut donc se substituer à de nombreuses mesures de propriétés souvent coûteuses et longues. L'indicateur doit également être facilement interprétable par les acteurs du territoire étudié (agriculteurs, agronomes, ...). Pour finir, idéalement la mesure de l'indicateur en question doit être simple, rapide et peu coûteuse. (*Doran et Zeiss 2000*).

Les paramètres relatifs aux communautés de vers de terre rendent compte de la texture, du taux de matière organique, de la porosité, de l'acidité et de l'humidité d'un sol. La mesure du bio indicateur lombricien permet d'appréhender l'évolution de la qualité d'un sol, c'est-à-dire sa dégradation ou son amélioration (*Ivask et al. 2007*). De plus l'homme joue un rôle dominant sur la dynamique des lombrics d'une part par la gestion culturale et d'autre part par les déplacements de sols et de matière organique animale ou végétale (*Singh 2018*).

Selon ces critères, les vers de terre sont de bons bio indicateurs. Ils sont étroitement liés aux fonctions physiques et chimiques du sol, mais aussi en relation avec les microorganismes et les champignons du sol. La méthode d'échantillonnage est facilement réalisable et l'obtention des résultats est directe. Les vers de terre peuvent donc permettre d'évaluer l'impact des pratiques agricoles (travail du sol, amendements organiques ou minéraux, usage d'intrants, rotations, ...) sur le sol et sa santé (*Bartlett et al. 2010 ; Chabert 1999 ; Decaens et al. 1999 ; Fragoso 1997 ; Mayeux et Savane 1996 ; Pankhurst et al. 1997 ; Paoletti 1999 ; Pelosi 2008*).

3.2. La biologie et l'écologie lombricienne

3.2.1. Les groupes de vers de terre

La classification des vers de terre dépend de leurs traits de vie. Ainsi, les vers de terre peuvent être classés en sous-groupes. Chacun des groupes est déterminé à partir des caractéristiques écologiques des vers, de leurs capacités à creuser des galeries spécifiques, de leurs régimes alimentaires, mais aussi de leurs couleurs, de leurs tailles et de leurs formes (Paoletti 1999 ; Bouché 1977).

Selon Bouché 1977, Pelosi 2008, Reynolds 1977 et Singh 2018, il est possible de distinguer trois principaux groupes qui diffèrent par leurs fonctionnements :

- **Les épigés** sont présents en surface dans la litière, ils vivent dans des milieux riches et sont associés à un métabolisme et une reproduction intenses. Ils sont hautement pigmentés et de petites tailles. Ils forment des cocons pour passer les saisons sèches. Ils sont sensibles aux intrants chimiques, notamment les pesticides, et aux événements physiques de surface (météorologie et pratiques culturales). Ils ont une faible implication dans la modification des propriétés physiques telle que la macroporosité. Par contre, les épigés ont tendance à favoriser la dégradation de la matière organique et le stockage de l'eau en surface. Ce groupe réunit des espèces relativement rares en milieu cultivé.
- **Les anéciques** présentent un gradient de couleur de la bouche (sombre) à l'anus (claire). Ce type de vers forme des galeries verticales permanentes ou semi-permanentes. Souvent grands lorsqu'ils sont adultes, les anéciques se nourrissent en surface de litière. Les espèces de ce groupe sont réglées par une diapause, c'est-à-dire qu'ils rentrent en léthargie durant les saisons sèches lorsque le taux d'humidité du sol est faible et que la température est trop élevée ou trop faible. Ils sont phytophages pour la plupart et jouent un rôle important en mélangeant les nutriments des couches plus profondes et ceux de surface grâce à leurs turricules. De plus les anéciques sont impliqués dans l'amélioration des propriétés physiques d'un sol en lien avec la formation de grandes galeries verticales.
- **Les endogées** ne présentent pas de pigmentation. Ils sont géophages, c'est-à-dire qu'ils se nourrissent de sol présentant une grande fraction minérale plus ou moins enrichie en matière organique. Les espèces de ce groupe peuvent rentrer en quiescence non réglée pour passer les saisons sèches, lorsque le sol est sec et trop chaud ou trop froid. Les endogés forment des galeries sans direction préférentielle, ce qui influence et améliore la macroporosité et l'infiltration de l'eau.

- Tableau.2 : Les espèces de vers de terre au Québec. Earthworm species in Quebec.

(Adapté de Reynolds 2018)

Species	Group
<i>Dendrobaena Octaedra</i> (Reynolds 1977)	Epigeic
<i>Dendrodrilus Rubidus</i> (Reynolds 1977)	Epigeic
<i>Eisenia Foetida</i> (Reynolds 1977)	Epigeic
<i>Eisenia Hortensis</i> (Gates 1968)	Epigeic
<i>Lombricus Castaneus</i> (Reynolds 1977)	Epigeic
<i>Eiseniella Tetraeda</i> (Reynolds 1977)	Epigeic
<i>Lumbricus Festivus</i> (Reynolds 1977)	Epigeic
<i>Lombricus Rubellus</i> (Reynolds 1977)	Epigeic
<i>Allolobophora Chlorotica</i> (Reynolds 1977)	Endogeic
<i>Aporrectodea Rosea</i> (Reynolds 1977)	Endogeic
<i>Aporrectodea Trapezoides</i> (Reynolds 1977)	Endogeic
<i>Aporrectodea Tuberculata</i> (Reynolds 1977)	Endogeic
<i>Aporrectodea Turgida</i> (Reynolds 1977)	Endogeic
<i>Octolasion Cyaneum</i> (Reynolds 1977)	Endogeic
<i>Octolasion Tyrtaneum</i> (Reynolds 1977)	Endogeic
<i>Satchellius Mammalis</i> (Reynolds 1977)	Endogeic
<i>Aporrectodea Longa</i> (Reynolds 1977)	Anecic
<i>Lumbricus Terrestris</i> (Reynolds 1977)	Anecic

Ainsi, les espèces de ces trois différents groupes n'influent pas de la même manière sur les propriétés des sols (*Fragoso et al. 1997*).

3.2.2. Les espèces de vers de terre au Québec

Les zones cultivées de la province du Québec présentent une diversité d'espèces de vers de terre. *Reynolds 2018* distingue 18 espèces identiques aux espèces européennes au sein des terres arables québécoises (Tableau.2).

Il est important d'avoir un regard sur les communautés de vers de terre à l'échelle des groupes mais aussi des espèces. En effet, l'action des espèces sur le sol varie. De plus la dynamique temporelle des communautés des différentes espèces de vers de terre est liée aux conditions climatiques, à l'état du sol et aux pratiques culturales (*Abail et Whalen 2018*). D'une espèce à l'autre ou au sein d'une même espèce, il se peut qu'il y ait une compétition. Ainsi, on distingue la compétition qui peut être en lien avec la profondeur, la longueur et la taille des galeries de celle en lien avec la croissance et la reproduction chez différentes espèces de vers de terre (*Eriksen-Hamel et Whalen 2007 ; Jégou et al. 2001 ; Lowe et Butt 2002,1999*).

La distribution spatio-temporelle des différentes espèces de vers de terre dépend du type de sol et de la gestion à laquelle il est soumis. Les vers ne réagissent pas de la même manière aux variabilités spatio-temporelles relatives aux pratiques agricoles (*Fragoso et al. 1997*). *A. turgida* (*A. caliginosa*) et *A. rosea*, des espèces endogées sont très peu sensibles aux perturbations anthropiques, sont très communes dans les sols cultivés. Les épigés et anéciques sont quant à eux très sensibles aux perturbations anthropiques et sont donc moins présents au sein de sols exploités, même si *L.rubellus* une espèce épigé semble mieux résister aux perturbations. Le plus souvent les espèces *A. chlorotica* et *L. castaneus*, respectivement endogé et épigé, sont très peu présentes dans les zones cultivées (*Ivask et al. 2007*).

Plusieurs études ont permis de définir une abondance lombricienne moyenne comprise entre 50 et 400 individus par m². Cependant dans certains cas elle peut dépasser les 1000 individus par m². La biomasse fraîche moyenne est souvent comprise entre 30 et 100 g par m², mais peut dépasser les 300 g par m² (*Lavelle et Spain 2001 ; Lee 1985 ; Pelosi 2008 ; Smeaton et al. 2003*).

3.2.3. Le cycle de vie des vers de terre

Les cycles de vie dépendent de l'espèce mais aussi des conditions du milieu de vie. Les paramètres du sol déterminant au développement des vers de terre sont l'humidité et la température du sol. Ils influencent notamment les périodes d'activité des vers de terre. Les lombrics passent par différentes phases au cours de leur vie. Les juvéniles naissent à partir d'un cocon et vont évoluer vers un stade de sub-adulte, puis d'adulte capable de se reproduire. On distingue des variations sur les modes de reproduction d'un groupe, voire d'une espèce à l'autre ; elles peuvent être biparentales, monoparentale, ou via parthénogénèse. De plus le nombre de cocons formés par phase de reproduction est variable : d'un nombre faible pour les anéciques et les endogés à un grand nombre pour les épigés. Cependant pour les espèces de ce dernier groupe, la mortalité est plus importante et la durée de vie est plus faible (*Bouché 1977 ; Hartensein et Amico 1983 ; Pelosi 2008 ; Reynolds 1977 ; Satchell 1967 ; Sims et Gerard 1999*). Comme nous l'avons évoqué précédemment les vers de terre jouent un rôle important :

- Sur la chimie et notamment la matière organique des sols (*Cluzeau 2009 ; Pelosi 2008 ; Pérès et al. 1998 ; Singh 2018 ; Zhang et Schradel 1993*).
- Sur la physique et notamment sur la structure des sols (*Bouché 1977 ; Pelosi 2008 ; Reynolds 1977*).

3.3. La dynamique des communautés de vers de terre

3.3.1. L'effet des conditions climatiques sur la dynamique des populations de vers de terre

Le climat et les paramètres biogéographiques influencent les communautés lombriciennes, leur dynamique mais également la diversité spécifique (*Edwards et Bohlen 1996 ; Hackenberger 2014*). Les spécificités climatiques d'un lieu donné vont influencer l'humidité et la température du sol deux paramètres clés pour expliquer la dynamique des communautés de vers de terre. La menace du changement climatique entraîne donc une modification des habitats réduisant la résilience des espèces de vers les moins adaptées à la variabilité des conditions environnementales (*Eggleton et al. 2009*).

Grossi et Brun 1997 ont mis en avant la relation entre la pluviométrie et la dynamique des vers de terre à l'automne et au printemps. Ils ont montré un effet positif d'une pluviométrie marqué 30 jours après la précipitation. Cela est notamment dû aux propriétés hydriques des sols et leur capacité à infiltrer et retenir l'eau. On distingue ainsi des périodes climatiques de sécheresse défavorables au développement et notamment à la reproduction des vers de terre pour toutes les espèces. Cependant, d'une espèce à l'autre, le niveau de résistance à ces

périodes extrêmes n'est pas le même. De plus, les spécificités climatiques vont influencer le développement des végétaux et l'activité des autres acteurs biologiques du sol et ainsi la dynamique de la matière organique ce qui peut modifier la richesse spécifique d'un sol (Lavelle 1988).

3.3.2. *L'effet des propriétés des sols sur la dynamique des populations de vers de terre*

Les propriétés inhérentes d'un sol représentent des données essentielles prises en compte dans la définition de la santé d'un sol. Les propriétés physiques, chimiques et biologiques d'un sol peuvent avoir une influence sur les communautés de vers de terre.

La texture

Les vers de terre ont une préférence pour les sols à texture fine (loams, argiles). Les sols sableux et grossiers peuvent leur causer des dommages physiques (Lapied et al. 2009 ; Lee 1985 ; Paoletti 1999 ; Pelosi 2008 ; Reedler et al. 2006 ; Singh 2018). L'explication de cette préférence reste à faire, mais il semblerait que lorsque le taux d'humidité est maintenu constant, la texture importe peu (El-Duweini et Ghabbour 1965).

Le pH

Les vers de terre peuvent vivre dans des sols avec un pH compris entre 4 et 8, mais dans la majorité des cas ils préfèrent des milieux neutres avec un pH près de 7. Ils sont très sensibles à l'acidification, et cette acidification peut être causée par l'usage d'intrants chimiques (Paoletti 1999).

L'humidité

L'optimum d'humidité favorable au cycle de vie des vers est estimé à 80 %, mais ils peuvent vivre dans une fourchette d'humidité comprise entre 60 et 90 % (Lee 1985, Pelosi 2008, Singh 2018). Les saisons sèches s'accompagnent le plus souvent d'une activité très réduite, voire d'une quiescence pour les espèces anéciques (Bouché 1977).

La température du sol

Les grandes fonctions des vers de terre (croissance, respiration, reproduction) sont influencées par la température. L'optimal de température varie d'une espèce à l'autre mais en moyenne il se situe entre 10 et 20°C. À partir d'une température inférieure à 0°C ou supérieure à 28°C l'activité des lombrics décroît fortement et alors s'en suit une diminution des services fournis par les vers (Bouché 1977 ; Lee 1985 ; Pelosi 2008 ; Singh 2018).

La teneur en matière organique

Les sols riches en matière organique présentent généralement une population importante de vers de terre (Bouché 1977 ; Pelosi 2008 ; Van Vliet et al. 2007). La disponibilité de la matière organique dans le temps et l'espace conditionne fortement l'activité et notamment la multiplication des communautés de vers de terre peu importe l'espèce (Lavelle 1988). L'usage répété de pratiques intensives est à l'origine d'une baisse notable de la teneur en matière organique du sol. Dans ce cas, la teneur en matière organique devient un facteur limitant entraînant donc une diminution de l'abondance et de la diversité spécifique des lombrics (Edwards 1983).

La compaction / densité / porosité

La compaction des sols est souvent due à une intensification des pratiques agricoles et la généralisation de l'usage des engins mécaniques. Le tassement qui en résulte peut réduire l'abondance et la biomasse des lombrics (Jégou et al. 2002 ; Langmaack et al. 1999 ; Pelosi 2008). L'abondance des vers est plus importante dans des sols où la densité apparente et la compaction sont faibles. Mais la biomasse est, quant à elle, plus importante dans des zones compactées. Ceci est dû à une moins grande sensibilité des grandes espèces à la compaction (Cluzeau 1992 ; Capowiez et al. 2009). Cependant *a contrario*, Langmaack et al. 1999 note une plus grosse activité endogéique notamment pour la formation de galeries. En effet, ce groupe est plus adapté aux zones cultivées qui présentent des strates de compaction, les espèces endogées ont notamment su changer leur activité relative à la formation de galeries. Les anéciques qui creusent des galeries verticales passent par des zones présentant un degré de compaction variable, ils s'adaptent donc moins facilement.

3.3.3. L'effet des pratiques culturales sur la dynamique des populations de vers de terre

Les pratiques conventionnelles intensives ont tendance à augmenter la sensibilité des sols face aux variations climatiques (Ivask et al. 2007). Les pratiques culturales influencent les propriétés d'un sol et donc les populations de lombrics. Il est important de considérer que les pratiques peuvent avoir un effet direct à court terme sur les vers de terre et qu'*a contrario* la réponse à une pratique donnée peut se faire après plusieurs années. Il est donc difficile de faire des prédictions sur les communautés de vers de terre d'un sol à partir des pratiques culturales auxquelles il est soumis. Cependant il est possible de souligner le bénéfice de certaines pratiques pour les vers de terre (Lofs-Holmin 1983 ; Poaletti 1999). Les pratiques culturales modifient la composition des populations de vers de terre ce qui impacte les propriétés physique, chimique, biologique et donc le fonctionnement général du sol (Pelosi et al. 2009). Ivask et al. 2007 ont noté que plus les pratiques (travail du sol, usage d'intrants chimiques, monoculture) étaient intensives et fréquentes et plus les communautés de vers de

terre étaient faibles. Comme nous l'avons vu plus haut les zones cultivées sont des zones hautement perturbées. On retrouve donc au niveau des terres arables des espèces de lombrics adaptées aux perturbations. Ces espèces appartiennent le plus souvent au groupe des endogés (*Fragoso et al. 1997 ; Ivask et al. 2007*).

Les différents types de pratiques n'affectent pas de la même manière les vers de terre et leur diversité spécifique.

Le travail du sol

Le travail du sol est une pratique culturale qui affecte particulièrement les vers de terre. Cependant il impacte différemment les groupes et les espèces de vers de terre, il apparaît que les anéciques et les épigés soient les plus sensibles au travail conventionnel du sol, ainsi on les retrouve en plus grande abondance dans des sols cultivés associés à un travail réduit. En effet, un travail conventionnel aura d'une part une influence directe sur les vers, leurs habitats, leurs galeries et aura d'autre part tendance à enfouir les résidus et la matière organique plus en profondeur (*Pelosi 2008 ; Edwards et Bohlen 1996*).

Concernant l'effet temporel du travail du sol, *Crittenden et al. 2014* ont montré qu'à court terme un labour avait des effets négatifs sur l'abondance et la biomasse des vers de terre et de plus qu'il réduisait la diversité spécifique. L'usage à long terme d'un travail de sol marqué rend compte d'une légère hausse de l'abondance des vers au printemps, ceci est potentiellement dû à une plus grande accoutumance de certaines espèces endogées : *A. turdida*, *A. rosea*. Cette étude souligne également les effets négatifs d'un travail réduit sur ces espèces.

On note également que l'usage d'un travail de sol va globalement limiter la résilience du sol en favorisant l'assèchement des terres en surface. Le sol sera sensible à de plus grande variation de température et les vers à une plus grande prédation (*Capowiez et al. 2009 ; Crittenden et al. 2014*). Un travail de sol marqué et répétitif influence donc la stratification physique et chimique du sol tout en impactant l'activité bénéfique des vers de terre pour le sol.

Les amendements

La seule réduction du travail du sol n'a qu'un effet réduit sur les lombrics. Cependant, une fertilisation organique adéquate produit des bénéfices à long terme pour les vers de terre (*Schmidt et al 2003*). D'autre part, malgré le maintien d'un travail de sol, il est possible de conserver une densité lombricienne importante par l'intermédiaire d'une bonne gestion des amendements organiques (*Curry et Byrne 1997*).

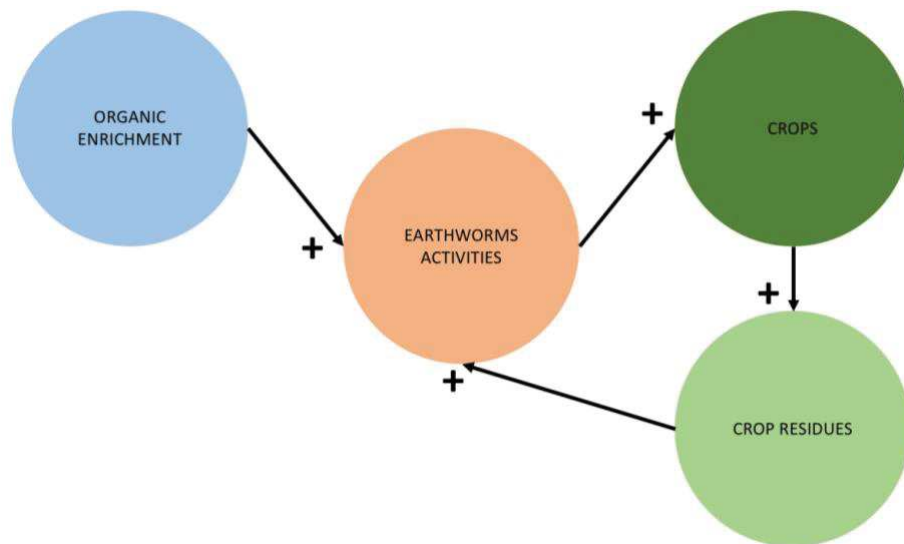


Figure.2 : L'intérêt double des amendements organiques pour les vers de terre.

Double benefits of organic amendements to earthworms.

(Adapté de Murchie et al. 2015)

Les amendements ont globalement un impact positif à long terme sur les communautés de lombrics en permettant une augmentation directe de la matière organique. Ils sont également favorables aux cultures qui produisent une plus grande biomasse des résidus et donc une augmentation de la nourriture valorisable par les différents groupes et espèces de vers de terre (Figure.2) (Murchie *et al.* 2015). Les vers de terre sont impactés par la quantité, la qualité et la répartition des différentes sources de nutriments. Ces sources peuvent être liées à l'homme comme c'est souvent le cas en agriculture. La qualité et la quantité ont une influence sur la dynamique et la croissance des communautés de vers de terre (Edwards et Lofty 1977 ; Lee 1985 ; Lofs-Holmin 1983 ; Pelosi 2008 ; Pérès *et al.* 1998 ; Singh 2018). L'effet positif notable des amendements peut s'expliquer par une augmentation de la diversité spécifique des vers de terre (Pérès *et al.* 1998).

Les types d'apports de matière organique n'ont pas le même intérêt pour les vers de terre. La matière organique avec un faible ratio C/N est facilement dégradable et donc attractive pour les lombrics. *A contrario*, la matière organique avec un ratio C/N important, c'est-à-dire un taux de lignine élevé, n'est pas une source nutritive intéressante pour les vers de terre. Cependant, la dégradation de ce type de matériaux est possible grâce à une étroite collaboration avec les champignons et microorganismes du sol (Bouché 1977 ; Curry et Byrne 1997 ; Roarty *et al.* 2017 ; Singh 2018). L'utilisation de lisier ou de fumier peut être à l'origine d'une modification violente de l'humidité du sol et donc impacter de manière négative les vers de terre (Paoletti 1999).

Les apports et les résidus de culture ont une influence sur la dynamique des groupes et des espèces. On observe notamment des particularités nutritives associées aux groupes de vers de terre. En effet, les anéciques et les épigés préfèrent de la matière organique fraîche et riche contrairement aux espèces endogés qualifiés de géophage (Curry et Byrne 1997 ; Murchie *et al.* 2015). Pelosi *et al.* 2009 ont mis en avant une dominance des espèces anéciques et épigés dans des systèmes associés à un paillis de légumineuses alors que les systèmes plus conventionnels présentent une dominance des espèces endogés *A. turgida* et *A. chlorotica*.

Tableau.3 : Le rapport C/N de différents résidus de cultures.

C/N ratio of different crop residues.

(Adapté de *Abail et Whalen 2018*)

Type of residues	Ratio C/N
Maize	21
Soybean	50
Cereal Straw	>50
Legumes Cover	<20
Grasses Cover	>30

La fertilisation minérale agit directement sur l'accroissement de la biomasse des cultures et des résidus associés, une source d'une matière organique valorisable par les lombrics. Cependant elle agit indirectement sur l'acidification des sols ce qui est peu favorable aux vers de terre (*Lofs-Holmin 1983 ; Murchie et al. 2015 ; Potter et al. 1985 ; Schmidt et al. 2003 ; Singh 2018*).

Les types de cultures et rotations

Les types de cultures n'ont pas les mêmes effets sur les lombrics. En effet, on constate que les communautés lombriciennes sont généralement plus impactées par des cultures avec un grand développement racinaire (patates, betteraves, ...) qu'avec des cultures de céréales qui laissent des résidus utilisables par certaines communautés de lombrics (*Curry et al. 2002*). On note également que la mise en place de cultures intercalaires et de bandes d'enherbement entraînent une augmentation des populations de vers de terre (*Cluzeau et al. 2005 ; Pelosi 2008*).

Les rotations de culture sont à la base d'une plus grande diversité nutritionnelle pour les vers générant *in fine* une plus grande diversité de résidus. Les couverts végétaux et leurs résidus sont une très bonne source de nutriment pour les vers. Cette variété de résidus est donc favorable à une diversité spécifique même si les vers ont plus d'intérêts pour des sources nutritionnelles avec un faible ratio C/N (<30), des nutriments plus facilement mobilisables et dégradables (*Ashworth et al. 2017 ; Edwards et Bohlen 1996 ; Roarty et al. 2017*). La valeur du C/N pour les cultures de couverture dépend du type de couvert impliqué. En effet les couverts de légumineuses ont un C/N plus faible (<20) que les couverts de graminées (> 30). En grandes cultures, le maïs-grain et ses résidus de feuilles ont plus de bénéfices que les résidus de soja ; d'une part ils sont plus importants et d'autre part ils présentent un faible C/N (~20) comparé au soja (~50). Les pailles de céréales ont souvent des valeurs C/N élevées (>50). Les résidus issus de couverts de légumineuses seront donc facilement utilisables à court terme par les vers de terre et les autres organismes du sol. Les résidus de cultures avec une valeur importante de C/N seront mobilisables à plus long terme par les lombrics (Tableau.3) (*Abail et Whalen 2018 ; Bouché 1977 ; Curry et Byrne 1997 ; Roarty et al. 2017 ; Singh 2018*). *Schmidt et al 2003* ont également mis en avant que l'usage couplé d'une fertilisation organique et de cultures de couverture n'a pas un effet marquant à court terme. En effet l'usage de couvert génère beaucoup de nourriture pour les vers de terre d'où l'effet minime des amendements même organiques.

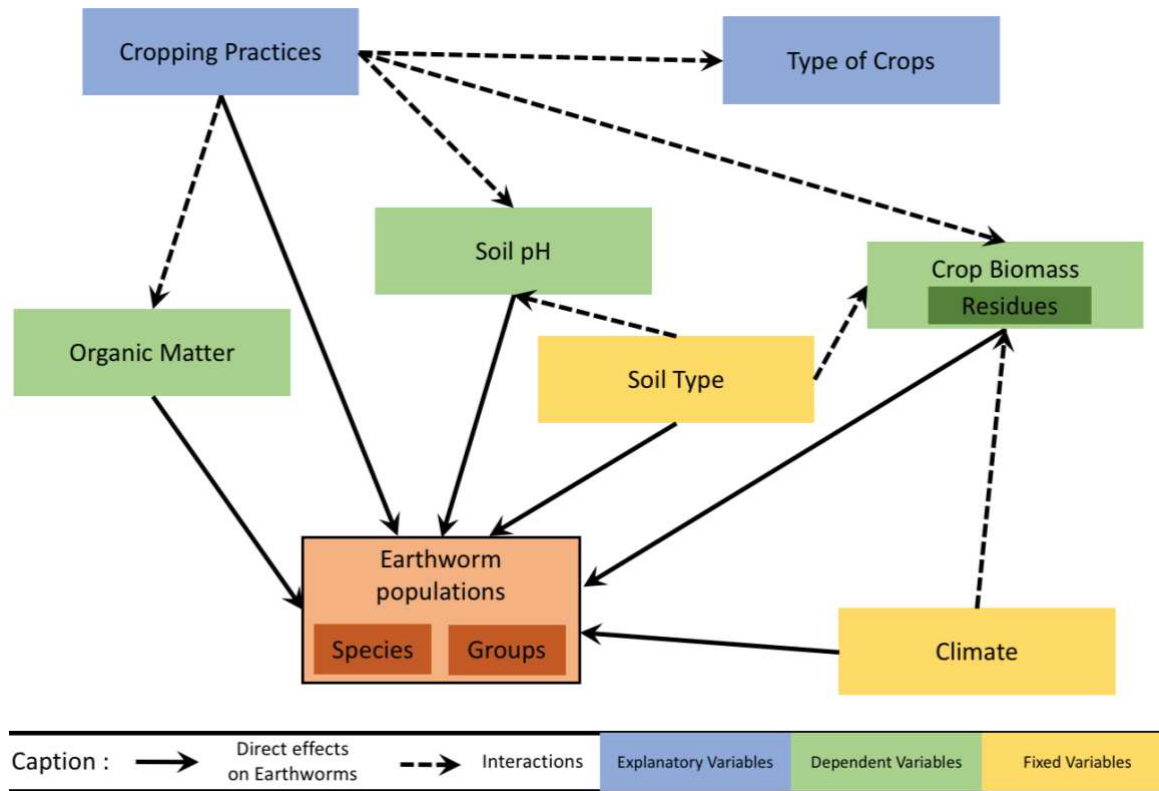


Figure.3 : L'influence de différentes variables sur les vers de terre au sein d'un sol cultivé.

Impact of different variables on earthworms in arable soil.

(Adapté de Lofs-Holmin 1983)

L'agriculture Biologique

L'agriculture biologique et ses effets sur les communautés de vers de terre fait débat. En effet la principale différence entre les pratiques conventionnelles et biologiques résulte dans l'usage d'intrants chimiques et notamment de pesticides qui peuvent impacter négativement les vers. L'influence des intrants chimiques dépend de l'intrant en question et de sa période et sa fréquence d'application, mais aussi du contexte pédoclimatique et de l'espèce de ver de terre. Les épigés, présents en surface, semblent donc principalement menacés par l'usage de produits phytosanitaires. De plus en régie biologique les systèmes sont le plus souvent basés sur un usage d'amendements organiques bénéfiques (*Edwards et Bohlen 1996 ; Pelosi 2008*). L'effet peu marqué des bénéfices des pratiques biologiques peut donc s'expliquer par la conservation d'un travail conventionnel du sol, une pratique qui perturbe la dynamique des vers de terre (*Pelosi et al. 2009 ; Singh 2018*).

Pour résumer (Figure.3), il existe des pratiques à effet positif sur les communautés de lombrics mais le plus souvent elles ne compensent pas les mauvaises pratiques (on peut aisément détruire un sol mais difficilement le reconstruire). Les apports de matières organiques ont une influence positive sur la production de biomasse et donc de résidus mobilisés par les vers de terre. Les apports de matières organiques peuvent en plus stimuler l'activité des lombrics et limiter l'acidification des sols. L'usage d'apports de matières organiques et de culture de couverture, combiné à un travail de sol réduit, est fortement bénéfique pour les vers de terre. Les résidus présentent également des effets indirects positifs quant à la protection face à la prédation, à la lumière et aux variations de température.

4. Les objectifs et les hypothèses de cette étude

4.1. Les objectifs du projet GRAPPE BIO

Le projet GRAPPE BIO met à l'étude des systèmes BIO intensifs en grandes cultures et vise à évaluer la santé des sols par l'intermédiaire de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques.

En relation avec les objectifs globaux relatifs à la santé des sols, c'est-à-dire la préservation ou l'amélioration de la qualité générale des sols, il est important de se demander si :

- Les systèmes BIO intensifs alliant des rotations courtes incluant du maïs, du soja et un travail du sol plus ou moins marqué peuvent simplement s'appuyer sur de bonnes pratiques de fertilisation et de couverture du sol pour répondre aux objectifs relatifs à la santé des sols ?

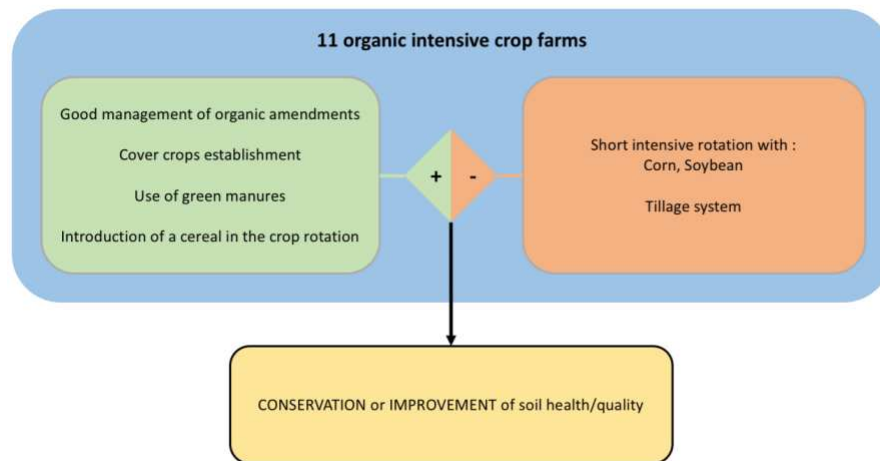


Figure.4 : Objectifs généraux du projet GRAPPE BIO.
General objectives of the GRAPPE BIO project.

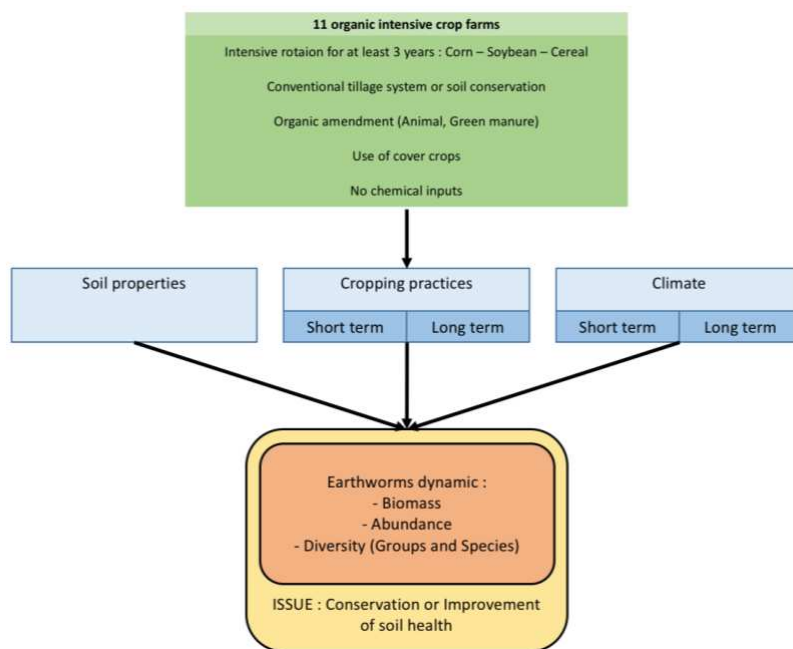


Figure.5 : Les objectifs globaux du stage : L’effet du climat, de la gestion des cultures et des propriétés du sol sur les communautés de vers de terre.

Internchip global objectives : Effect of the climate, farming practices and soil properties on earthworm populations.

- Ces pratiques biologiques intensives sont-elles capables de fournir une production agricole tout en préservant ou améliorant la santé des sols ?
- Quelle pratique culturale est la plus limitante vis-à-vis de la santé des sols ? (Figure.4)

4.2. Les objectifs du stage

L'objectif principal de mon stage était d'étudier la santé des sols par l'intermédiaire du bio indicateur lombricien, c'est-à-dire d'étudier les effets des pratiques culturales, du climat et des paramètres du sol sur les communautés de lombrics (abondance, biomasse, groupes, espèces et leurs diversités) (Figure.5).

Le projet permettra de répondre aux questions de recherche suivantes :

- Quels effets ces pratiques ont sur les populations de lombrics et comment les mesurer au travers des bio indicateurs de la santé des sols ?
- Peut-on estimer l'état de santé d'un sol cultivé en fonction de la dynamique de sa population de vers de terre (groupes, espèces) ?
- Peut-on conclure sur les pratiques à mettre en œuvre et favoriser l'aide à la décision ?

Ainsi l'idée générale sera d'analyser :

L'effet des pratiques culturales à court et long terme :

- Le travail du sol (type de travail, intensité, fréquence)
- Les amendements (type d'amendement, dose, valeur fertilisante)
- Les cultures de couvertures

L'effet du climat à court et long terme :

- Précipitations
- Température

L'effet des propriétés du sol :

- Chimiques
- Physiques

4.3. Les hypothèses du stage

Les hypothèses qui seront testées dans le cadre de ce projet sont les suivantes :

H1 : Les zones étudiées étant intensivement cultivées, elles présentent donc une faible diversité spécifique de vers de terre, avec une majorité de vers endogés.

H2 : Le climat, variable d'une exploitation à une autre, a un grand impact sur l'état d'humidité et de température du sol sur le court terme. Un éloignement trop important des optimums de température et d'humidité peut fortement réduire le développement et la diversité des vers de terre.

H3 : Les sols neutres aux textures fines avantagent le développement des vers de terre peu importe le groupe considéré.

H4 : Les apports réguliers mais diversifiés de matière organique favorisent le renouvellement et le développement de l'ensemble des espèces de vers de terre sur le court et le long terme.

H5 : Les rotations longues et diversifiées, incluant des céréales, des prairies ou fourrages, des engrais verts et des cultures de couvertures sont bénéfiques à court et long terme grâce aux apports d'une diversité de résidus.

H6 : Les différents types d'amendements n'ont pas la même influence sur les groupes de vers de terre. En effet les épigés préfèrent des sources riches en matière organique, tandis que les endogés ont des prédispositions à la géophagie.

H7 : Un travail du sol marqué est un facteur limitant qui nuit à la dynamique des vers de terre et la santé des sols. De telles pratiques auraient un effet direct sur le court terme, mais un usage fréquent du travail du sol sur le long terme ne permettrait pas aux vers des différents groupes de retrouver une bonne abondance. Les groupes anéciques et épigés sont les plus affectés par de telles pratiques. Des rotations même courtes incluant une céréale et/ou un engrais vert en plus des cultures intensives de maïs et de soja permettent de limiter un travail intense et fréquent du sol et donc favoriser une croissance des populations de vers de terre.

Tableau.4 : Caractéristiques des fermes et des champs sélectionnés.

Characteristics of selected farms and fields.

Farms ID	Fields ID	Region	Organic Certification in	Soil Classes	Climat	Crops 2017	Crops 2018	Crops 2019	Tillage characteristic	Enrichment characteristic	Cover Crops characteristic
A	1	Monteregie-Est	2010	G1	Temperate	S	Ca	M	Light Tillage <10cm, at most a plowing every 3 years	Hen manure twice/ 3 years	Cover crops without destruction 2 times / 3 years
A	2	Monteregie-Est	2010	G1	Temperate	Ca	M	S			
A	3	Monteregie-Est	2010	G1	Temperate	S	S	Cp			
B	1	Lanaudiere	2006	G1	Temperate	S	Ca	M	Frequent Light Tillage <10cm, at most a plowing every year	Hen manure at least twice / 3 years	Cover crops with destruction 2 times / 3 years and a fall crop
B	2	Lanaudiere	2006	G1	Temperate	Ca	M	S			
B	3	Lanaudiere	2006	G1	Temperate	M	Pv	Ca			
C	1	Monteregie-Ouest	2009	G2	Temperate	S	S	M	Frequent Light Tillage <10cm, a plowing every year	Turkey manure at least twice / 3 years	Cover crops with destruction 2 times / 3 years
C	2	Monteregie-Ouest	2009	G2	Temperate	Pv	M	S			
C	3	Monteregie-Ouest	2009	G2	Temperate	M	S	Pv			
D	1	Monteregie-Est	1996	G2	Temperate	S	Cp	M		Swine slurry twice/ 3 years	
D	2	Monteregie-Est	1996	G2	Temperate	Cp	M	S			
D	3	Monteregie-Est	1996	G2	Temperate	M	S	S			
E	1	Centre-du-Quebec	1999	G1	Temperate	S	Ca	M	Light Tillage <10cm or heavy chisel every years, at most a plowing every 3 years		Cover crops with destruction 1 time / 3 years and a fall crop
E	2	Centre-du-Quebec	1999	G1	Temperate	Gm	M	S			
E	3	Centre-du-Quebec	1999	G1	Temperate	M	S	Ca			
F	1	Centre-du-Quebec	1984	G3	Temperate/Boreal	Hs	Ca	M	Reduced tillage, at most a heavy tillage every years, no plow	Hen manure + Swine manure twice/ 3 years	Cover crops without destruction 2 times / 3 years and a fall crop
F	2	Centre-du-Quebec	1984	G1	Temperate/Boreal	Ca	M	S			
F	3	Centre-du-Quebec	1984	G3	Temperate/Boreal	M	S	Ca			
G	1	Monteregie-Ouest	2014	G1	Temperate	S	Cp	M	Light Tillage <10cm, at most a plowing every year		Cover crops with destruction 1 time / 3 years
G	2	Monteregie-Ouest	2014	G1	Temperate	S	M	S			
G	3	Monteregie-Ouest	2014	G1	Temperate	Cp	S	Cp			
H	1	Mauricie	2006	G2	Temperate/Boreal	S	Cp	M	Frequent Light Tillage <10cm, at most a plowing every year	Swine slurry and manure + Turkey manure twice / 3 years	Cover crops without destruction 1 time / 3 years and a fall crop
H	2	Mauricie	2006	G1	Temperate/Boreal	Ca	M	S			
H	3	Mauricie	2006	G2	Temperate/Boreal	M	S	Ca			
I	1	Monteregie-Ouest	1998	G1	Temperate	Cp	Tr	M	Frequent Light Tillage <15cm, no plow	Hen manure once / 3 years	Cover crops with destruction 2 time / 3 years
I	2	Monteregie-Ouest	1998	G1	Temperate	Cp	M	S			
I	3	Monteregie-Ouest	1998	G3	Temperate	M	S	Cp			
J	1	Monteregie-Ouest	2010	G1	Temperate	S	Cp	M	Frequent Light Tillage <10cm, at most a plowing every year		Cover crops with destruction 2 time / 3 years
J	2	Monteregie-Ouest	2010	G1	Temperate	Cp	M	S			
J	3	Monteregie-Ouest	2010	G1	Temperate	M	S	Cp			
K	1	Monteregie-Est	2000	G1	Temperate	S	Pv	M	Reduced tillage <10cm, no plow	Swine slurry once / 3 years	Cover crops with destruction 1 time / 3 years
K	2	Monteregie-Est	2000	G1	Temperate	Pv	M	S			
K	3	Monteregie-Est	2000	G1	Temperate	M	S	Pv			

II. Matériels et Méthodes

1. La présentation des fermes adhérentes au projet

1.1. L'étude de 11 fermes biologiques intensives en grandes cultures

Le projet GRAPPE BIO est un projet en recherche participative qui a débuté en 2019, ainsi à l'hiver un appel à la candidature a été lancé pour les exploitations en grandes cultures du Québec. Suite à cela 11 fermes ont été retenues (Les fermes sont prénommées de la ferme A à la ferme K), ces fermes ont une particularité commune : elles sont toutes en régie biologique et pour la majorité depuis plus de 10 ans, seule les fermes A et J sont en régie biologique depuis 9 ans et la ferme G depuis 5 ans. De plus ces exploitations présentent des pratiques en adéquation avec les objectifs et les hypothèses du projet ; c'est-à-dire le plus souvent des rotations intensives courtes incluant du maïs, du soja et une céréale de printemps ou d'automne, les fermes utilisant des prairies dans leur rotation n'ont pas été sélectionnées l'intensité des cultures étant au cœur des enjeux du projet. Cependant toutes les exploitations du projet ne respectent pas strictement cette rotation ; en effet il se peut que dans certains cas la céréale soit remplacé par une culture de pois vert (un type de culture qui nécessite peut de travail de sol et qui donc à ce sens assez comparable à une céréale sur ce point), de plus certaines fermes peuvent enchaîner deux années de maïs ou de soja et il est également important de noter que la ferme A produisait du lait dans un passé récent il est ainsi possible de retrouver des prairies dans ses rotations sur les 3 dernières années.

La spécificité de chaque ferme va également dépendre du type et de l'intensité du travail de sol en place, des espèces et de la fréquence d'utilisation des couverts végétaux et engrais verts, et pour finir du type et de la fréquence d'utilisation des fertilisants organiques animaux. L'ensemble de ces informations a été étudié pour l'ensemble des champs de chaque exploitation grâce au Plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF) qui regroupe des données relatives aux pratiques culturales, mais aussi aux propriétés des sols de tous les champs de l'exploitation. Cela nous a permis d'identifier des parcelles d'études correspondant au cadre défini ci-dessus, c'est-à-dire un champ de maïs, de soja et de céréale pour chaque ferme. Ainsi, pour l'année 2019 dans la majorité des cas (sauf dans les cas où la rotation intègre deux années consécutives de soja ou de maïs) le champ identifié 1 correspond au maïs, le 2 au soja et le 3 à la céréale ou au pois vert (Tableau.4).



Figure.6 : Carte pédologique du Québec présentant la répartition des 11 fermes participantes au projet de recherche.

Québec soil map with the distribution of the 11 farms contributing to the research project.

(Adapté de IRDA 1977)

Les 11 fermes participantes sont situées dans différentes régions du Québec (Montréal, Centre du Québec, Lanaudière et Mauricie) le long du Saint-Laurent entre Québec et Montréal (Figure.6).

1.2. Le contexte pédoclimatique

La province du Québec se divise en plusieurs régions présentant des types de climats différents. Cependant les fermes ayant adhéré au projet d'étude de la santé des sols se situent dans une zone au sud de la province présentant un climat continental humide avec des étés tempérés. Ce type de climat se caractérise par des hivers froids et des étés chauds et humides, de plus les précipitations se font régulièrement toute l'année avec une moyenne comprise entre 700 et 1000 mm (*Villeneuve 1959*).

Une analyse simple, par ACP, des données climatiques de température et de pluviométrie (issus de *Environnement et lutte contre le changement climatique Québec*) sur l'année 2018-2019 et sur les 15 dernières années a permis de mettre en avant la spécificité des fermes F et H qui sont intégrées à une zone climatique dite « Tempérée / Boréale modérément froid », ces fermes présentent des températures moyennes annuelles plus fraîches que l'ensemble des autres exploitations qui elles sont situées dans une zone climatique « Tempérée » (Tableau.4).

L'ensemble des 11 exploitations étudiées se situent dans une zone où les sols appartiennent à la classe climatique des sols tempérés. Cette classe climatique se caractérise par une température moyenne annuelle comprise entre 8 et 15°C à 50 cm de profondeur et une période estivale chaude (les mois de juin, juillet et août) durant laquelle les températures varient entre 15 et 22°C à 50 cm de profondeur.

Si l'on s'intéresse à la répartition des exploitations du projet sur les différents grands groupes de sols on remarque que l'ensemble des fermes se situent sur du Gleysol humique mis à part la ferme A et C respectivement sur du Podzol humo-ferrique et du Brunisol mélanique (Figure.6). Plus précisément, les sols des fermes étudiées sont pour la plupart des sols argileux (G1), cependant les fermes C et D sont principalement sur des sols limoneux (G2), les fermes F et I présentent des sols argileux et sableux (G3) et la ferme H des sols argileux et limoneux (Tableau.4) (*Clayton et Marshall 1972*).

2. Le dispositif expérimental

Pour chacune des 11 exploitations du projet, 3 champs en régimes biologique, et suivant une rotation intensive courte ont été identifiés. Chaque champ correspond à un type de culture de cette rotation intensive, c'est-à-dire : une culture de maïs, de soja et de céréale (ou

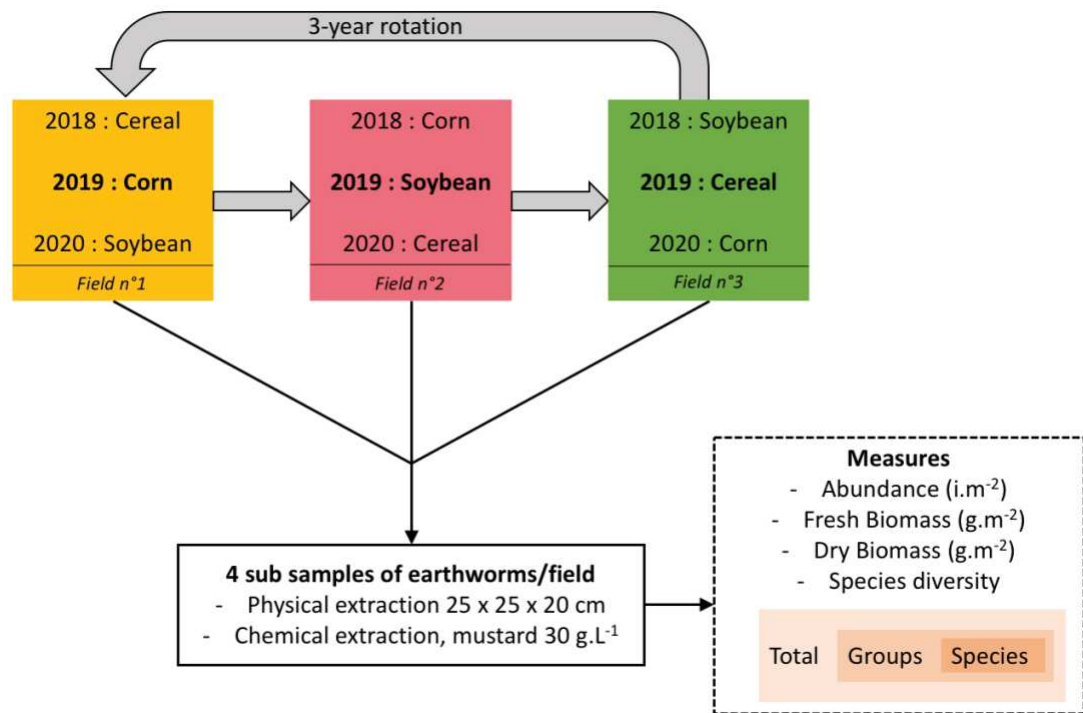


Figure.7 : Dispositif expérimental et de la méthode d'échantillonnage des vers de terre.
Experimental design and sampling methodology for earthworms.

pois vert). Au sein de chaque parcelle ont été définies 4 sous-unités expérimentales représentatives (Figure.7).

L'échantillonnage s'effectue durant des périodes pendant lesquelles le contexte pédoclimatique est favorable à l'activité des vers de terre (*Eggleton et al 2009 ; Fletcher et al 2005 ; ISO23611 2018*). Dans le cadre de cette étude, le prélèvement des vers de terre a eu lieu au printemps (du 27 mai au 4 juin 2019), une période présentant un taux d'humidité et des températures de sol optimum pour les lombrics.

3. L'échantillonnage des vers de terre

3.1. Un échantillonnage par extraction physique et chimique in situ

Pour chaque sous-unité expérimentale (4 quadrats par champ), un tri manuel a été effectué suite à l'extraction d'un bloc de sol de 25 cm x 25 cm et sur 20 cm de profondeur. Cette profondeur permet d'englober une zone où l'activité lombricienne est bonne (*Barlett et al. 2010 ; Zicsi 1962*).

Cette méthode a été couplée à une méthode d'extraction chimique à la moutarde (solution acqueuse à 30g.L⁻¹ à base « d'amora fine et forte »). La combinaison des deux méthodes présente généralement des avantages (*Andriuzzi et al. 2017 ; Bartlett et al. 2010 ; Bohlen et al. 1995*), mais dans ce projet, la moutarde n'a pas permis d'extraire davantage de vers de terre que la méthode d'extraction physique. Cela est peut-être lié à la texture argileuse des sols échantillonnés qui limitait l'infiltration verticale de la solution moutardée. L'ensemble des lombrics prélevés ont été conservés dans une solution de formol à 3,5 % jusqu'à leur identification (Annexe.2).

3.2. Une identification et mesures de biomasses en laboratoire

En laboratoire, les échantillons de vers de terre prélevés ont donné lieu à leur identification par groupes et puis par espèces grâce à une grille établie à partir des travaux de *Reynolds (1977)* sur les vers de terre d'Amérique du Nord. Les vers juvéniles non identifiables ont été isolés dans un groupe dédié (Annexe.3).

Une fois identifiés, la biomasse fraîche de chacune des espèces de vers de terre a été mesurée. Une biomasse sèche a également été établie suite à une mise à l'étuve à 60°C pendant une période de 24 à 48 h. Elle permet de s'affranchir de la variabilité de la masse des vers de terre en fonction du taux d'humidité (Annexe.2).

Ainsi, pour l'ensemble des espèces identifiées, il nous est possible de mesurer l'abondance (individus/m²), la biomasse fraîche (g.m⁻²), et la biomasse sèche (g/m²) après un passage à l'étuve à 60°C (Figure.7).

3.3. Une mesure de la densité apparente, de l'humidité et de la température du sol.

La densité apparente et l'humidité du sol sont mesurées à deux profondeurs 0-5 cm et 10-15 cm au niveau de chaque sous-unités (4 quadrats par champ). Ces mesures ont été effectuées par l'extraction du sol grâce à un cylindre de volume (ml), ce volume de sol humide et sec (après un passage à l'étuve à 150°C pendant 48h) est pesé ce qui a permis de déduire les valeurs de densité apparente et d'humidité. Pour la densité apparente une correction est apportée par la mesure de la masse volumique des roches supérieures 2mm de chaque échantillon.

De plus au niveau de chaque quadrat la température à 10 cm et 20 cm de profondeur est relevée.

4. La construction du jeu de données et la méthode statistique

La construction du jeu de données s'est fait grâce aux échanges avec les agriculteurs sur les pratiques culturales et les spécificités des fermes impliquées dans le projet, mais aussi, par la collecte des données climatiques (*Environnement et lutte contre le changement climatique Québec 2018-2019*) et pour finir par les relevés terrain de vers de terre, de densités apparentes du sol, d'humidités du sol et de températures de sol au sein des 3 champs sélectionnés pour chaque exploitation. Ainsi nous disposons d'un jeu de données constitué de 33 individus (11 fermes x 3 champs) pour lesquels nous disposons de :

- Variables explicatives associées au contexte pédoclimatique et aux pratiques culturales conduites au sein de chaque ferme entre 2017 et 2019.
- Variables réponses issues des relevés sur le terrain, on distingue notamment les données relatives aux vers de terre (Abondance et biomasse à l'échelle des groupes et des espèces).

Certaines variables explicatives ont été obtenues par la création de groupes de valeurs, c'est notamment le cas pour :

- Le travail du sol, une variable qui prend en compte le type, la fréquence et la profondeur du travail.
- Les cultures de couvertures, une variable qui prend en compte le mode de semis et les modalités de destruction des couverts végétaux.

L'ensemble des variables du jeu de données sont expliquées dans le document (Annexe.4).

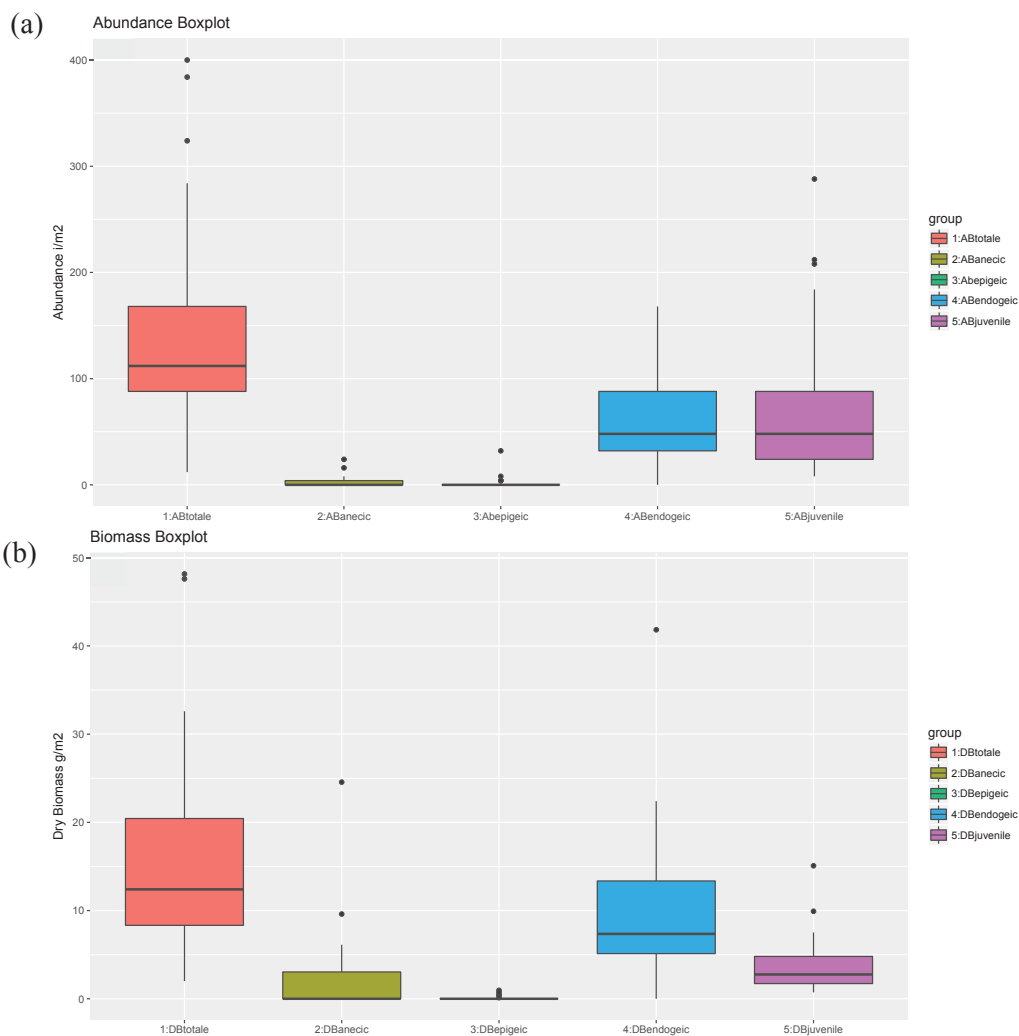


Figure.8 : Boite à moustache [a : Abondance des vers de terre (i.m-2), b : Biomasse sèche des vers de terre (g.m-2)]. Boxplot [a : Earthworm abundance (i.m-2), b : Earthworm dry biomass (g.m-2)].

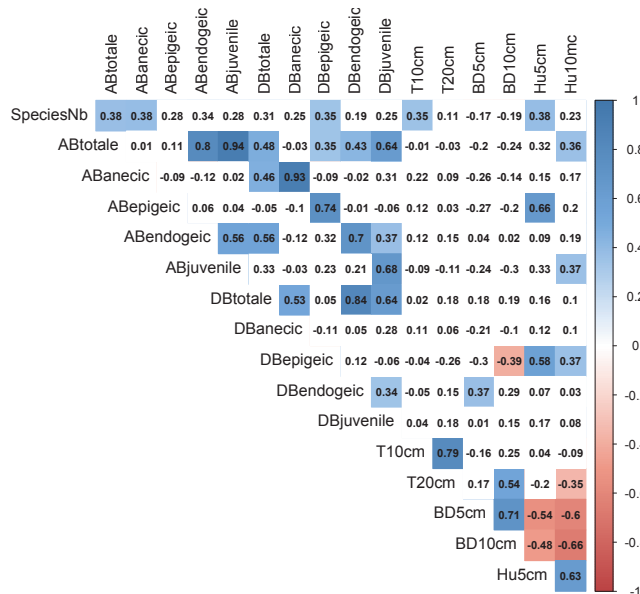


Figure.9 : Matrice de corrélation des données mesurées (AB : Abondance des vers de terre, DB : Biomasse sèche des vers de terre, T : Température du sol, BD : Densité apparente du sol, Hu : Teneur en eau du sol), les coefficients de corrélation colorés ont passé le test de significativité à 95%. Correlation matrix of measured data (AB : Earthworm bundance, DB : Earthworm dry biomass, T : Soil temperature, BD : Soil bulk density, Hu : Soil water content), colored correlation coefficients are significant at 95%.

De plus quelques données relatives aux propriétés chimiques des sols n'étaient pas disponibles dans les documents de certaines fermes pour certains champs ; ainsi préalablement à l'étude statistique des imputations par la moyenne et des imputations multiples ont été réalisées pour compléter le jeu de données.

L'étude statistique se découpe en deux parties.

Dans un premier temps, une étude de l'impact de certaines pratiques culturales et particularités pédoclimatiques sur la dynamique des populations lombriciennes. Pour cela sont réalisés des tests non paramétriques de Wilcoxon (Mann-Whitney), permettant une comparaison de moyenne sur des échantillons indépendants.

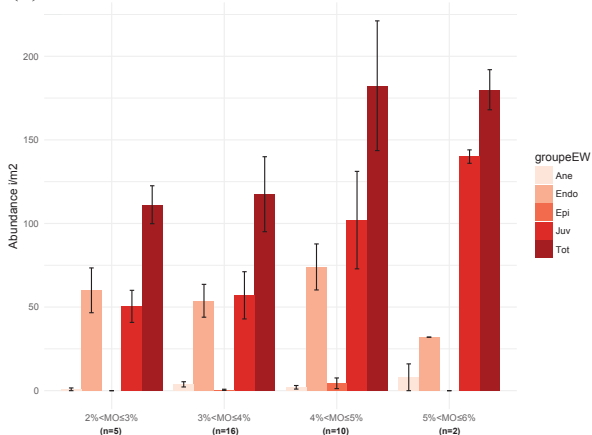
Dans un second temps, des modèles mixtes multivariés avec un effet aléatoire des fermes sont construits autour des variables réponses liées aux vers de terre. Pour cela, on réduit le nombre de variables explicatives quantitatives en regroupant celles qui sont proches au regard d'une ACP. Les variables explicatives qualitatives sont elles aussi regroupées selon le même principe mais après la réalisation d'une ACM. Suite à cela plusieurs modèles linéaires mixtes sont construits et interprétés.

III. Résultats et Discussion

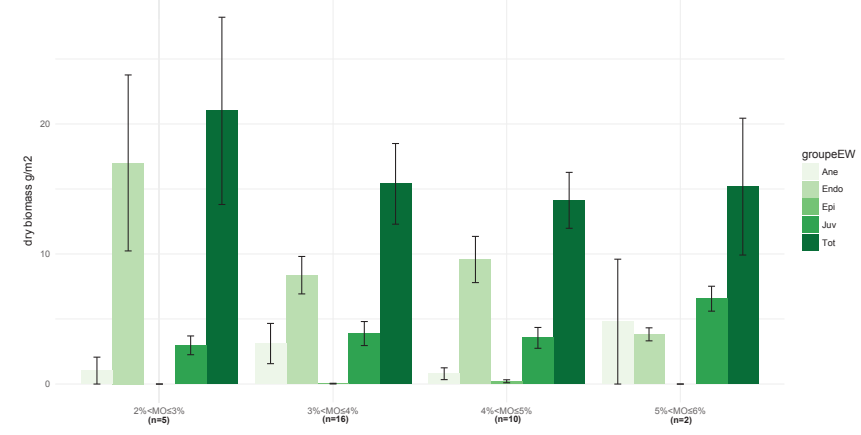
1. Une présentation générale des données relatives aux vers de terre

L'étude globale des données prélevées au champ (Figure.8) nous permet de remarquer que l'abondance totale de vers de terre par mètre carré est comprise entre un minima de quelques dizaines d'individus et un maxima pouvant atteindre les 400 individus. La biomasse sèche varie entre quelques g.m^{-2} et 50 g.m^{-2} . Ces données sont cohérentes et caractéristiques des zones cultivées au sein desquelles la pression anthropique est importante (*Lavelle et Spain 2001 ; Lee 1985 ; Pelosi 2008 ; Smeaton et al. 2003*). De plus, les vers retrouvés en majorité appartiennent au groupe des endogées, des vers plus adaptés aux pressions des zones cultivées, *a contrario* très peu de vers épigés et anéciques ont été retrouvés ce qui nous permet de souligner l'effet intensif des pratiques sur ces groupes (*Fragoso et al. 1997, Ivask et al. 2007*). La matrice de corrélation (Figure.9) rend compte de la relation entre l'abondance et la biomasse lombricienne. De plus, elle permet de rendre compte du lien entre l'abondance totale et l'abondance des vers juvéniles et endogés, ces vers ont été majoritairement retrouvés lors de l'échantillonnage. Concernant la biomasse sèche, on se rend compte d'un lien entre la biomasse totale et la biomasse des vers juvéniles, endogés et anéciques. Les anéciques bien que peu nombreux, sont de gros vers qui ont donc une contribution importante pour la biomasse totale. La relation positive entre l'humidité en surface et la biomasse des vers épigés s'explique par un meilleur développement de ce type

(a) Organic Matter and EW Abundance



(b) Organic Matter and EW Biomass



(c) MO and EW diversity

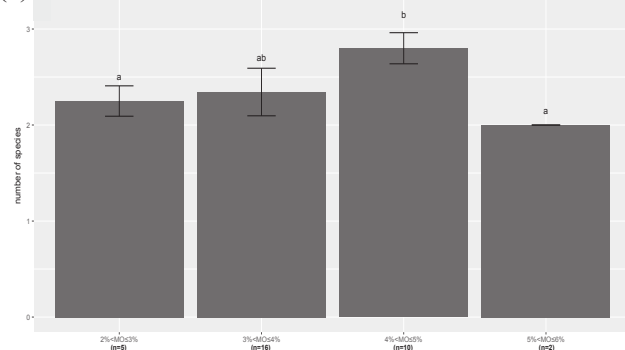
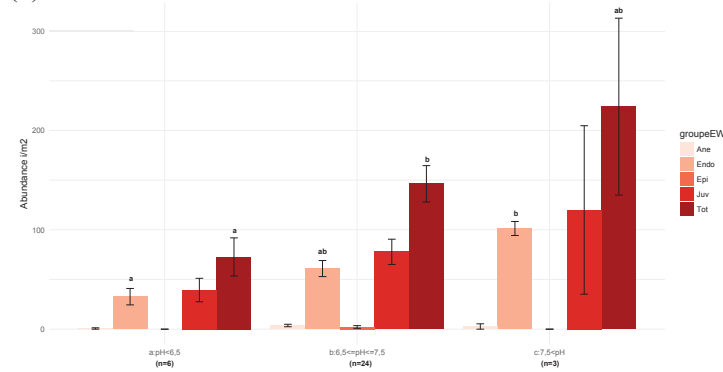


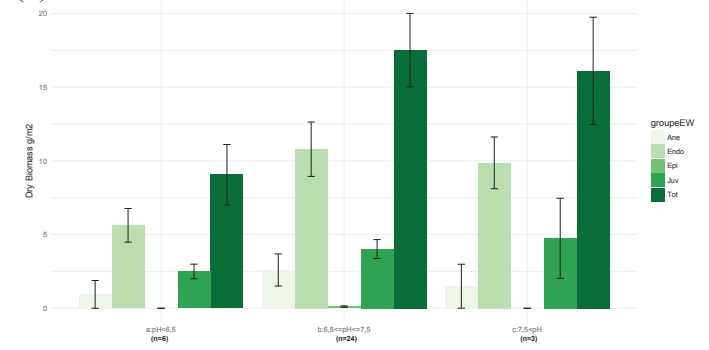
Figure.10 : Influence du taux de matière organique du sol sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne.

Influence of soil organic matter on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c).

(a) pH & EW Abundance



(b) pH & EW Biomass



(c) pH & EW diversity

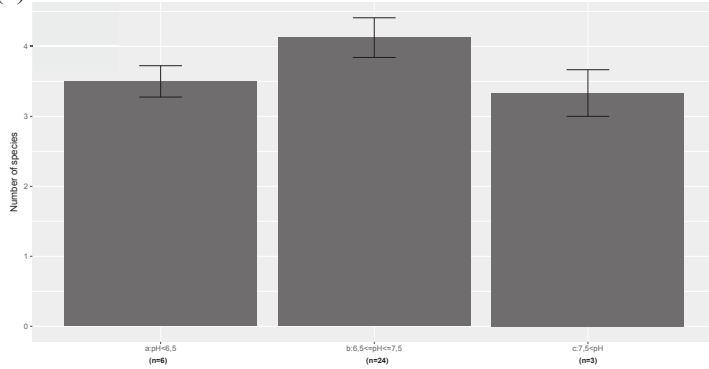


Figure.11 : Influence du pH sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne.

Influence of pH on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c).

de ver lorsque l'humidité est importante (*Lee 1985, Pelosi 2008, Singh 2018*). Cependant, on observe peu de relation entre les variables de températures du sol, de densités de sol et d'humidités de sol avec les vers de terre. Ceci peut s'expliquer par le faible nombre de répétitions lors de l'échantillonnage.

2. Une analyse univariée de l'impact du contexte pédoclimatique et des pratiques culturales sur les vers de terre

La teneur en matière organique

Un fort taux de matière organique aurait tendance à favoriser l'abondance totale et notamment l'abondance des vers juvéniles. La teneur en matière organique affecterait donc surtout le renouvellement des populations de vers de terre puisque la tendance ne se retrouve pas sur le graphique des biomasses sèches. Cependant, il semblerait y avoir une teneur optimale (<5%) favorable au développement des vers endogés, ces vers géophages n'apprécieraient pas les sols avec des forts taux de matière organique. Un regard sur la diversité spécifique permet de rendre compte du taux optimal de matière organique (4-5 %), une teneur favorable au développement des vers des différents groupes on y retrouve ainsi les vers des 3 groupes et notamment les épigés qui apprécient les forts taux de matière organique (Figure.10) (*Bouché 1977 ; Lavelle 1988 ; Pelosi 2008*).

Le pH

Les sols au pH neutre (compris entre 6,5 et 7,5) présentent une abondance totale plus importante que les sols acides (pH<6,5). Les sols basiques (pH>7,5) présentent une abondance de vers endogés supérieur au sols acides. Même si le caractère limitant des sols acides ne se retrouve qu'en tendance au regard des biomasses sèches, cela confirme le désavantage des sols acides pour le développement et la dynamique lombricienne (Figure.11) (*Paoletti 1999*).

La classe de sol

Les sols G1 ont une abondance totale de vers de terre supérieure aux sols G2. Cependant, cet avantage des argiles par rapport aux loams ne se retrouve pas en terme de biomasse sèche, ainsi les sols G1 ne permettent pas une grosse croissance des vers. On n'y retrouve des petits vers matures ou des vers juvéniles (Figure.12). Même si les sols G1 et G2 sont deux classes de sols aux textures plutôt fines donc bénéfiques, on suppose que le caractère bénéfique des sols argileux sur l'abondance doit potentiellement être lié à la mise en œuvre de bonnes pratiques culturales. De plus, lorsque le taux d'humidité du sol présente peu de variation, la texture importante peu (*El-Duweini et Ghabbour 1965*). C'est le cas dans cette étude puisque l'échantillonnage a été effectué durant une même période restreinte.

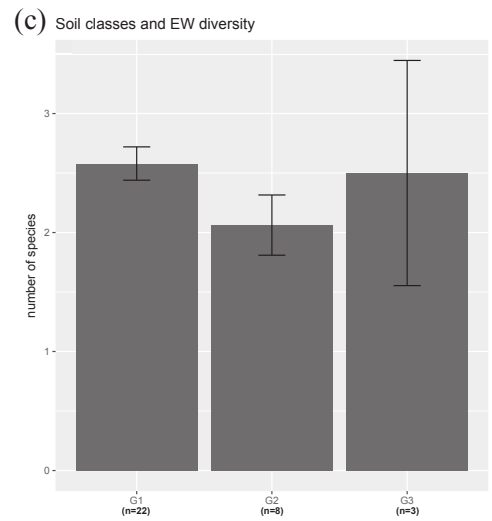
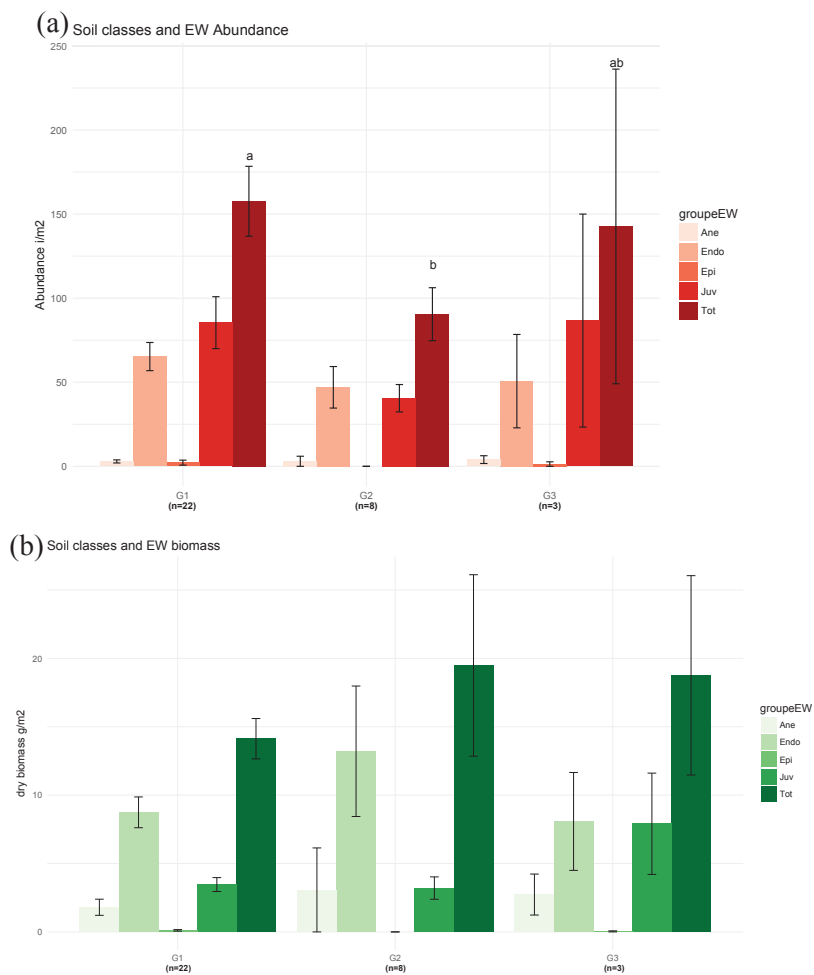


Figure.12 : Influence de la classe de sol sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité lombricienne (c) [G1 : argiles, G2 : loams, G3 : sables].

Influence of soil class on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c) [G1 : clays, G2 : loams, G3 : sands].

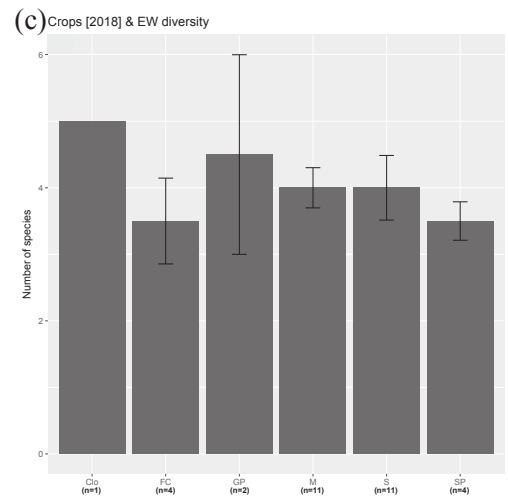
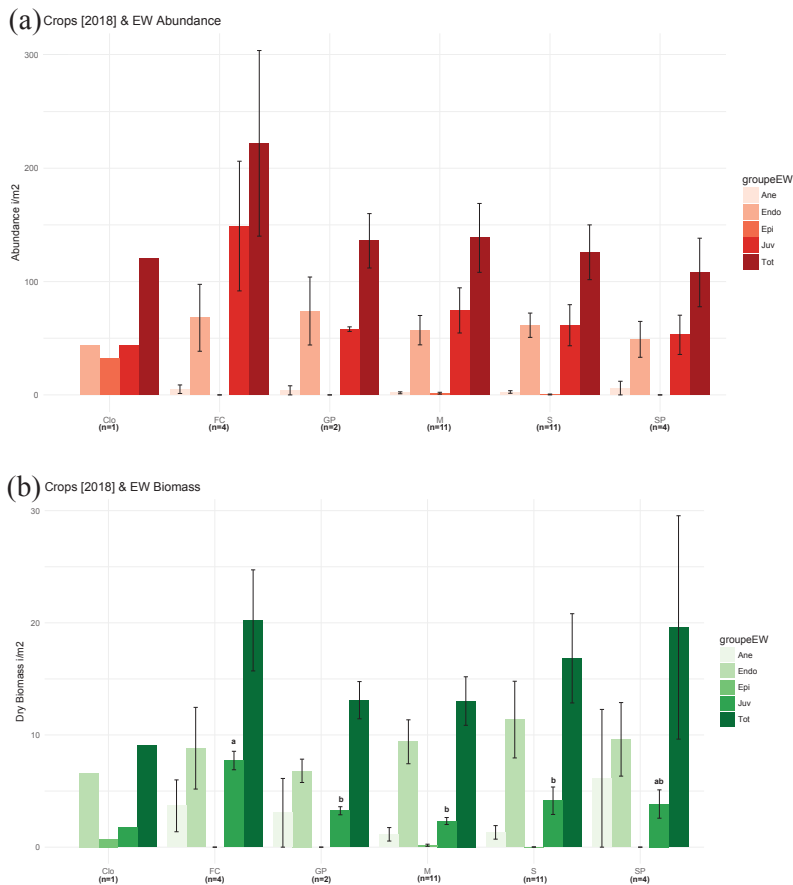


Figure.13 : Effet de la culture en 2018 sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne [Clo : Trèfle, FC : Céréale d'automne, GP : Pois vert, M : Maïs, S : Soja, SP : Céréale de printemps].

Effect of 2018 crop on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c) [Clo : Clover, FC : Fall cereal, GP : Green pea, M : Corn, S : Soybean, SP : Spring cereal].

La culture en 2018

Le type de culture en 2018 influence différemment les populations de vers de terre et leur dynamisme. On remarque notamment une tendance positive quant à l'usage de céréales d'automne sur l'abondance totale de vers et l'abondance des vers juvéniles. De plus, la biomasse sèche des juvéniles est significativement plus importante avec un précédent cultural de céréale d'automne en 2018 par rapport à une culture de soja ou de maïs (Figure.13). L'effet positif du précédent de culture de céréale d'automne s'explique par un apport de résidus de céréales favorables au début du printemps. Les céréales d'automne peuvent jouer le rôle d'engrais verts lorsqu'elles ne passent pas l'hiver (*Abail et Whalen 2018 ; Ashworth et al. 2017 ; Curry et al. 2002*).

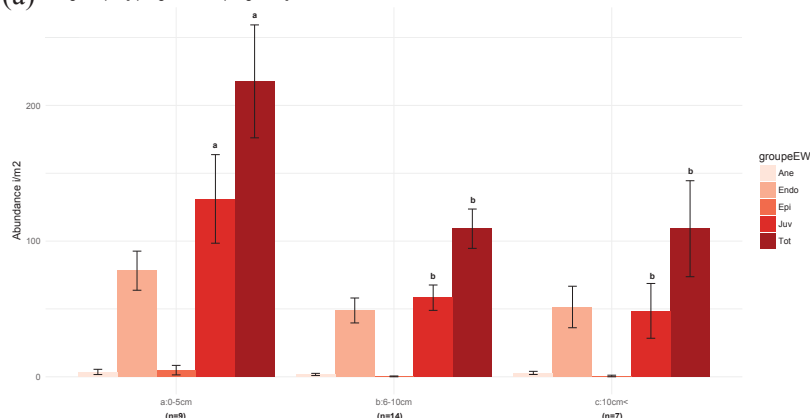
Le travail du sol

Une faible profondeur moyenne (0-5 cm) de travail de sol entre le printemps 2018 et 2019 a un effet significativement favorable sur l'abondance totale des vers et l'abondance des vers juvéniles par rapport à un travail moyen plus profond entre le printemps 2018 et 2019 (>6 cm). Ce constat se vérifie en tendance. En effet, on remarque une tendance à la diminution de la biomasse sèche avec l'augmentation de la profondeur moyenne de travail de sol (Figure.14). De plus, une faible fréquence de travail de sol entre le printemps 2018 et 2019 (1-3 passages) a un effet significativement favorable sur l'abondance totale des vers, l'abondance des vers endogés et l'abondance des vers juvéniles par rapport à une fréquence de travail plus élevée entre le printemps 2018 et 2019 (>7 passages) (Figure.15). L'étude globale du travail de sol effectué au printemps 2018, prenant en compte le type, la fréquence et la profondeur de travail de sol, met en avant un effet positif significatif des techniques de travail plus réduites, peu fréquentes et peu profondes favorables au développement des vers de terre et plus généralement à la conservation des sols (Figure.16) (*Capowiez et al. 2009 ; Crittenden et al. 2014 ; Edwards et Bohlen 1996 ; Pelosi 2008*).

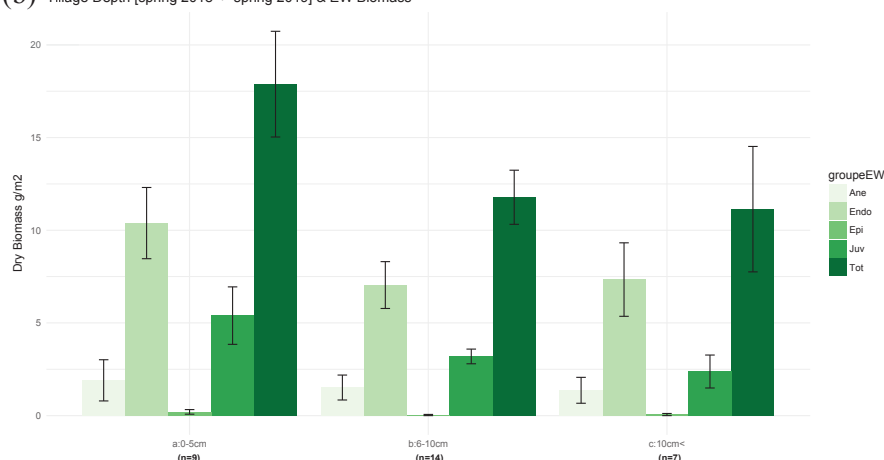
3. Une analyse multivariée de l'impact du contexte pédoclimatique et des pratiques culturales sur les vers de terre

L'étude univariée préalable couplée à l'analyse des variables quantitatives par ACP et qualitatives par ACM nous a permis de faire ressortir plusieurs variables explicatives d'intérêts. Les 9 modèles conservés sont présentés dans le Tableau.5. L'étude des résidus permettant la validation de chaque modèle est disponible en (Annexe.5). Dans cette partie nous nous pencherons plus précisément sur l'étude des modèles M2, M5, M8 et M9 (Tableau.5).

(a) Tillage Depth [spring 2018 -> spring 2019] & EW Abundance



(b) Tillage Depth [spring 2018 -> spring 2019] & EW Biomass



(c) Tillage depth [Spring 2018 -> Spring 2019] & EW diversity

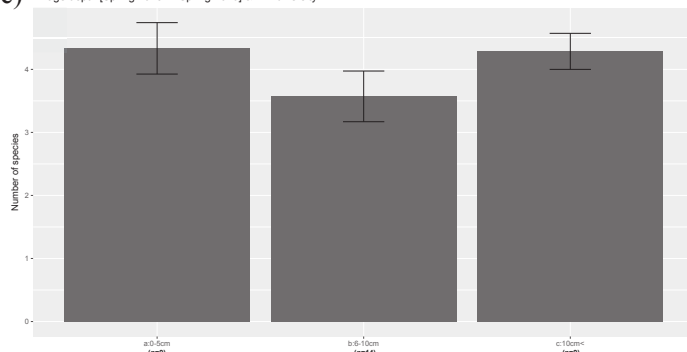
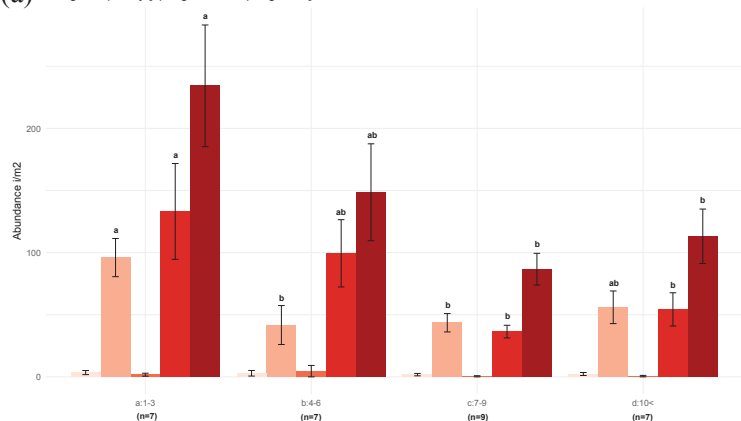


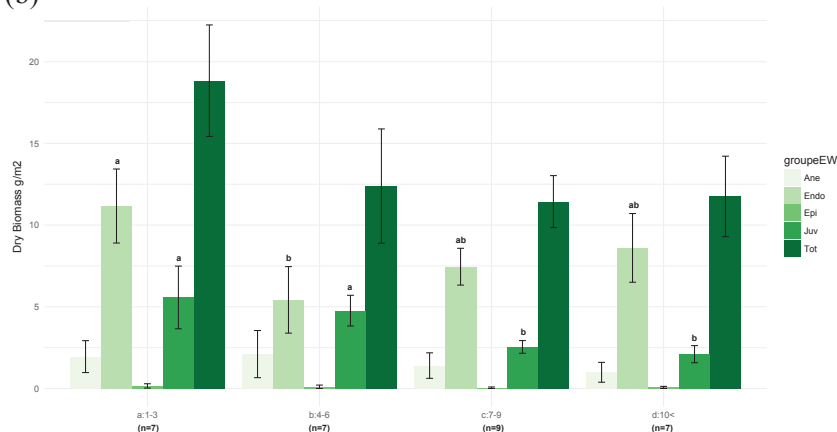
Figure.14 : Effet de la profondeur de travail de sol entre le printemps 2018 et 2019 sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne.

Effect of tillage depth between spring 2018 and 2019 on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c).

(a) Tillage frequency [spring 2018 -> spring 2019] & EW Abundance



(b) Tillage frequency [spring 2018 -> spring 2019] & EW Biomass



(c) Tillage frequency [Spring 2018 -> Spring 2019] & EW diversity

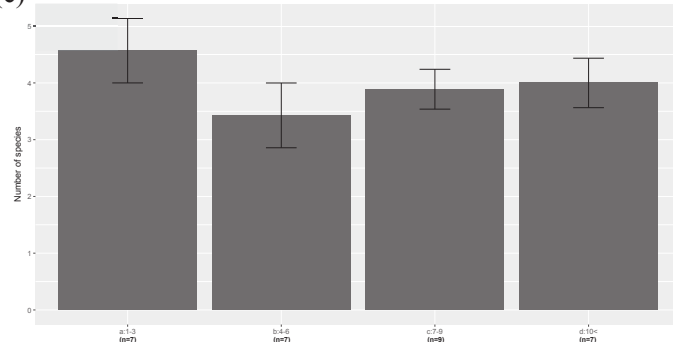


Figure.15 : Influence de la fréquence de travail de sol entre le printemps 2018 et 2019 sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne.

Influence of tillage frequency between spring 2018 and 2019 on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c).

Influence du travail de sol au printemps 2018, de la température moyenne au printemps 2019 et du type de fertilisation au printemps 2019 sur l'abondance totale des vers et l'abondance des vers juvéniles

L'étude des modèles M2 et M5 (Tableau.5) met en avant un effet négatif du travail de sol du printemps 2018. Il y a aussi un effet positif des températures moyennes élevée du printemps 2019 et du fumier de porc sur d'une part l'abondance totale des vers de terre (Figure.17) et sur l'abondance des vers juvéniles (Figure.18). Ainsi, des travaux de sol intenses auront des impacts négatifs sur les populations de vers de terre même après une période d'un an, il est difficile de conclure sur un effet de long terme puisque les travaux de sol intenses sont fréquents (Crittenden et al. 2014 ; Edwards et Bohlen 1996). La température moyenne de printemps a un effet direct sur les températures de sol sur le court terme. Ainsi des températures élevées seront favorable à des sols chauds au printemps ; des conditions favorables au développement des vers (Lee 1985 ; Pelosi 2008 ; Singh 2018). On ne souligne pas un effet positif notable des fertilisants animaux sur le court terme, cela peut être dû au modification des paramètres d'humidité du sol suite à l'application. Seul le fumier de porc semble avoir un effet bénéfique sur le court terme (Paoletti 1999).

Influence de la culture de couverture 2018 et de la classe de sol sur la biomasse sèche des vers juvéniles

L'étude du modèle M8 (Tableau.5) met en avant un caractère favorable des sables et argiles sur la biomasse sèche des vers juvéniles, et un effet bénéfique des cultures de couverture intercalaires qui ne sont pas détruites sur cette biomasse (Figure.19). Il est délicat de conclure sur l'effet de la classe de sol puisque la classe G1 regroupe une diversité de type de sol qui semble affecter très différemment les vers. Ainsi, les modèles M8 et M9 s'opposent à ce niveau même si les variables réponses ne sont pas les même (biomasse sèche totale et biomasse sèche des juvéniles) elles sont très liées (Figure.9) (Reeleder et al. 2006 ; Singh 2018). L'effet positif des cultures de couverture intercalaires non détruites ou des cultures principales (principalement des céréales d'automne) qui, si elles ne passent pas l'hiver, serviront d'engrais vert, est l'apport de résidus intéressants d'un point de vu fertilisant pour les vers notamment la dynamique et le renouvellement des populations. Cet effet positif est notable après une période d'au moins une année (Abail et Whalen 2018 ; Ashworth et al. 2017 ; Curry et al. 2002).

Influence du type de sol et du type de fertilisation au printemps 2019 sur la biomasse sèche des vers endogés

L'étude du modèle M9 (Tableau.5), met en avant un effet bénéfique du fumier de porc sur le court terme sur la biomasse sèche des vers endogés, et le caractère favorable des

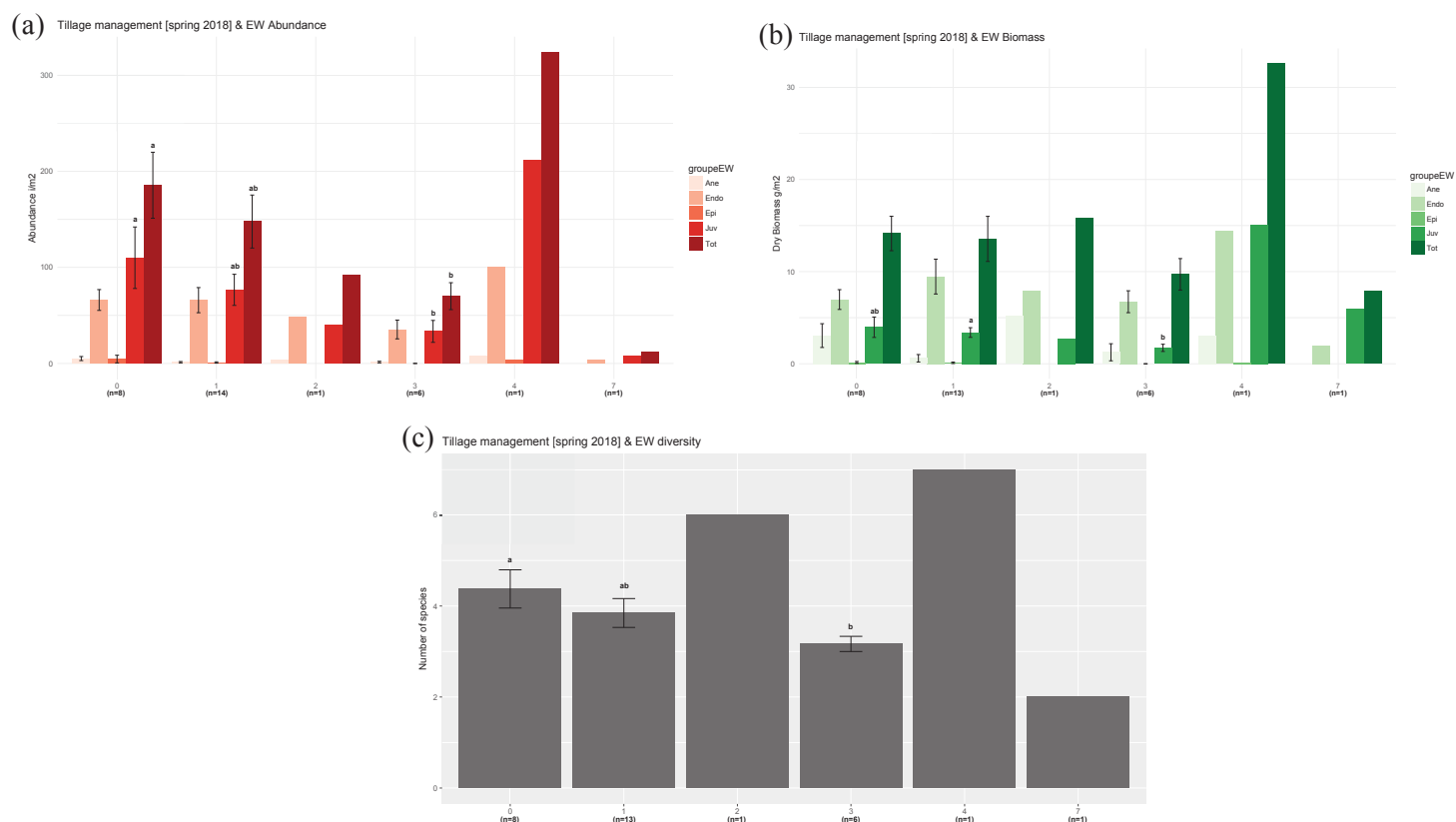


Figure.16 : Influence du travail de sol du printemps 2018 sur l'abondance (a), la biomasse sèche (b) et la diversité (c) lombricienne [0 : Pas de travail de sol, 1 : Un passage cultivateur, vibroculteur ou herse à disque à 5-10 cm, 2 : Un passage de déchaumeur ou labour à 5-10 cm, 3 : >=2 passages de cultivateur, vibroculteur ou herse à disque à 5-10 cm, 4 : Un passage de chisel >= 15 cm, 7 : Un passage de sous soleuse, déchaumeur ou labour à >= 20 cm].

Influence of tillage frequency between spring 2018 and 2019 on earthworm abundance (a), dry biomass (b) and diversity (c)

Tableau.5 : Modèles sélectionnés, des AIC (Akaike Information Criterion), de l'estimation pour chaque variable quantitative explicative et des *P* value pour chaque variable explicative.

Selected models, theirs AIC, the estimate for each quantitative explanatory variable and *P* value for each explanatory variable.

Model names	Variable to explain	Model writng	AIC	Estimate of explanatory quantitative variables	Pr of explanatory variables
M1	Log(Total Abundance)	$\log AB \sim Wprn18 + Amprn19 + (1 ferme)$	62,02	$Wprn18 = -0,34325$	$Wprn18 = 3,310e-06$ $Amprn19 = 3,147e-08$
M2	Log(Total Abundance)	$\log AB \sim Wprn18 + Amprn19 + TmoyPRN19 + (1 ferme)$	60,02	$Wprn18 = -0,2918$ $TmoyPRN19 = 0,5265$	$Wprn18 = 2,545e-05$ $Amprn19 = 1,289e-09$ $TmoyPRN19 = 1,24e-02$
M3	Log(Total Abundance)	$\log AB \sim Amprn19 + Typesol + (1 ferme)$	59,05		$Amprn19 = 1,559e-07$ $Typesol = 4,444e-10$
M4	Log(Juvenile Abundance)	$\log ABj \sim Wprn18 + Amprn19 + (1 ferme)$	78,97	$Wprn18 = -0,3386$	$Wprn18 = 9,272e-04$ $Amprn19 = 1,7703e-03$
M5	Log(Juvenile Abundance)	$\log ABj \sim Wprn18 + Amprn19 + TmoyPRN19 + (1 ferme)$	78,03	$Wprn18 = -0,2761$ $TmoyPRN19 = 0,5916$	$Wprn18 = 5,941e-03$ $Amprn19 = 4,488e-04$ $TmoyPRN19 = 4,4182e-02$
M6	Log(Juvenile Abundance)	$\log ABj \sim Typesol + Amprn19 + (1 ferme)$	77,23		$Amprn19 = 2,5963e-02$ $Typesol = 8,5546e-03$
M7	Log(Total Dry Biomass)	$\log BMS \sim Amprn19 + Typesol + (1 ferme)$	57,73		$Amprn19 = 2,343e-04$ $Typesol = 4,4078e-02$
M8	Log(Juvenile Dry Biomass)	$\log BMSj \sim CC18 + Classesol + (1 ferme)$	71,98	$CC18 = 0,17722$	$CC18 = 5,827e-03$ $Classesol = 2,7814e-02$
M9	Log(Endogeic Dry Biomass+1)	$\log BMSen \sim Typesol + Amprn19 + (1 ferme)$	54,85		$Amprn19 = 5,263e-09$ $Typesol = 2,098e-03$

sols argileux-limoneux par rapport aux sables et loams sur cette biomasse (Figure.20). Une fois de plus le fumier de porc à court terme est le seul type de fertilisant animale qui paraît avoir un effet favorable sur la dynamique des populations des vers endogés. Même si ces vers sont caractérisés de « géophages » l'apport de matière organique les avantagent (*Bouché 1977 ; Paoletti 1999 ; Pelosi 2008 ; Van Vliet et al. 2007*). Il serait intéressant d'avoir un regard sur l'influence sur le long terme de ces différents amendements organiques. Cependant, les données actuelles ne permettent pas de conclure sur de tels effets.

IV. Conclusion

L'analyse globale des influences du contexte pédoclimatique et des pratiques culturales sur les populations de vers de terre nous permet de conclure au regard de hypothèses posées que :

H1 : Les zones mises à l'étude ne présentaient pas une grosse diversité spécifique de vers, avec très peu de vers Epigés, peu de vers anéciques, et une grande majorité d'endogés.

H2 : Il n'y a pas de corrélation forte entre les données de vers de terre et les températures de sol et l'humidité de sol. Cependant les modèles mettent en avant un effet de court terme des températures au printemps qui impactent la température de sol et la dynamique des vers.

H3 : Les sols acides ne sont pas favorables à la dynamique lombricienne. On note une grosse variabilité d'abondance et de biomasse lombricienne en lien avec le type de sol, ce qui ne nous permet pas de conclure sur les effets classes et type de sols. Cependant, les sols G1 sont plus favorables que les sols G2.

H4 : Le type d'amendement animale n'a pas d'effet notable, même si sur le court terme le fumier de porc pourrait impacter positivement l'abondance des vers notamment le nombre de juvéniles.

H5 : L'effet précédent d'une céréale d'automne est positif pour la dynamique lombricienne. Ceci est dû aux apports de résidus de céréales nutritifs avec un bon ratio C/N au regard des cycles de vie des vers.

H6 : Il n'est pas possible de conclure sur les effets des différents types d'amendement sur les différents groupes et espèces de vers.

H7 : Le travail de sol intense (fréquent et profond), est limitant pour les différentes populations de vers. Cependant, il est difficile, même au regard des modèles, de conclure sur les causes d'une très faible abondance et biomasse des vers Epigés et anéciques.

Pour conclure, il est important de noter que le bio indicateur vers de terre n'apporte qu'une petite information relative à la santé des sols. Il est nécessaire d'avoir un regard sur un ensemble d'indicateurs physiques, chimiques et biologiques pour conclure sur la santé d'un sol et potentiellement développer des outils d'aide à la décision (*Stewart et al. 2018*).

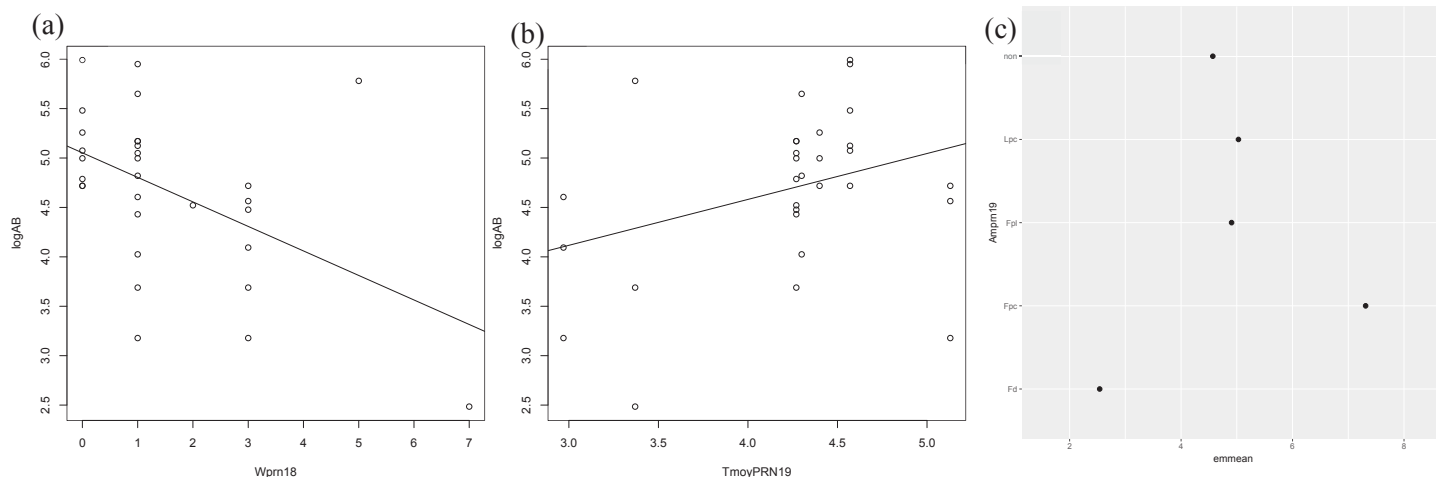


Figure.17 : Modèle M2 liant l’abondance totale lombricienne (logAB) avec le travail de sol au printemps 2018 (Wprn18) (a), la température de l’air au printemps 2019 (TmoyPRN19) (b) et le type d’amendement au printemps 2019 (Amprn19 [non : pas d’amendement, Lpc : Lisier de porc, Fpl : Fumier de poule, Fpc : Fumier de porc, Fd : Fumier de dinde] (c)).

M2 model connecting earthworm total abundance (logAB) with 2018 spring tillage management (Wprn18) (a), air temperature in spring 2019 (TmoyPRN19) (b) and the type of animal manure applied in spring 2019 (Amprn19) (c).

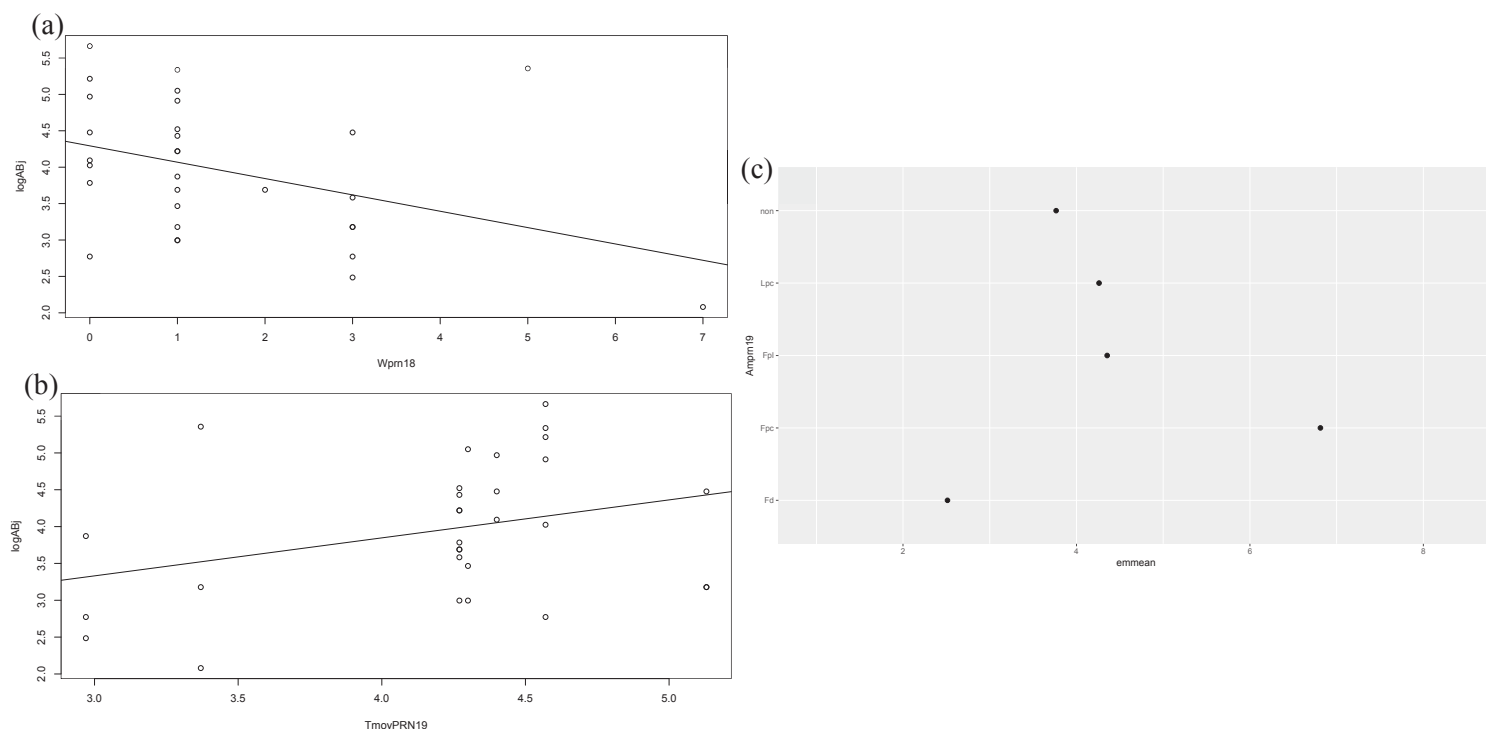


Figure.18 : Modèle M5 liant l’abondance juvénile lombricienne (logABj) avec le travail de sol au printemps 2018 (Wprn18) (a), la température moyenne au printemps 2019 (TmoyPRN19) (b) et le type d’amendement au printemps 2019 (Amprn19 [non : pas d’amendement, Lpc : Lisier de porc, Fpl : Fumier de poule, Fpc : Fumier de porc, Fd : Fumier de dinde]) (c).

M5 model connecting earthworm juvenile abundance (logABj) with 2018 spring tillage management (Wprn18) (a), mean of the 2019 spring temperature (b) and the type of 2019 spring animal fertilisation (Amprn19 Amprn19 [non : no amendment, Lpc : swine slurry, Fpl : hen manure, Fpc : swine manure, Fd : turkey manure]) (c).

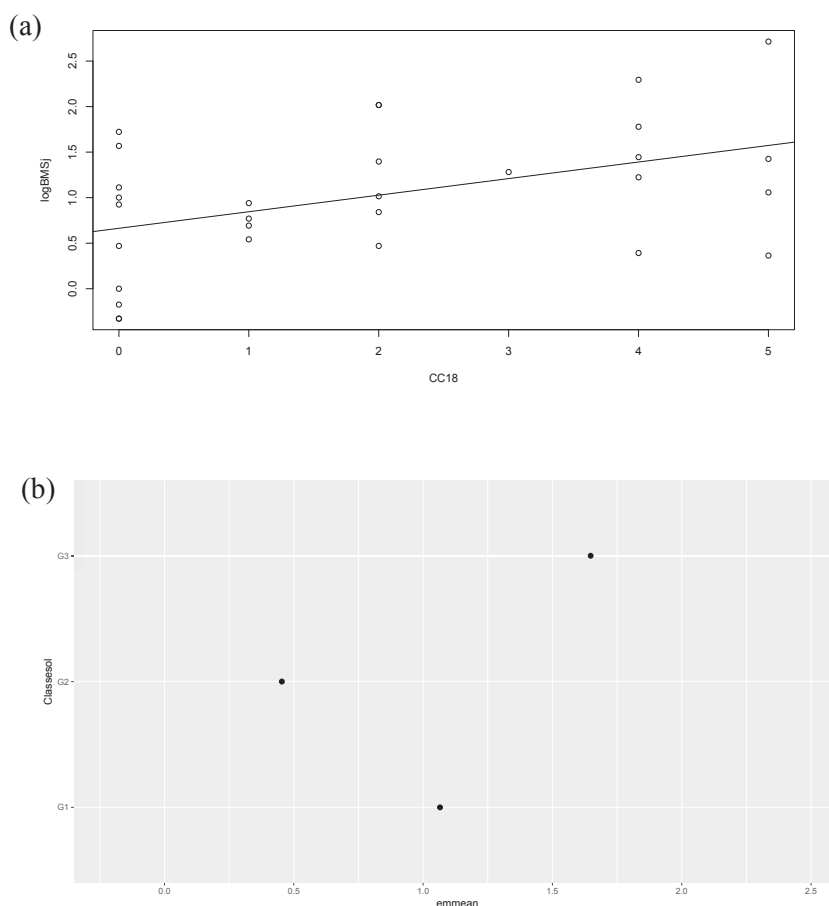


Figure.19 : Modèle M8 liant la biomasse sèche des vers juvénile (logBMSj) avec la gestion des cultures de couverture 2018 (CC18 [0 : pas de culture de couverture, 1 : culture de couverture dérobée détruite, 2 : culture de couverture intercalaire détruite, 3 : culture de couverture dérobée conservée ou fauchée, 4 : culture de couverture intercalaire conservée ou fauché, 5 : Céréale d'automne qui ne passe pas toujours l'hiver et qui sert d'engrais vert]) (a) et la classe de sol (Classesol [G1 : argileux, G2 : loams, G3 : sableux]) (b). M5 model connecting dry biomass of juvenile earthworms (logBMSj) with 2018 cover crops management (CC18 [0 : no cover crop, 1 : catch crop plowed, 2 : relay crop plowed, 3 : catch crop conserved or cut, 4 : relay crop conserved or cut, 5 : fall cereal used as a green manure or incorporated]) (a) and soil classes (Classesol [G1 : clays, G2 : loams, G3 : sands]) (b).

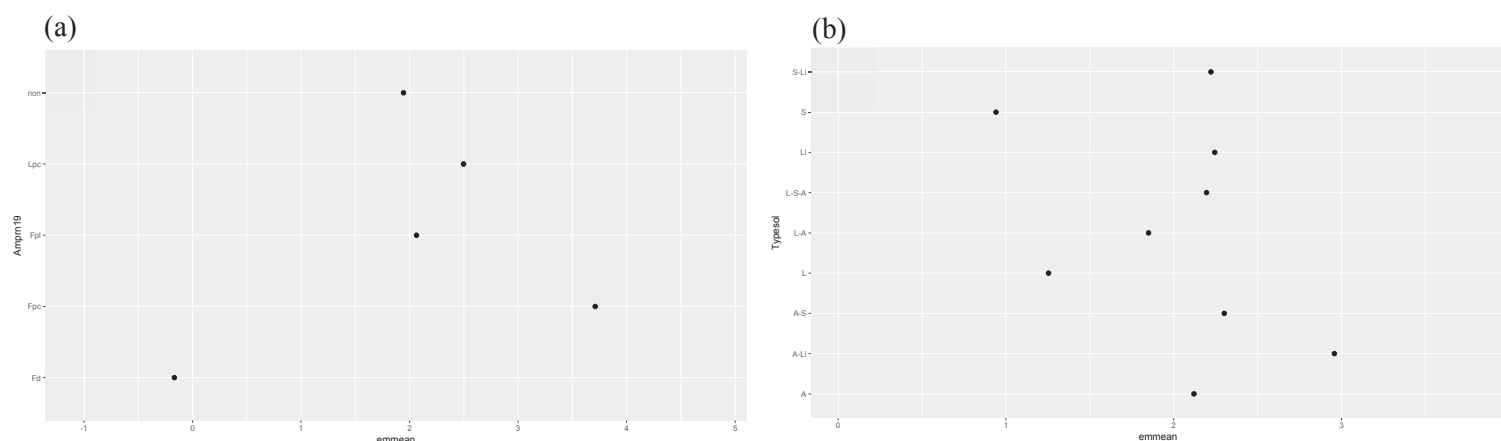


Figure.20 : Modèle M9 liant la biomasse sèche des vers endogés (logBMSen) avec le type d'amendement appliqué au printemps 2019 (Amprn19 [non : Pas d'amendement, Lpc : Lisier de porc, Fpl : Fumier de poule, Fpc : Fumier de porc, Fd : Fumier de dinde]) (a) et le type de sol (typesol) (b). M9 model connecting dry biomass of the endogeic earthworms (logBMSen) with the type of 2019 spring animal fertilisation (Amprn19 [non : no amendement, Lpc : swine slurry, Fpl : hen manure, Fpc : swine manure, Fd : turkey maure]) (a) and soil type (typesol) (b).

Bibliographie

ABAIL, Zhor et WHALEN, Joann K. Corn residue inputs influence earthworm population dynamics in a no-till corn-soybean rotation. *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Juin 2018, Vol. 127, p. 120-128. DOI 10.1016/j.apsoil.2018.03.013

ACTON, D. F. et GREGORICH. *The health of our soils : toward sustainable agriculture in Canada* /. [Ottawa] : Agriculture and Agri-Food Canada, 1995. [Consulté le 21 mars 2019]. ISBN 978-0-660-15947-8. DOI 10.5962/bhl.title.58906

ANDRIUZZI, Walter S., PULLEMAN, Mirjam M., CLUZEAU, Daniel et PÉRÈS, Guénola. Comparison of two widely used sampling methods in assessing earthworm community responses to agricultural intensification. *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Octobre 2017, Vol. 119, p. 145-151. DOI 10.1016/j.apsoil.2017.06.011

ASHWORTH, A.J., ALLEN, F.L., TYLER, D.D., POTE, D.H. et SHIPITALO, M.J. Earthworm populations are affected from long-term crop sequences and bio-covers under no-tillage. *Pedobiologia* [en ligne]. Janvier 2017, Vol. 60, p. 27-33. DOI 10.1016/j.pedobi.2017.01.001

BARTLETT, Mark D., BRIONES, Maria J.I., NEILSON, Roy, SCHMIDT, Olaf, SPURGEON, David et CREAMER, Rachel E. A critical review of current methods in earthworm ecology: From individuals to populations. *European Journal of Soil Biology* [en ligne]. Mars 2010, Vol. 46, n° 2, p. 67-73. DOI 10.1016/j.ejsobi.2009.11.006

BEKETOV, Mikhail A., KEFFORD, Ben J., SCHÄFER, Ralf B. et LIESS, Matthias. Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [en ligne]. Juillet 2013, Vol. 110, n° 27, p. 11039-11043. DOI 10.1073/pnas.1305618110

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. et BRUN, J.-J. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services: Earthworm impact on ecosystem services. *European Journal of Soil Science* [en ligne]. Avril 2013, Vol. 64, n° 2, p. 161-182. DOI 10.1111/ejss.12025

BOHLEN, P. Efficacy of methods for manipulating earthworm populations in large-scale field experiments in agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* [en ligne]. Août 1995, Vol. 27, n° 8, p. 993-999. DOI 10.1016/0038-0717(95)00025-A

BOUCHÉ, Marcel. Strategies lombriciennes. *Ecological Bulletins*. 1977, n° 25, p. 122-132

BOUCHÉ, Marcel B. *Lombriciens de France: écologie et systématique*. [S.l.] : Institut national de la recherche agronomique, 1972

BOUCHÉ, Marcel et GARDNER, R.H. Earthworm functions. VIII.- Population estimation techniques. *Revue d'écologie et de biologie du sol*. 1984, Vol. 21, p. 37-63

BÜNEMANN, Else K., BONGIORNO, Giulia, BAI, Zhanguo, CREAMER, Rachel E., DE DEYN, Gerlinde, DE GOEDE, Ron, FLESKENS, Luuk, GEISSEN, Violette, KUYPER, Thom W., MÄDER, Paul, PULLEMAN, Mirjam, SUKKEL, Wijnand, VAN GROENIGEN, Jan Willem et BRUSSAARD, Lijbert. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* [en ligne]. Mai 2018, Vol. 120, p. 105-125. DOI 10.1016/j.soilbio.2018.01.030

CAPOWIEZ, Yvan, CADOUX, Stéphane, BOUCHANT, Pierre, RUY, Stéphane, ROGER-ESTRADE, Jean, RICHARD, Guy et BOIZARD, Hubert. The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. *Soil and Tillage Research* [en ligne]. Novembre 2009, Vol. 105, n° 2, p. 209-216. DOI 10.1016/j.still.2009.09.002

CARTV. *Cahier des charges relatif aux produits portant des indications se référant au mode de production biologique*. Décembre 2018, p. 34

CLAPPERTON, Jill, MILLER, James J., LARNEY, Francis J. et WAYNE LINDWALL, C. Earthworm populations as affected by long-term tillage practices in southern Alberta, Canada. *Soil Biology and Biochemistry* [en ligne]. Mars 1997, Vol. 29, n° 3-4, p. 631-633. DOI 10.1016/S0038-0717(96)00189-7

CLAYTON et MARSHALL. *Le climat des sols du Canada*. 1972

CLUZEAU, Daniel, PÉRÈS, Guénola, GUERNION, Muriel, CHAUSSOD, Rémi, CORTET, Jérôme, FARGETTE, Mireille, MARTIN-LAURENT, Fabrice, MATEILLE, Thierry, PERNIN, Céline, PONGE, Jean-François, RUIZ-CAMACHO, Nuria, VILLENAVE, Cécile, ROUGÉ, Laurence, MERCIER, Vincent, BELLIDO, Alain, CANNAVACCIUOLO, Mario, PIRON, Denis, ARROUAYS, Dominique, BOULONNE, Line, JOLIVET, Claudy, LAVELLE, Patrick, VELASQUEZ, Elena, PLANTARD, Olivier, WALTER, Christian, LEMERCIER, Blandine, TICO, Sylvie, GITEAU, Jean-Luc et BISPO, Antonio. Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols: exemple du programme pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv. *Etude et Gestion des Sols*. 2009, p. 17

COULIS, Mathieu et JOLY, François-Xavier. Allometric equations for estimating fresh biomass of five soil macroinvertebrate species from neotropical agroecosystems. *European Journal of Soil Biology* [en ligne]. Novembre 2017, Vol. 83, p. 18-26. DOI 10.1016/j.ejsobi.2017.09.006

CRITTENDEN, S.J., ESWARAMURTHY, T., DE GOEDE, R.G.M, BRUSSAARD, L. et PULLEMAN, M.M. Effect of tillage on earthworms over short- and medium-term in conventional and organic farming. *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Novembre 2014, Vol. 83, p. 140-148. DOI 10.1016/j.apsoil.2014.03.001

CURRY, James P., BYRNE, David et SCHMIDT, Olaf. Intensive cultivation can drastically reduce earthworm populations in arable land. *European Journal of Soil Biology* [en ligne]. Avril 2002, Vol. 38, n° 2, p. 127-130. DOI 10.1016/S1164-5563(02)01132-9

CURRY, J.P. et BYRNE, D. Role of earthworms in straw decomposition in a winter cereal field. *Soil Biology and Biochemistry* [en ligne]. Mars 1997, Vol. 29, n° 3-4, p. 555-558. DOI 10.1016/S0038-0717(96)00179-4

DATTA, Shivika, SINGH, Joginder, SINGH, Sharanpreet et SINGH, Jaswinder. Earthworms, pesticides and sustainable agriculture: a review. *Environmental Science and Pollution Research* [en ligne]. Mai 2016, Vol. 23, n° 9, p. 8227-8243. DOI 10.1007/s11356-016-6375-0

DORAN, John W. *Soil health and global sustainability: translating science into practice*. 2002, p. 9

DORAN, John W. et PARKIN, Timothy B. Quantitative Indicators of Soil Quality: A Minimum Data Set. Dans : *SSSA Special Publication* [en ligne]. [S. l.] : Soil Science Society of America, 1996. ISBN 978-0-89118-944-2. DOI 10.2136/sssaspecpub49.c2

DORAN, John W. et ZEISS, Michael R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Août 2000, Vol. 15, n° 1, p. 3-11. DOI 10.1016/S0929-1393(00)00067-6

DORAN, J.W. et PARKIN, Timothy B. Defining and Assessing Soil Quality. Dans : *SSSA Special Publication* [en ligne]. [S. l.] : Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1994. [Consulté le 26 mars 2019]. ISBN 978-0-89118-930-5. DOI 10.2136/sssaspecpub35.c1

DROBNIK, Thomas, GREINER, Lucie, KELLER, Armin et GRÊT-REGAMEY, Adrienne. Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators* [en ligne]. Novembre 2018, Vol. 94, p. 151-169. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.06.052

EAST, Duncan et KNIGHT, David. Sampling soil earthworm populations using household detergent and mustard. *Journal of Biological Education* [en ligne]. Septembre 1998, Vol. 32, n° 3, p. 201-206. DOI 10.1080/00219266.1998.9655621

EDWARDS, C. A. Earthworm ecology in cultivated soils. Dans : SATCHELL, J. E. (dir.), *Earthworm Ecology* [en ligne]. Dordrecht : Springer Netherlands, 1983, p. 123-137. [Consulté le 30 avril 2019]. ISBN 978-94-009-5967-5. DOI 10.1007/978-94-009-5965-1_10

EDWARDS, Clive A. et BOHLEN, P. J. *Biology and Ecology of Earthworms*. [S. l.] : Springer Science & Business Media, 1996. ISBN 978-0-412-56160-3. Google-Books-ID: ad4rDwD_GhsC

EGGLETON, Paul, INWARD, Kelly, SMITH, Joanne, JONES, David T. et SHERLOCK, Emma. A six year study of earthworm (Lumbricidae) populations in pasture woodland in southern England shows their responses to soil temperature and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry* [en ligne]. Septembre 2009, Vol. 41, n° 9, p. 1857-1865. DOI 10.1016/j.soilbio.2009.06.007

EL-DUWEINI, A. Khalaf et GHABBOUR, Samir I. Population Density and Biomass of Earthworms in Different Types of Egyptian Soils. *The Journal of Applied Ecology* [en ligne]. Novembre 1965, Vol. 2, n° 2, p. 271. DOI 10.2307/2401479

FAO. *Status of the world's soil resources: main report*. Rome : FAO : ITPS, 2015. ISBN 978-92-5-109004-6

FLETCHER, David, MACKENZIE, Darryl et VILLOUTA, Eduardo. Modelling skewed data with many zeros: A simple approach combining ordinary and logistic regression. *Environmental and Ecological Statistics* [en ligne]. Mars 2005, Vol. 12, n° 1, p. 45-54. DOI 10.1007/s10651-005-6817-1

FRAGOSO, C., BROWN, G.G., PATRÓN, J.C., BLANCHART, E., LAVELLE, P., PASHANASI, B., SENAPATI, B. et KUMAR, T. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of earthworms. *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Août 1997, Vol. 6, n° 1, p. 17-35. DOI 10.1016/S0929-1393(96)00154-0

GATES. Contribution to a revision of the lumbricidae *Eisenia hortensis* (Michaelsen 1890). Dans : *Library of the museum of comparative zoology - Harvard University*. [S. l.] : [s. n.], 1968

GAUTHIER, Mélanie et CHAMPAGNE, Michel. Évaluation de la santé globale des sols. *Agro Enviro Lab*. 2017, p. 17

GREGORICH, E G. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. [s. d.], p. 1264

GROSSI, J.-L. et BRUN, J.-J. Effect of climate and plant succession on lumbricid populations in the French Alps. *Soil Biology and Biochemistry* [en ligne]. Mars 1997, Vol. 29, n° 3-4, p. 329-333. DOI 10.1016/S0038-0717(96)00234-9

HABERERN, J. *Development of a Soil Health Index*. 1992, p. 4

HACKENBERGER, D.K. et HACKENBERGER, B.K. Earthworm community structure in grassland habitats differentiated by climate type during two consecutive seasons. *European Journal of Soil Biology* [en ligne]. Mars 2014, Vol. 61, p. 27-34. DOI 10.1016/j.ejsobi.2014.01.001

HALE, Cindy M., REICH, Peter B. et FRELICH, Lee E. Allometric Equations for Estimation of Ash-free Dry Mass from Length Measurements for Selected European Earthworm Species (Lumbricidae) in the Western Great Lakes Region. *The American Midland Naturalist* [en ligne]. Janvier 2004, Vol. 151, n° 1, p. 179-185. DOI 10.1674/0003-0031(2004)151[0179:AEFEOA]2.0.CO;2

IVASK, Mari, KUU, Annely et SIZOV, Eduard. Abundance of earthworm species in Estonian arable soils. *European Journal of Soil Biology* [en ligne]. Novembre 2007, Vol. 43, p. S39-S42. DOI 10.1016/j.ejsobi.2007.08.006

JÉGOU, Danielle, BRUNOTTE, Joachim, ROGASIK, Helmut, CAPOWIEZ, Yvan, DIESTEL, Heiko, SCHRADER, Stefan et CLUZEAU, Daniel. Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. *European Journal of Soil Biology* [en ligne]. Juin 2002, Vol. 38, n° 3-4, p. 329-336. DOI 10.1016/S1164-5563(02)01148-2

KEITH, Aidan M et ROBINSON, David A. *Earthworms as Natural Capital: Ecosystem Service Providers in Agricultural Soils*. 2012, p. 10

KERNECKER, Maria, WHALEN, Joann K. et BRADLEY, Robert L. Agricultural management and flooding shape habitats for non-native earthworms in southern Quebec, Canada. *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Novembre 2015, Vol. 96, p. 240-250. DOI 10.1016/j.apsoil.2015.08.011

KIBBLEWHITE, M.G, RITZ, K et SWIFT, M.J. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* [en ligne]. Février 2008, Vol. 363, n° 1492, p. 685-701. DOI 10.1098/rstb.2007.2178

LANGMAACK, M., SCHRADER, S., RAPP-BERNHARDT, U. et KOTZKE, K. Quantitative analysis of earthworm burrow systems with respect to biological soil-structure regeneration after soil compaction. *Biology and Fertility of Soils* [en ligne]. Janvier 1999, Vol. 28, n° 3, p. 219-229. DOI 10.1007/s003740050486

LAPIED, E., NAHMANI, J. et ROUSSEAU, G.X. Influence of texture and amendments on soil properties and earthworm communities. *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Octobre 2009, Vol. 43, n° 2-3, p. 241-249. DOI 10.1016/j.apsoil.2009.08.004

LAVELLE, P. Earthworm activities and the soil system. *Biology and Fertility of Soils* [en ligne]. Mai 1988, Vol. 6, n° 3. DOI 10.1007/BF00260820

LAWRENCE, Amy Paulson et BOWERS, Michael A. A test of the 'hot' mustard extraction method of sampling earthworms. *Soil Biology and Biochemistry* [en ligne]. Avril 2002, Vol. 34, n° 4, p. 549-552. DOI 10.1016/S0038-0717(01)00211-5

LOFS-HOLMIN, Astrid. Influence of Agricultural Practices on Earthworms (*Lumbricidae*). *Acta Agriculturae Scandinavica* [en ligne]. Janvier 1983, Vol. 33, n° 3, p. 225-234. DOI 10.1080/00015128309439886

MAUSEL, Paul W. Soil Quality In Illinois — An Example Of A Soils Geography Ressource Analysis. *The Professional Geographer* [en ligne]. Avril 1971, Vol. 23, n° 2, p. 127-136. DOI 10.1111/j.0033-0124.1971.00127.x

MURCHIE, Archie K., BLACKSHAW, Rod P., GORDON, Alan W. et CHRISTIE, Peter. Responses of earthworm species to long-term applications of slurry. *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Novembre 2015, Vol. 96, p. 60-67. DOI 10.1016/j.apsoil.2015.07.005

NATIONS UNIES. *Rapport sur les objectifs de développement durable*. 2017

ONGC. *Systèmes de production biologique Principes généraux et normes de gestion*. CAN/CGSB-32.310 [en ligne]. 2015.

ONGC. *Systèmes de production biologique Principes généraux et normes de gestion*. CAN/CGSB-32.311 [en ligne]. 2015.

PANKHURST, DOUBE et GUPTA. *Biological indicators of soil health*. 1997

PAOLETTI, Maurizio G. *The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators*. 1999, p. 19

PELOSI, Céline. *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*. 2008, p. 142

PELOSI, Céline, BERTRAND, Michel et ROGER-ESTRADE, Jean. Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* [en ligne]. Avril 2009, Vol. 29, n° 2, p. 287-295. DOI 10.1051/agro/2008069

PÉRÈS, G., CLUZEAU, D., CURMI, P. et HALLAIRE, V. Earthworm activity and soil structure changes due to organic enrichments in vineyard systems. *Biology and Fertility of Soils* [en ligne]. Septembre 1998, Vol. 27, n° 4, p. 417-424. DOI 10.1007/s003740050452

PÉRÈS, Guénola. *Identification et quantification in situ des interactions entre la diversité lombricienne et la macro-bioporosité dans le contexte polyculture breton. Influence sur le fonctionnement hydrique du sol*. 2003, p. 268

POTTER, BRIDGES et GORDON. Effect of N Fertilization on Earthworm and Microarthropod Populations in Kentucky Bluegrass TurP. *AGRONOMY JOURNAL*. 1985, Vol. 77, p. 6

REELEDER, R.D., MILLER, J.J., BALL COELHO, B.R. et ROY, R.C. Impacts of tillage, cover crop, and nitrogen on populations of earthworms, microarthropods, and soil fungi in a cultivated fragile soil. *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Octobre 2006, Vol. 33, n° 3, p. 243-257. DOI 10.1016/j.apsoil.2005.10.006

REYNOLDS et EGGEN. *Earthworm biology and vermicomposting II.pdf*. [S. l.] : [s. n.], 1993

REYNOLDS, John W. et ROYAL ONTARIO MUSEUM. *The earthworms (lumbricidae and sparganophilidae) of Ontario* /. Toronto : : Royal Ontario Museum, 1977. DOI 10.5962/bhl.title.60740

REYNOLDS, John Warren. *FIRST EARTHWORM (ANNELIDA: OLIGOCHAETA) SPECIES' COLLECTIONS IN CANADA AND THE CONTINENTAL UNITED STATES*. 1976, p. 51

ROARTY, Shaun, HACKETT, Richard A. et SCHMIDT, Olaf. Earthworm populations in twelve cover crop and weed management combinations. *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Juin 2017, Vol. 114, p. 142-151. DOI 10.1016/j.apsoil.2017.02.001

SALL, Djiby, QUÉBEC (PROVINCE) et MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, des pêcheries et de l'alimentation. *Monographie de l'industrie des grains au Québec*. [S. l.] : [s. n.], 2015. [Consulté le 17 juillet 2019]. ISBN 978-2-550-72997-6.

SCHMIDT, O, CLEMENTS, R.O et DONALDSON, G. Why do cereal-legume intercrops support large earthworm populations? *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Février 2003, Vol. 22, n° 2, p. 181-190. DOI 10.1016/S0929-1393(02)00131-2

SIMS, R. W. et GERARD, B. M. *Earthworms: Keys and Notes for the Identification of the Species*. London : Backhuys Publishers, 31 décembre 1985. ISBN 978-90-04-07582-5

SINGH, Jaswinder. Role of Earthworm in Sustainable Agriculture. Dans : *Sustainable Food Systems from Agriculture to Industry* [en ligne]. [S. l.] : Elsevier, 2018, p. 83-122. ISBN 978-0-12-811935-8. DOI 10.1016/B978-0-12-811935-8.00003-2

SMEATON, Timothy C., DALY, Ashlyn N. et CRANWELL, John M. Earthworm population responses to cultivation and irrigation in a South Australian soil. *Pedobiologia* [en ligne]. Janvier 2003, Vol. 47, n° 4, p. 379-385. DOI 10.1078/0031-4056-00201

STEWART, Ryan D., JIAN, Jinshi, GYAWALI, Ayush J., THOMASON, Wade E., BADGLEY, Brian D., REITER, Mark S. et STRICKLAND, Michael S. What We Talk about When We Talk about Soil Health. *ael* [en ligne]. 2018, Vol. 3, n° 1, p. 0. DOI 10.2134/ael2018.06.0033

STEWART, Ryan D., JIAN, Jinshi, GYAWALI, Ayush J., THOMASON, Wade E., BADGLEY, Brian D., REITER, Mark S. et STRICKLAND, Michael S. What We Talk about When We Talk about Soil Health. *ael* [en ligne]. 2018, Vol. 3, n° 1, p. 0. DOI 10.2134/ael2018.06.0033

TILMAN, David, CASSMAN, Kenneth G., MATSON, Pamela A., NAYLOR, Rosamond et POLASKY, Stephen. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* [en ligne]. Août 2002, Vol. 418, n° 6898, p. 671-677. DOI 10.1038/nature01014

VAN VLIET, P.C.J., VAN DER STELT, B., RIETBERG, P.I. et DE GOEDE, R.G.M. Effects of organic matter content on earthworms and nitrogen mineralization in grassland soils. *European Journal of Soil Biology* [en ligne]. Novembre 2007, Vol. 43, p. S222-S229. DOI 10.1016/j.ejsobi.2007.08.052

VILLENEUVE, G.-Oscar. Bref aperçu climatique du Québec méridional. *Cahiers de géographie du Québec* [en ligne]. 1959, Vol. 3, n° 6, p. 153. DOI 10.7202/020175ar

WHALEN, Joann K. Spatial and temporal distribution of earthworm patches in corn field, hayfield and forest systems of southwestern Quebec, Canada. *Applied Soil Ecology* [en ligne]. Octobre 2004, Vol. 27, n° 2, p. 143-151. DOI 10.1016/j.apsoil.2004.04.004

ZICSI, Andiodrilus. Determination of number and size of sampling unit for estimating lumbricid populations of arables soils. *Progress in soil zoology*. 1962, p. 68-71

Sitographie

Agriculture biologique. Dans : *MAPAQ* [en ligne]. [s. d.]. [Consulté le 20 mars 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Production/agriculturebiologique/Pages/alimentsbio.aspx>

Atlas climatiques du Québec - Observations quotidiennes [en ligne]. [s. d.]. [Consulté le 17 avril 2019]. Disponible à l'adresse : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees/OQcarte.asp>

ECOLOGICAL AGRICULTURE PROJECT. *La culture biologique du soya* [en ligne]. [s. d.]. [Consulté le 30 avril 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.eap.mcgill.ca/agrobio/ab340-01.htm>

CARTV. *Agriculture biologique : historique et fondement* | *CARTV* [en ligne]. [s. d.]. [Consulté le 17 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.cartv.gouv.qc.ca/agriculture-biologique-historique-fondement>

ICI.RADIO-CANADA.CA, Zone International-. Toujours plus d'affamés dans le monde en 2019 | Les cartes week-end. Dans : *Radio-Canada.ca* [en ligne]. [s. d.]. [Consulté le 18 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1139163/faim-malnutrition-monde-famine-yemen-sud-soudan-nigeria>

Indicateurs et évaluation de la santé des sols du monde | *Portail d'information sur les sols* | *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture* [en ligne]. [s. d.]. [Consulté le 18 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/indicateurs-et-evaluation-de-la-sante-des-sols-du-monde/fr/>

Institut de la Statistique du Québec. *Institut de la statistique du Québec* [en ligne]. [s. d.]. [Consulté le 29 avril 2019]. Disponible à l'adresse : <http://www.stat.gouv.qc.ca/>

Institut de la Statistique du Québec. *Superficie des grandes cultures, rendement à l'hectare et production, par région administrative, Québec, 2018* [en ligne]. [s. d.]. [Consulté le 29 avril 2019]. Disponible à l'adresse : http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/grandes-cultures/gc_2018.htm

IRDA. Cartes thématiques. Dans : *IRDA* [en ligne]. [s. d.]. [Consulté le 29 avril 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.irda.qc.ca/fr/services/protection-ressources/sante-sols/information-sols/cartes-thematiques/>

MINNESOTA UNIVERSITY. *Great Lakes Worm Watch: Methods, Calculating Earthworm Biomass* [en ligne]. [s. d.]. [Consulté le 11 mars 2019]. Disponible à l'adresse : http://greatlakeswormwatch.org/research/methods_worms_biomass.html

Portail Bio Québec [en ligne]. [s. d.]. [Consulté le 29 avril 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.portailbioquebec.info/>

Annexes

Annexe.1: version anglaise : « Assesment of soil health by earthworm bio indicator on intensive organic farms in Quebec ».

Table of contents

I. Introduction.....	1
1. Organic intensive crop farming in Québec	1
2. Improvement and preservation of soil health : a major agricultural issue	1
3. Earthworm : a bio indicator of soil health	2
4. Objectives of the project and of the internship	3
II. Materials and methods.....	3
1. Studied farms	3
2. Experimental design	4
3. Earthworm sampling and identification.....	4
4. Dataset construction and statistical method.....	4
III. Results and discussion	4
1. General earthworm data presentation	4
2. Univariate analysis of the cultural practices and the pedoclimatic context on earthworms.....	5
3. Multivariate analysis : the impacts of cultural practices and pedoclimatic context on earthworm populations	5
IV. Conclusion	6

I. Introduction

Globally, the green revolution was associated with a wide use of chemical inputs allowing an increase of the yields and productivity ; What are the consequences ? Since the 80's we have observed a general decrease of the efficiency and resilience of the soils (*Datta et al. 2016*).

Modern farming techniques, coupled with intensive management of arable land and climate change have caused deep degradation of ecosystems including a significant decline in biodiversity and soil health (*Beketov et al. 2013 ; Singh 2018*).

1. Organic intensive crop farming in Québec

The organic crop productions in Québec are subject to a regulation prohibiting especially the use of chemicals and GMO. The goals of a sustainable agriculture encouraged the public and private policies to promote environmental and soil friendly agricultural practices (*CARTV 2018 ; MAPAQ 2017 ; ONGC CAN/CGSB-32.310 2015 ; ONGC CAN/CGSB-32.311 2015*).

The large scale crop farming is mainly associated to maize, soybean and cereals productions. In 2018, organic crops represented 2.8% of the million hectares dedicated to this type of crop in Canada. Furthermore these crops are central in economic and environmental issues (*CARTV ; Institut de la statistique du Québec ; Portail Bio Québec ; Sall et al. 2015*).

Intensive crop systems, even organic, pose a long-term threat to soil conservation especially because of the use of conventional tillages and short rotations (*Ecological agriculture project 1991*).

2. Improvement and preservation of soil health : a major agricultural issue

The soil is a dynamic living support for the productions, it allows the maintenance of the environmental quality (*Doran 2002 ; Doran and Parkin 1994*).

The notion of soil health/quality has evolved since the 80's, which only evoked a productivist dimension, towards the integration of spatio-temporal sustainability. So in this study we consider that soil health can be defined as : The capacity of a soil to function within the boundaries of an ecosystem to support a culture, maintain environmental quality and promote plant and animal (including human) health (*Acton and Gregorich 1995 ; Bünemann et al. 2018 ; Doran 2002 ; Drobnick et al. 2018 ; Haberern 1992 ; Mausel 1971*).

The goals of sustainable agriculture emphasize the need to maintain or improve soil health and therefore to promote the resilience of the systems (*Kibblewhite et al. 2008 ; Pankhurst et al. 1997*).

Soil health can be assessed using 3 types of indicators : the chemical and physical indicators report on fertility and soil structure and the biological indicators provide information on the biological functioning of soils (*Champagne and Gauthier 2017 ; FAO, Ivask et al. 2007*).

3. Earthworm : a bio indicator of soil health

Earthworms play a major role in soils. They are involved in the chemical and physical dynamic of the soils, especially with the organic matter degradation and the improvement of the soil structure (*Bouché 1977 ; Jones et al. 1994 ; Pelosi 2008 ; Pérès et al. 1998 ; Singh 2018 ; Reynolds 1977*).

A good indicator of soil health must report for the physical, chemical and biological parameters, it must be sensitive to climatic and cultural practices variations and easily measurable (*Doran and Parkin 1994, 1996*).

The earthworms seem, as such, to be a good bio indicator and help to understand the improvement or degradation of the soil health (*Ivask et al. 2007*).

According to *Bouché 1977* and *Reynolds 1977*, it's possible to distinguish 3 main groups that differ in their functioning, and their influence on soil properties :

- **Epigeic** are present on the surface and associated to the chemical soil dynamic with the degradation of rich organic matter.
- **Anecic** form vertical galleries and have a role in the chemical soil mix and also the physical dynamic with an increase of the macroporosity.
- **Endogeic** are geophages and form horizontal galleries, they are associated to the physical soil dynamic such as water filtration and an increase of the macroporosity.

In the province of Québec there are 18 species with different life cycles (8 endogeic, 8 epigeic and 2 anecic) all European (*Reynolds 2018*).

In cultivated environment the earthworm abundance is between 50 and 400 i/m², the fresh biomass vary between 30 and 100 g/m² (*Lavelle and Spain 2001 ; Lee 1985 ; Pelosi 2008 ; Smeaton et al. 2003*).

Earthworm communities are sensitive to climatic and pedological context and also to the specificity of the cultural practices.

The climatic context will impact the temperature and humidity of the soils, 2 limiting parameters for earthworms development (*Edwards and Bohlen 1996 ; Hackenberger 2014*).

The pedological context and more precisely the physics, chemistry and biology of a soil can have an influence on the different communities of earthworms. So it's important to have a look at several parameters such as : the pH, the texture, the soil humidity, the soil temperature, the rate of organic matter, the compaction and their impact on earthworms (*Bouché 1977 ; Cluzeau 1992 ; Paoletti 1999 ; Pelosi 2008 ; Singh 2018*).

Cultural practices have an effect on soil properties and so on earthworms. It's possible to emphasize the benefits of certain practice for earthworms. The different practices haven't the same influence on earthworm and their diversity. The intensity and frequency of conventional practices (tillage, monocrops, chemicals) have generally bad effects on earthworms communities. On the contrary a good gestion of the organic enrichment (greem manure, animal waste), and of the type of crops in a diversified rotation. The species and groups of earthwroms do not react in he same way to the perturbation associated to the pratices, the endogeics appear to be the most suitable (*Abail and Whalen 2018 ; Curry and Byrne 1997 ; Edwards and Bohlen 1996 ; Fragoso et al. 1997 ; Ivask et al. 2007 ; Lofs-Holmin 1983 ; Pelosi et al. 2009 ; Poaletti 1999 ; Roarty et al. 2017 ; Schmidt et al. 2003*).

4. Objectives of the project and of the internship

The project aims at to study the impact of the pedoclimatic context and the agricultural practices on the soil health in large scale crops. More precisely, if a good management of the enrichment (green manure and animal waste), and the integration of cereals in the intensive rotation maize, soybean makes it possible to compensate the conventional tillage use in organic farming.

As part of my internship this study of soil health is made by the sampling of the bio indicator earthworm, and an analysis related to the abundance, the biomass, and the species diversity.

II. Materials and methods

1. Studied farms

The project brings together 11 Québec farms (distributed in different regions) that were selected after a call for application. The two main criteria of selection were the organic management and the intensive crop production ; that is to say most often a 3 years intensive rotation with maize, soybean and cereal or green pea.

The specificity of the farms depends on : the pedoclimatic context and on the practices. The diversity of practices results in the intensity and frequency of tillage, of green and/or animal enrichment, of the use of cover crops.

2. Experimental design

For the 11 farms of the project, 3 fields were identified : a field of maize, a field of soybean and a field of cereal or green pea. For each fields the sampling is done at the level of 4 sub experimental representative units where earthworm, bulk density, temperature and humidity of the soil are measured. The sampling takes place in spring a favorable period to the earthworms activity.

3. Earthworm sampling and identification

Thus for each experimental unit is carried out : A physical extraction on a block of 25 cm of side and 20 cm of depth, then a manual sorting of the worms. And a chemical extraction with 30g.L⁻¹ mustard solution (« Amora fine et forte ») (*Andriuzzi et al. 2017 ; Bartlett et al. 2010 ; Bohlen et al. 1995*). The earthworms are kept in a 3.5% formol solution. In laboratory earthworm species are identified and counted according to the work of *Reynolds 1977*. We also measure fresh and dry biomass after a passage of 48h in the dryer at 60°C.

4. Dataset construction and statistical method

Prior to the statistical study, the construction of the dataset for the 33 individuals (11 farms x 3 fields) is made from exchanges with the farmers, data from field documents and field sampling.

The statistical study is divided into two parts :

First of all, a simple study of the impact of several cultural practices and pedoclimatic particularities on the dynamic of earthworm communities, according to a Wilcoxon test : a non parametric mean comparison test for two unpaired samples.

In second time, multivariate models are built around response variables related to earthworms. To do this, we reduce the number of quantitative explanatory variables by grouping those that are close by the implementation of a PCA. Qualitative explanatory variables are also grouped according to the same principle with an MCA. Following this, several mixed models, with a farm random effect, are built and interpreted.

III. Results and discussion

1. General earthworm data presentation

The earthworm abundance and biomass from the sampling are representative of the cultivated area. In fact, we have found on average 100 i.m⁻² with a maximum of 400 i.m⁻²

(Lavelle and Spain 2001 ; Lee 1985 ; Pelosi 2008 ; Smeaton et al. 2003). Furthermore, the most represented earthworm group are the endogeic, these worms are usually more adapted to the anthropogenic pressure in cultivated areas, whereas the anecic and epigeic populations are generally low which confirms the sensitivity of these worms to the agricultural practices (Fragoso et al. 1997, Ivask et al. 2007).

2. Univariate analysis of the cultural practices and the pedoclimatic context on earthworms

-The important rate of soil organic matter tend to favorise the total abundance of earthworms with especially a lot of juvenile worms. The organic matter seems to be beneficial for renewal of earthworm populations. The endogeic group, geophagous earthworms, are limited by important rate of organic matter, it could explain the optimum rate of organic matter (4-5%) for an important species diversity influenced per the diversity of endogeic earthworms (Bouché 1977 ; Lavelle 1988 ; Pelosi 2008).

-Acid pH (<6,5) are not beneficial for the earthworms wich are more present and developed in neutral or slightly basic soil (Paoletti 1999).

-G1 soils are beneficial for total and juvenile earthworm abundances compared to G2 soils. G1 soils allow a better renewal, even if G1 and G2 soils are fine textures soils, this gap could be explain by the difference of practices or of soil properties (Singh 2018).

-The previous positive effect of fall cereal crops is important. In fact, we observe a better total and juvenile dry biomass the year after the use of a fall cereal. This positive effet is due to a favorable residue contribution in early spring. Fall cereals can play the role of green manures when they don't survive to the winter (Abail and Whalen 2018 ; Ashworth et al. 2017 ; Curry et al. 2002).

-A shallow average depth of tillage (0-5cm) between the Spring 2018 and 2019 has a significant positive effect on total and juvenile worm abundances. In addition, a low tillage frequency (1-3 practices) between Spring 2018 and 2019 has a significant positive effect on total, endogeic and juvenile worms abundances. A reduced tillage management is favorable for the renewal and the development of earthworms and more generally for soil conservation (Capowiez et al. 2009 ; Crittenden et al. 2014 ; Edwards and Bohlen 1996 ; Pelosi 2008).

3. Multivariate analysis : the impacts of cultural practices and pedoclimatic context on earthworm populations

The analysis by PCA and MCA allowed us to choose few explanatory variables and built 9 mixed models with farm random effect. In this part 4 models are analyzed.

First of all, we observed an effect of Spring 2018 tillage management, of Spring 2019 mean temperature and of the Spring 2019 type of fertilization on total and juvenile earthworm

abundance (M2 and M5). An intensive tillage management will have negative impacts on earthworm populations even after a period of one year, it is difficult to conclude on a long-term effect because an intensive tillage supposes, more often, a regularity (*Crittenden et al. 2014 ; Edwards and Bohlen 1996*). The average spring temperature has a direct effect on soil temperatures in the short term, so high temperatures will favor warm soils in the spring, and also favorable conditions for the development of earthworms (*Lee 1985 ; Pelosi 2008 ; Singh 2018*). Furthermore, we acknowledge and effect of the 2018 cover crops management and of the soil classes on juvenile dry biomass (M8). In fact, we can see a benefit of sands and clays on juvenile biomass but there is a variability which limit the interpretation (*Reeleder et al. 2006 ; Singh 2018*). Albeit, we observed a positive effect of the conserved or cut relay crops. This is due to beneficial residue with a good C/N ratio for earthworms, so favorable to their renewal (*Abail and Whalen 2018 ; Ashworth et al. 2017 ; Curry et al. 2002*). To finish, we observed an effect of the soil type and of the Spring 2019 fertilization type on endogeic dry biomass (M9). In fact, clay-silt soils are beneficial compared to sands or loams, but there is a variability of endogeic dry biomass among the diversity of fine texture soil (*Reeleder et al. 2006 ; Singh 2018*). The use of swine manure appear to be favorable for the development of endogeic worms even if they are geophagous a short term enrichment is beneficial (*Bouché 1977 ; Paoletti 1999 ; Pelosi 2008 ; Van Vliet et al. 2007*). I could be interesting to have a look at the impact of the type of animal enrichment in long term, but the current data don't allow to conclude on this point.

IV. Conclusion

The global analysis of the pedoclimatic context and of the cultutal practices on earthworm populations allowed us to see that neutral or basical soils with an high rate of organic matter and a clay type are generally beneficial for the development and the renewal of earthworms. Furthermore, soil tillage management appears to be a limit for general earthworm abundance and biomass when it's used with intensivity. We haven't notified any effect of the type of animal enrichment but the use of fall cereals present several benefits a year after. The only use of earthworm as indicator of soil health is not reliable. In fact, it's necessary to have a look at a set of physical, chemical and biological indicators to conclude on the health of a soil and potentially develop decision support tools (*Stewart et al. 2018*).

Annexe.2 : Protocole d'échantillonnage de l'abondance et de la biomasse des vers de terre. Sampling protocol for earthworm abundance and biomass.

Earthworm Sampling

IN SITU

MATERIAL
Spade (20 cm depth, 25 cm wide)
Quadrat 25 cm x 25 cm
Trays
Flasks (4 per sample pit)
Mustard (« Amora fine et forte », at most 15 g per sample pit)
Formaldehyde
Marker
Watering can
Bottle of 1 liter
Water (500 ml per sample pit, 6 liter per farm)
Flate tweezers
Gloves

1. Choose the experimental units, 4 for each fields in order to have the best representativeness.

The earthworms will be sampling in two quadrats for each fields (Soya, Maize and Cereal). The sampling points are choosen to represent the field unit. So, for each farms, we will deal with 12 experimental units. To sample an experimental unit it takes approximately 30 to 45 min.

When the sampling units are define, it is important to limit disturbances (stamping) in the study site.

2. Preparation of the chemical solution for the extraction.

The solution done for the chemical extraction is a mix of 30 g of mustard (« Amora fine et forte ») in 1 liter of water.

At most we will use 500 ml of mustard solution per experimental unit, so we will use 6 liters of solution per farm (that is to say 90 g of mustard).

3. Physical extraction.

Place a quadrat of 25 x 25 cm on the study point. Use a spade to remove the square until a depth of 20 cm in one block. It is important to limit any disturbances such as vibration, in fact it could favorise earthworm escape.

Put the soil block in a tray to split up soil and earthworms.

Put the soil block in a tray to split up soil and earthworms.

4. Chemical extraction.

The solution is added in the hole. Add 250 ml if the infiltration is good add until 500 ml of mustard solution.

When the solution is added keep a glance at the hole to detect any earthworms who goes up.

5. During the action of the mustard solution, proceed to the hand pick of the earthworms of the soil block just extracted.

The earthworms found by the physical extraction are put in a flask (write the identification of the farm, the field, the experimental unit) with 3 % formaldehyde.

6. After 15 – 20 min have a look to the hole with the chemical solution.

The earthworms found are put in the same flask (or an other one if we want to discuss about the efficiency of the chemical and physical method) with 3 % formaldehyde.

IN LABORATORY

MATERIAL
Identification table
Aluminium dish
Sterilizer, 24h – 48h at 60°C
Binocular loupe
Marker
Balance

Abundance per group and species

1. Group Identification.

For each sampling (flask), count and separate the earthworms per group (Anecic, Epigeic, Endogeic).

2. Species identification.

In each group count and separate the earthworms per species.

Juvenil earthworms are hardly identifiable. They will be represented per a group « juvenil ».

(nb : The identification is based on the classification table (*Reynolds 1977*))

3. The Abundance is expressed in number of earthworms per m².

The number of earthworms related to a sample pit is multiplied per 16 ($0,25\text{ m} \times 0,25\text{ m} \times 16 = 1\text{m}^2$).

Fresh Biomass

1. For each species earthworms are wiped thanks to paper towel and weight.
2. The fresh biomass is expressed in g per m^2 .

The fresh biomass related to a sample pit is multiplied per 16 ($0,25\text{ m} \times 0,25\text{ m} \times 16 = 1\text{m}^2$).

Dry Biomass

1. Put the earthworms separate per sample pit and species in the sterilizer at 60°C during 24 to 48 hours to eliminate water. Weigh the earthworms ($\text{Mass}_{60^\circ\text{C}}$).
2. The dry biomass is expressed in g per m^2 .

The biomass related to a sample pit is multiplied per 16 ($0,25\text{ m} \times 0,25\text{ m} \times 16 = 1\text{m}^2$).

Annexe.3 : Fiche d'aide à l'identification des vers de terre du Québec. Sheet for the identification of Quebec earthworms.

Clé d'identification des vers de terre du Québec

L'identification des espèces de vers de terre se fait au regard des informations intrinsèques :

- La morphologie : Couleur, taille, type de soies, segmentation, disposition et structure des appareils reproducteurs
- La physiologie et les informations extrinsèques des vers étudiés peuvent donner des informations quant à l'espèce en jeux.

(Bouché 1977 ; Reynolds 2018 ; Reynolds 1977 ; Gates 1968).

Critères d'identification :

La taille, la couleur, la segmentation : ces informations sont facilement accessibles et très importantes pour l'identification des vers de terre

Le Groupe : Définir préalablement le groupe (Anécique, Épigé, Endogé) auquel appartient le ver à identifier permet de cibler les différentes espèces associées au groupe en question.

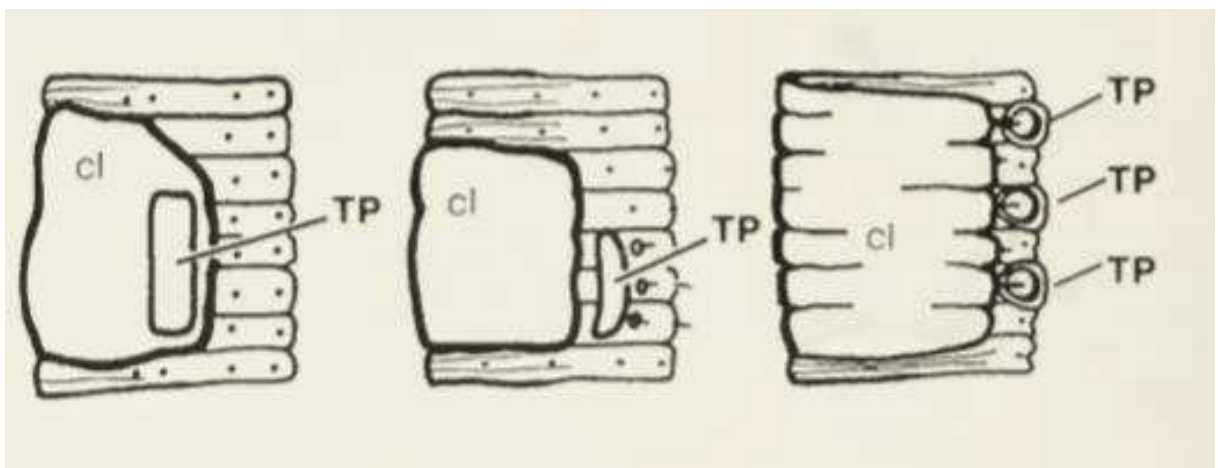
Le premier pore dorsal :

Repérer le segment au niveau duquel se situe le premier pore dorsal

Tubercules de puberté :

Les tubercules de puberté varient par leurs couleurs, formes, tailles, et dispositions et permettent de caractériser les espèces.

Elles se situent au niveau du clitellum, les repérer pour déterminer l'espèce à identifier.



Le pore mâle :

Ils jouent un rôle clé dans la reproduction des vers de terre en sécrétant les spermatozoïdes.

- Position : La position des pores mâle peut varier d'une espèce à l'autre. Repérer le(s) segment(s) au niveau du(des)quelles se situent le(s) pore(s) mâles.

Clitellum :

Le clitellum est à l'origine de la sécrétion des cocons qui contiennent les œufs.

- Position : La position du clitellum varie d'une espèce à l'autre en repérant la section de segments au niveau de laquelle se situe le clitellum cela donne des informations importantes pour l'identification des espèces.
- Forme : La forme du clitellum donne des informations sur l'espèce en question

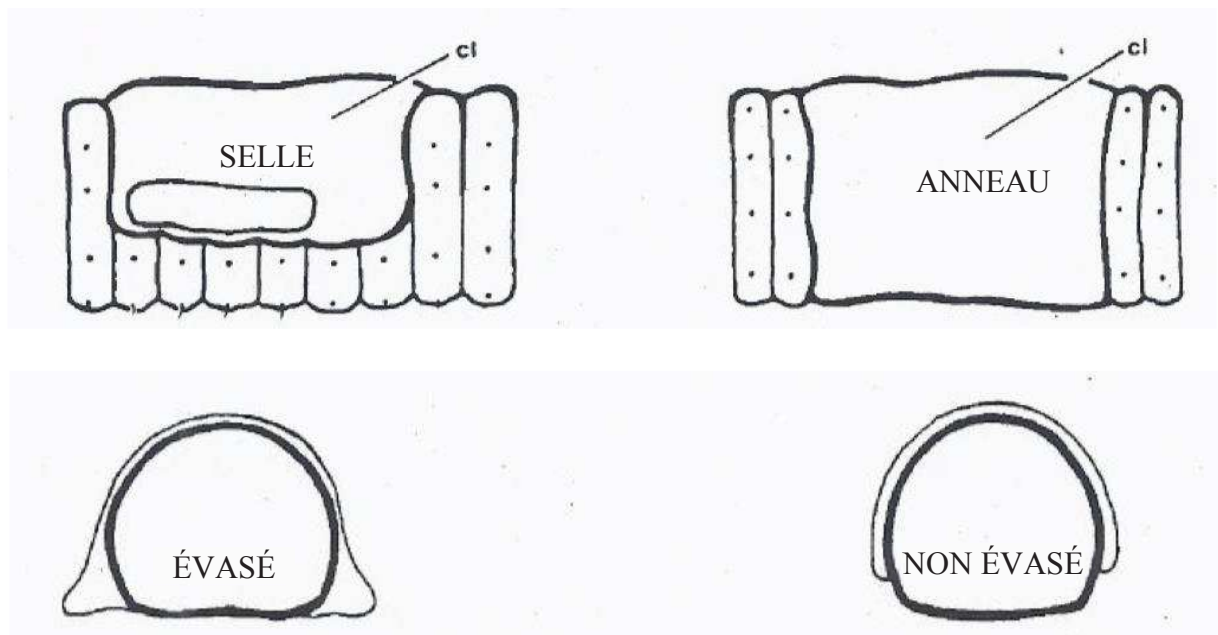


Fig. a et b : Forme du clitellum (*Adapté de Reynolds 1977*)

Type de soies :

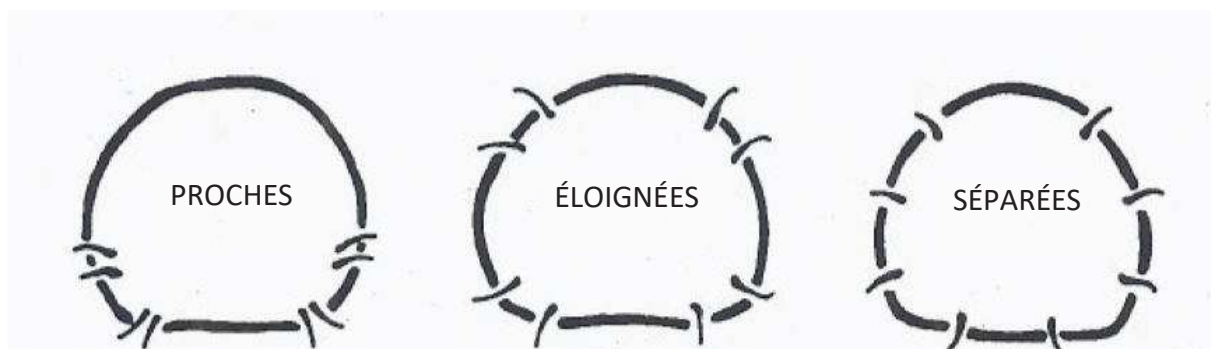


Fig. c : Disposition des soies (*Adapté de Reynolds 1977*)

Prostomium : Le prostomium correspond au premier segment. Sa forme donne des informations pour l'identification des espèces de vers de terre.

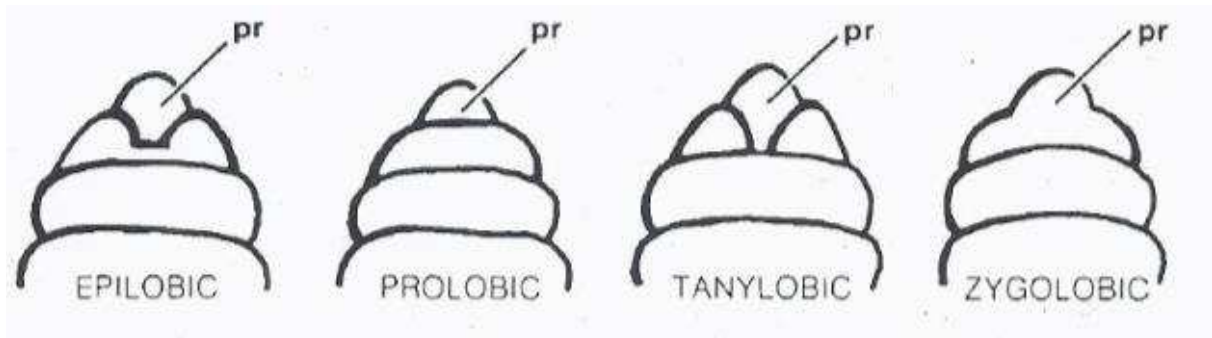


Fig. d : Les 4 types de prostomium (*Reynolds 1977*)

Les vers juvéniles ne possèdent pas de clitellum ce qui les rend très difficile à identifier. Ils constitueront une classe de vers juvéniles indépendante de l'espèce.

La couleur est un indicateur difficilement utilisable pour l'identification des vers, d'une part pour certaines espèces elle est variable d'un ver à l'autre, d'autre part la conservation des vers dans le formol impact la couleur des vers.

Epigés

Dendrobaena Octaedra

Groupe : Epigé

Longueur : 17 – 60 mm

Diamètre : 3 – 5 mm

Nombre total de segment : 60 - 100

Couleur : rouge, rouge foncé à violet

Premier pore dorsal : (4/5-6/7)

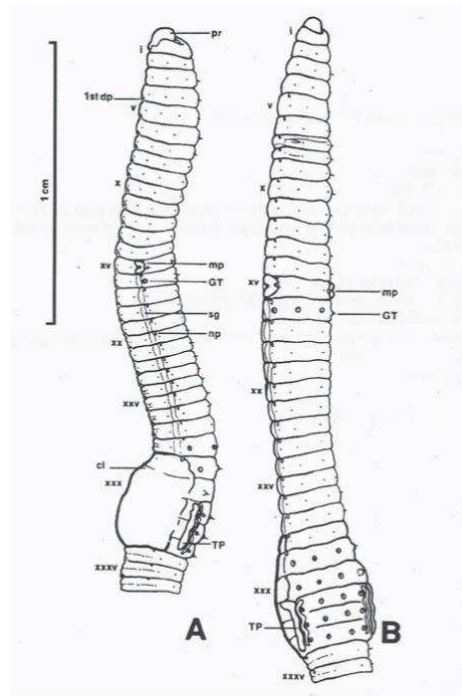
Pore mâle : (15)

Clitellium : selle, (27,28,29-33,34)

Tubercules de puberté : (31-33)

Type de soies : vraiment écartées voir séparées

Prostomium : Epilobique



Dendrodrilus Rubidus

Groupe : Epigé

Longueur : 20 – 90 mm

Diamètre : 2 – 5 mm

Nombre total de segment : 50 - 120

Couleur : rouge, plus foncé en dorsal

Premier pore dorsal : (5/6)

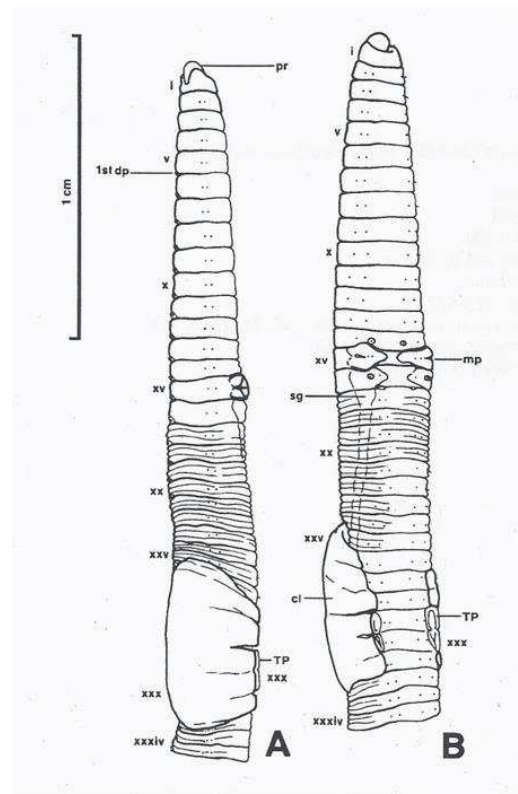
Pore mâle : (15,16)

Clitellium : selle, (26, 27-31, 32)

Tubercules de puberté : (28, 29-30)

Type de soies : éloignées

Prostomium : Epilobique



Eisenia Foetida

Groupe : Epigé

Longueur : 35 – 130 mm

Diamètre : 3 – 5 mm

Nombre total de segment : 80 -110

Couleur : Variable – Violet, rouge, rouge très foncé, sillons jaunes

Premier pore dorsal : (4/5)

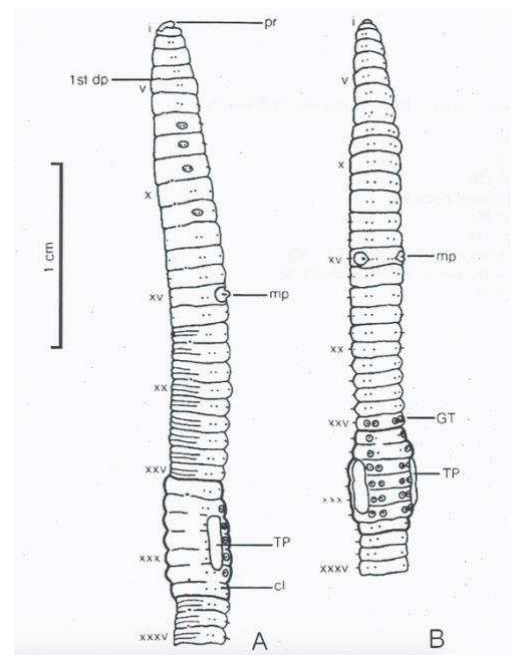
Pore mâle : (15)

Clitellium : Selle, (24, 25, 26-32)

Tubercules de puberté : (28-30)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Epilobique



***Eisenia Hortensis* (Gates 1968)**

Groupe : Epigé

Longueur : 35 – 50 mm

Diamètre : 3 – 5 mm

Nombre total de segment : 80 – 85

Couleur : Gradient bouche anus, rouge violacé

Premier pore dorsal : (5/6)

Pore mâle : (15)

Clitellium : selle, (26-32)

Tubercules de puberté : (30-32)

Type de soies : difficilement repérable, écartées, voir séparées

Prostomium : Epilobique

Eiseniella Tetraeda

Groupe : Epigé

Longueur : 30 – 60 mm

Diamètre : 2 – 4 mm

Nombre total de segment : 60 – 90

Couleur : Variable – marron foncé, verdâtre, sillons rougeâtre ou jaune

Premier pore dorsal : (4/5-5/6)

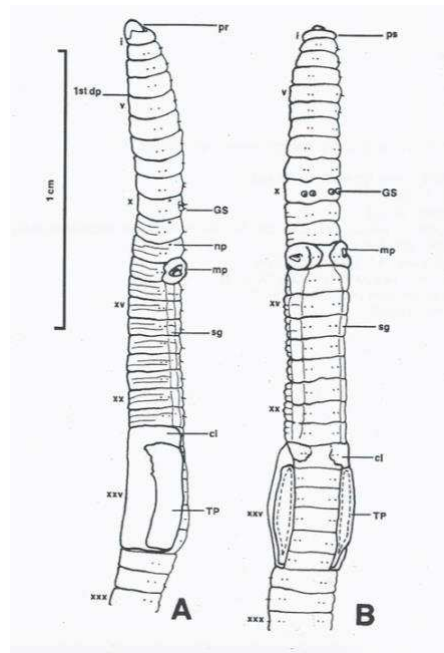
Pore mâle : (13 ou 15)

Clitellium : selle, (22, 23-26, 27)

Tubercules de puberté : (23-25, 26)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Epilobique



Lombricus Castaneus

Groupe : Epigé

Longueur : 30 – 50 mm

Diamètre : 3 – 5 mm

Nombre total de segment : 70 - 100

Couleur : hautement pigmenté, rouge noir, violet brun

Premier pore dorsal : (5/6-8/9)

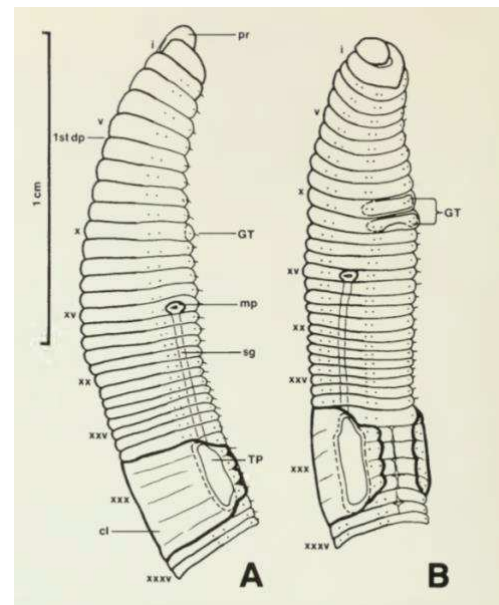
Pore mâle : (15)

Clitellium : selle, (28-33)

Tubercules de puberté : (29-32)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Tanylobique



Lumbricus Festivus

Groupe : Epigé

Longueur : 48 – 105 mm

Diamètre : 4 – 5 mm

Nombre total de segment : 100 - 143

Couleur : Brun rougeâtre

Premier pore dorsal : (11/12 ou 12/13)

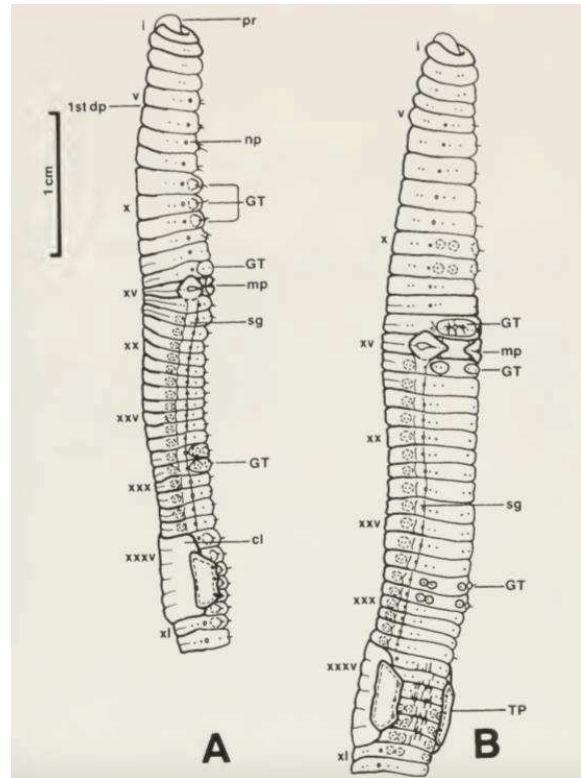
Pore mâle : (15)

Clitellium : selle, (34-39)

Tubercules de puberté : (35-37, 38)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Tanylobique



Lombricus Rubellus

Groupe : Epigé

Longueur : 50 – 150 mm

Diamètre : 4 – 6 mm

Nombre total de segment : 70 – 120

Couleur : rouge brun ou violet rouge,
jaune pâle en ventrale

Premier pore dorsal : (5/6-8/9)

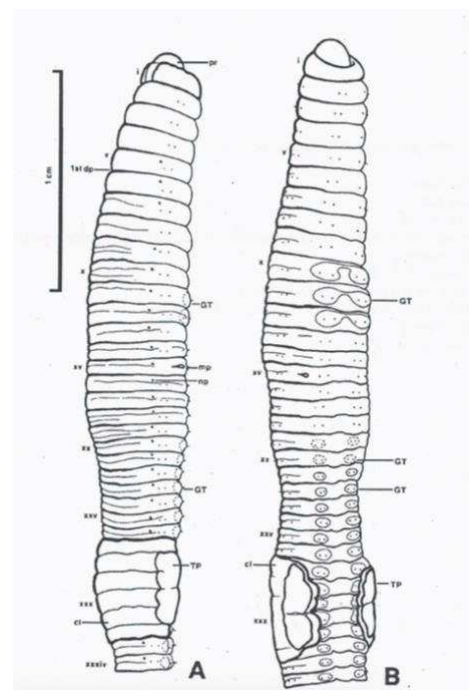
Pore mâle : (15)

Clitellium : selle, (26, 27-31, 32)

Tubercules de puberté : (28-31)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Tanylobique



Endogés

Octolasion Cyaneum

Groupe : Endogé

Longueur : 65 – 180 mm

Diamètre : 7 – 8 mm

Nombre total de segment : 140 – 158

Couleur : Bleu gris, blanchâtre

Premier pore dorsal : (11/12 ou 12/13)

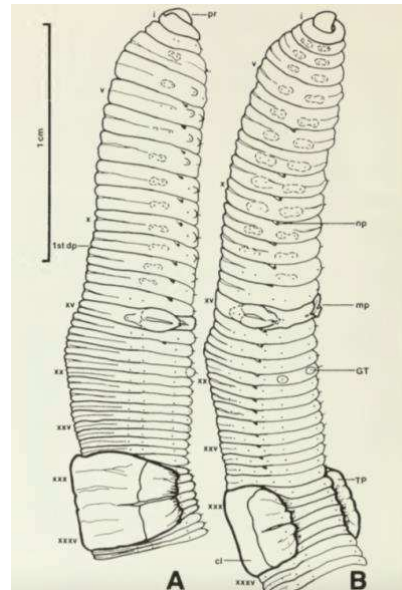
Pore mâle : (15)

Clitellium : selle, (29-34)

Tubercules de puberté : (30-33)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Epilobique



Octolasion Tyrtaneum

Groupe : Endogé

Longueur : 25 – 130 mm

Diamètre : 3 – 6 mm

Nombre total de segment : $75 - 150$

Couleur : Variable – blanchâtre, bleuté, rosé, grisé

Premier pore dorsal : (9/10-13/14 généralement 11/12)

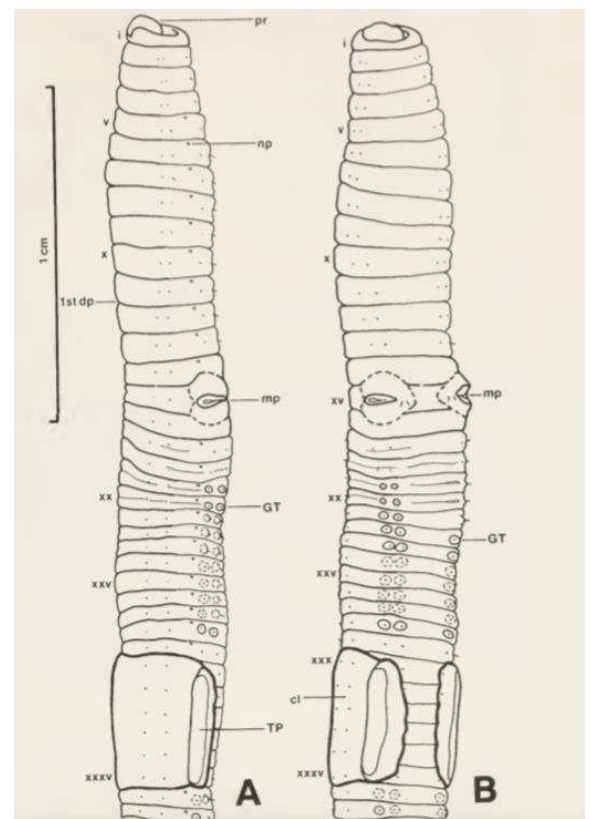
Pore mâle : (15)

Clitellium : selle, (30-35)

Tubercules de puberté : (31-34)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Epilobique



Satchellius Mammalis

Groupe : Endogé

Longueur : 24 – 41 mm

Diamètre : 1,5 – 3 mm

Nombre total de segment : 83 – 100

Couleur : Hautement pigmenté, rouge, violet

Premier pore dorsal : (4/5-6/7, très visible)

Pore mâle : (14-16, généralement 15)

Clitellium : selle, (31-36)

Tubercules de puberté : (33, 34)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Epilobique

Aporrectodea Turgida

Groupe : Endogé

Longueur : 60 – 85 mm

Diamètre : 3,5 – 5 mm

Nombre total de segment : 130 - 168

Couleur : non pigmenté

Premier pore dorsal : (12/13 ou 13/14)

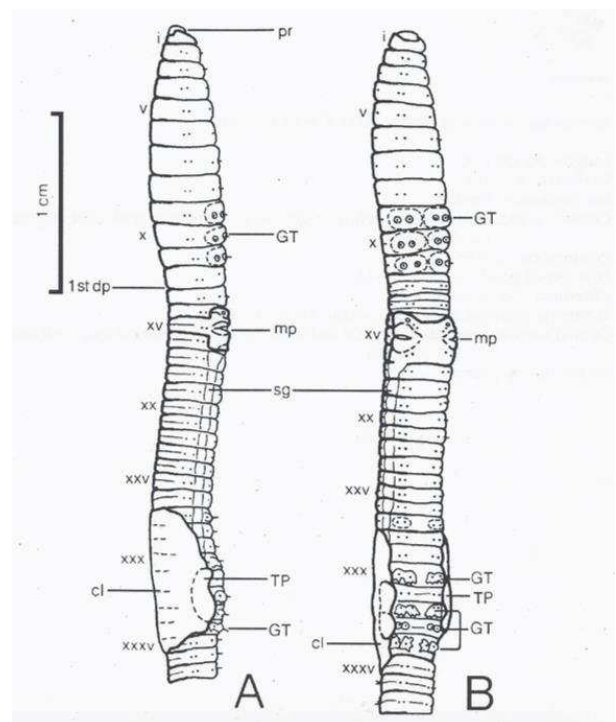
Pore mâle : (15)

Clitellium : selle, (27, 28, 29-34, 35)

Tubercules de puberté : (29-33)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Epilobique



Allolobophora Chlorotica

Groupe : Endogé

Couleur : Vert, Jaune, rose ou gris

Longueur : 30 – 70 mm

Diamètre : 3 – 5 mm

Nombre total de segments : 80 – 140

Premier pore dorsal : (4/5)

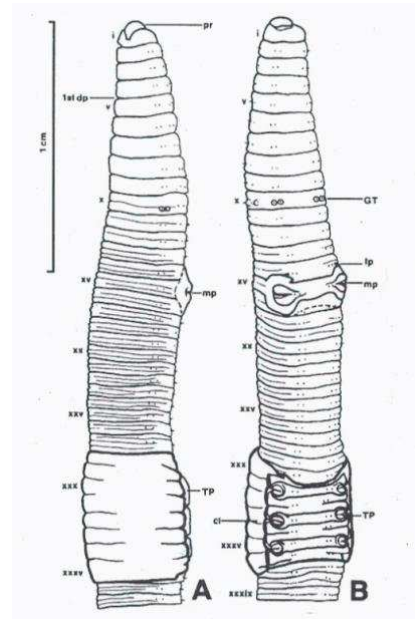
Pore mâle : (15)

Clitellum : selle, (28, 29-37)

Tubercules de puberté : (31, 33, 35)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Epilobique



Aporrectodea Rosea

Groupe : Endogé

Longueur : 25 – 85 mm

Diamètre : 3 – 5 mm

Nombre total de segments : 120 – 150

Couleur : non pigmenté, couleur rosé gris quand il est en vie, couleur blanche lorsqu'il est préservé dans le formol

Premier pore dorsal : (4/5)

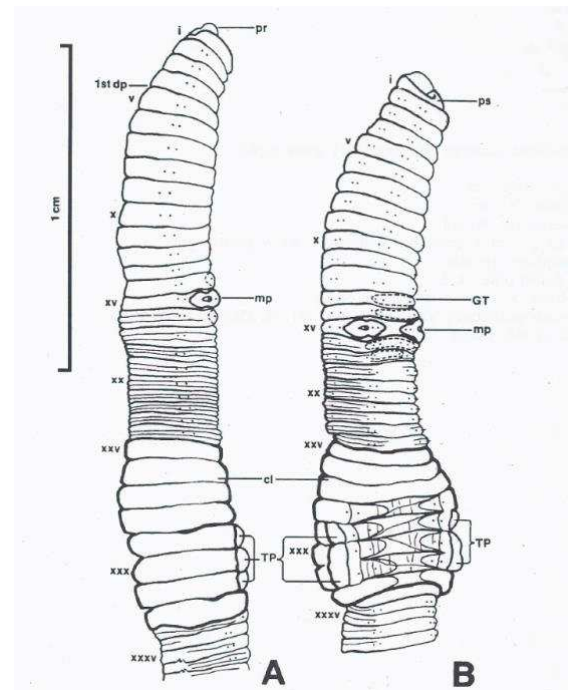
Pore mâle : (15)

Clitellum : évasé, (25, 26-32)

Tubercules de puberté : (29, 31)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Epilobique



Aporrectodea Trapezoides

Groupe : Endogé

Longueur : 80 – 140 mm

Diamètre : 3 – 7 mm

Nombre total de segment : 93 - 169

Couleur : Variable – Brun, rouge

Premier pore dorsal : (12/13)

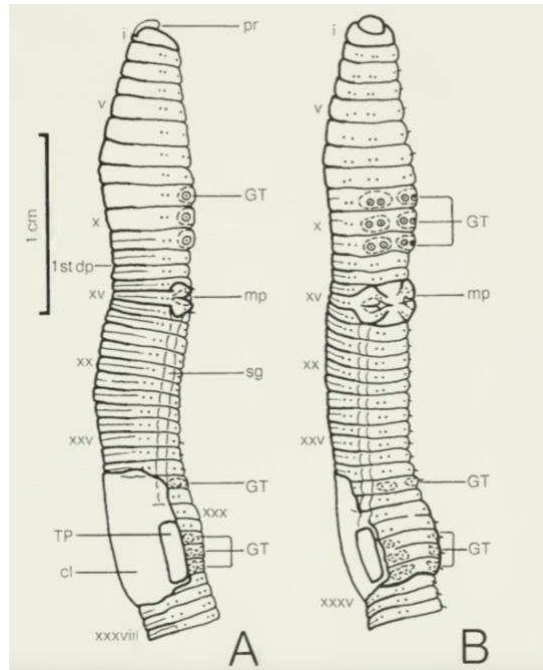
Pore mâle : (15)

Clitellium : Selle, (27, 28-33, 34)

Tubercules de puberté : (31-33)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Epilobique



Aporrectodea Tuberculata

Groupe : Endogé

Longueur : 90 – 150 mm

Diamètre : 4 – 8 mm

Nombre total de segment : 146 - 194

Couleur : non pigmenté

Premier pore dorsal : (11/12 ou 12/13)

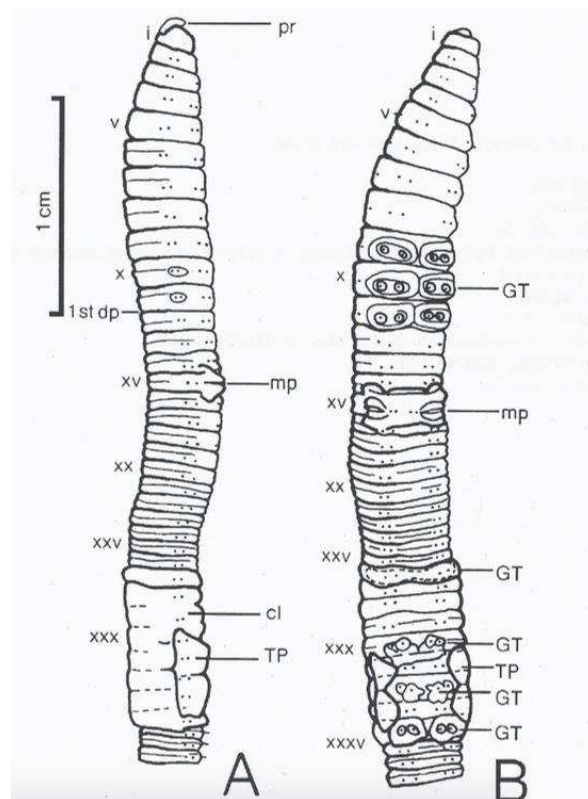
Pore mâle : (15)

Clitellium : Anneau, (27-34)

Tubercules de puberté : (30, 31-33, 34)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Epilobique



Anécique

Lumbricus Terrestris

Groupe : Anécique

Longueur : 90 – 300 mm

Diamètre : 6 – 10 mm

Nombre total de segment : 120 - 160

Couleur : Gradient bouche anus, hautement pigmenté, marron-rouge ou violet pour la partie dorsale et jaune orangé pour la partie ventrale

Premier pore dorsal : (7/8)

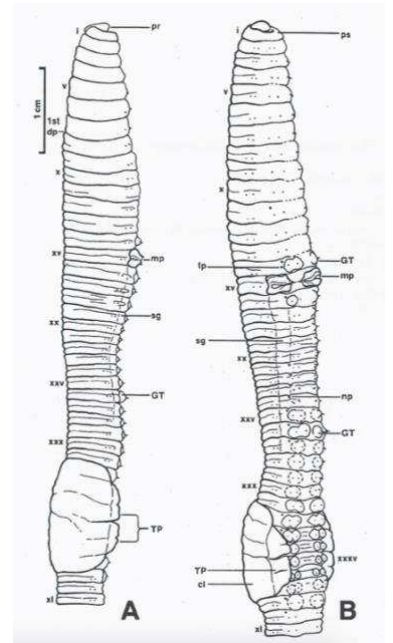
Pore mâle : (15)

Clitellium : selle, (31, 32-37)

Tubercules de puberté : (33-36)

Type de soies : rapprochées au milieu et écartées à la fin

Prostomium : Tanylobique



Aporrectodea Longa

Groupe : Anécique

Longueur : 90 – 150 mm

Diamètre : 6 – 9 mm

Nombre total de segment : 150 - 222

Couleur : Gradient bouche anus, Gris brun

Premier pore dorsale : (12/13)

Pore mâle : (15)

Clitellum : Anneau, (27, 28-34, 35)

Tubercules de puberté : (32-34)

Type de soies : rapprochées

Prostomium : Epilobique

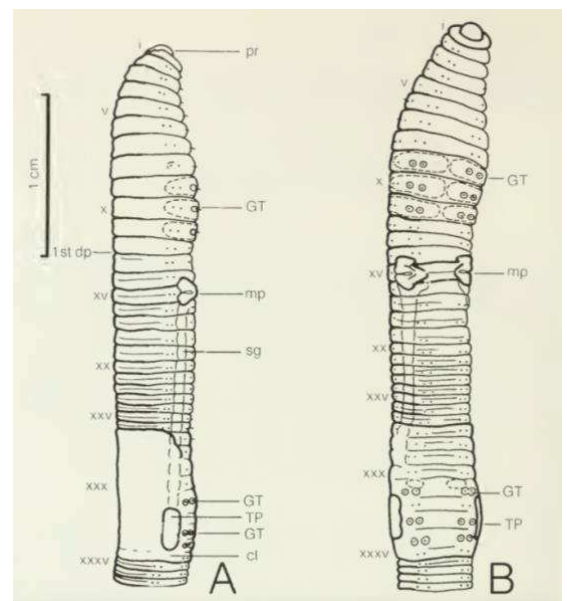


Tableau de référence des espèces de vers de terre du Canada :

Reference	Species	Group
1	<i>Dendrobaena octaedra (Reynolds 1977)</i>	Epigeic
2	<i>Dendrodrilus rubidus (Reynolds 1977)</i>	Epigeic
3	<i>Eisenia foetida (Reynolds 1977)</i>	Epigeic
4	<i>Eisenia hortensis (Gates 1968)</i>	Epigeic
5	<i>Lombricus castaneus (Reynolds 1977)</i>	Epigeic
6	<i>Eiseniella tetraeda (Reynolds 1977)</i>	Epigeic
7	<i>Lumbricus festivus (Reynolds 1977)</i>	Epigeic
8	<i>Lombricus rubellus (Reynolds 1977)</i>	Epigeic
9	<i>Allolobophora chlorotica (Reynolds 1977)</i>	Endogeic
10	<i>Aporrectodea rosea (Reynolds 1977)</i>	Endogeic
11	<i>Aporrectodea trapezoides (Reynolds 1977)</i>	Endogeic
12	<i>Aporrectodea tuberculata (Reynolds 1977)</i>	Endogeic
13	<i>Aporrectodea turgida (Reynolds 1977)</i>	Endogeic
14	<i>Octolasion cyaneum (Reynolds 1977)</i>	Endogeic
15	<i>Octolasion tyrtaneum (Reynolds 1977)</i>	Endogeic
16	<i>Satchellius mammalis (Reynolds 1977)</i>	Endogeic
17	<i>Aporrectodea longa (Reynolds 1977)</i>	Anecic
18	<i>Lumbricus terrestris (Reynolds 1977)</i>	Anecic
19	Juvéniles	

Annexe.4 : Fiche explicative du jeu de données. Explanatory document of the dataset.

Informations sur les variables du jeu de données GRAPPE BIO 2019

IDGRAPPE (identifiant des fermes et des champs par le projet)

MEHALD : Montérégie-Est, Ferme A
LAFRAP : Lanaudière, Ferme B
MOALGA : Montérégie-Ouest, Ferme C
MENORO : Montérégie-Est, Ferme D
CQARCH : Centre-du-Québec, Ferme E
CQSEAN : Centre-du-Québec, Ferme F
MOAGRO : Montérégie-Ouest, Ferme G
MALAMY : Mauricie, Ferme H
MOLONG : Montérégie-Ouest, Ferme I
MOANCE : Montérégie-Ouest, Ferme J
MEALRA : Montérégie-Est, Ferme K

1 : Maïs en 2019 [Soja en 2020, Céréale (ou Pois) en 2021]
2 : Soja en 2019 [Céréale (ou Pois) en 2020, Maïs en 2021]
3 : Céréale (ou Pois) en 2019 [Maïs en 2020, Soja en 2021]

IDferme (identification des fermes de manière anonyme pour le projet)

A : Ferme A
B : Ferme B
C : Ferme C
D : Ferme D
E : Ferme E
F : Ferme F
G : Ferme G
H : Ferme H
I : Ferme I
J : Ferme J
K : Ferme K

Région (Région Administrative de la ferme échantillonnée)

IDPAEF (identifiant du champ décrit dans le PAEF)

Date d'échantillonnage (Date du prélèvement des vers de terre et du sol jj/mm/aaaa)

Type de sol

A-Lo : Argile Lourde
A-Li : Argile Limoneuse
A : Argile
A-S : Argile Sableuse
L-Li-A : Loam Limono Argileux
L-A : Loam Argileux
L-S-A : Loam Sablo Argileux
L-Li : Loam Limoneux
L : Loam
L-S : Loam Sableux
Li : Limon
S-L : Sable Loameux
S : Sable
S-Li : Sable Limoneux
Li-A-S : Limono Argileux Sableux

Classe de sol (Classes (G1, G2, G3) déduites du triangle des textures)

G1 : Sols argileux
G2 : Sols loameux
G3 : Sols sableux

WpH (Valeur du pH eau du sol)

BpH (Valeur du pH tampon du sol)

MO (teneur en Matière Organique en %)

Classe MO (Groupe de classe de matière organique)

1 : teneur en matière organique $MO \leq 3\%$
2 : teneur en matière organique $3 < MO \leq 4\%$
3 : teneur en matière organique $4 < MO \leq 5\%$
4 : teneur en matière organique $5 < MO \leq 6\%$

P, K, Ca, Mg (teneur des différents éléments en kg/ha)

CEC (Capacité d'échange cationique en Meq/100g)

P (Teneur en P en %)

AA (Année de réalisation des analyses de sols décrites dans le PAEF)

Date BIO (Année de conversion en Régie Biologique)

Culture 2017, 2018, 2019 (Type de culture en 2017, 2018 et 2019)

M : Maïs

S : Soja

Ca : Céréale d'automne

Cp : Céréale de printemps

Pv : Pois vert

Hs : Haricot sec

Gm : mélange de Grains

Tr : Trèfle

Billon 2017, 2018, 2019(Culture sur Billon)

oui : billon pour le Maïs ou le Soja

non : absence de billon pour le Maïs ou le Soja

nonc : cultures non sujettes au billon (céréales, pois verts ...)

Semis 2019 (Culture semé ou non avant l'échantillonnage)

s : semé avant échantillonnage

ns : non semé lors de l'échantillonnage

Rdt 2018 (Rendement des cultures en t/ha respectivement en 2018)

Prairie / Fourrage (espèce de prairie et fourrage inclus dans la rotation)

oui : prairie ou fourrage dans la rotation

non : pas de prairie ou de fourrage dans la rotation

CC 2018 (Classification pour la culture de couverture en 2018)

On distingue différentes pratiques relatives aux cultures de couvertures :

-Le mode de semis : dérobé ou intercalaire (sous-semis).

-Les modalités de destruction de la culture de couverture : Labour ou Déchaumeur, conservation de la culture au champ après une ou plusieurs fauches pour la fertilisation, la culture sera récolté si elle passe l'hiver (pour les céréales d'automne).

0 : Absence de culture de couverture

1 : Culture de couverture dérobée détruite par un travail de sol de type labour ou déchaumeur

2 : Culture de couverture intercalaire détruite par un travail de sol de type labour ou déchaumeur

3 : Culture de couverture dérobée conservée (détruite par le gel ou fauché)

4 : Culture de couverture intercalaire conservé (détruite par le gel ou fauché)

5 : Céréale d'automne conservée et cultivée si elle passe l'hiver

Type CC 2018 (Type de culture de couverture implanté respectivement en 2018)

Tr : Trèfle rouge
Ti : Trèfle incarnat
Th : Trèfle huia
Tm : Trèfle méliot
Tl : Trèfle ladina
Rg : Ray-grass
Pf : Pois fourragé
Sga : Seigle automne
non : pas de culture de couverture

Semis CC 2018 (Type d'implantation de la culture de couverture respectivement en 2018)

I : Intercalaire
Db : Dérobée
Cp : Culture principale (céréale d'automne)

Destruction CC 2018 (Mode de destruction de la culture de couverture respectivement en 2018)

L : Labour
D : Déchaumeur
non : la culture n'est pas détruite (action du gel ou culture conservée si elle passe l'hiver)

Waut et Wprn 2017, 2018, 2019 (Classification pour le travail du sol saisonnier de 2017 à 2019)

Les groupes de travail de sol sont définis en fonction :

-Du type de travail de sol : Absence de travail de sol, vibroculteur ou herse à disque, déchaumeur ou chisel, sous soleuse, labour.

-De la fréquence : 1, 2 ou 3 passage.

-De la profondeur : 5 – 10 cm, 10 – 15 cm, 15 – 20 cm, >=20 cm

L'information est conservée pour chaque saison (automne et printemps), ce qui nous permet d'avoir un regard sur la fréquence des pratiques de travail de sol au cours des années.

0 : pas de travail de sol

1 : Un passage cultivateur, vibroculteur ou herse à disque à 5 – 10 cm

2 : Un passage de déchaumeur ou labour à 5 – 10 cm

3 : >=2 passages de cultivateur, vibroculteur ou herse à disque à 5 – 10 cm

4 : Un passage de déchaumeur, scalpeur ou labour à 10 – 15 cm

5 : Un passage de chisel >= 15 cm

6 : Un passage de déchaumeur ou labour à 15 – 20 cm

7 : Un passage de sous soleuse, déchaumeur ou labour à >= 20 cm

Type Waut et Wprn 2017, 2018, 2019 (Type de travail de sol respectivement à l'automne et au printemps 2017, 2018 et 2019)

L : Labour
D : Déchaumeur
V : Vibroculteur
Hd : Herse à disque
SS : Sous Soleuse
C : Chisel
Sca : Scalpeur
Cu : Cultivateur
non : pas de travail de sol

Prof Waut et Wprn 2017, 2018, 2019 (Profondeur de travail de sol respectivement à l'automne et au printemps 2017, 2018 et 2019)

Freq Waut et Wprn 2017, 2018, 2019 (Fréquence de travail de sol respectivement à l'automne et au printemps 2017, 2018 et 2019)

Feq1819 (Fréquence de passage de sol entre le printemps 2018 et le printemps 2019, nombre totale de passage que ce soit pour la préparation du sol ou pour le désherbage)

Prof1819 (Profondeur moyenne de travail de sol en cm entre le printemps 2018 et le printemps 2019)

Herse 2018 et 2019 (Nombre de passage de herse respectivement en 2018 et 2019)

Peigne 2018 et 2019 (Nombre de passage de peigne respectivement en 2018 et 2019)

Sarcleur 2018 et 2019 (Nombre de passage de sarcleur respectivement en 2018 et 2019)

Houe 2018 et 2019 (Nombre de passage de houe respectivement en 2018 et 2019)

Cultivateur 2018 et 2019 (Nombre de passage de cultivateur respectivement en 2018 et 2019)

Fq1819 (Nombre de travail mécanique (travail de sol et désherbage) entre le printemps 2018 et le printemps 2019)

Amprn et Amaut 2017, 2018, 2019 (Type d'amendements réalisé respectivement au printemps et à l'automne 2017, 2018 et 2019)

Le groupement relatif aux pratiques de fertilisation organique sont définis en fonction du type de fertilisant utilisé :

Fumier de poule, Lisier de poule, Fumier de porc, Lisier de porc, Fumier de dinde.

L'information est conservée pour chaque saison (automne et printemps), ce qui nous permet d'avoir un regard sur la fréquence des pratiques d'enrichissement animale au cours des années.

Fpl : Fumier de poule

Fpc : Fumier de porc

Fd : Fumier de dinde

Lpl : Lisier de poule

Lpc : Lisier de porc

Ld : Lisier de dinde

non : pas d'amendements

QTprn et QTaut 2017, 2018, 2019 (Quantité d'amendement, en t/ha, épandu respectivement au printemps et à l'automne 2017, 2018 et 2019)

AmNprn et AmNaut 2017, 2018, 2019 (Dose d'N, en t/ha, appliquée respectivement au printemps et à l'automne 2017, 2018 et 2019)

AmPO2prn et AmPO2aut 2017, 2018, 2019 (Dose de PO2, en t/ha, appliquée respectivement au printemps et à l'automne 2017, 2018 et 2019)

AmK2Oprn et AmK2Oaut 2017, 2018, 2019 (Dose de K2O, en t/ha, appliquée respectivement au printemps et à l'automne 2017, 2018 et 2019)

Pt juin2018 → Pt mai2019 (Pluviométrie totale mensuelle en mm pour chaque mois de juin 2018 à mai 2019)

Tmoy juin2018 → Tmoy mai2019 (Température moyenne mensuelle en °C pour chaque mois de juin 2018 à mai 2019)

Pt juin>15ans → Pt mai>15ans (Pluviométrie totale mensuelle en mm, moyenne mensuelle issus d'une collecte de données sur au moins 15 ans)

Tmoy juin>15ans → Tmoy mai>15ans (Température moyenne mensuelle en °C, moyenne mensuelle issus d'une collecte de données sur au moins 15 ans)

Pt ETE2018, Pt AUT2018, Pt HIV2019, Pt PRN2019 (Pluviométrie totale saisonnière en mm, sur l'année 2018-2019 de l'été 2018 au printemps 2019)

ETE2018 : juin, juillet et août 2018
AUT2018 : septembre, octobre et novembre 2018
HIV2019 : décembre 2018, janvier et février 2019
PRN2019 : mars, avril et mai 2019

Tmoy ETE2018, Tmoy AUT2018, Tmoy HIV2019, Tmoy PRN2019 (Température moyenne saisonnière en °C, sur l'année 2018-2019 de l'été 2018 au printemps 2019)

ETE2018 : juin, juillet et août 2018
AUT2018 : septembre, octobre et novembre 2018
HIV2019 : décembre 2018, janvier et février 2019
PRN2019 : mars, avril et mai 2019

Pt ETE>15ans, Pt AUT>15ans, Pt HIV>15ans, Pt PRN>15ans (Pluviométrie totale saisonnière en mm, moyenne sur les saisons des 15 dernières années au moins)

Tmoy ETE>15ans, Tmoy AUT>15ans, Tmoy HIV>15ans, Tmoy PRN>15ans (Température moyenne saisonnière en °C, moyenne sur les saisons des 15 dernières années au moins)

Pt A2018-2019 (Pluviométrie totale en mm sur l'année 2018-2019 de juin 2018 à mai 2019)

Tmoy A2018-2019 (Température moyenne en °C sur l'année 2018-2019 de juin 2018 à mai 2019)

Pt A>15ans (Pluviométrie totale en mm, moyenne issus de données sur au moins 15 ans)

Tmoy A>15ans (Température moyenne en °C, moyenne issus de données sur au moins 15 ans)

AB (Abondance des vers de terre, en i/m², pour les différents groupes et les différentes espèces)

BMf (Biomasse fraîche des vers de terre, en g/m², pour les différents groupes et les différentes espèces)

BMs (Biomasse sèche des vers de terre, en g/m², obtenue après un passage à l'étuve à 60°C pour les différents groupes et les différentes espèces)

T 10 cm, 20cm (température de sols, en °C, mesurée à 10 et 20 cm de profondeur)

Da0-5cm, Da10-15cm (Densité apparente du sol, mesurée à 0-5 et 10-15 cm de profondeur)

H0-5cm, H10-15cm (Humidité pondérée du sol en %, mesurée à 0-5 et 10-15 cm de profondeur)

Annexe.5 : Présentation des résidus et de leur répartition pour les 9 modèles étudiés. Presentation of residuals and their distribution for the 9 studied models.

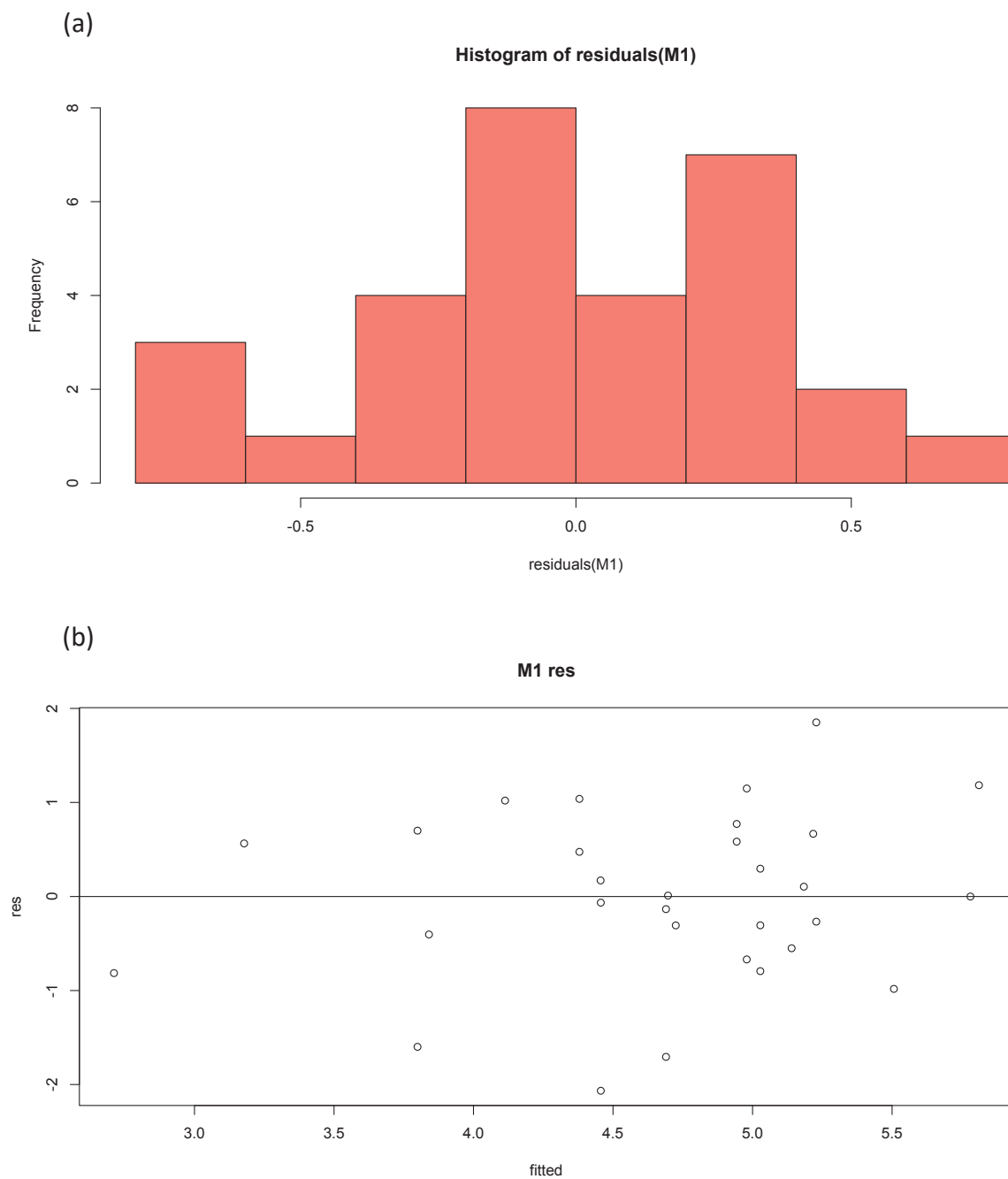
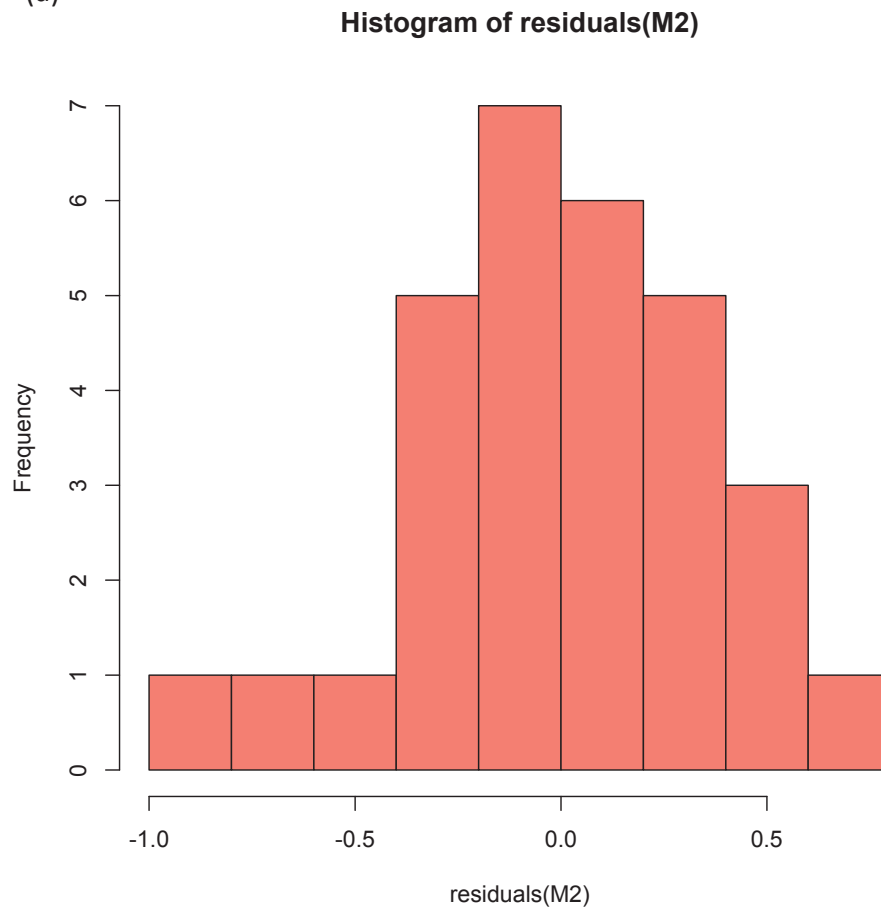


Figure A5.1 : Visualisation de la répartition (a) et de l'homogénéité (b) des résidus du modèle M1.
Visualization of the distribution and homogeneity of the M1 model residues.

(a)



(b)

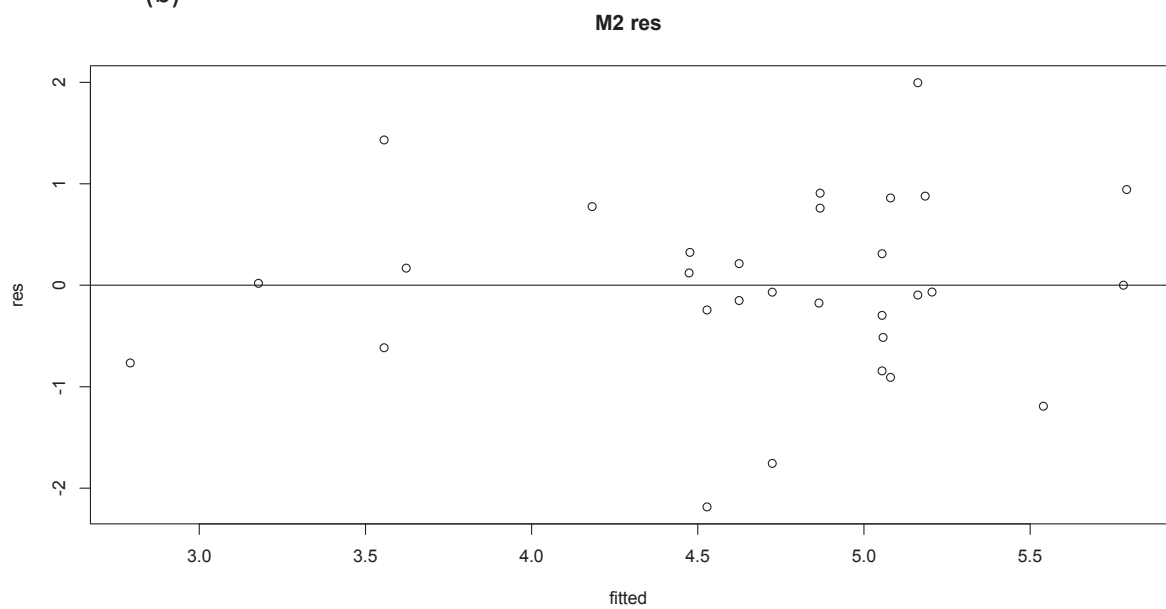
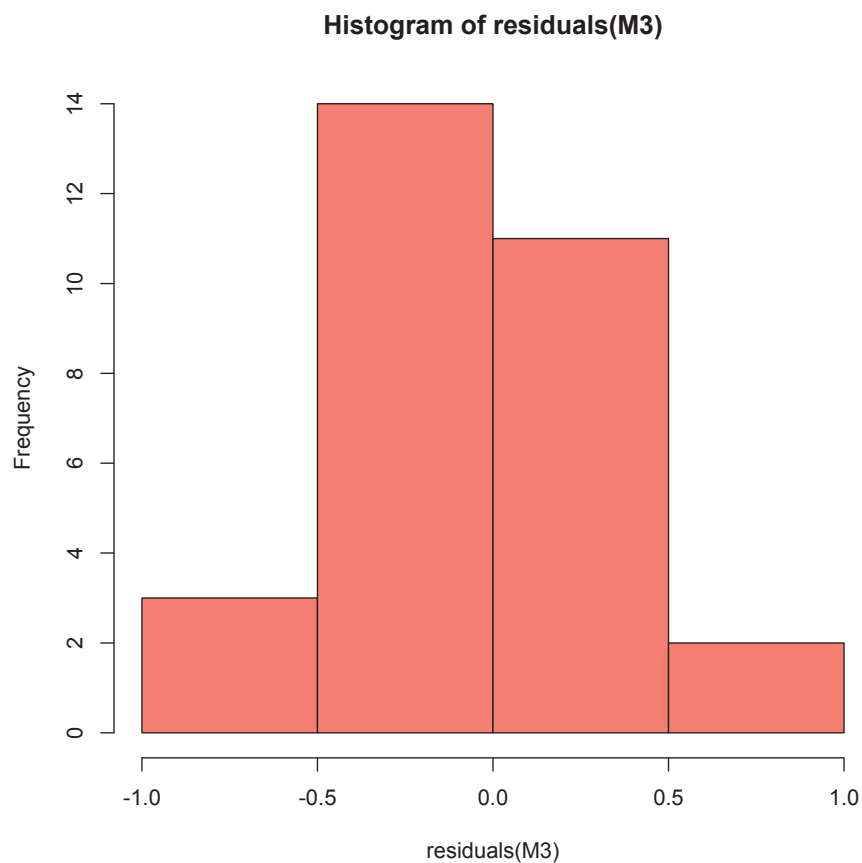


Figure A5.2 : Visualisation de la répartition (a) et de l'homogénéité (b) des résidus du modèle M2.
Visualization of the distribution and homogeneity of the M2 model residues.

(a)



(b)

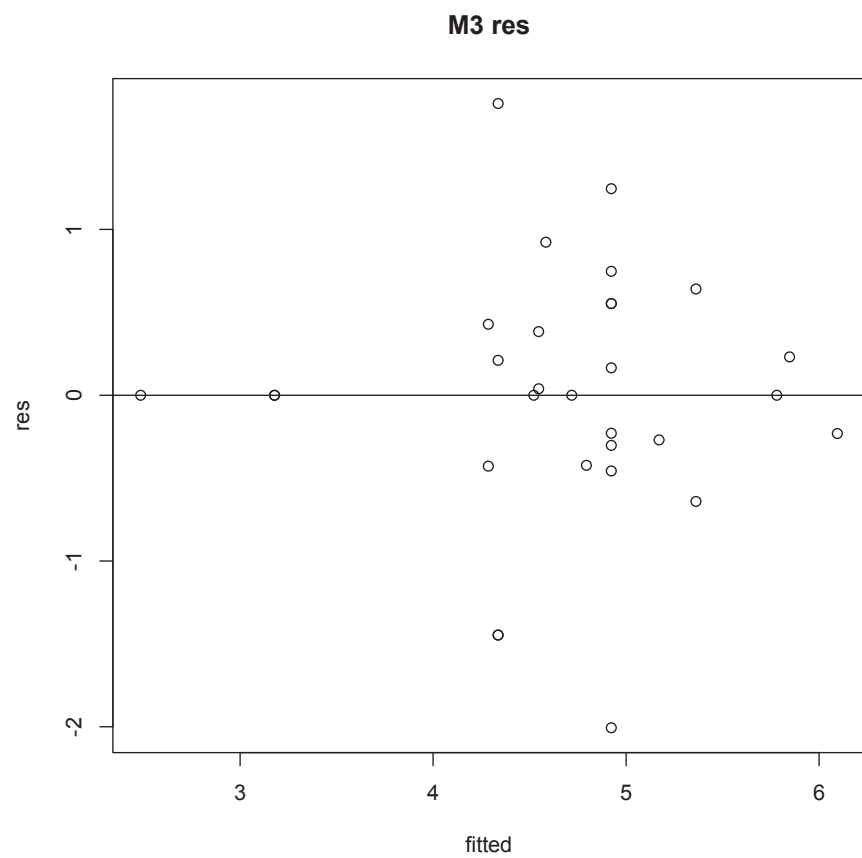
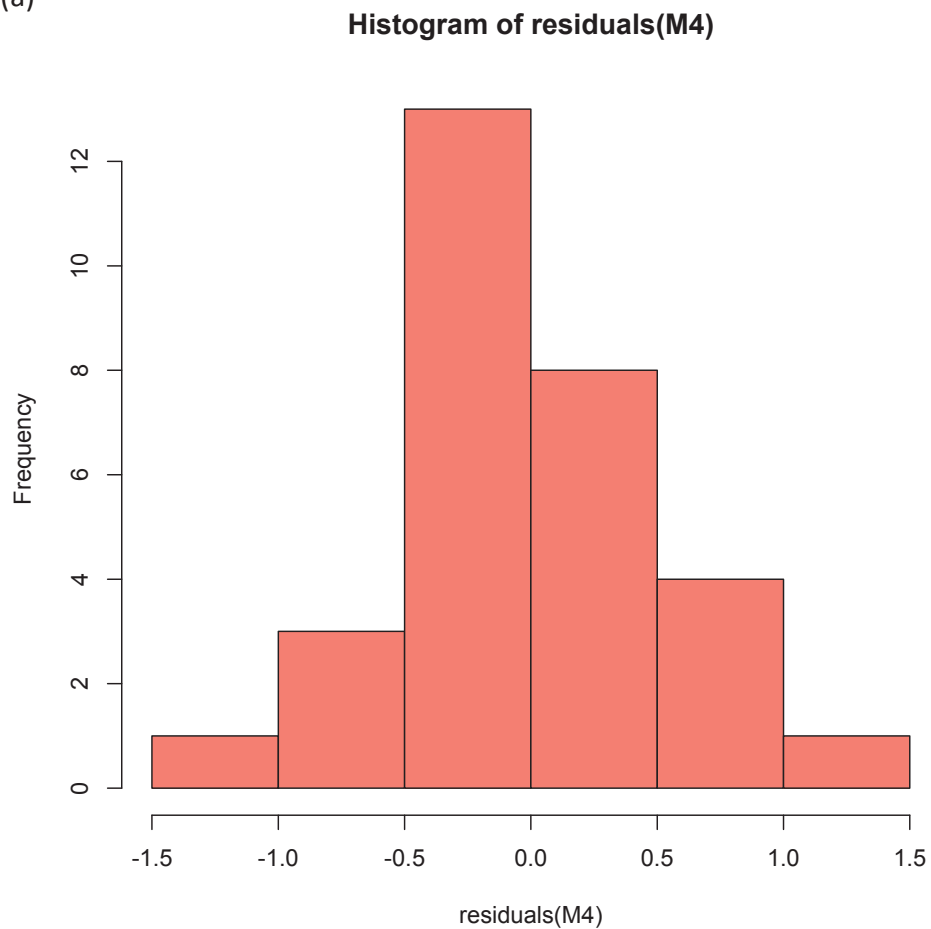


Figure A5.3: Visualisation de la répartition (a) et de l'homogénéité (b) des résidus du modèle M3.
Visualization of the distribution and homogeneity of the M3 model residues.

(a)



(b)

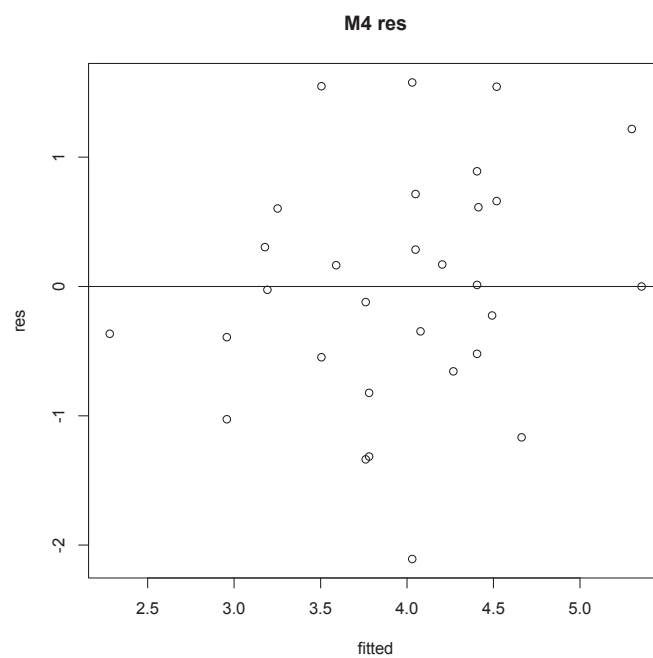


Figure A5.4 : Visualisation de la répartition (a) et de l'homogénéité (b) des résidus du modèle M4.
Visualization of the distribution and homogeneity of the M4 model residues.

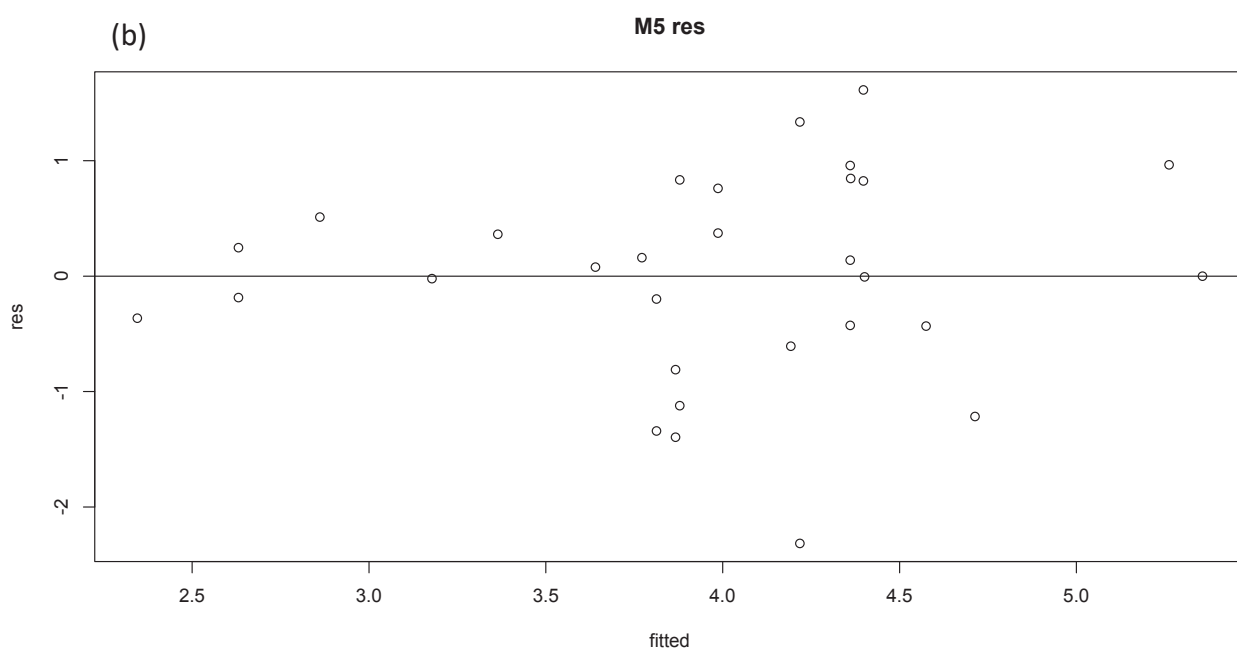
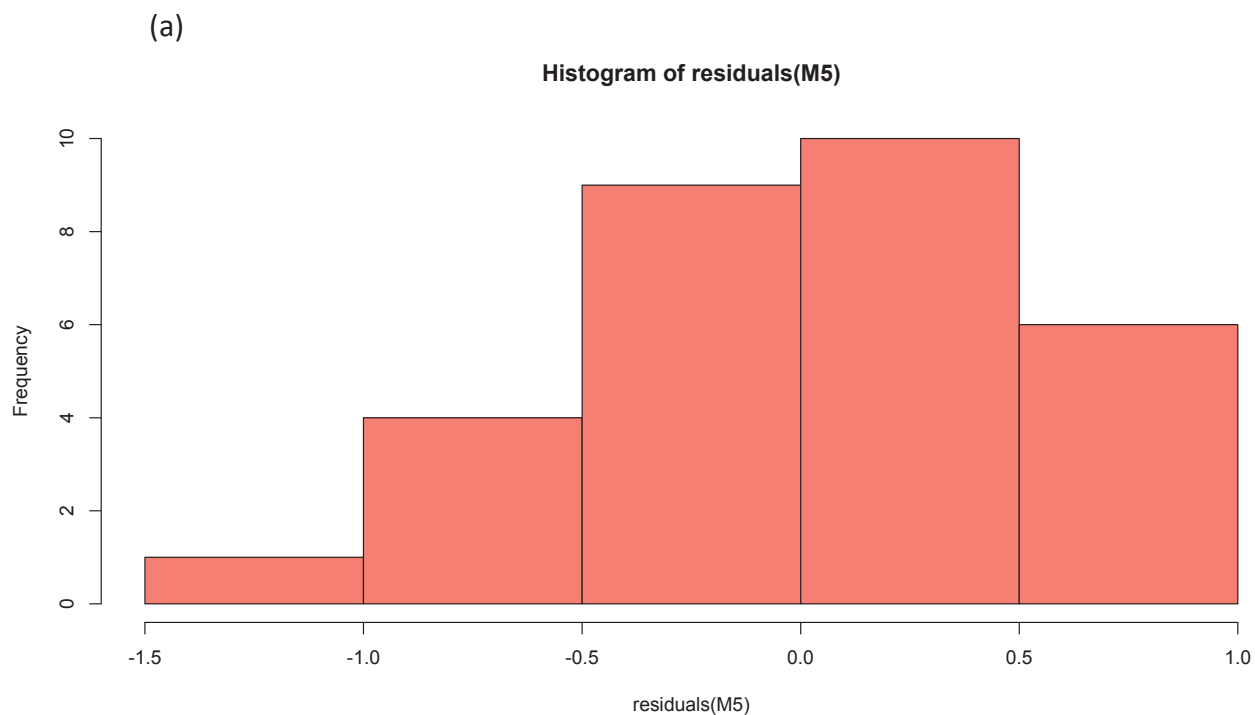
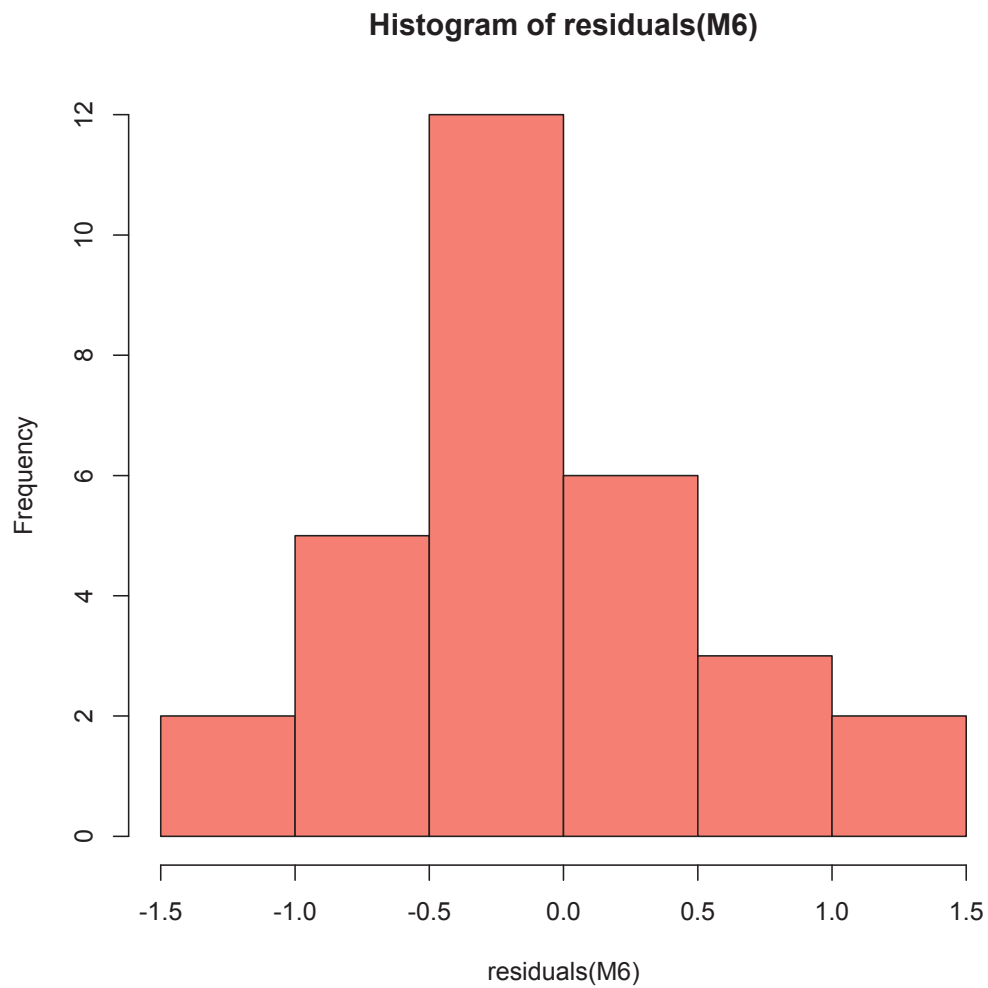


Figure A5.5 : Visualisation de la répartition (a) et de l'homogénéité (b) des résidus du modèle M5.
Visualization of the distribution and homogeneity of the M5 model residues.

(a)



(b)

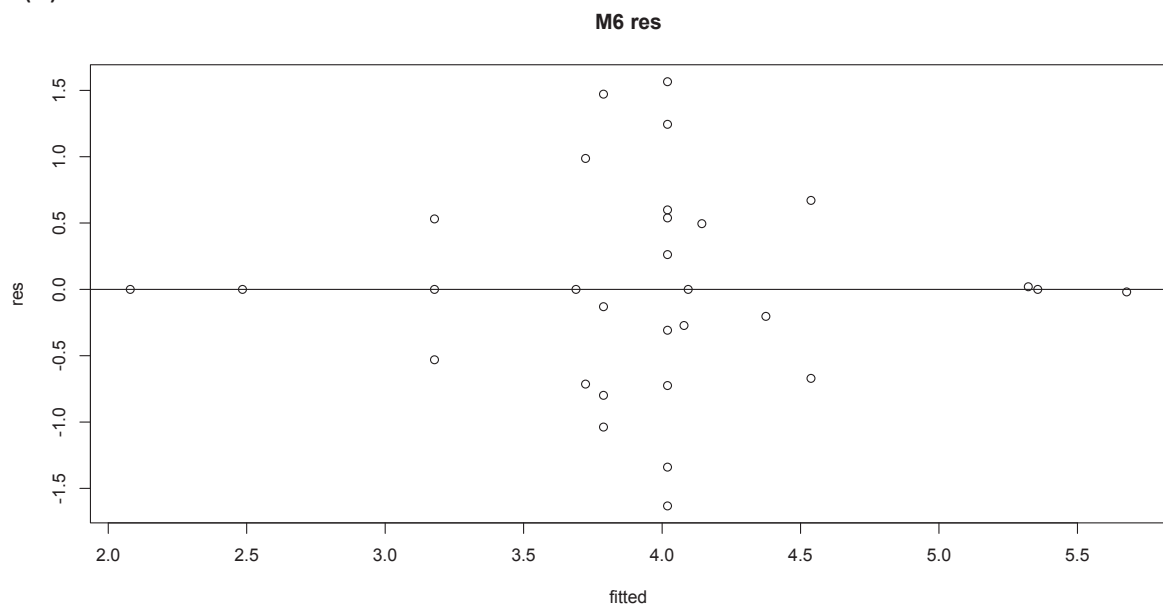


Figure A5.6 : Visualisation de la répartition (a) et de l'homogénéité (b) des résidus du modèle M6.
Visualization of the distribution and homogeneity of the M6 model residues.

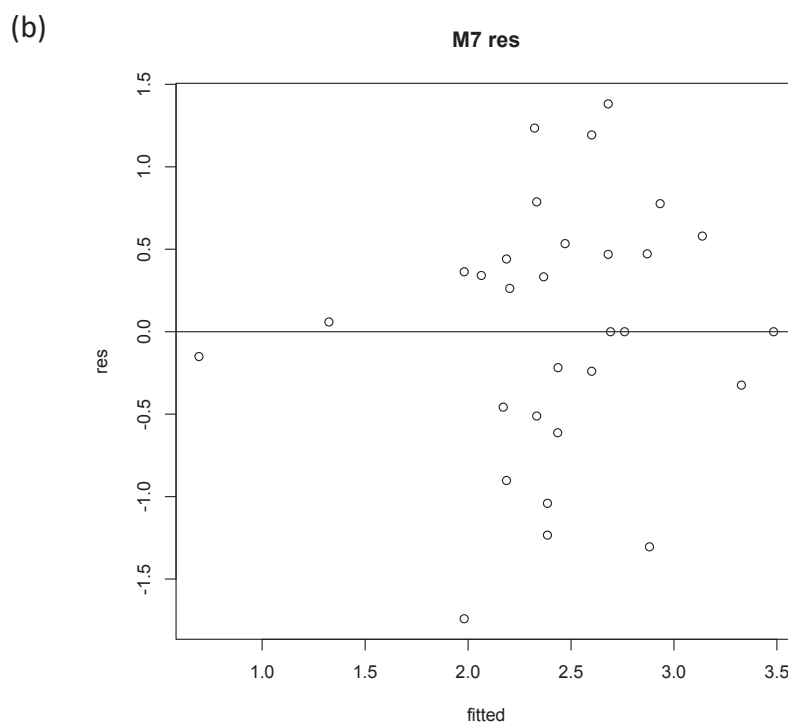
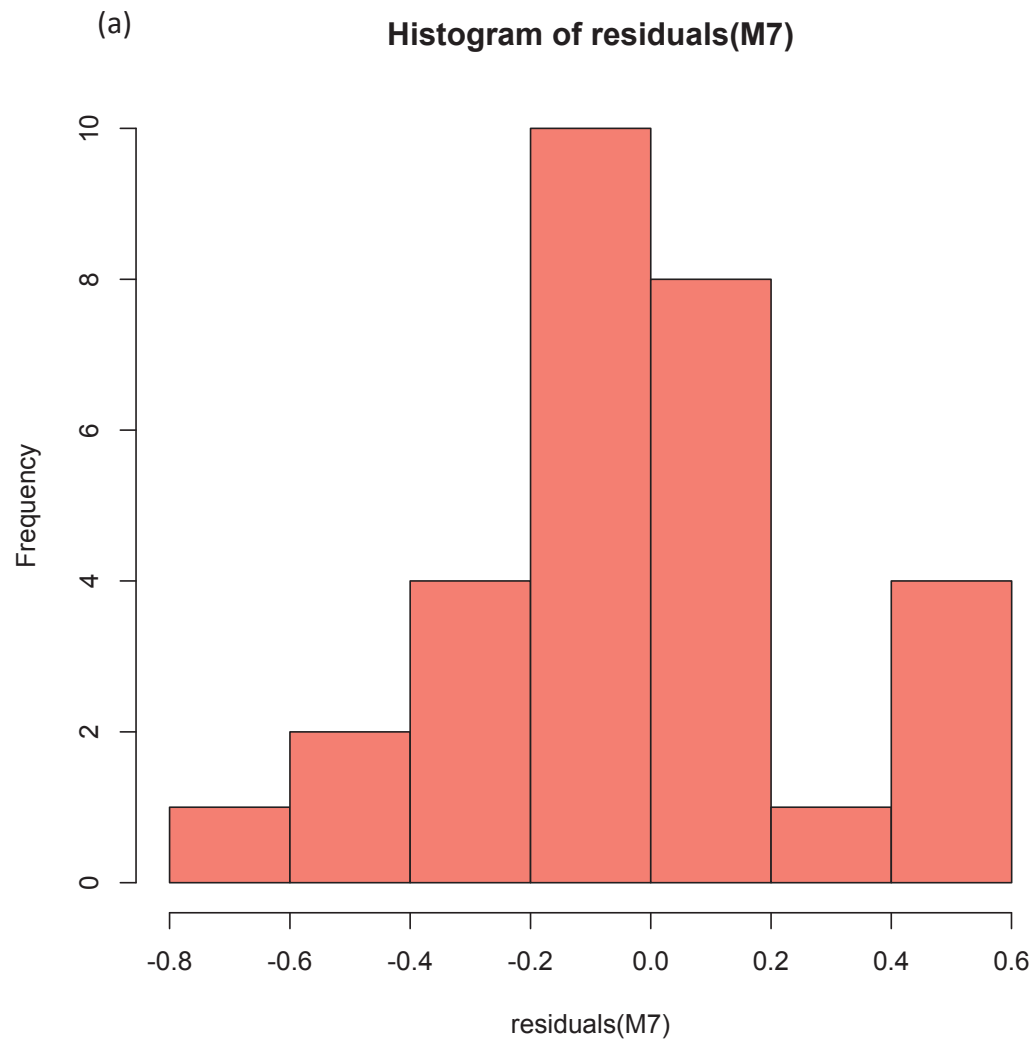


Figure A5.7 : Visualisation de la répartition (a) et de l'homogénéité (b) des résidus du modèle M7.
Visualization of the distribution and homogeneity of the M7 model residues.

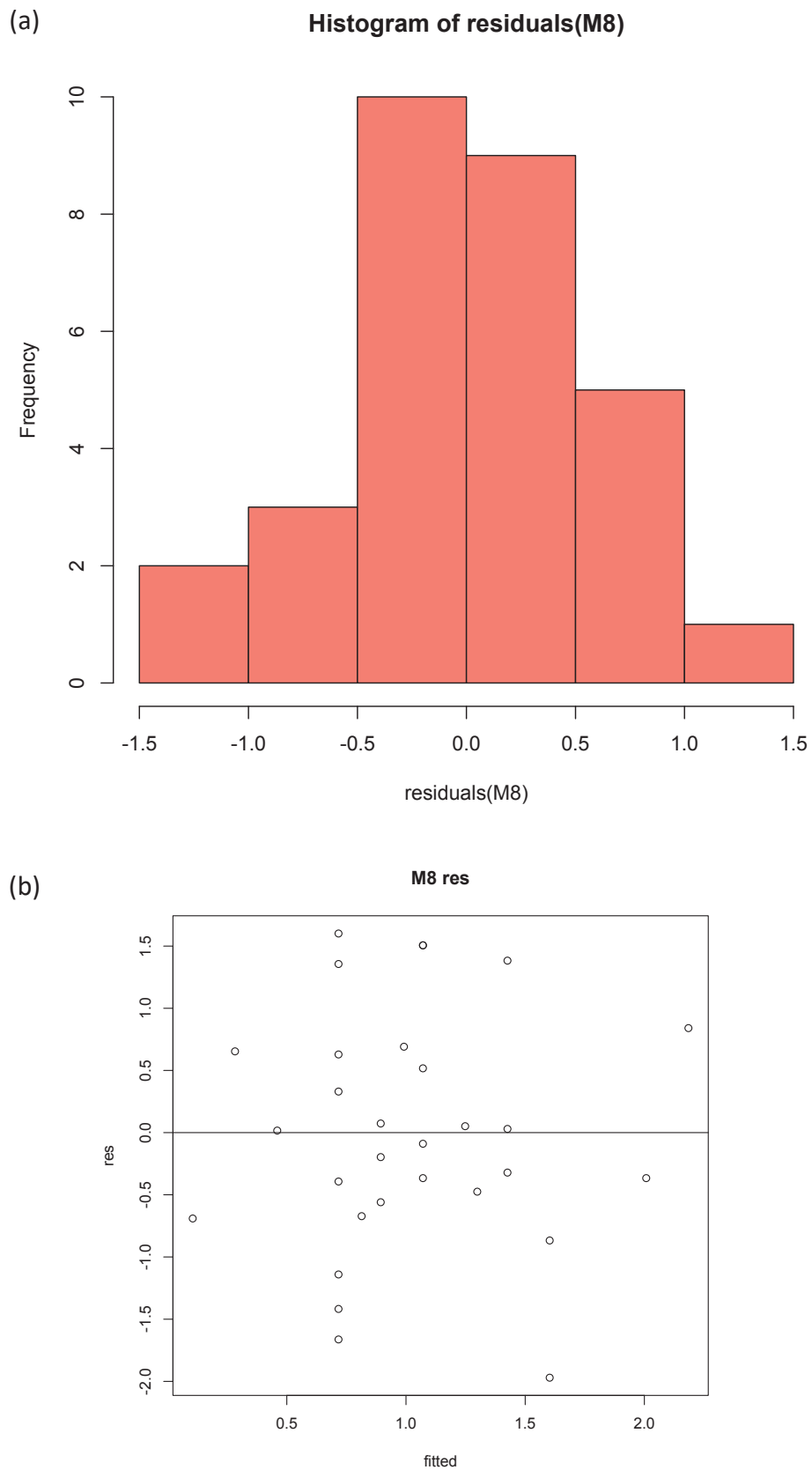


Figure A5.8 : Visualisation de la répartition (a) et de l'homogénéité (b) des résidus du modèle M8.
Visualization of the distribution and homogeneity of the M8 model residues.

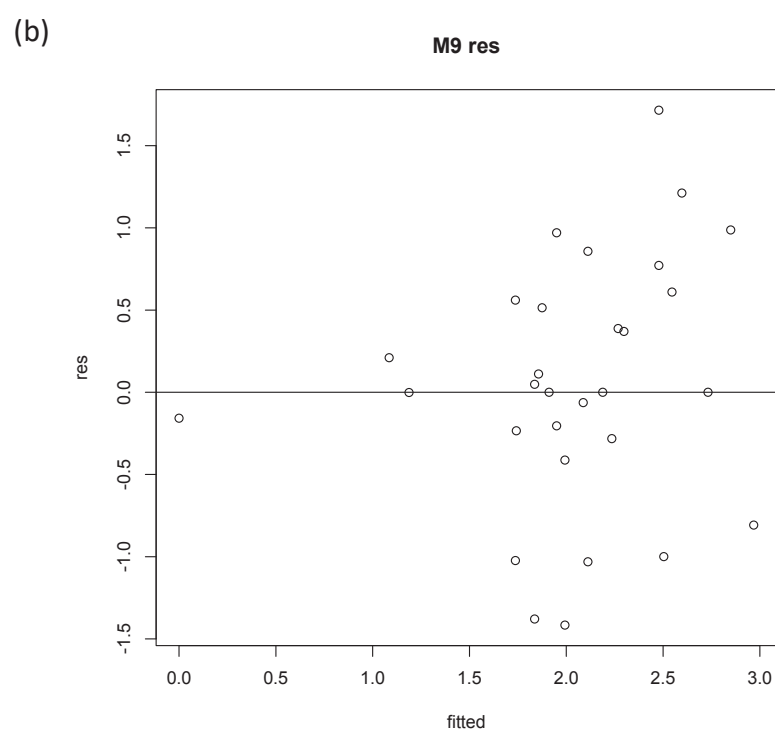
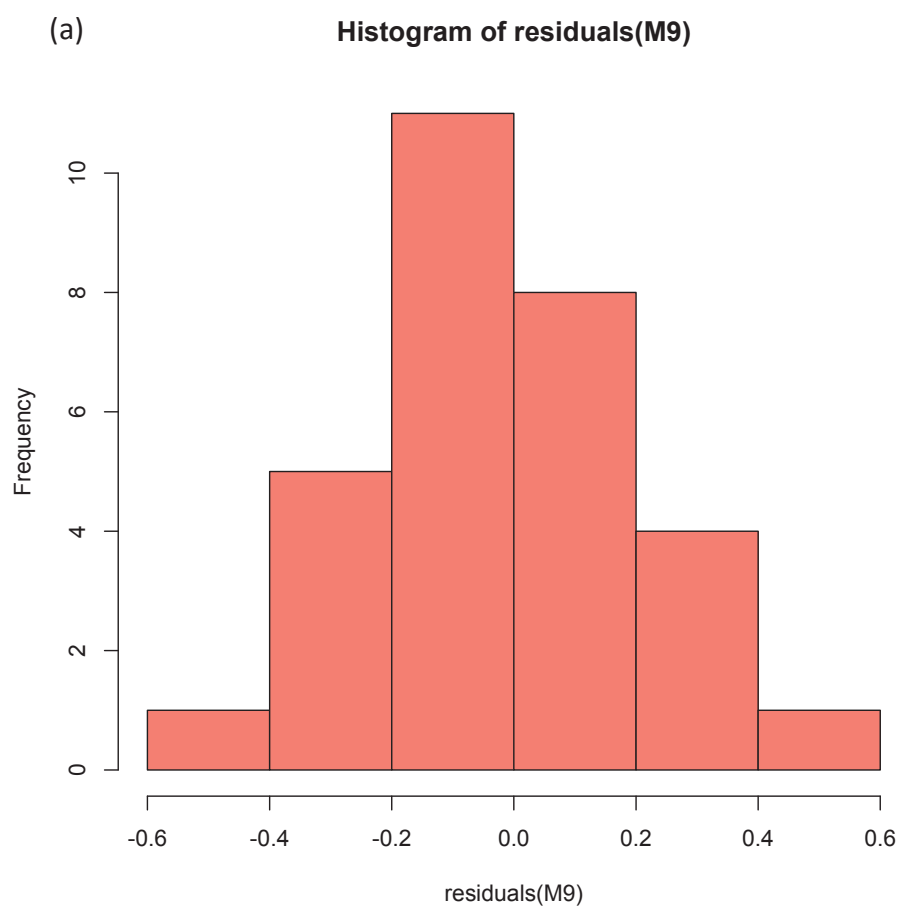


Figure A5.9 : Visualisation de la répartition (a) et de l'homogénéité (b) des résidus du modèle M9.
Visualization of the distribution and homogeneity of the M9 model residues.

	Diplôme : Ingénieur Agronome Spécialité : Agroecology Enseignant référent : Safya Menasseri	
Auteur : RONDEAU Nathan Date de naissance : 28/07/1996		Organisme d'accueil : Laboratoire d'agroécologie de l'Université Laval
Nb pages : 27 Annexes : 42	Adresse : Pavillon Paul Comtois, 2425 rue de l'agriculture, Québec QC G1V 0A6 Canada	
Année de soutenance : 2018-2019		Maître de stage : Caroline HALDE
Titre français : Évaluation de la santé des sols d'exploitations intensives bio québécoises par l'application du bio-indicateur lombricien. Titre anglais : Assessment of soil health by earthworm bioindicator in intensive organic farms in Quebec		
Résumé : La préservation et l'amélioration de la santé des sols sont aujourd'hui des enjeux agricoles majeurs. L'évaluation de la santé d'un sol passe par l'usage de différents indicateurs. Les vers de terre sont un type de bio-indicateurs permettant d'approcher l'état de santé d'un sol. Les lombriciens jouent des rôles différents dans la dynamique physique et chimique des sols et sont donc des espèces clés pour la résilience des systèmes. Ce projet vise à étudier l'influence du contexte pédoclimatique et des pratiques culturales de 11 exploitations biologiques intensives québécoises par un échantillonnage de vers de terre. Ainsi, une extraction physique couplée à une extraction chimique à la moutarde ont permis de mesurer l'abondance et la biomasse sèche à l'échelle des groupes et des espèces au sein d'un champ de maïs, de soja et de céréales pour chaque ferme. Il a été constaté que les zones étudiées présentaient des caractéristiques de zones cultivées avec une majorité d'Endogées et une abondance totale qui approchait en moyenne les 100 i.m⁻². Les sols acides et l'intensité du travail de sol (profondeur et fréquence) sont des éléments limitant au développement et renouvellement des vers de terre et donc peu favorable à la santé globale des sols. L'usage de cultures de couvertures intercalaires conservées ou simplement fauchées et incorporées ont une influence positive sur les vers juvéniles. Un taux optimal de matière organique du sol a le plus souvent un effet bénéfique sur les vers endogées et notamment sur l'augmentation de la diversité des espèces de vers de terre d'un sol.		
Abstract : The preservation and improvement of soil health are currently major agricultural issues. Assessing the health of a soil requires the use of different indicators, earthworms are a type of bio-indicators to approach the health of a soil. Earthworms play different roles in the physical and chemical dynamics of a soil and are therefore key species for the resilience of the systems. This project aims at studying of the influence of the pedoclimatic context and of the cultural practices on 11 Quebec intensive organic farms by earthworm sampling. A physical extraction coupled with a chemical extraction with mustard were used to measure abundance and dry biomass at the group and species level inside a maize, a soybean and a cereal field for each farm. It was found that the areas studied had the characteristics of cultivated lands with a majority of endogeic and a total approaching on average 100 i.m⁻². Acid soils and the intensity of tillage management (depth and frequency) are limiting factors to the development and renewal of earthworms and therefore not favorable to the health soils. The use of cover crops that are conserved or simply cut positively affects eartworms, especially juveniles. An optimum rate of soil organic matter is most often beneficial to endogeic earthworms and also promote the diversity of the earthworm species.		
Mots-clés : Vers de terre, Grandes Cultures, Santé/Qualité des sols, Biologique, Intensif Key Words: Earthworms, Crops, Soil Health/Quality, Organic, Intensive		