
Comprendre et promouvoir l'agrobiodiversité fonctionnelle des lombriciens en Wallonie

Auteur : Darms, Lucie

Promoteur(s) : Colinet, Gilles; Boeraeve, Fanny

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/12248>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**COMPRENDRE ET PROMOUVOIR
L'AGROBIODIVERSITÉ FONCTIONNELLE
DES LOMBRICIENS EN WALLONIE**

LUCIE DARMS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2020 – 2021

CO- PROMOTEURS : FANNY BOERAEVE ET GILLES COLINET

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le promoteur, membre du personnel enseignant de GxABT.

**COMPRENDRE ET PROMOUVOIR
L'AGROBIODIVERSITÉ FONCTIONNELLE
DES LOMBRICIENS EN WALLONIE**

LUCIE DARMS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2020 – 2021

CO- PROMOTEURS : FANNY BOERAEVE ET GILLES COLINET

Avant – propos

La question de recherche de ce travail provient d'une intéressante discussion que j'ai eue avec un agriculteur de Hesbaye rencontré à l'été 2020, pendant mon stage de master. Celui-ci pratiquait une agriculture qualifiée de conventionnelle et affirmait pourtant avoir des champs remplis de vers de terre. La pratique semblait alors contradictoire à la théorie vue dans mes cours. J'ai ressenti le besoin de creuser la question et me voilà un an plus tard, à vous présenter le fruit de mon travail.

Ma volonté est de légitimer l'intérêt du grand public à travailler sur ces organismes du sol et à les préserver. J'aimerais pouvoir démontrer que, intégrer les vers de terre, c'est déléguer le travail de l'agriculteur. Par les services qu'ils peuvent rendre au sol, ils représentent l'auxiliaire le plus écologique et économique. Jusqu'ici, certaines pratiques agricoles ne semblent pas collaborer avec ces petits ouvriers souterrains. Mon but est de mettre en évidence ces pratiques.

Enfin, je trouve que cela a beaucoup de sens d'achever mes études et d'entreprendre ma vie d'ingénieur en sols en travaillant sur des animaux que l'on appelle « ingénieurs du sol ».

« Il est permis de douter qu'il y ait beaucoup d'autres animaux qui aient joué dans l'histoire du globe un rôle aussi important que ces créatures d'une organisation si inférieure. »

— Charles Darwin (1809-1882).²

« La disparition des vers de terre est un phénomène aussi inquiétant que la fonte des glaces. »

— Hubert Reeves (2018).³

² Rôle des vers de terre dans la formation de la terre végétale, C. Darwin 1882, cité par Bouché, 2014.

³ Journal télévisé du 24 février 2018 RTBF, https://www.rtb.be/info/societe/detail_le-cri-d-alarme-d-hubert-reeves-la-disparition-des-vers-de-terre-aussi-grave-que-le-rechauffement-climatique?id=9850098, (28/05/2021)

Cette recherche prend place au sein du département d'agronomie Gembloux Agro-Bio Tech de l'Université de Liège, dans l'équipe de recherche « Biodiversité et Paysages » (BP) et dans l'axe « Echange Eau Sol Plante » (EESP).

Remerciements

Dès le départ, que ce soit lors de mes études ou lors de cette dernière œuvre, aucune réalisation n'a été individuelle. Cette page qui se tourne est un travail d'équipe mené sans relâche. C'est pourquoi, j'aimerais adresser mes remerciements les plus sincères à :

Mes **deux co-promoteurs**, qui ont été présents et dévoués. J'exprime ma plus vive gratitude à Fanny Boeraeve. Essentielle à la bonne réalisation de ce TFE sans stress, elle m'a apporté son aide tant du point de vue technique qu'intellectuel et émotionnel. Je remercie du fond du cœur le professeur Gilles Colinet pour avoir accepté de diriger cette étude, pour avoir répondu à mes questions et résolu mes problèmes. Merci pour votre accompagnement jusqu'au bout.

Les **services de BP et EESP** d'avoir couvert toutes les dépenses engendrées par ce travail, et particulièrement aux secrétaires Cynthia Thomas et Katia Berghmans pour leur disponibilité.

Mes **compagnons de TFE** : Adrien, Aimé, Marine, Marie et Nicolas qui ont fait preuve d'une grande solidarité, d'un grand soutien et m'ont apporté beaucoup d'encouragements.

Catherine et Zoé qui m'ont apporté leur précieuse aide lors de la collecte des données.

La personne qui m'a mis le livre « Eloge du ver de terre » de Christophe Gatineau dans les mains. Cela a été un point de départ dans mon intérêt pour ces animaux.

Tous les professeurs qui ont suscité davantage cet intérêt au moyen de la théorie, vue notamment à travers **les cours d'agroécologie**.

L'ensemble du corps professoral de Gembloux Agro-Bio Tech sans exception, ils m'ont apporté une base solide et ont toujours été à l'écoute. Je suis très reconnaissante de l'aide apportée par Monsieur Brostaux pour mes nombreuses questions en statistiques.

Toutes les personnes rencontrées lors de mon stage chez **SoilCapital**, qui m'ont partagé leur savoir et m'ont ouvert les portes du monde agricole avec beaucoup de sympathie.

Tous **les agriculteurs** qui m'ont chaleureusement accordé une partie de leur temps, merci pour les discussions intéressantes et les partages d'opinions.

Mes chères amies Louise, Adèle, Laetitia, Aurore, Andrea et Coline qui m'ont toujours guidées, tirées vers le haut, et amusées. Je leur dois une fière chandelle.

Ma maman et mes sœurs qui ont toujours vu en moi la bioingénieur que je deviens en rédigeant ce travail de fin d'étude.

Simon pour son étonnant talent de guide, de confident, plein d'amour et de surprises.

Enfin, merci aux relecteurs pour leurs remarques très justes et bienveillantes.

Résumé

Depuis plusieurs années, il est constaté que l'agrobiodiversité des sols est impactée par les pratiques culturales des différents types d'agriculture (le labour et les intrants synthétiques sont le plus souvent pointés du doigt). Les vers de terre forment l'un des groupes les plus importants de la macrofaune du sol et jouent un rôle majeur dans les écosystèmes agricoles. (Bouthier et al., 2014)

Dans cet ouvrage, le potentiel de différentes pratiques agricoles, regroupé dans 4 modalités distinctes (l'agriculture biologique, l'agriculture de conservation, mais aussi leur combinaison face à l'agriculture conventionnelle classique) est évalué pour mobiliser l'abondance des vers de terre, leur diversité (groupes écologiques et stades) et leur contribution aux différents services écosystémiques du sol.

Les 24 parcelles étudiées se situent en Wallonie, sur un sol limoneux à drainage normal ou ralenti.

Les fonctions écologiques qui sont abordés sont la stabilité des agrégats (*slake test*), l'activité de nourrissage biologique (*bait lamina test*) et une évaluation visuelle du sol (structure, texture, couleur, mottes, racines, etc).

Cette étude est dirigée par une approche systémique, à l'image de ce que prône l'agroécologie.

Le type de pratiques et le contexte pédologique n'affectent pas les résultats. Des tendances de corrélation entre vers de terre et fonctions écologiques sont montrées. D'autres recherches plus précises et plus longues doivent avoir lieu.

Mots-clés : *Agroécologie, vers de terre, pratiques culturales, slake test, bait lamina, VSA method, sol limoneux, drainage, Wallonie, fonctions écologiques, services écosystémiques*

Abstract

For several years, it has been noted that soil agrobiodiversity is impacted by the cultivation practices of different types of agriculture (ploughing and synthetic inputs are most often blamed). Earthworms are one of the most important groups of soil macrofauna and play a major role in agricultural ecosystems. (Bouthier et al., 2014)

In this work, the potential of different agricultural practices, grouped in 4 distinct modalities (organic agriculture, conservation agriculture, but also their combination against conventional agriculture) is assessed to mobilise earthworm abundance, diversity (ecological groups and stages) and contribution to different soil ecosystem services.

The 24 plots studied are located in Wallonia, on a silty soil with normal or slow drainage.

The ecological functions that are addressed are aggregate stability (*slake test*), biological feeding activity (*bait lamina test*) and a visual assessment of the soil (structure, texture, colour, clods, roots, etc).

This study is driven by a systems approach, as advocated by agroecology.

The type of practices and the soil context do not affect the results. Trends in the correlation between earthworms and ecological functions are shown. Further, more precise and longer research is needed.

Keywords : *Agroecology, earthworms, farming practices, slake test, bait lamina, VSA method, loamy soil, drainage, Wallonia, ecological functions, ecosystem services*

Table des matières

Avant – propos	4
Remerciements.....	5
Résumé	6
Partie I – Introduction & objectifs	10
I.1. Défis de l’agriculture actuelle	10
1.1. L’Agriculture Biologique comme alternative.....	10
1.2. L’Agriculture de Conservation comme alternative	11
1.3. L’Agriculture Biologique de Conservation comme alternative.....	11
I.2. Les lombriciens	12
2.1. Origine et taxonomie	12
2.2. Géodrilologie, l’étude des vers de terre.....	12
2.3. Abondance et comportement.....	14
I.3. La gestion des sols par l’activité biologique	14
I.4. La gestion des sols pour l’activité biologique	15
I.5. Mesurer la biodiversité	16
5.1. Les vers de terre comme indicateur de biodiversité	16
5.2. Les services écosystémiques	16
5.3. Agroécologie et approche systémique.....	17
I.6. Propriétés des sols	19
6.1. Texture.....	19
6.2. Structure	19
6.3. Porosité.....	19
6.4. Stabilité des agrégats	20
6.5. Couleur	20
6.6. Racines	21
6.7. Croûte et couvert	21
6.8. Activité biologique	21
Partie II – Matériel et méthode	22
II.1. Introduction	22
II.2. Les 4 modalités de système agricole	22
II.3. Site et période d’étude	23
II.4. Lien avec les hypothèses	26
II.5. Echantillonnage des vers de terre : Test-Bêche	27

II.6. Analyse composite des sols	29
II.7. Différentes approches des services écosystémiques	30
II.9. Analyses statistiques	36
Partie III – Présentation des résultats	39
III.1. Résultats	39
1.1. Analyses composites des sols	39
1.2. Evaluation visuelle du sol (« <i>VSA Method</i> »).....	40
1.3. Abondance des vers de terre.....	42
1.4. Stabilité des agrégats	42
1.5. Evolution du taux de minéralisation des sols au mois d’avril	43
1.6. Itinéraires techniques des agriculteurs.....	43
III.2. Analyses statistiques	45
Partie IV - Discussion & Interprétations	55
IV.1. Critiques des résultats	55
IV.2. Critiques de la méthode	57
2.1. Stratégie d’échantillonnage	57
2.2. Echantillonnage – Test-bêche.....	57
2.3. <i>Bait lamina</i>	58
2.4. Méthode <i>VSA</i>	58
2.5. Autres fonctions écologiques	58
2.6. Groupes écologiques et stades de développement.....	59
2.7. Données de l’interview aux agriculteurs	59
IV.3. Perspectives	59
3.1. Le temps	59
3.2. L’espace.....	60
3.3. Les observations	60
3.4. Etude économique	60
IV.4. Précautions dans l’interprétation de ce travail	61
IV.5. Contribution de l’étudiant	61
Partie V – Conclusion	62
Bibliographie	63
Annexes	67
Annexe 1 – Les 24 Districts de l’Espace Rural en Wallonie	67
Annexe 2 – Légende de la Carte Numérique des Sols Wallons.....	68
Annexe 3 – Données IRM de température (1), précipitations (2) et rayonnement solaire (3) pour les mois de mars (a) et avril (b) 2021	69

Annexe 4 - Recouvrement et stade de développement	70
Annexe 5 – Observations terrain, données « Test-bêche »	71
Annexe 6 - Références de porosité du Visual Soil Assessment.....	73
Annexe 6bis - Références en termes de couvert et de croute de surface	74
Annexe 7 – Résultats des deux analyses composites pour chaque parcelle.....	75
Annexe 8 - Résultats du <i>slake test</i>	78
Annexe 9 - Distributions des résidus qui vérifient la normalité du modèle de régression des vers de terre (a), des <i>Bait lamina</i> (b) et du <i>slake test</i> (c).....	79
Annexe 10 - Codes statistiques utilisés dans R.....	80
Annexe 11 - Nombre de trous consommés en fonction du système de pratiques (a) et de la position sur la bande (b).....	83
Annexe 12 – Stabilité des agrégats en fonction du système de pratiques	84
Annexe 13 – Cercle de corrélation du 2ème plan factoriel.....	84
Annexe 14 – Photographies des traces de vers de terre	85

I.1. Défis de l'agriculture actuelle

L'un des principaux défis auxquels l'agriculture est aujourd'hui confrontée est la nécessité de réduire les pesticides synthétiques et les labours énergivores, qui sont actuellement les alternatives répandues pour limiter les adventices et les ravageurs des cultures. Ces pratiques peuvent contribuer à la destruction de nos propres sols, en termes d'agrobiodiversité ou d'érosion.

L'agrobiodiversité fonctionnelle des sols c'est l'ensemble de la biodiversité qu'on retrouve dans un sol agricole qui peut y jouer un ou plusieurs rôles. Ces rôles, ou « fonctions écologiques » maintiennent la bonne structure du sol et sa régénération, par le recyclage des nutriments, notamment.

Selon Jacqueline L. Stroud (2019), et beaucoup d'autres avant elle, il faut trouver un compromis de sol ARABLE DURABLE. Cela signifie qu'au-delà de la volonté d'avoir un sol qui produit, il ne faut pas négliger l'importance du fait que celui-ci soit sain, afin de promouvoir la production des sols à long terme.

Pour relever les défis actuels, différentes formes d'agriculture s'établissent.

Au sens large des définitions, il peut être retenu que l'agriculture conventionnelle travaille avec l'usage de labours et d'intrants synthétiques. Là où l'agriculture de conservation (AC) ne réalise que des opérations à faible profondeur dites de « travail réduit » ou « travail de conservation du sol » (TCS). L'agriculture biologique (AB), elle, bannit tout recours aux intrants synthétiques. Enfin, l'agriculture biologique de conservation (ABC) combine les efforts pour proposer une agriculture sans retournement du sol et sans intrants quelconques issus de l'industrie.

Cependant, une étude de l'ITAB (Sautereau et al., 2016) témoigne de la diversité des systèmes intra-AB et intra-AC au fil de leur extension, ce qui rend la comparaison entre AB et AC d'une difficulté méthodologique majeure. Certains écarts entre AB et AC peuvent donc s'estomper selon le référentiel de comparaison retenu.

1.1. L'Agriculture Biologique comme alternative

La certification « Agriculture Biologique » ou « AB » est attribuée à toutes parcelles faisant l'objet d'une gestion agricole respectant un cahier des charges précis.

Cette gestion doit allier les meilleures pratiques environnementales, un haut degré de biodiversité, la préservation des ressources naturelles, le bien-être animal et le respect des consommateurs à l'égard de produits obtenus grâce à des substances et à des procédés naturels. Depuis 1992, la réglementation européenne se met en place afin d'harmoniser les différents cahiers des charges privés et publics qui avaient été développés auparavant. Ceux-ci doivent répondre aux dispositions fixées par les Règlements (CE) 834/2007, (CE) 889/2008 et (CE) 1235/2008.

En Wallonie, les dispositions prises figurent dans l'Arrêté du Gouvernement wallon du 11 février 2010 relatif à la production et à l'étiquetage des produits biologiques.

En 2019, il y avait 1819 exploitations d'Agriculture Biologique en Wallonie (recensées sur le site de la fonction publique belge Statbel) soit 84 422 hectares. L'augmentation des exploitants convertis en « AB » a été marquante depuis les années 80 (Figure I.1).

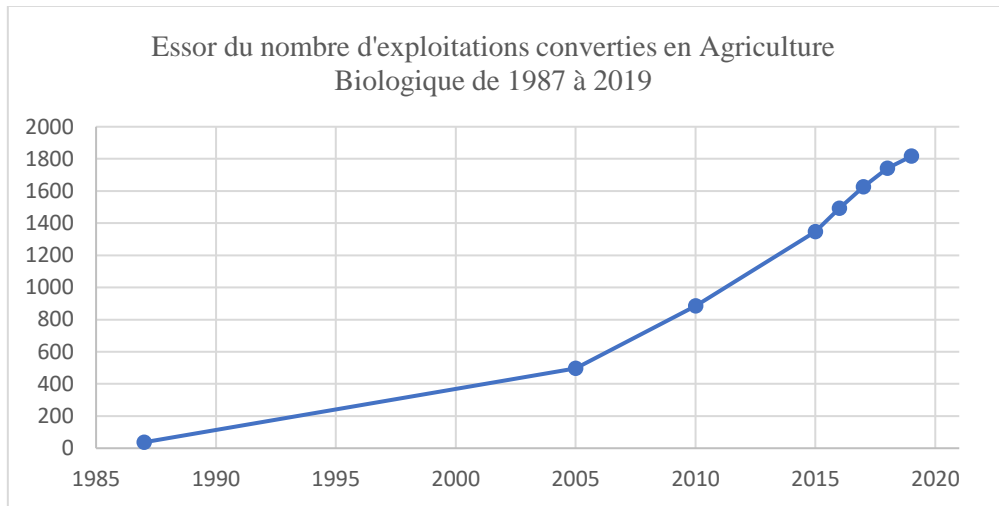


Figure I.1. Essor du nombre d'exploitations converties en AB de 1987 à 2019. Source : Statbel

1.2.L'Agriculture de Conservation comme alternative

L'Agriculture de Conservation (AC) est un terme qui a été créé en 2001 par la FAO (Mollier, 2013, cité par Braibant et Morelle, 2018). Il fait référence à un nouveau modèle d'agriculture ayant pour trois piliers : la réduction du travail du sol, la couverture permanente du sol et la diversification des espèces cultivées au sein de la rotation.

Bien que ces piliers soient bien définis en Wallonie, leurs formes d'applications le sont moins. Braibant et Morelle ont alors proposé un questionnaire hiérarchisant les formes les plus et les moins abouties d'AC.

1.3.L'Agriculture Biologique de Conservation comme alternative

L'organisation « TILMAN-ORG » (2011), est pionnière dans le domaine de l'Agriculture Biologique de Conservation. Selon elle, l'ABC se caractérise par une utilisation plus efficace des nutriments, une meilleure gestion des mauvaises herbes, générant une biodiversité plus importante, une productivité accrue et une empreinte carbone plus faible.

Il est rare de rencontrer une exploitation en Agriculture Biologique qui respecte parfaitement les trois piliers de l'AC. Toujours est-il que les agriculteurs bios sont de plus en plus nombreux à tenter de se rapprocher au maximum de cette agriculture de conservation (Sarhou, 2016). En Wallonie notamment, dans l'Ouest du Hainaut, un « réseau des fermes novatrices » modifie ses pratiques agricoles et les agriculteurs vont jusqu'à se passer à la fois d'intrants de synthèse et de labours profonds des sols (Boeraeve, 2019).

I.2. Les lombriciens

2.1. Origine et taxonomie

Le terme « lombricien » équivaut au terme générique de « vers de terre ». Afin de ne pas confondre avec les autres types de vers, il s'agit bien de ceux qui vivent dans la terre. Taxonomiquement, il s'agit du sous-ordre des Lumbricina. Sera alors écarté le terme « lombric » qui ne s'applique qu'à une seule espèce de lombriciens (Bouché, 2014).

Les « Lumbricidae », une des 14 familles de Lumbricina selon le NCBI (« Centre américain pour les informations biotechnologiques »), représentent l'essentiel de la faune de vers de terre dans les prairies et les écosystèmes agricoles de la région paléarctique (Pérez-Losada et al., 2012) soit l'Europe, l'Asie du Nord, l'Afrique du Nord et une petite partie du Moyen-Orient.

L'Europe à elle seule regroupe 430 espèces dans la famille des Lumbricidae (Herzog et al., 2012) dont 29 espèces en Belgique, au Luxembourg et dans le nord de la France (Lerchs Salazar, 2014).

Tout sol n'est pas inéluctablement pourvu d'autant de vers de terre. Par exemple, sur les 19 espèces de vers de terre inventoriées à ce jour au Québec, seulement deux sont indigènes. Les autres sont toutes d'origine européenne. Elles y sont parvenues suite à l'immigration des colons venus d'Europe (Moore, 2017).

2.2. Géodrilologie, l'étude des vers de terre

La géodrilologie est la branche de la zoologie qui étudie les vers de terre.

C'est dans le courant des années 1830 que les premières recherches sur les vers de terre eurent lieu. En effet, lors de ses travaux sur la formation de la terre végétale, Charles Darwin a été amené à conserver longtemps des vers de terre dans son laboratoire. Il s'est alors pris d'intérêt pour ces animaux et en a détourné le sens de ses ouvrages pour écrire en 1882 : *Rôle des vers de terre dans la formation de la terre végétale* (Figure I.2.2.1).

Marcel Bouché, un spécialiste des vers de terre mondialement reconnu, a créé en 1971 le concept de « catégories écologiques ». C'est là un compromis entre classement morphologique et écologique (Bouché, 1977).

On retrouve maintenant quatre distinctions de groupes écologiques parmi les lombriciens.

Les endogés vivent en pleine terre, ils sont dits « géophages », ils se nourrissent de terre assez pauvre en matière organique. Ils sont de taille petite à moyenne (1 à 20 cm) et sont beaucoup plus pâles que les autres catégories de vers car ils n'ont pas de pigments cutanés. Ils font des galeries plus ou moins horizontales. Les espèces endogées peuvent représenter entre 20 à 40% de la biomasse lombricienne (Bouché, 2014 ; Sheperd et al., 2018).

A l'inverse, les épigés se situent à la surface du sol (sous la couche de mulch, lorsqu'elle existe, ou dans les fumiers). Beaucoup plus sujets à la prédation, ils ont acquis par sélection naturelle deux avantages majeurs : une prolificité plus importante et une homochromie (la couleur de leur peau se confond avec celle de leur milieu). Ils sont de petite taille (1 à 5 cm) et plutôt rouges. Ils se nourrissent de matières organiques déjà fragmentées. Ils ne représentent qu'environ 5% de la biomasse totale des vers de terre (Bouché, 2014 ; Sheperd et al., 2018).

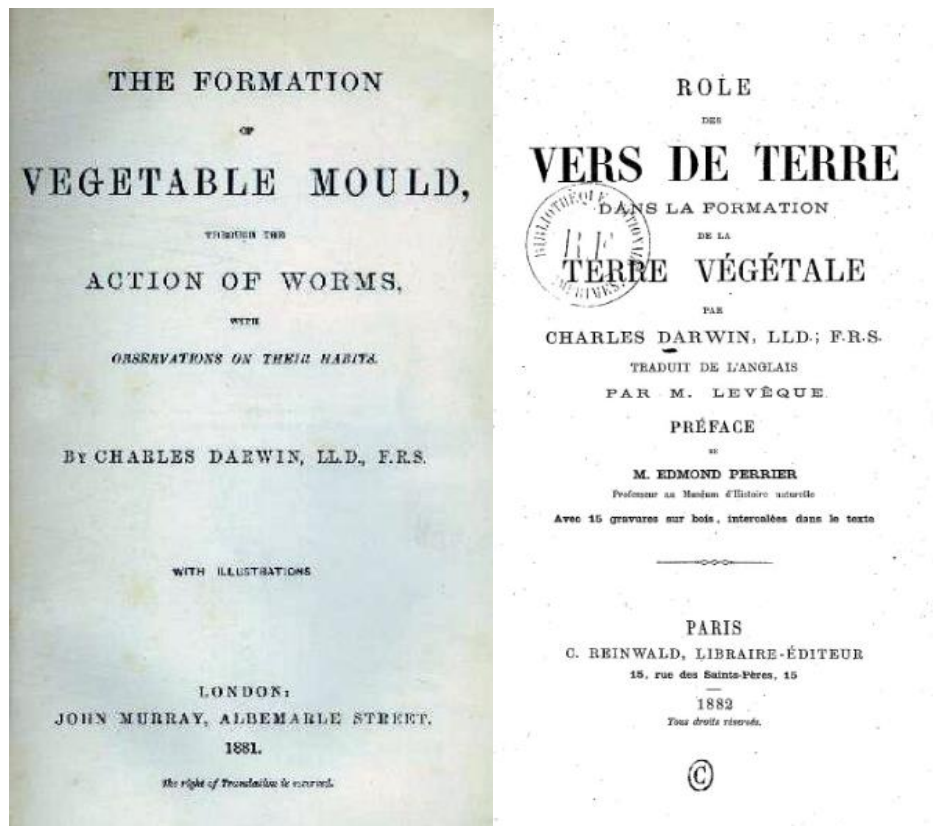


Figure I.2.2.1. Couverture de l'ouvrage de Charles Darwin « Rôle des vers de terre dans la formation de la terre végétale », originale (a) et version traduite (b).

Les anéciques sont les plus grands et les plus intéressants. Avec leur 10 à 110 cm de long, on les reconnaît grâce à leur queue aplatie (Figure I.2.2.2). Leur pigmentation est souvent assez sombre (gris clair, gris foncé, rouge...). La nuit, ils viennent se nourrir des résidus déposés à la surface. Résidus qu'ils vont ensuite fragmenter et enfouir dans le sol, grâce à des galeries verticales allant jusqu'à deux mètres de profondeur. Ces dernières sont larges et améliorent la porosité du sol. Par ce mouvement de va-et-vient, la matière minérale est mélangée à la matière organique, c'est la bioturbation. Les anéciques sont très importants dans les écosystèmes européens et ils peuvent représenter jusqu'à 60% de la biomasse lombricienne (Bouché, 2014 ; Sheperd et al., 2018).

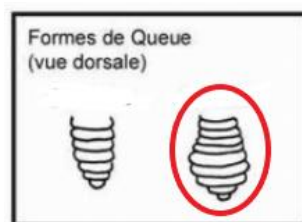


Figure I.2.2.2. Reconnaissance de la queue aplatie d'un ver de terre anécique.
Source : OPVT, Université de Rennes

Les épi-anéciques forment une quatrième catégorie, dont le genre *Lumbricus spp* est assez connu. Ils présentent la caractéristique d'être épigés au stade juvénile. Certains vont le rester tandis que d'autres vont atteindre une taille trop importante au stade adulte, incompatible avec un habitat d'épige. Ils se

comporteront dès lors comme des anéciques, sans toutefois bénéficier de toutes leurs fonctionnalités (Bouché, 2014).

L'Université de Rennes, très active dans l'étude des vers de terre, fournit de bons outils didactiques et reconnaît également ces quatre catégories de groupes écologiques dans sa classification la plus récente.

2.3. Abondance et comportement

Ensemble, le poids vif des lombriciens représente plus de la moitié de la masse totale des animaux terrestres. On retrouve de 5 à 400 grammes de vers de terre par mètre carré de terre agricole (Gatineau, 2018).

Leur cycle biologique, qui a fait l'objet de nombreuses études, présente un arrêt d'activité (diapause) chez certaines espèces. De manière générale, les lombriciens sont en relation avec les variations saisonnières des pluies et des températures (Stoeckli, 1928 ; Dreidax 1921, cité par HAMEED and SOTO, n.d.). En climat tempéré, ils sont actifs environ 200 jours par an (Bucaille, 2020).

Les périodes d'observations doivent correspondre à l'activité optimale des vers de terre. Sachant qu'ils sont inactifs dans les sols secs et gelés (Lerchs Salazar, 2014) et actifs dans un sol frais mais ressuyé, on conseille par exemple de les observer de janvier à mi-avril dans la moitié Nord de la France (Capowiez, 2009), qui est comparable à la Wallonie en termes de climat.

La lenteur des taux de reproduction des populations de vers de terre est une inquiétude en cas de changement de gestion de pratiques agricoles (Roarty and Schmidt, 2013, cité par Stroud, 2019). Chez les vers de terre anéciques par exemple, 8 cocons sont produits par ver de terre et par an, avec une durée de développement de 60 semaines (Edwards and Bohlen, 1996).

Des études de modèles « REAL » (Rôle Ecologique et Agronomique des Lombriciens) sont proposés par Bouché et Kretschmar (1977), et reprennent les fonctions des vers de terre simultanément avec les techniques nécessaires à l'estimation des paramètres écologiques.

I.3. La gestion des sols par l'activité biologique

L'impact de l'activité biologique sur les sols est connu, notamment par son rôle fondamental de pédogenèse et de régénération (Bucaille, 2020; Koffi et al., 2015).

Selon Christophe Gatineau (2018), le ver de terre est le maillon central de la décomposition accomplie par le biote du sol (animaux, bactéries, champignons). Ils augmentent la production végétale (Blouin et al., 2013) car ils déchiquettent et décomposent les résidus végétaux, les convertissant en matière organique, et libérant ainsi des nutriments minéraux (Sheperd et al., 2018).

Ils ingèrent des quantités considérables, bien que difficiles à estimer, de terre et de déchets organiques et leurs déjections, nommées turricules, sont riches. Les turricules contiennent plus d'éléments minéraux que la terre environnante. Les quantités sont multipliées par des facteurs 2-3, 4-5, 6-7 et 10-11 pour respectivement le magnésium échangeable, l'azote, le phosphore disponible et le potassium échangeable. Cela a une grande influence sur l'augmentation de la biodisponibilité des éléments minéraux (PROSENSOLS, n.d., a; Sheperd et al., 2018). Au total, Darwin comptait 30 tonnes de

turricules par hectare déposés par les lombriciens à la surface du sol chaque année, soit environ 1% de la masse de sol dans l'horizon labouré. Cet ordre de grandeur reste validé actuellement (Bouché 2014).

Leurs activités de fouissage et d'alimentation modifient la structure du sol et plusieurs de ses propriétés. En particulier, les vers de terre augmentent la macroporosité du sol et forment des agrégats stables (Crittenden et al., 2014 ; Baldivieso-Freitas et al., 2018). En ce qui concerne l'eau, les vers de terre ont leur rôle à jouer sur sa rétention, son infiltration et son drainage (Sheperd et al., 2018). Enfin, grâce à leurs glandes dites de Morren, ou « usines à solubiliser les minéraux », les vers anéciques sont capables de lier les humus et les argiles entre eux. (Bucaille, 2020).

I.4. La gestion des sols pour l'activité biologique

Dès lors que le rôle de l'activité biologique sur les sols est connu, la question est encore de connaître l'impact de la bonne ou mauvaise gestion du sol, par l'homme, sur l'activité biologique.

De prime abord, les populations de vers de terre sont influencées par les propriétés physiques du sol. Sont pointés du doigt la compaction, la texture, le pH acide (Moore, 2017), les conditions anaérobies, l'humidité ou encore l'engorgement en eau.

Le facteur-clé limitant est l'approvisionnement en nourriture, soit la teneur en matière organique (Crittenden et al., 2014 ; Chan, 2001; Hendrix et al., 1986). L'étude de Baldivieso-Freitas et al. (2018), a démontré cela avec une densité et une biomasse de vers de terre plus élevées dans les parcelles sur lesquelles du fumier de ferme a été épandu. Le couvert végétal, d'une culture intermédiaire notamment, tient également ce rôle d' « alimentation » (Stroud, 2019).

En ce qui concerne le travail du sol, il peut aussi modifier de 2 à 9 fois l'abondance relative des espèces de vers de terre et la composition et diversité de leur communauté (Chan, 2001).

On parle d'abondance relative des espèces car certaines études ont montré que les vers de terre les plus grands et les plus fragiles (ceux qui ont des épithéliums mous) sont les plus affectés par le travail intensif du sol (Pelosi et al., 2014a). Il est important de considérer aussi la variabilité de leurs comportements de fouissement et d'alimentation pour déterminer les effets que le type de travail du sol peut avoir sur les vers de terre (Lofs-Holmin, 1983; Edwards, 1984 cité par Lemtiri et al., 2014 ; Capowiez et al., 2009).

L'impact du labour par exemple, même superficiel, est certain sur l'abondance des lombriciens, notamment les espèces anéciques. Néanmoins, par sa redistribution de la matière organique, il favorise les espèces endogées. Il semblerait aussi que le stade juvénile soit privilégié dans des parcelles labourées récemment. C'est du moins ce qu'a montré l'échantillonnage de Baldivieso-Freitas et al. (2018) et cela s'expliquerait par la reconversion de la population. Elle peut se rétablir en un an sous des formes moins sévères de culture, où la perturbation n'est pas répétée (Lemtiri et al., 2014).

L'INRA (2014) a présenté la sensibilité du ver de terre commun face à la toxicité des pesticides dans le rapport « l'Écotoxicologie des sols revisités à l'aune de l'agroécologie ». La revue de Pelosi et al. (2014b) soulève les rôles indirects que peuvent avoir les pesticides tels qu'empêcher l'éclosion, jouer sur le taux de reproduction, le rythme de croissance et l'énergie disponible à creuser des galeries.

Il faut veiller également aux combinaisons d'opérations agricoles dont les effets pourraient s'annuler. Par exemple, les engrais verts sont bénéfiques pour les populations de vers de terre alors que leur utilisation combinée à un passage au chisel entraîne une biomasse significativement plus faible (Baldivieso-Freitas et al., 2018).

Quand on confronte les différents systèmes, les abondances et les biomasses des vers de terre sont supérieures de 100 à 2 500% dans les systèmes de semis en couvert végétal (une technique de l'AC) et dans les systèmes biologiques par rapport aux systèmes intensifs (Bouthier et al., n.d.).

I.5. Mesurer la biodiversité

5.1. Les vers de terre comme indicateur de biodiversité

Les indicateurs biologiques de la qualité des sols sont d'un grand intérêt (Krüger et al., 2016, cité par Vincent et al., 2019) puisqu'ils dépendent des conditions physico-chimiques du sol, des pratiques agricoles et ils interviennent directement dans les fonctions de l'écosystème (Vincent et al., 2019).

Les caractéristiques d'un bioindicateur des sols correct doivent être les suivantes (Bispo et al., 2009, cité par Lerchs Salazar, 2014) : Être connu scientifiquement, être lié ou corrélé à des fonctions de l'écosystème, intégrer des propriétés ou des processus physiques, chimiques et biologiques du sol, pouvoir rendre compte des méthodes de gestion des sols, présenter des qualités de mesure, être validé, facile à utiliser et d'un coût abordable.

Le ver de terre est reconnu comme un bioindicateur scientifiquement fondé (Herzog et al., 2012; Pelosi et al., 2014b) et son utilisation comme tel est d'autant plus pertinente qu'en agriculture, il est considéré comme une espèce clé de voûte (Stroud et al., 2016).

Applicable dans toute l'Europe et à tout type d'exploitation, il est jugé pratique et souhaitable pour les diverses parties prenantes qui se rencontrent et s'accordent sur l'importance de la biodiversité : les agriculteurs et la gestion de leur exploitation, les gouvernements régionaux et leurs politiques agro-environnementales, les conseillers agricoles et leur manière d'évaluer la biodiversité, les organismes de certification ou encore les ONG de protection de la nature (Herzog et al., 2012).

5.2. Les services écosystémiques

Les effets de la gestion du sol sur les populations lombriciennes sont déjà relativement connus. Néanmoins, il est possible d'aller plus loin dans la compréhension de ces effets et des conséquences qu'ils auront sur les sols au long terme grâce à la notion de services écosystémiques.

Cette notion de services écosystémiques s'est imposée à la suite du *Millenium Ecosystem Assessment* (2005) comme les avantages tirés des écosystèmes par l'humanité. Il en existe quatre types : les services d'approvisionnement, les services de régulation, les services culturels et les services de soutien des écosystèmes.

Il est de plus en plus attendu que les paysages agricoles fournissent simultanément un large éventail de services, engendrant une certaine complexité (Rabbinge et Bindraban 2012 ; cité par Andersson et al., 2015). Cela relève le choix judicieux d'étudier les parcelles avec une approche systémique.

5.3. Agroécologie et approche systémique

Là où les facteurs et les biais peuvent être isolés dans des travaux expérimentaux, l'analyse systémique étudie avec véricité les systèmes dans leur contexte réel, avec leurs contraintes sociales et environnementales. Le mouvement d'agroécologie prône le fait d'intégrer ces contraintes (Drinkwater, 2002).

Le sol doit également être considéré comme un tout. Il a été vu que, si les vers de terre ont un impact sur la production primaire (par une minéralisation accrue de la matière organique et donc la libération de nutriments), cela n'a pourtant lieu que s'il y a une réduction concomitante des sorties du système (par lixiviation notamment), ou une augmentation des entrées du système (par fixation d'azote entre autres). L'effet positif des vers de terre pourrait alors n'être que transitoire, et un cercle vicieux de matière organique et de vers de terre ferait réduire jusqu'à l'extinction ces populations (Barot et al., 2007b, cité par Blouin et al, 2013).

Un premier service écosystémique important est la fertilité du sol. Elle est reliée à trois types de fertilité. La fertilité physique du sol aborde la structure meuble, perméable et aérée du sol, retenant l'eau et évacuant les excès. C'est elle qui détermine les conditions de germination des semences, de colonisation efficace des racines, d'aération et d'économie en eau. Etroitement lié à cela, la fertilité chimique a trait à la nutrition minérale des végétaux. Ce sont les concepts de biodisponibilité des éléments, de carences, de toxicités et d'équilibres. Celles-ci n'ont de sens que si la fertilité biologique - liée à l'activité biologique - assure les transferts de ces nutriments, du sol à la plante, et la minéralisation des matières organiques apportées (Genot et al., 2009). Ce travail approche en premier lieu la fertilité biologique, par l'étude de l'activité biologique, mais tous les objectifs se rejoignent et se recourent, afin de couvrir les trois notions de fertilité (Bucaille, 2020).

Afin de bien redéfinir les différentes notions, les services écosystémiques reflètent ce dont l'agroécosystème est capable, maintenant, de fournir en termes de bénéfices pour l'homme. En revanche, les fonctions et les propriétés du sol représentent un état (de structure ou de composition) et mesure la potentielle capacité de l'écosystème à délivrer des services écosystémiques (Boeraeve et al., 2020). L'utilisation conjointe de plusieurs indicateurs différents pour un même service (ou du même indicateur pour plusieurs services) est recommandée par Andersson et al. (2015). Cela fournit des informations plus complètes sur les dimensions de l'offre et de la demande de chaque service, et permet donc de mieux saisir la complexité et informer la prise de décision locale.

Il est important également d'accorder cette étude avec les données relatives au type de sols, pour décrire l'agroécosystème dans son ensemble. Les propriétés physico-chimiques du sol sous-tendent les processus écologiques, tels que la décomposition du sol (Boeraeve et al., 2020). En effet, face à la gestion des systèmes agricoles sans labour, l'ampleur des changements de matière organique varie selon les sols (Six et al., 2000). Parfois, des sols ne conviennent pas à accueillir des populations de vers de terre à cause de certaines caractéristiques, c'est le cas des sols de sables siliceux, sablo sableux ou sablo-limoneux (Bucaille, 2020). A l'inverse, c'est parfois grâce à la présence de vers de terre que les sols présentent de bonnes caractéristiques. Par exemple, les sols qui savent garder davantage leur structure doivent notamment leur résilience à la capacité des lombriciens à maintenir les bonnes conditions physiques du sol (Guillocheau et al., 2020).

C'est sur base de toutes ces notions que les objectifs et les méthodes de ce travail ont été définies. La cascade liant les propriétés aux fonctions, et elles-mêmes aux services écosystémiques, est présentée à la Figure I.5.3.

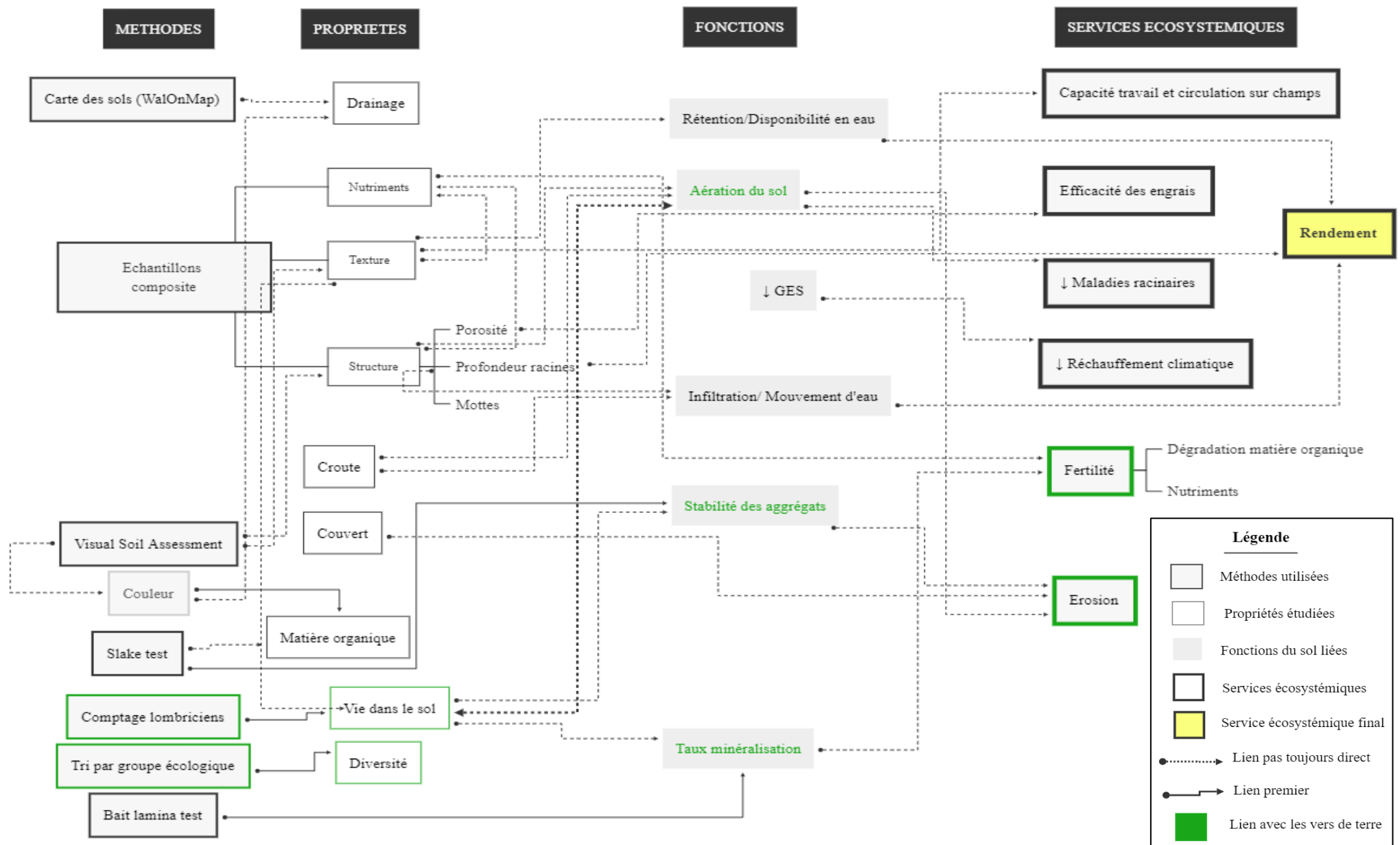


Figure I.5.3. Présentation schématique des méthodes et objectifs mettant en lien propriétés, fonctions et services écosystémiques du sol

I.6. Propriétés des sols

Les sols, milieux de vie des lombriciens, sont définis par une série de propriétés. Il est important d'en balayer les principales afin de pouvoir les évaluer par la suite.

Les informations suivantes sont en grande partie tirées du Guide de la FAO « *Annual crop* » de Shepherd et al. (2008) car la méthode « *Visual Soil Assessment* » utilisée et décrite plus loin se base sur leurs critères de détermination.

6.1. Texture

Elle traduit la taille des particules minérales, spécialement par une proportion des différents groupes de taille, à savoir, les sables (entre 2 mm et 0,05 mm), les limons (entre 0,05 et 0,002 mm) et les argiles (< 0,002mm) selon la référence du Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité de La Hulpe.

La texture influence le fonctionnement du sol de plusieurs façons, notamment à travers son effet sur la rétention et la disponibilité en eau ; l'aptitude à travailler le sol et y circuler ; la vie du sol ; l'apport et la rétention de nutriments (Shepherd et al., 2008).

6.2. Structure

La structure du sol est classée selon la taille, la forme, la fermeté, la porosité et l'abondance relative des agrégats et des mottes du sol (Shepherd et al., 2008).

En plus de ce qui a déjà été pris en compte par la texture, la structure va jouer sur le mouvement et le stockage de l'eau, l'aération du sol (et donc les taux d'échanges gazeux), sa température, la résistance à la dégradation structurelle et à l'érosion (Shepherd et al., 2008). Connaître les bonnes conditions de structure du sol permet d'envisager la réalisation d'une culture sans labour, le travail minimum du sol ou le travail conventionnel entre les rangs (Shepherd et al., 2008).

6.3. Porosité

La porosité est un complément d'information par rapport à la structure. En effet, les sols à bonne structure ont une porosité élevée entre et dans les agrégats, mais les sols à structure médiocre peuvent ne pas avoir de macropores et de micropores grossiers à l'intérieur des grandes mottes, ce qui limite leur drainage et leur aération (Shepherd et al., 2008). Une mauvaise aération entraîne l'accumulation de dioxyde de carbone, de méthane et de gaz sulfureux, et réduit la capacité des plantes à absorber l'eau et les nutriments, notamment l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) et le soufre (S) (Shepherd et al., 2008). De plus, le nombre, la biodiversité et l'activité (de décomposition notamment) des micro-organismes et des vers de terre sont également dépendant d'une bonne aération du sol (Shepherd et al., 2008).

6.4. Stabilité des agrégats

C'est la vie du sol et la matière organique apportée qui assurent la stabilité du sol. En effet, les vers de terre brassent et minéralisent la matière organique tandis que les bactéries et champignons consolident les agrégats par leur sécrétion de « colle ». Cette stabilité permet au sol d'être plus résistant au passage et trempage de l'eau (Association VertCarbone, 2017) ce qui aboutit ainsi à une diminution de l'érosion (PROSENSOLS, n.d.,b)

Le *slake test* est un test de dégradation de mottes par immersion dans l'eau.

6.5. Couleur

La couleur du sol reflète la teneur en matière organique, qui elle-même a de multiples atouts (Figure I.6.5) (Shepherd et al., 2008).

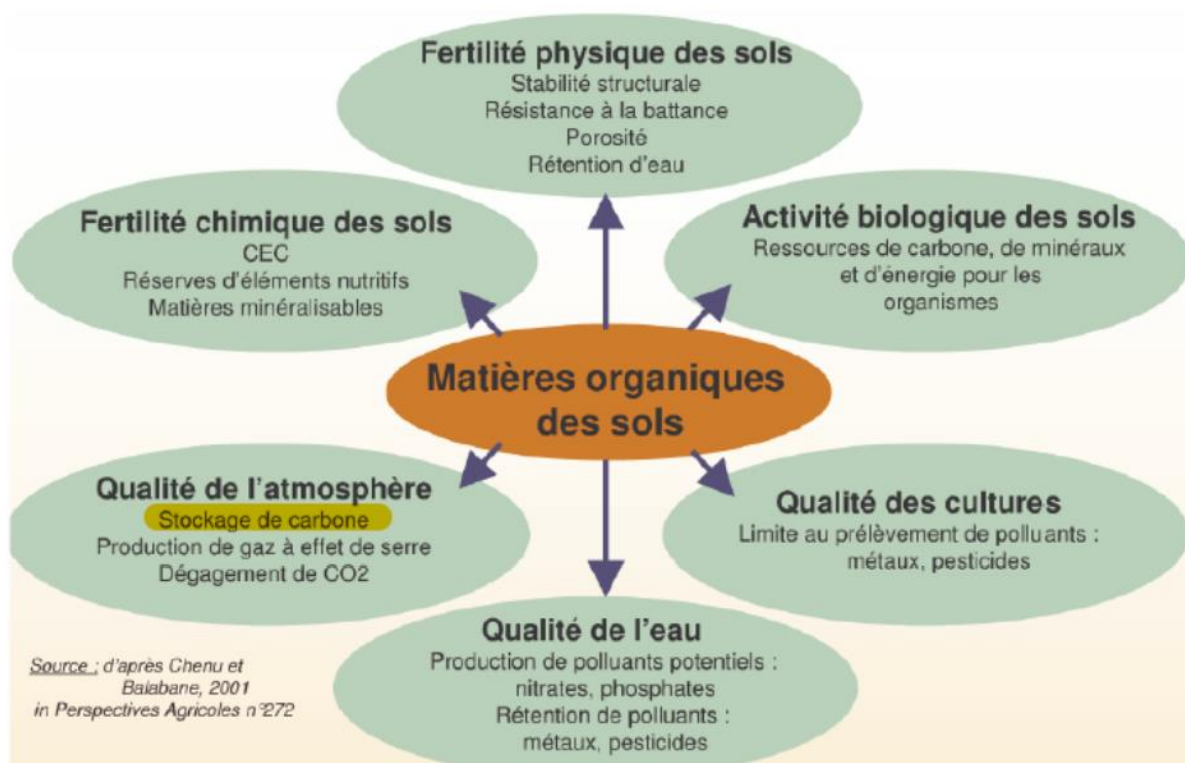


Figure I.6.5. Multiples rôles de la matière organique. Source : Chenu and Balabane, 2001.

Elle peut également être un indicateur utile du drainage et du degré d'aération du sol grâce aux formes chimiques ou à l'état d'oxydation du fer et du manganèse (Shepherd et al., 2008).

6.6. Racines

La profondeur potentielle d'enracinement traduit la capacité de rétention d'eau du sol et parallèlement un meilleur accès à l'eau et aux nutriments pour la plante (Shepherd et al., 2008). L'exploration d'un grand volume de sol par les racines est freinée par la présence d'une semelle de labour et peut être limitée davantage par d'autres paramètres (changement brusque de texture, pH, toxicité ou carences en nutriments, etc.) (Shepherd et al., 2008).

Les cultures dotées d'un système racinaire profond et vigoureux contribuent à augmenter les niveaux de matière organique du sol et ainsi la vie du sol en profondeur (Shepherd et al., 2008).

6.7. Croûte et couvert

L'encroûtement de la surface d'une parcelle réduit l'aération du sol, l'infiltration de l'eau et son stockage (Shepherd et al., 2008). Cela augmente alors le ruissellement et c'est dans ce sens que la couverture végétale permet de prévenir l'encroûtement, en minimisant la dispersion de la surface du sol par la pluie ou l'irrigation (Shepherd et al., 2008). Elle aide également à réduire l'encroûtement en interceptant les grosses gouttes de pluie avant qu'elles ne puissent frapper et compacter la surface du sol. (Shepherd et al., 2008)

6.8. Activité biologique

L'activité biologique peut être mesurée entre autres par la méthode de la lamelle-appât, ou en anglais « *bait lamina* ». Elle a été mise au point par Von Törne (1990a,b, cité par Boeraeve et al., 2020) pour mesurer *in situ* l'activité alimentaire des invertébrés du sol et sa répartition verticale dans les 15 premiers centimètres du sol (Römbke, 2014). La consommation de l'« appât », ou substance « *bait* », qui imite les matériaux dégradés par la faune du sol, est évaluée (Knacker et al., 2003 ; Ghaley et al., 2014, cité par Boeraeve et al., 2020) et pourrait être reliée au taux de minéralisation de l'azote (Boeraeve et al., 2020). Selon Ghaley et al. (2014), cela ne mesure pas l'activité de l'ensemble des organismes du sol qui contribuent au taux de décomposition. Ce sont particulièrement les vers de terre qui sont reconnus comme étant des mangeurs très efficaces sur les bandes de *Bait lamina* et ces dernières semblent refléter en grande partie leur activité (Hamel et al., 2007 ; Von Gestel et al., 2003)

II.1. Introduction

Dans le respect de la multifactorialité des exploitations agricoles, relevée plus haut, cette étude adopte une approche dite de « système ». Les résultats obtenus seront tirés des situations actuelles des fermes, en considérant l'intégralité de leurs conditions et leurs pratiques. Les parcelles choisies ne sont pas des parcelles d'expérimentation mais bien des parcelles en exploitation continue par l'agriculteur.

Une précaution toute particulière est requise lors de l'analyse statistique car cette approche engendre davantage de bruits dans les données.

II.2. Les 4 modalités de système agricole

Les quatre modalités étudiées ont été déterminées *a priori* selon deux critères.

Le premier critère concerne le travail du sol et fait la différence entre la modalité « agriculture conventionnelle » (CVL) et celle « de conservation » (CST). Une série de questions issue du travail de Braibant et Morelle (2018) permet d'attribuer une côte de 1 à 20 en fonction du lien entretenu avec l'agriculture de conservation. Toutes les exploitations témoignant un intérêt valant plus de 14/20 sont considérées comme pratiquant l'agriculture « de conservation ».

En second lieu, la modalité d'« agriculture biologique » (BIO) est simplement définie selon la détention ou non du certificat « AB » pour la parcelle en question.

Dans le cas où les deux critères sont réunis, on parle d'agriculture biologique de conservation (ABC) et dans le cas où aucun critère n'est complété, on rejoint l'agriculture conventionnelle.

A cela s'ajoute l'option de travailler avec une culture de couverture, qui se rencontre principalement dans les systèmes qui veulent réduire leur travail du sol.

La Figure II.2 schématise de manière simplifiée cette classification.

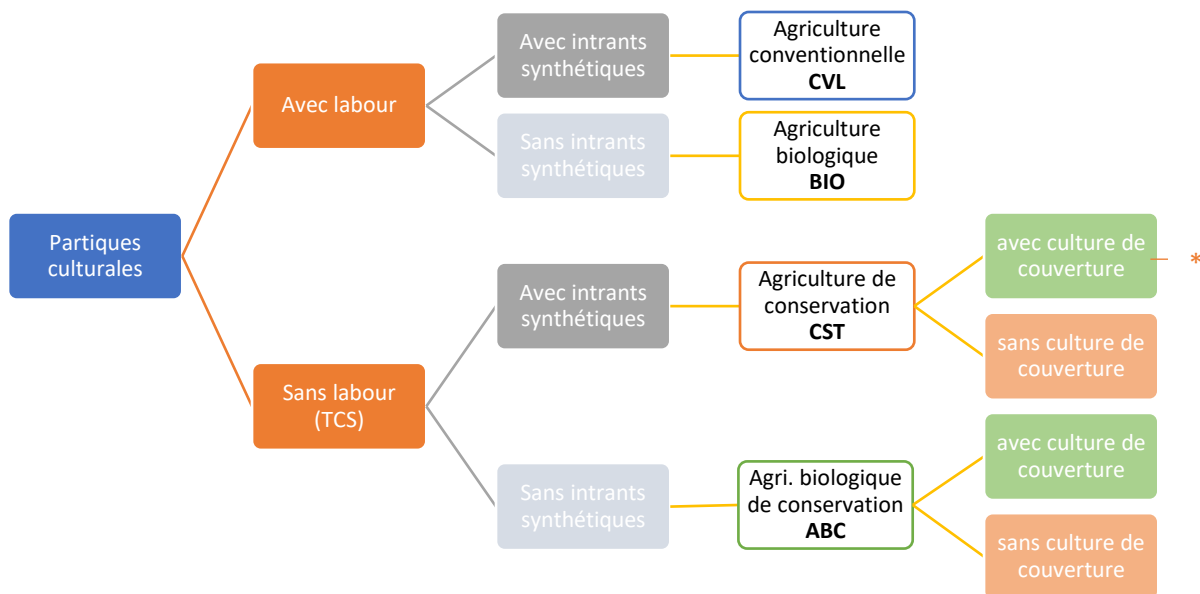


Figure II.2. Visualisation des critères séparant les 4 modalités étudiées.

Notons bien que le critère « avec intrants synthétiques » ne reflète pas leur usage systématique, mais les autorise simplement.

Strictement parlant, l’agriculture de conservation se définit plutôt autour des trois grands principes que sont le travail minimal du sol, la couverture permanente des sols et les associations culturales. Sa place dans le graphique devrait donc plutôt se situer au-delà de l’astéris orange.

Des informations sur les itinéraires de culture sont demandés lors d’une interview téléphonique pour approfondir la distinction entre les différents systèmes de pratiques agricoles.

II.3. Site et période d’étude

Le cas d’étude est issu d’un réseau de 52 exploitations préétabli par Mme Fanny Boeraeve. Ce réseau prend place au sein de différents climats et de différents Districts de l’Espace Rural (DER) dans le nord de la Wallonie. Selon Legrain et al. (2011), les DER constituent le premier niveau de stratification géomorphopédologique du territoire wallon. Ils relèvent les spécificités régionales en termes de modèle d’organisation des sols et de relation roches – reliefs – sols – occupation des sols. Il en existe 24 différents (Annexe 1).

La figure II.3.1 montre la concordance des DER et des dix zones bioclimatiques qui découpent le territoire wallon. Ces zones sont caractérisées par la longueur de la saison de végétation, les précipitations annuelles (mm), les températures moyennes, minimales et maximales et l’indice de Lang⁴ (WalOnMap, consulté le 13/05/2021). Notre site d’étude recouvre trois zones bioclimatiques, à savoir les Plaines et Vallées Scaldisiennes, le Hesbigno-Brabançon et la Sambre-et-Meuse et Condroz.

⁴ L’indice de Lang est le rapport entre la pluviométrie annuelle et la température moyenne annuelle

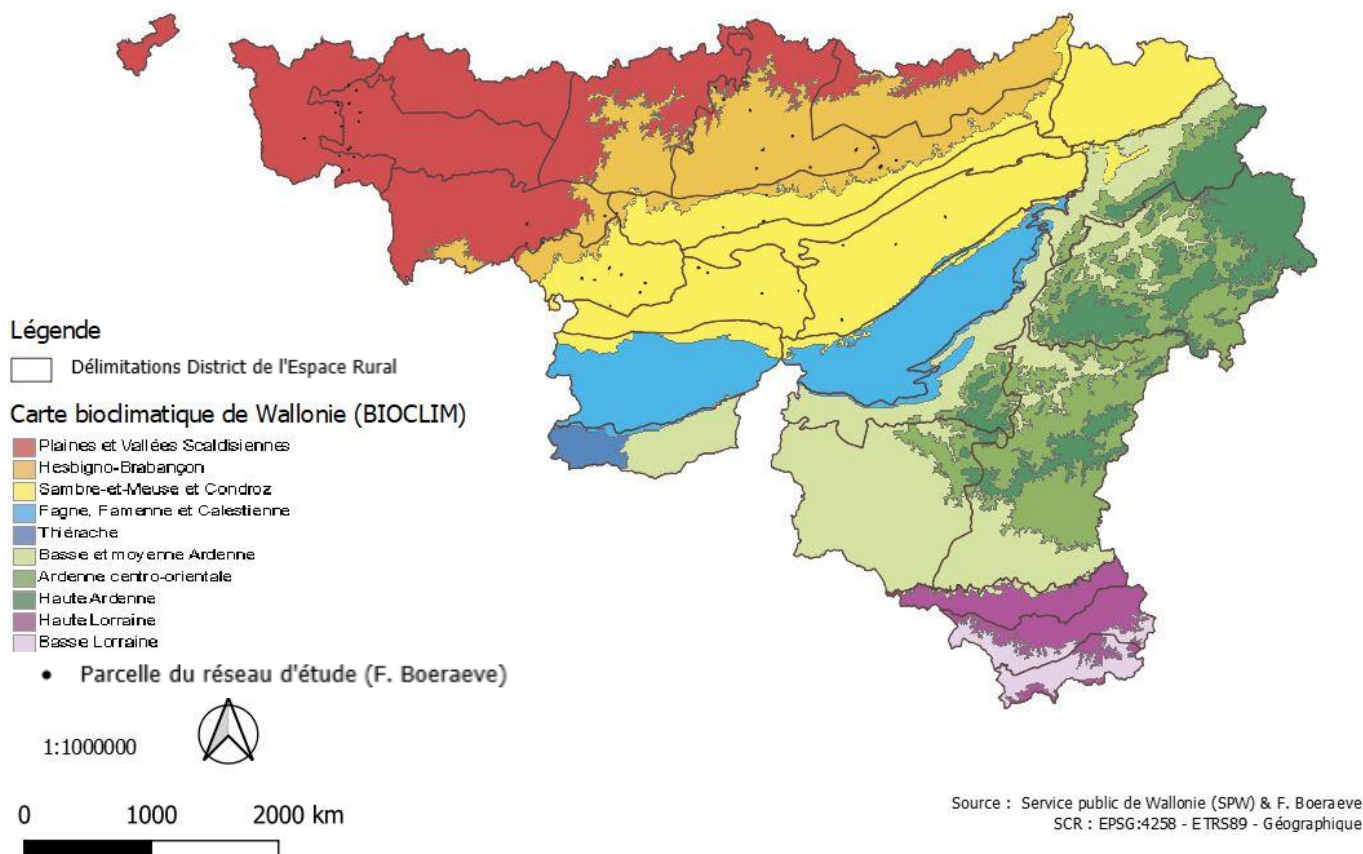


Figure II.3.1. Carte des dix zones bioclimatiques de Wallonie

Dans chaque exploitation, la parcelle d'étude a été choisie selon quatre critères : la modalité appliquée à la parcelle (ABC, BIO, CVL, CST), la culture en place (obligatoirement des céréales d'hiver), la parcelle doit être accessible et d'une superficie supérieure à un hectare.

Ce réseau de parcelles a été analysé dans son ensemble afin de n'en retenir qu'une sélection pertinente. La problématique d'étude demande de couvrir les quatre modalités de pratiques agricoles et la répartition géographique des parcelles engendre nécessairement la question fondamentale de la diversité des types de sols. Les données sur le sol, la topographie et la localisation des parcelles sont tirées des bases de données WalOnMap ainsi que de la légende de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (Annexe 2). Le logiciel QGIS a permis d'analyser le plan parcellaire.

Il a été convenu de ne représenter qu'un échantillon de la diversité des types de sols en ne retenant que les sols de texture limoneuse. L'importance agricole de la Région limoneuse (36 % de la surface agricole wallonne) justifie le fait d'y multiplier les échantillons et de plus, le réseau de ferme balaie majoritairement des exploitations dans cette région. Les sols ne seront alors distingués que par le type de drainage naturel qu'ils présentent.

Un premier lot comporte des sols limoneux à drainage normal et horizon B textural (sigle **Aba** majoritaire) et le deuxième lot est constitué de sols limoneux à drainage ralenti (sigles **Ad** ou **Ah**). Ce drainage, imparfait à humide, signifie que le sous-sol est saturé en eau en période humide – en hiver – mais peut néanmoins souffrir de sécheresse en saison sèche.

Le drainage du sol est un facteur pertinent car selon la littérature, l'humidité jouerait un rôle sur l'abondance de vers de terre. Bien que ce facteur de variation soit lié aux conditions géologiques, à la texture des sols et à la situation topographique du terrain, il pourrait être influencé par d'éventuelles opérations de drainage.

La variable « type de sol » est donc croisée avec la variable d'étude « système de pratiques » dans la sélection des 24 parcelles triées dans la Table II.3.2 et visibles à la Figure II.3.3. De ce fait, les efforts d'échantillonnage sont répartis sur l'ensemble des modalités agricoles avec six parcelles dans chaque modalité.

Les parcelles sont identifiées par des codes comprenant un chiffre, la modalité et le DER correspondant « 00 – AAA – B ». Leur localisation est donnée pour que les agriculteurs puissent s'identifier.

Table II.3.2. Codes parcellaires et localisation des 24 parcelles sélectionnées, en fonction de leur modalité de pratiques et de type de sol.

	ABC	CST	CVL	BIO
Limons à drainage bon	05ABCA (Louvain-la-Neuve) 07ABCB (Couthuin) 08ABCB (Souvret) 12ABCH (Estinnes)	09CSTA (Corbais) 35CSTB (Flawinne) 48CSTH (Haulchin) 28CSTG (Péruwelz) 33CSTG (Chercq)	41CVLB (Couthuin) 47CVLH (Piéton) 51 CVLE (Merbes)	25BIOA (Liernu) 22BIOA (Gembloux) 26BIOC (Bas-Oha)
Limons à drainage ralenti	06ABCA (Fernelmont) 13ABCF (Herquegnies)	37CSTE (Goziée)	24CVLA (Tourinnes) 36CVLA (Gembloux) 43CVLF (Anvaing)	54BIOB (Namur) 55BIOH (Piéton) 53BIOF (Tournai)

Tous les échantillonnages ont été réalisés du 15 mars au 23 avril. Selon les données IRM provisoires, cette courte période a subi des températures moyennes de 6 à 7,5°C (Annexe 3). Le mois de mars a bénéficié d'un temps pluvieux et relativement plus couvert (de 30 à 60 mm de précipitation sur le mois pour un total moyen de 94 kWh/m² d'ensoleillement) que le mois d'avril (de 25 à 40 mm de précipitation pour 130 à 145 kWh/m² d'ensoleillement cumulé sur le mois).

Au 15 mars (jour julien 74), les cultures en étaient au stade BBHC⁵ entre début tallage et plein tallage et présentaient un recouvrement de la parcelle allant de 10 à 80% (Annexe 4).

⁵ Echelle BBHC proposée par le Livre Blanc 2008, M. Plancquaert.

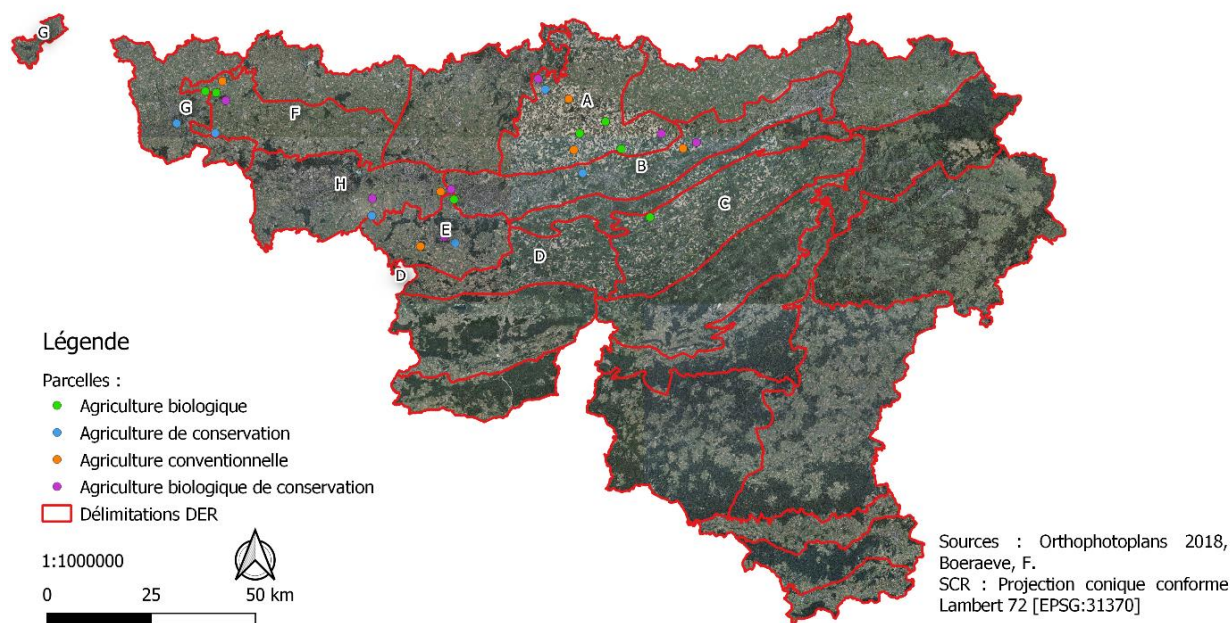


Figure II.3.3. Plan parcellaire des 24 parcelles retenues

II.4. Lien avec les hypothèses

L'ensemble des sous-échantillonnages a lieu sur les 24 parcelles retenues.

La représentation des quatre modalités de système de culture parmi celles-ci permet de vérifier l'hypothèse « Les pratiques agricoles influencent l'abondance des vers de terre ».

En distinguant les deux types de sols, on peut étendre la portée de ce travail et vérifier l'hypothèse « L'influence des pratiques sur l'abondance de vers de terre dépend du type de sol ».

Différentes fonctions écologiques vont être testées pour approcher les services écosystémiques et ainsi vérifier l'hypothèse « Les vers de terre contribuent plus ou moins aux différents services écosystémiques du sol ».

II.5. Echantillonnage des vers de terre : Test-Bêche

Le protocole de prélèvement par test à la bêche a été retenu parmi les choix possibles (le protocole « Moutarde »⁶ ou le protocole « Panier à vers-de-terre »⁷ issus tous deux de l'Université de Rennes). Les critères de décision sont la durée et la logistique requises pour les différents tests, la précision que ceux-ci amènent et la contrainte spatiale imposée aux agriculteurs.

Une semaine d'intervalle sépare les deux dates d'échantillonnage (15 mars et 22 mars). La démarche nécessite de connaître au mieux les conditions et le contexte d'échantillonnage des parcelles, c'est pourquoi plusieurs informations ont été collectées sur le terrain. Les informations sur le paysage entourant les parcelles ont de plus été vérifiées par la base de données WalOnMap (Annexe 5).

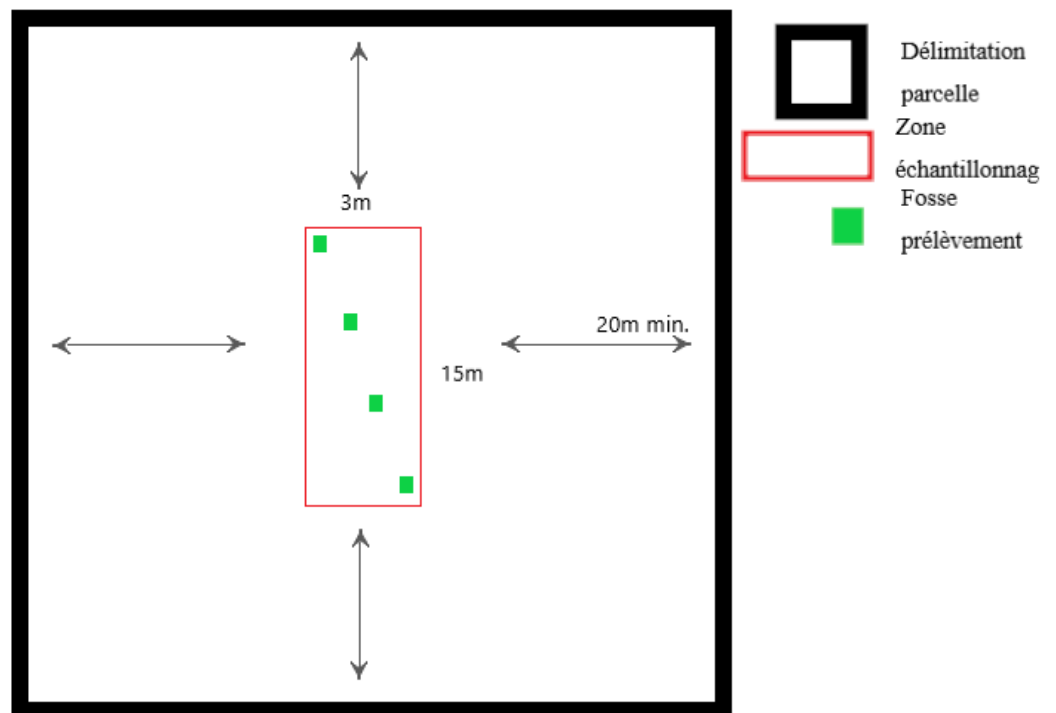


Figure II.5.1. Dispositif d'échantillonnage sur la parcelle



Figure II.5.2. Prélèvement des volumes de sol, du champ au laboratoire.

⁶ <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/protocole-participatif-moutarde>

⁷ <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/protocole-participatif-paniers-a-vers-de-terre>

Quatre volumes de sol de 16x25x25cm (largeur x longueur x profondeur) sont prélevés à l'aide d'une bêche et d'un gabarit en métal de cette dimension. Le transect est réalisé en escalier sur 3 mètres de large et 15 mètres de long. Ainsi, les volumes prélevés sont distants de cinq mètres les uns des autres. Tous sont situés à 20 mètres au moins des marges du champ pour éviter un effet bordure (Figure II.5.1).

Les volumes prélevés sont répartis en boîtes de « superficie » (0-10 cm) et de « profondeur » (10-25 cm) et toutes sont transportées jusqu'au laboratoire (Figure II.5.2).

Deux techniques sont alors mises en place pour mettre en évidence les lombriciens. La première consiste à émettre manuellement les boîtes de terres sèches de profondeur. La deuxième concerne les boîtes de superficie, préalablement inondées, et fait l'objet d'une technique de lavage – tamisage.

Les vers sont comptés et classés dans leur groupe écologique au moyen de la clé de détermination du projet « Observatoire Participatif des Vers de Terre » (OPVT) de l'Université de Rennes (Figure II.5.3).

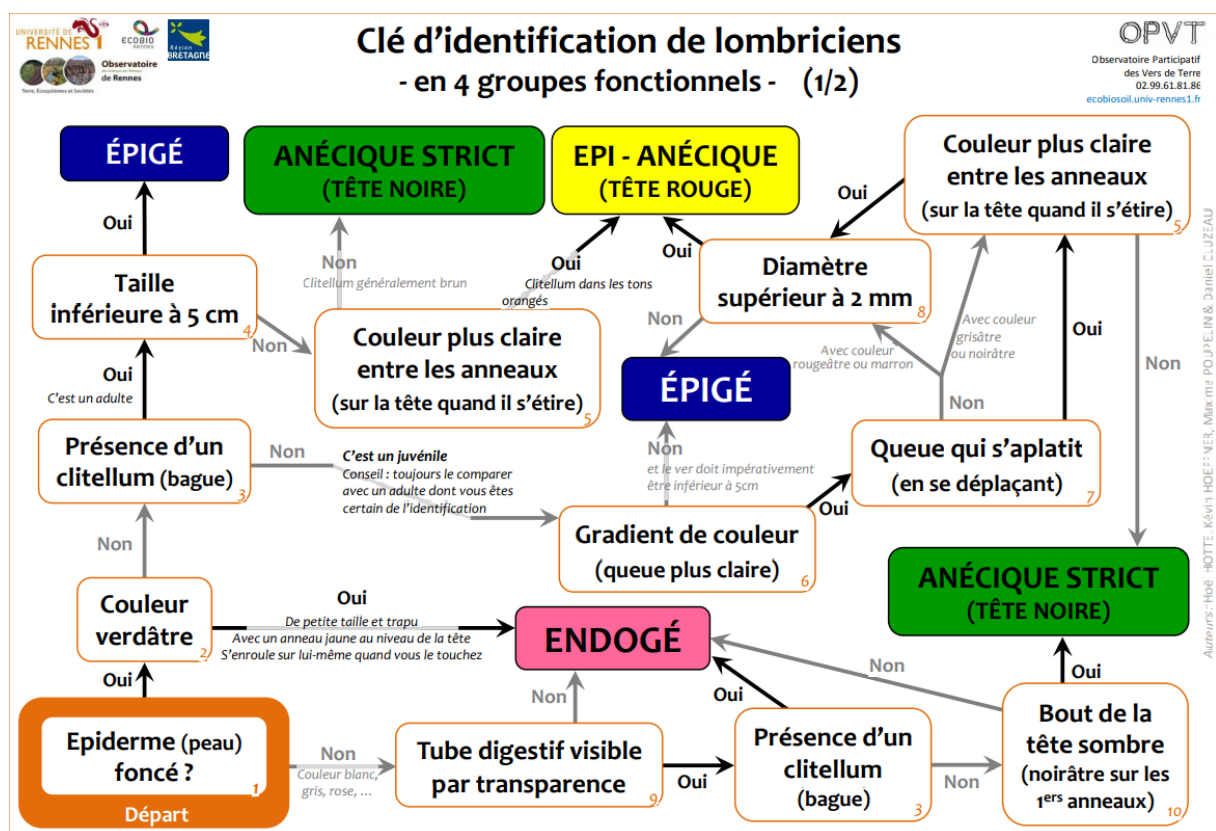


Figure II.5.3. Clé d'identification de lombriciens en 4 groupes fonctionnels.
Source : Université de Rennes 1/CNRS - OSUR - UMR Ecobio

Le nombre moyen de vers de terre par mètre carré est calculé avec la formule suivante :

Vers de terre par m² = nombre moyen de vers de terre par fosse d'une parcelle × 25. (Stroud, 2019)

II.6. Analyse composite des sols

Dans la zone d'échantillonnage de la parcelle (3x15m), deux échantillons de sol composites sont collectés, l'un dans la partie supérieure (a), l'autre dans la partie inférieure (b). Chacun d'eux, formant un volume de 500 grammes, est obtenu à partir de 10 trous de tarières aléatoires (22 cm de profondeur, 3 cm Ø) (Figure II.6).

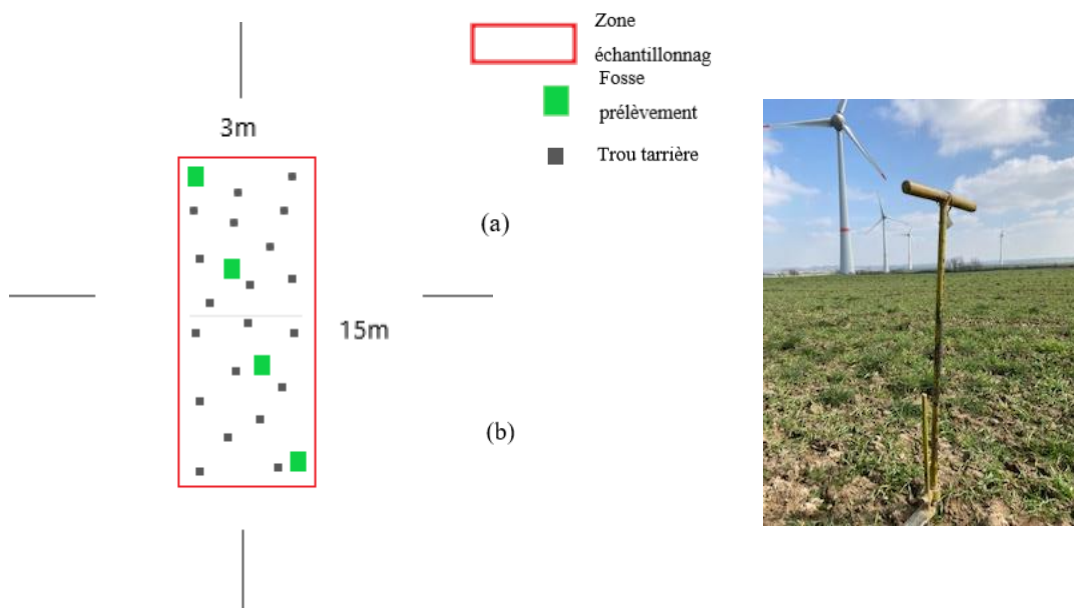


Figure II.6. Echantillonnage composite à la tarière, dispositif et matériel

Les échantillons sont analysés par le laboratoire du Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité à La Hulpe. Là, ils sont séchés, homogénéisés et utilisés pour des analyses physico-chimiques et de texture.

Les minéraux Phosphore⁸, Calcium⁸, Magnésium⁸, Potassium⁸ sont analysés moyennant une extraction à l'acétate d'ammonium 0,5N EDTA ("Ethylenediaminetetraacetic acid") 0,02M, pH 4,65 (PTCS9) et les concentrations sont ensuite évaluées par méthodes de spectrophotométrie d'absorption atomique (Mg, Ca and K) ou par colorimétrie au bleu de Molybdène (P).

Les autres paramètres sont évalués selon les normes ISO suivantes : pH eau et pH KCl 1N : ISO 10390 ; Carbone Total : NF ISO10694 ; Capacité d'échange cationique : ISO 23470 ; Azote total⁸ : NF ISO 13878.

L'analyse de Granulométrie des sols détermine la texture⁸, soit le pourcentage d'argile⁸, de limon (fin, grossier et total)⁸ et de sable (fin, grossier et total)⁸ grâce à une méthode de granulométrie dérivée de NF X31-107 et fournit le triangle textural⁸ correspondant pour chaque parcelle. Elle renseigne également le taux d'humus⁸ (= Carbone organique⁸ x 2) et le CaCO₃ par méthode dérivée de NF ISO 10693.

⁸ Analyses sous accréditation BELAC

II.7. Différentes approches des services écosystémiques

II.7.1. *Bait lamina*

Les bandes de *Bait lamina* proviennent de l'entreprise Terra Protecta GmbH (Allemagne) et consistent en des bandes de PVC de 16 cm de long avec des trous de 16×2 mm remplis de cellulose, de flocons de son et de charbon actif.

6 bandes sont enfoncées verticalement dans le sol, marquées d'un jalon placé à proximité. Elles sont disposées en escalier au centre de la parcelle, non loin de la zone d'échantillonnage des vers de terre, suivant la même logique que le « Test-Bêche » présentée précédemment (Figure II.7.1.1).

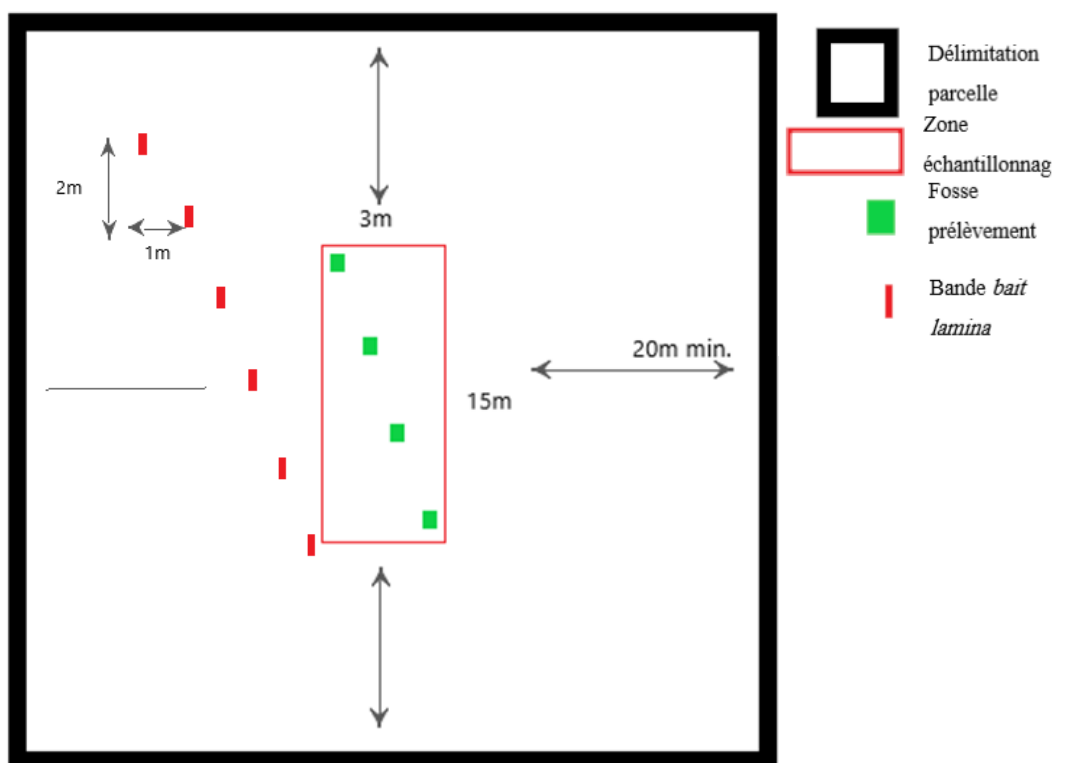


Figure II.7.1.1. Dispositif expérimental des bandes de Bait lamina



Figure II.7.1.2. Relevés d'une bande (a), disposition sur la parcelle (b) et comptage des trous consommés (c)

La réalisation d'un essai témoin permet d'identifier la durée d'étude la plus appropriée. Il faut attendre qu'environ la moitié des bandes soient dégradés de plus de 50% avant de les enlever.

Dans le cas présent, l'expérience a duré 22 jours. Les bandes sont restées en place du 2 au 23 avril. Deux relevés ont eu lieu, le 17 et le 20 avril (Figure II.7.1.2) afin de pouvoir mettre en évidence une évolution de la consommation.

II.7.2. Slake test

Dans chacune des 24 parcelles, 16 petites mottes de 4-5 cm de diamètre sont collectées sur la zone d'échantillonnage.

Elles sont tour à tour placées dans un panier en plastique compartimenté, qui est ensuite inséré dans un bac rempli d'eau (Figure II.7.2). Les mottes sont immergées pendant une minute, puis le panier est relevé pour constater leur état de dégradation. Ce schéma est répété jusqu'à cinq fois, le temps que le volume restant de la motte soit inférieur à 10% de son volume initial. On considère alors que la motte est dégradée et on lui attribue une classe, référant le nombre de minutes écoulées. Ainsi, la classe 2 correspond à des mottes qui ont été dégradées au bout de la deuxième minute complète passée dans l'eau.



Figure II.7.2. Décomposition des agrégats dans l'eau (Slake test)

II.7.3. Méthode « VSA »

Initialement prévue comme une carte de points, la méthode de « *Visual Soil Assessment* » développée par la FAO et BioAgriNomics a ici été adaptée afin d'éviter les redondances avec les analyses d'échantillons composites en laboratoire.

Chaque indicateur reçoit une note visuelle de 0 (mauvais), 0,5 (intermédiaire mauvais), 1 (modéré), 1,5 (intermédiaire bon) ou 2 (bon), en comparant la qualité du sol avec des tableaux ou des photographies issues du manuel du guide de terrain de la FAO.

Les observations sont réalisées sur huit parcelles, choisies pour qu'il y ait deux répétitions par modalité de système, au sein de la catégorie des sols limoneux à drainage bon. Le but est de vérifier l'adéquation entre le type de sol selon la théorie (type de drainage) et selon la réalité sur le terrain. L'hypothèse de

départ veut que ces sols ne présentent pas de grandes différences visuelles. Pour vérifier la bonne indication de cette méthode, une parcelle de limon à drainage ralenti est également évaluée pour montrer des résultats *a priori* différents de toutes les autres parcelles.

La classe texturale est évaluée grâce aux différents aspects qu'une poignée de terre peut présenter : un son granuleux et/ou râpeux, un toucher savonneux, collant ou lisse et des grumeaux. Un autre moyen est de mouler cette poignée de terre en boule (si cela est toutefois possible) puis la presser à plat et observer si elle se déforme, avec ou sans fissures, ou si la boule se désagrège. Les références pour ce critère sont données dans la Figure II.7.3.1.

Visual score (VS)	Textural class	Description
2 [Good]	Silt loam	Smooth soapy feel, slightly sticky, no grittiness. Moulds into a cohesive ball that fissures when pressed flat.
1.5 [Moderately good]	Clay loam	Very smooth, sticky and plastic. Moulds into a cohesive ball that deforms without fissuring.
1 [Moderate]	Sandy loam	Slightly gritty, faint rasping sound. Moulds into a cohesive ball that fissures when pressed flat.
0.5 [Moderately poor]	Loamy sand Silty clay Clay	Loamy sand: Gritty and rasping sound. Will almost mould into a ball but disintegrates when pressed flat. Silty clay, clay: Very smooth, very sticky, very plastic. Moulds into a cohesive ball that deforms without fissuring.
0 [Poor]	Sand	Gritty and rasping sound. Cannot be moulded into a ball.

Figure II.7.3.1. Références des classes texturales du sol. Source : Sheperd et al., 2018

Pour évaluer **la structure**, il faut prélever à la bêche un volume de 200 mm³ de terre entre le passage des roues. Ce bloc de terre est ensuite lâché, à partir d'une hauteur d'un mètre du sol sur un bac en plastique. Le bloc est ainsi séparé en plusieurs mottes et l'opération est répétée jusqu'à trois fois avec les plus grosses d'entre elles. La mesure de la distribution des agrégats se fait par étalement des fractions les plus grossières vers les plus fines (Figure II.7.3.2).

L'information de la **couleur** est également tirée de ces mottes. Habituellement comparée à une motte « témoin » prélevée sous la ligne de clôture, ici la comparaison se fait avec les photos du manuel.

Les sols bruns, jaune-brun, rouge-brun et rouges sans tâches gris-ocre, indiquent des conditions bien aérées et bien drainées. Les couleurs gris-bleu peuvent indiquer que le sol est mal drainé ou gorgé d'eau et mal aéré pendant de longues périodes (Figure II.7.3.3a).

La quantité de concrétions complète l'observation des mottes (Figure II.7.3.3b).



GOOD CONDITION VS = 2
 Soil dominated by friable, fine aggregates with no significant clodding. Aggregates are generally subrounded (nutty) and often quite porous.



MODERATE CONDITION VS = 1
 Soil contains significant proportions (50%) of both coarse clods and friable fine aggregates. The coarse clods are firm, subangular or angular in shape and have few or no pores.



POOR CONDITION VS = 0
 Soil dominated by coarse clods with very few finer aggregates. The coarse clods are very firm, angular or subangular in shape and have very few or no pores.

Figure II.7.3.2. Références des distributions de tailles d'agrégats. Source : Sheperd et al., 2018.



*Figure II.7.3.3. Références en termes de mottes, couleur (a) et concrétions (b).
 Source : Sheperd et al., 2018.*

Le **développement des racines** est noté selon la profondeur d'une couche limitante (Figure II.7.3.4a). S'il apparaît un épaissement excessif des racines, cela traduit une résistance à la pénétration des racines due à la présence d'une **semelle de labour**. Elle est mise en évidence facilement en enfonçant un couteau le long du profil de sol (Figure II.7.3.4b).

VSA score (VS)	Potential rooting depth (m)
2.0 [Good]	> 0.8
1.5 [Moderately good]	0.6–0.8
1.0 [Moderate]	0.4–0.6
0.5 [Moderately poor]	0.2–0.4
0 [Poor]	< 0.2



*Figure II.7.3.4. Références pour la profondeur potentielle du développement des racines (a), et méthode d'évaluation de la profondeur de semelle de labour (b).
Source : Sheperd et al., 2018*

La quantité de racines est également jugée sur une motte de terre de surface. Les notes attribuées sont alors : 0 (pas de racine), 1 (racines présentes), 2 (racines abondantes). Des demi-points peuvent toujours être accordés.

La **porosité** est perçue au centre d'une tranche de terre préalablement découpée en deux. Les espaces, les interstices, les trous, les fissures et les crevasses sont observés entre et à l'intérieur des mottes de terre (Annexe 6).

Enfin, le critère de **croute** et celui du **couvert** sont, comme expliqué plus haut, liés. L'observation se fait en balayant du regard une partie représentative de la parcelle et en la confrontant aux photos du manuel FAO (Annexe 6bis).

Le critère d'érosion (par l'eau ou par le vent), initialement prévu dans l'évaluation de la FAO n'est pas observable dans cette étude à cause du stade avancé des cultures.

II.8. Itinéraire technique des agriculteurs

Plusieurs informations sur l'itinéraire cultural de chaque parcelle sont collectées lors d'un entretien dirigé avec leur gestionnaire. Les questions posées sont relatives à leur lien plus ou moins fort avec l'agriculture de conservation d'une part, via les trois piliers de Braibant et Morelle, ou l'agriculture biologique d'autre part, grâce à leur année de certification. En effet, ce dernier critère permet de différencier de manière plus sérieuse un agriculteur qui pratique l'agriculture biologique depuis plusieurs décennies (score de 18) d'un autre qui vient à peine d'obtenir la certification (score de 10). Ces scores sont attribués sur base de l'évolution de l'agriculture biologique en Wallonie (Figure I.1).

Pour le critère de travail du sol, l'interprétation des réponses se base notamment sur la logique de construction de l'indice « *Soil Tillage Intensity Rating* » (STIR) développé par l'« *U.S. Department of Agriculture* » (USDA). Il s'agit d'un indice autonome qui permet d'évaluer les systèmes de travail du sol sur des paramètres autres que les paramètres traditionnels du sol. Il se base sur le type de travail, de la gravité et du nombre d'interventions de perturbations de la qualité du sol et chaque paramètre est accompagné d'un coefficient (voir formule ci-dessous).

$$STIR = (vitesse\ d'opération \times 0,5) \times (type\ de\ travail\ du\ sol \times 3,25) \\ \times (profondeur\ de\ l'opération \times 1) \\ \times \left(\frac{pourcentage\ de\ surface\ perturbée\ (\%)}{100} \times 1 \right)$$

Le taux d'intensité de travail du sol (« STIR ») sera élevé pour les parcelles présentant beaucoup de perturbations et une fréquence d'opérations importante.

Malheureusement, la vitesse d'opération et le pourcentage de surface perturbée ne sont pas des paramètres connus. Dès lors, le type de travail du sol – représenté par une action et marqué d'un coefficient (Table II.8) – ainsi que la profondeur de travail seront utilisés pour attribuer un « STIR partiel » à l'itinéraire technique de chaque parcelle.

Table II.8. Type de travail sous forme de coefficient, défini par la/ les action(s) menée(s) par l'outil

Action de l'opération	Coefficient associé	Exemples d'outils agricoles
Inverser	1	Charrue à versoir
Enfouir	0,8	Disques, charrue à chisel, déchaumeuse
Mélanger et affiner	0,7	Herse rotative, vibroculteur, cultivateur
Soulever et fissurer	0,4	Sous-soleuse, décompacteur
Scarifier (désherber)	0,25	Herse étrille, bineuse, houe rotative
Compresser	0,15	Piétinement pâturage ou machines (semis, broyage)

Tous les intrants apportés à la parcelle sont séparés en trois catégories, à savoir : « organique », « minéral » ou « produits phytosanitaires ». Cette dernière catégorie couvre les insecticides, fongicides, herbicides, semences traitées et régulateurs de croissance. C'est le nombre de produits différents qui est retenu. Seuls les apports réalisés avant la fin de la période d'étude, soit le 23 avril, sont comptés.

II.9. Analyses statistiques

Les analyses sont réalisées avec le logiciel RStudio, version 4.0.2. La normalité est vérifiée sur les résidus des modèles de régression. Les codes sont disponibles en annexe et les packages nécessaires à toutes ces analyses sont : FactoMineR, factoextra, arm, lme4, lmeTest, car, vegan et MASS.

9.1 Analyses univariées

9.1.1. Modèle linéaire mixte généralisé (glmer)

Les variables de comptage (nombre de vers de terre totaux et nombre de trous de substance « bait » consommés) sont mises tour à tour en relation avec les pratiques agricoles, les types de sols et l'interaction entre ces deux facteurs fixes, tenant compte de la parcelle et de l'échantillonnage. La différence tient du fait que l'abondance des vers de terre est de plus reliée à l'appartenance à un groupe écologique et à un stade de développement, tandis que la consommation de substance « bait » tient compte de la position du trou consommé sur la moitié inférieure ou supérieure de la bande.

L'hypothèse de départ est la suivante : Le type de sol et le système de pratiques agricoles jouent sur le nombre de vers de terre et le nombre de trous consommés par parcelle (P-valeurs des deux variables inférieures à 0,05).

9.1.2. Modèle linéaire mixte (lmer)

Le score de stabilité des agrégats est représenté par la somme des classes des 16 mottes recueillies sur la parcelle lors du *slake test*. Le modèle de régression tient à nouveau compte des pratiques agricoles, du type de sol et de l'interaction entre ces deux facteurs fixes.

L'hypothèse de départ est la suivante : Le type de sol et le système de pratiques agricoles jouent sur la stabilité des agrégats (P-valeur des deux variables inférieures à 0,05).

9.1.3. Modèle linéaire fixe (lm)

L'analyse statistique souhaite montrer le caractère décisif du drainage comme catégorisation du type de sol. En effet, par l'étude de la carte des sols, cette seule caractéristique permettait de distinguer nos types de sols. Grâce aux échantillons composites, les données sont nombreuses et permettent d'entreprendre une étude plus approfondie des types de sols. Chaque critère des analyses de granulométrie ou de teneurs en minéraux est alors repris dans un modèle linéaire fixe.

L'hypothèse de départ est la suivante : La majorité des critères ne varie significativement pas au sein d'un type de sol (P-valeurs majoritairement supérieures à 0,05).

9.2. Analyses multivariées - Analyses en composantes principales (pca)

9.2.1. Une évaluation plus précise des systèmes est fournie dans un nouveau jeu de données reprenant le détail des pratiques réalisées sur les parcelles. Le regroupement des parcelles par modalité est évalué visuellement dans un cercle de corrélation.

L'hypothèse de départ est la suivante : Il n'y a pas de différence intra-modalité, les parcelles se regroupant selon leur appartenance dans l'espace défini selon les x premières composantes.

9.2.2. Pour explorer la corrélation potentielle entre les paramètres physico-chimiques du sol ainsi que leur texture avec le type de système et de sol, des analyses en composantes principales (ACP) sont effectuées.

Les parcelles sont d'abord identifiées dans le cercle de corrélation selon leur appartenance aux 4 modalités (9.2.2.1)

L'hypothèse de départ est la suivante : Les parcelles sont éparpillées dans l'espace défini selon les x premières composantes principales sans être regroupées entre parcelles de même système.

Ensuite, elles sont identifiées par leur type de drainage (9.2.2.2). Cela permet de vérifier visuellement l'appartenance plus ou moins profonde des parcelles à deux groupes distincts, qui aura déjà été calculé au point 9.1.3.

9.2.3. Afin de savoir si les vers de terre, repris par groupes écologiques, influencent les indicateurs de SE (à savoir la stabilité des agrégats ou la proportion de substance « *bait* » consommée), le jeu de données correspondant à ces variables subit une ACP.

L'hypothèse de départ est la suivante : Les abondances de vers dans les différents groupes écologiques suivent la même direction que les indicateurs de SE dans l'espace défini selon les x premières composantes principales (9.2.3.1).

En regardant la corrélation des variables d'abondance des vers avec la position des parcelles, les modalités qui accueillent un groupe écologique en particulier sont alors mises en lumière (9.2.3.2).

Partie III – Présentation des résultats

Cette section présente en premier lieu les résultats concrets n'ayant pas nécessités d'analyses supplémentaires. Ensuite, elle développe et confronte ces résultats au moyen d'analyses statistiques.

III.1. Résultats

1.1. Analyses composites des sols

Les analyses granulométriques réalisées en laboratoire donnent des résultats assez homogènes, et confirment visuellement l'appartenance de toutes les parcelles étudiées à la catégorie de sol « limons » (L) ou « limons lourds » (LLO). Seule la parcelle 55BIOH (représentée par ses deux composites) montre une composition de sol « limons sableux lourds » (LSL) (Figure III.1.1).

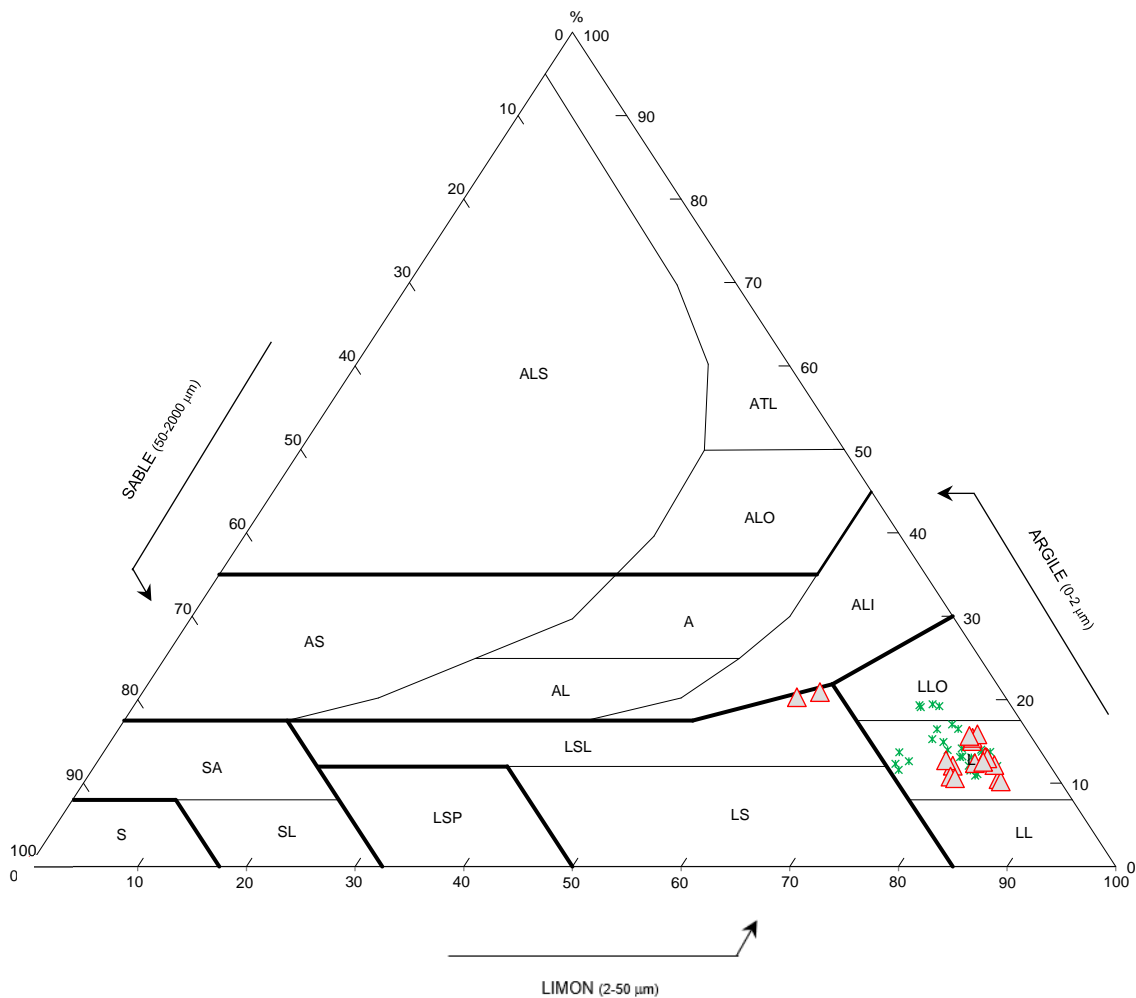


Figure III.1.1. Triangle textural de la carte des sols de Belgique, réalisé avec le logiciel Excel. (Croix= limons bons, triangle = limons lents)

Les parcelles représentées par une croix verte sont les parcelles de « limons bons » dont le drainage est normal tandis que les parcelles représentées par un triangle rouge sont des « limons lents » en référence à leur drainage qui est ralenti.

L'ensemble des résultats de granulométrie et de teneurs se trouvent en Annexe 7.

1.2. Evaluation visuelle du sol (« VSA Method »)

Après avoir présenté les informations du matériau sur base des analyses de laboratoire, ce sont les données issues du terrain qui seront maintenant confrontées avec la théorie.

Toutes les informations collectées sur les parcelles sont rassemblées à la page suivante. Certaines photographies prises sur le terrain peuvent servir d'appui pour justifier les notes de plusieurs critères à la fois, ce qui explique leur position sur plusieurs colonnes.

La semelle de labour n'est observée dans aucune des huit parcelles. De manière générale, les profils observés sont semblables aux photos ci-dessous (Figure III.1.2).



Figure III.1.2. Absence de semelle de labour dans les huit parcelles étudiées.

Les notes attribuées sont très souvent intermédiaires. Elles sont additionnées pour donner une note d'ensemble (« Total »). Les parcelles présentent toutes des notes autour de 11 ou 12. Seule la parcelle située sur un sol limoneux à drainage ralenti présente un résultat plus faible. Cela démontre la bonne indication de cette méthode d'évaluation.

Le critère « texture » présente ici des variations alors que dans les faits les granulométries sont homogènes. C'est alors un effet dû au couvert ou à la présence d'une croûte en surface qui expliqueraient cette observation. En effet, les semis n'ont pas été réalisés le même jour et les cultures présentent des couverts différents (Annexe 4).

	Critère	Texture	Structure	Porosité	Couleur	Motte	Racine	Croute	Couvert	TOTAL
09CSTA	Note Photos d'appui	2	0.5	1	1	1.5	1.5	2	2	11.5
37CSTE (Limon ralenti)	Note Photos d'appui	0.5	1	0.5	1	2	1.5	1	1	8.5
05ABCA	Note Photos d'appui	2	1	1	0.5	2	2	2	2	12.5
07ABCB	Note Photos d'appui	1	1	1	1	2	1.5	2	2	11.5
41CVLB	Note Photos d'appui	2	0.5	1	1.5	2	1.5	2	2	12.5
47CVLH	Note Photos d'appui	1	1	0.5	1	2	1.5	1	2	10
22BIOA	Note Photos d'appui	2	1	1	1	1.5	1.5	2	1	11
25BIOA	Note Photos d'appui	2	0	2	0.5	2	2	2	2	12.5

1.3. Abondance des vers de terre

Les résultats du comptage des vers de terre se trouvent à la Table III.1.3. Les vers sont triés selon leur groupe écologique et le total est transcrit en abondance d'individus par mètre carré.

Table III.1.3. Comptage et tri des vers de terre selon leur groupe écologique

Parcelle	Jour	Epigé	Epi-anécique	Anécique	Endogé	Total	Abondance/m ²
5ABCA	74	3	7	4	9	23	144
6ABCA	74	6	1	7	37	51	319
7ABCB	74	14	4	3	48	69	431
8ABCB	81	1	5	0	2	8	50
9CSTA	74	12	16	7	23	58	362
12ABCH	81	0	0	0	2	2	12
13ABCF	81	3	4	4	13	24	150
22BIOA	74	8	1	7	13	32	200
24CVLA	74	7	1	3	24	35	219
25BIOA	74	1	3	6	8	18	112
26BIOC	74	6	0	4	9	19	119
28CSTG	81	0	4	2	16	22	137
33CSTG	81	1	40	1	11	53	331
35CSTB	74	1	0	2	5	8	50
36CVLA	74	21	0	7	65	93	581
37CSTE	81	4	1	0	9	14	87
41CVLB	74	32	3	1	28	64	400
43CVLF	81	16	3	6	31	56	350
47CVLH	81	9	1	7	42	59	369
48CSTH	81	3	1	2	4	10	62
51CVLE	81	0	2	1	5	8	50
53BIOF	81	3	3	0	11	17	106
54BIOB	74	4	2	4	4	14	87
55BIOH	81	16	2	18	36	72	450

1.4. Stabilité des agrégats

Les classes attribuées lors de l'expérience du *slake test* se retrouvent en Annexe 8. La somme des 16 classes donne un score de stabilité des agrégats. C'est ce score, allant de 58 à 95, qui sera utilisé pour les analyses statistiques. *A priori*, la variabilité n'est pas très grande entre les différentes parcelles.

1.5. Evolution du taux de minéralisation des sols au mois d'avril

Le test de *Bait lamina* permet de mesurer l'activité de nourrissage des sols, et, par extrapolation, donne une idée du taux de minéralisation du sol. Grâce aux trois relevés effectués durant le mois d'avril, une évolution a pu être tracée (Figure III.1.5). Selon les moyennes générées sur Excel, les systèmes du plus actif au moins actif se classent dans l'ordre suivant : Système conventionnel > biologique > de conservation > biologique de conservation.

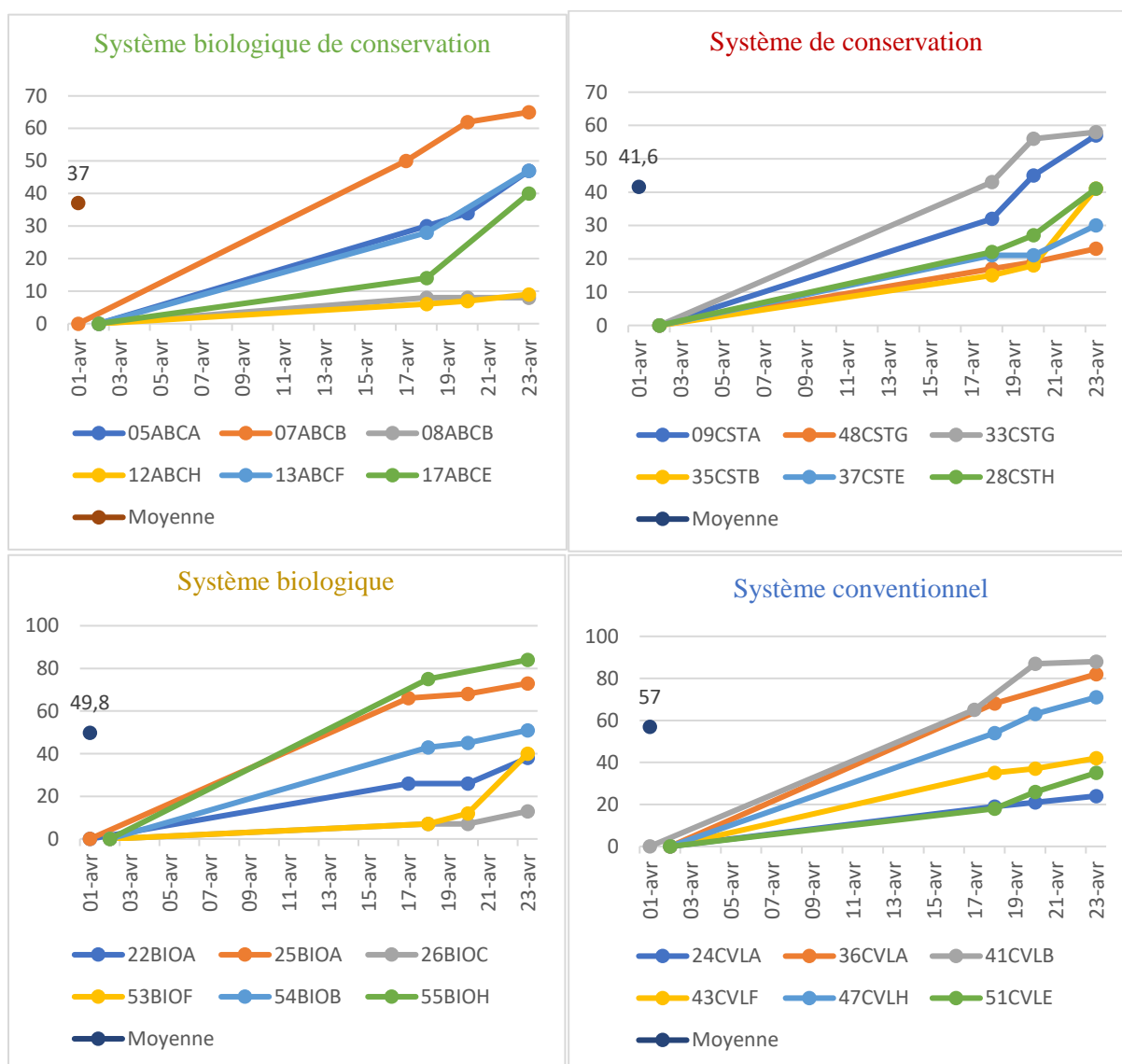


Figure III.1.5. Evolution du nombre de trous consommés (par parcelle) sur les bandes de Bait lamina en fonction du temps.

1.6. Itinéraires techniques des agriculteurs

Les informations tirées des interviews téléphoniques au sujet des itinéraires techniques des agriculteurs se trouvent à la page suivante (Table III.1.6).

Table III.1.6. Itinéraires culturels des parcelles étudiées

ID Parcelle	Système	Céréale	Culture précédente	Couvert	Code STIR		Score AC	Phytos/engrais/amendements			Score AB
					Avant semis	Pendant culture		Organique	Minéral	Phyto	
05ABCA	ABC	Epeautre	Maïs grain	Non	0,6	0	17	1	0	0	10
06ABCA	ABC	Epeautre	Pois protéagineux de printemps	Oui	3,7	0,3	17	1	0	0	12
07ABCB	ABC	Triticale	Chicorée	Non	1,3	0,3	11,5	1	0	0	13
08ABCB	ABC	Epeautre	Carotte	Non	1,9	0,2	10,5	1	0	0	18
09CSTA	CST	Froment d'hiver	Pommes-de-terre	Non	0,6	0	17	0	4	1	2
12ABCH	ABC	Orge d'hiver	Céréales d'hiver	Oui	0,7	0,2	10	2	0	0	10
13ABCF	ABC	Froment d'hiver	Maïs ensilage	Non	0,9	0,2	10,5	2	0	0	11
22BIOA	BIO	Froment d'hiver	Pois protéagineux de printemps	Non	2	0	2,5	1	0	0	11
24CVLA	CVL	Froment d'hiver	Betteraves	Non	2,7	0	5,5	0	2	2	0
25BIOA	BIO	Triticale et froment	Céréales d'hiver	Non	2	0	9	0	0	0	10
26BIOC	BIO	Froment + épeautre	Chicorée	Non	1,1	0,1	5,5	1	0	0	10
28CSTG	CST	Froment d'hiver	Lin textile	Oui	1,1	0	15	0	4	3	0
33CSTG	CST	Froment d'hiver	Betteraves	Non	1,3	0	15	0	0	1	0
35CSTB	CST	Froment d'hiver	Céréales d'hiver	Non	1,5	0	15	0	2	1	0
36CVLA	CVL	Froment d'hiver	Lin oléagineux	Non	0,7	0	9,5	0	2	6	0
37CSTE	CST	Froment d'hiver	Pommes-de-terre	Non	0,8	0	14	0	3	3	0
41CVLB	CVL	Froment d'hiver	Pommes-de-terre	Non	3,5	0	7,5	0	2	0	2
43CVLF	CVL	Froment d'hiver	Pommes-de-terre	Non	2	0	5,5	0	1	1	8
47CVLH	CVL	Froment d'hiver	Pois protéagineux de printemps	Non	1,9	0	6,5	0	3	7	0
48CSTH	CST	Epeautre	Maïs grain	Non	0,7	0	13	0	5	1	8
51CVLE	CVL	Froment d'hiver	Céréales d'hiver	Non	2,1	0	2	1	2	4	0
53BIOF	BIO	Petit épeautre	Amidonner + caméline	Oui	1,2	0,1	7	0	1	0	11
54BIOB	BIO	Triticale + Féverolle pois	Mélange protéagineux + céréales	Oui	3,6	0,1	4	1	0,3	0	13
55BIOH	BIO	Epeautre	Céréales d'hiver	Non	1,9	0	2	0	1	0	12

III.2. Analyses statistiques

L'objectif des analyses statistiques est de confronter les divers résultats pour répondre aux hypothèses de bases. Premièrement, les composantes intrinsèques à la stratégie d'échantillonnage (les quatre modalités et les facteurs physico-chimiques du sol) sont vérifiées par des analyses en composantes principales (ACP) au point 2.1 et 2.2. Ensuite, les modèles linéaires du point 2.3 apportent des indications sur les significativités de chacun des paramètres étudiés (type de système et type de sol) ou des paramètres propres à chaque échantillonnage. Enfin, au point 2.4 et 2.5, des ACP permettent de corréler les variables de l'étude entre elles.

Les distributions des résidus se trouvent en Annexe 9 et les correspondances des tableaux et figures avec les codes utilisés en Annexe 10.

2.1. Stratégie d'échantillonnage : Les modalités sont-elles bien distinctes les unes des autres ?

La distinction entre les quatre systèmes agricoles est réalisée de manière plus profonde et plus actuelle, afin de s'assurer que les parcelles répertoriées dans une modalité en présentent bien toutes les caractéristiques. En effet, comme énoncé plus haut, certains écarts entre l'agriculture biologique et l'agriculture de conservation peuvent s'estomper à cause de la diversité des systèmes au fil de leur extension.

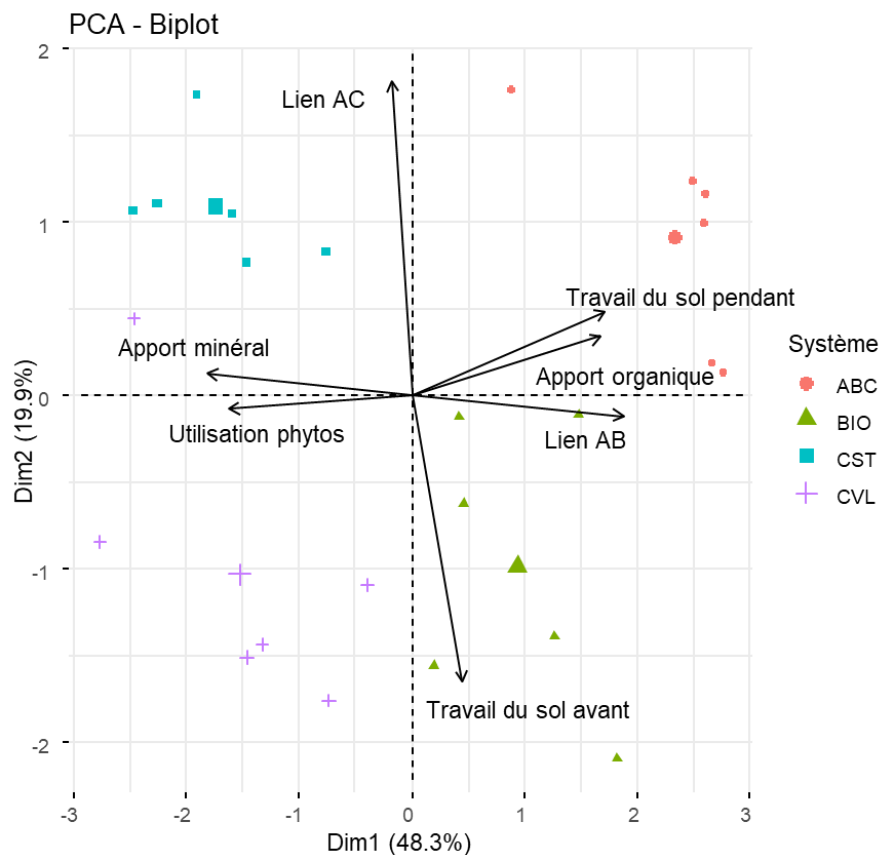


Figure III.2.1. Distribution des quatre modalités distinctement en fonction des paramètres d'itinéraires culturaux

Les deux premières composantes principales couvrent 68,2 % de la variabilité de l'ensemble des données d'itinéraires techniques (Figure III.2.1). Les quatre modalités de système présentent bien des caractéristiques distinctes. L'hypothèse de départ est complètement vérifiée.

L'agriculture biologique de conservation est caractérisée par un travail du sol pendant la culture en place ainsi que par des apports organiques. L'agriculture biologique, présentant forcément un lien fort avec elle-même, se distingue plutôt par son travail du sol avant le semis. A l'inverse, l'agriculture conventionnelle, qui travaille également son sol avant le semis, fait usage de produits phytosanitaires. Enfin, le système d'agriculture de conservation, par définition lié à l'AC, est représenté par des apports minéraux plus importants et favorise un travail du sol obligatoirement superficiel pendant la culture plutôt qu'un travail avant le semis (qui a tendance à être plus profond).

2.2. Stratégie d'échantillonnage : Facteurs de différenciation des propriétés physico-chimiques

Cette section vise d'abord la structure de corrélation des paramètres physico-chimiques du sol avec le type de système d'une part (Figure III.2.2.1, a et b), et le type de sol d'autre part (Figure III.2.2.2, a et b). Les résultats de granulométrie (a) sont présentés séparément de ceux de teneurs en minéraux (b) pour plus de lisibilité.

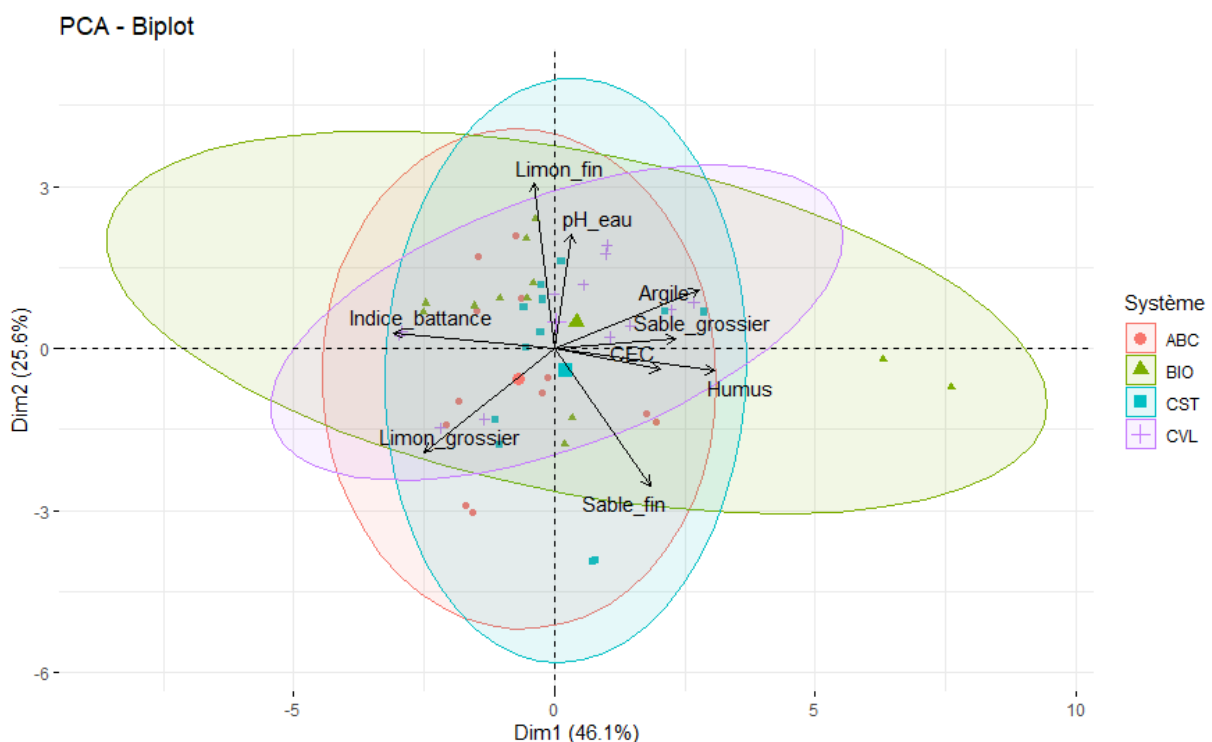


Figure III.2.2.1 (a). Distribution des parcelles selon les modalités de système, dans le 1^{er} plan factoriel des composantes physico-chimiques de granulométrie du sol.

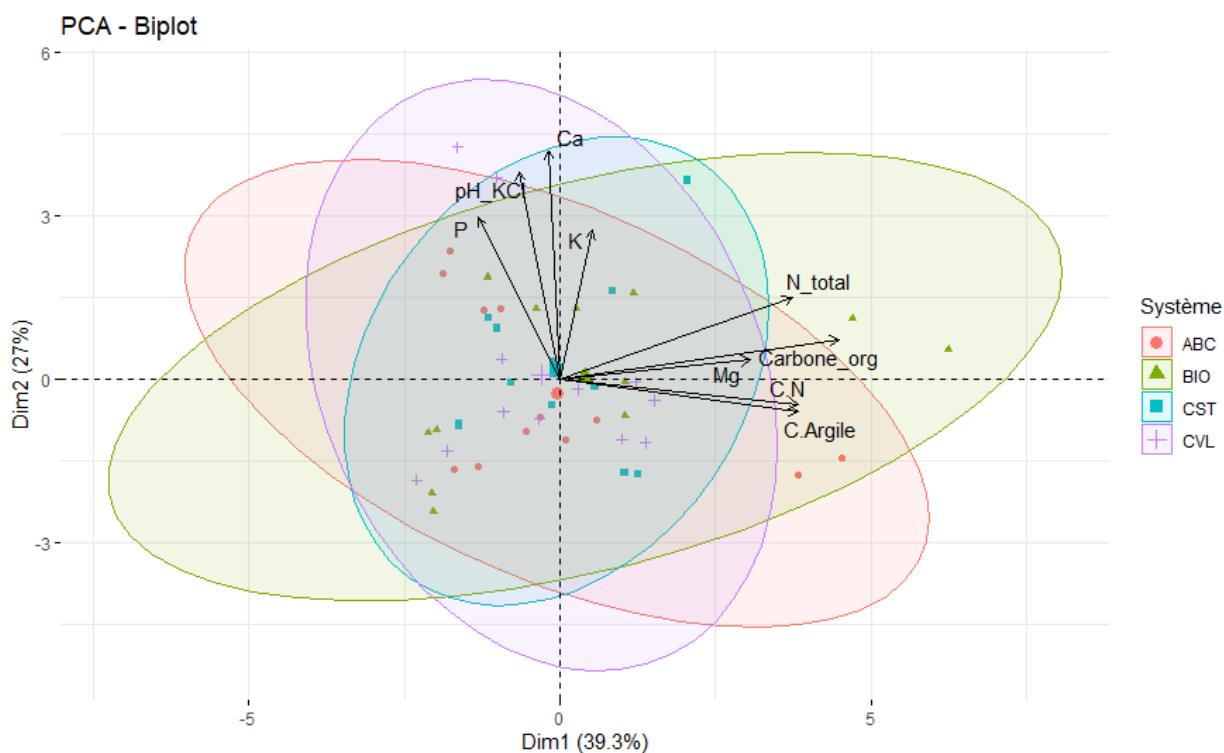


Figure III.2.2.1 (b). Distribution des parcelles selon les modalités de système, dans le 1^{er} plan factoriel des composantes de teneurs en minéraux (b) du sol.

Les deux premières composantes principales couvrent respectivement 71,7% et 66,3 % de la variabilité de l'ensemble de données de granulométrie (Figure III.2.2.1a) et de teneurs en minéraux (Figure III.2.2.1b). Aucune distinction claire ne peut être faite entre les parcelles des différents types de systèmes. La grande majorité d'entre elles se situe dans la zone centrale. Les ellipses des différents systèmes se recoupent. L'hypothèse de départ est donc vérifiée, à savoir qu'il n'y a pas de différence de propriétés physico-chimiques selon le système de culture.

Les moyennes de la Table III.2.2.2 sont construites sur base de deux échantillons composites de sol. Cela engendre la possibilité de générer un écart-type pour ces paramètres et ainsi évaluer la dispersion des données. Seuls les paramètres de teneurs en K, Mg et pourcentage d'argile varient significativement d'une modalité agricole à l'autre.

Table III.2.2.2. P-valeurs, écarts-type et moyennes des paramètres physico-chimiques et de texture du sol

	<u>P-valeur</u>	<u>Ecart-type</u>	<u>Significatif</u>	<u>ABC</u>	<u>BIO</u>	<u>CST</u>	<u>CVL</u>
P	0,9381	11,20	Non	6,6	6,2	6,7	5,9
K	0,002565	31,24	**	18,9	15,5	24,5	18,1
Mg	0,04875	34,27	*	12,4	17,7	12,3	11,5
Ca	0,6291	13225	Non	216	237	224	273
pH_KCl	0,2447	0,4510	Non	6,4	6,7	6,2	6,5
pH_eau	0,06929	0,21859	Non	7,4	7,7	7,1	7,4
Carbone_org	0,8797	22,024	Non	13,8	15,4	14,7	14,3
CEC	0,05486	0,6029	Non	8,8	9,3	9,7	9,3
N_total	0,4369	0,00073852	Non	0,12	0,14	0,14	0,13
C/N	0,7834	2,727	Non	11,1	10,9	10,4	10,8
Argile	0,044	6,6317	*	12,3	14,08	14,9	14,9
C/Argile	0,2926	0,06322	Non	1,1	1,1	0,9	0,9
Limon fin	0,4551	19,14	Non	29,1	31,02	29,1	31,3
Limon grossier	0,3344	27,22	Non	50,04	46,5	48,5	46,8
Sable fin	0,4137	6,3989	Non	6,8	5,8	5,9	5,07
Sable grossier	0,09026	1,2674	Non	1,7	2,6	1,4	1,7
Indice de battance	0,7829	0,2723	Non	2,02	1,89	1,81	1,91

Les parcelles, en plus d'être échantillonnées selon différents DER et les quatre modalités agricoles, sont choisies pour leur appartenance à l'un ou l'autre type de drainage du sol, à savoir les sols limoneux à drainage normal ou ralenti. Une ACP est appliquée pour voir leur distribution dans l'espace mathématique.

Dans la Figure III.2.2.3a, il est déjà bien visible que les deux groupes ne sont pas distincts. Statistiquement, la Table III.2.2.4 montre de nombreux paramètres témoignant de différences très (***) hautement (***) significatives (*), là où seuls quatre paramètres ne le sont pas.

Dans la Figure III.2.2.3b, il peut être observé que les limons bien drainés (LB) se différencient essentiellement par leur statut acido-basique tandis que les limons à drainage ralenti (LL) montrent une certaine corrélation avec les deux axes factoriels.

A l'intérieur d'un type de drainage, les paramètres ne devraient pas être significativement différents. L'hypothèse nulle est donc rejetée. Le type de drainage ne représente pas un critère de séparation très marquant.

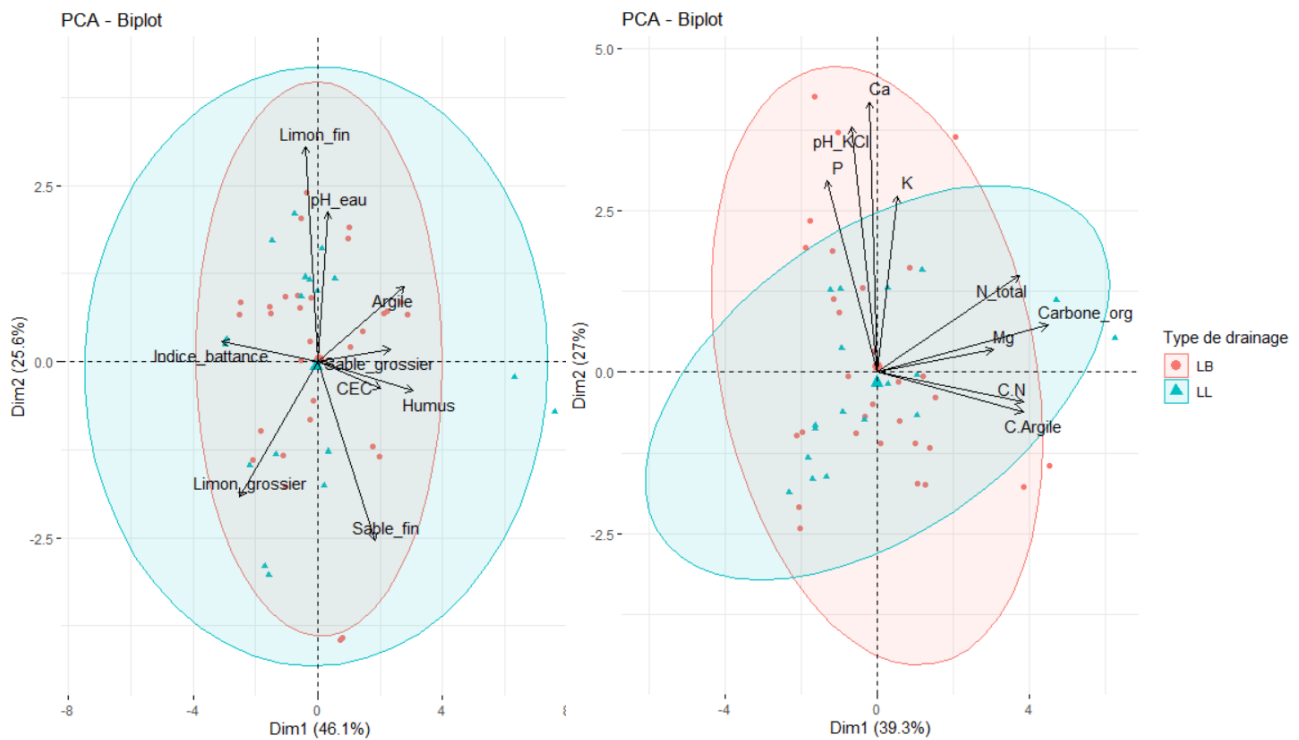


Figure III.2.2.3. Distribution des parcelles selon les modalités de type de drainage, dans le 1^{er} plan factoriel des composantes physico-chimiques de granulométrie (a) et de teneurs en minéraux (b) du sol.

Table III.2.2.4. Différences significatives ou non des paramètres au sein des groupes de parcelles limoneuses à drainage « bon » ou « lent ».

	<u>P-valeur</u>	<u>Significatif</u>	<u>Drainage bon</u>	<u>Drainage lent</u>
P	0,4307	Non	6,4	6,3
K	1,11E-02	***	21,1	16,2
Mg	3,60E-08	***	11,7	16,4
Ca	0,0001806	***	247	222
pH_KCl	1,29E-02	***	6,4	6,6
pH_eau	3,53E-10	***	7,3	7,5
Carbone_org	0,2047	Non	14,7	14,2
CEC	2,55E-02	***	9,1	9,6
N_total	8,98E-03	***	0,13	0,14
C/N	0,5522	Non	10,8	10,7
Argile	0,003551	**	14,3	13,7
C/Argile	0,5959	Non	1,04	1,02
Limon fin	1,30E-02	***	30,6	29,3
Limon grossier	3,48E-04	***	47,3	49,1
Sable fin	0,01201	*	6,005	5,7
Sable grossier	0,006333	**	1,7	2,08
Indice de battance	0,0005794	***	1,86	1,97

2.3. Facteurs de différenciation des paramètres biologiques

Il est maintenant temps d'aborder le lien entre l'abondance des vers de terre et les 4 systèmes ; les 2 types de sols ; les 4 groupes écologiques et les 2 stades de développement.

L'effet des pratiques agricoles et du type de sol ne jouent pas significativement sur l'abondance des vers de terre. En effet, le nombre d'individus ne se distingue qu'en fonction du groupe écologique (Table III.2.3.1).

Table III.2.3.1. P-valeur des différentes variables au sein du modèle linéaire généralisé du nombre de vers de terre prélevés

	Système	Type de sols	Groupe	Stade	Système *Type de sols
P-valeur	0,538	0,148	0,00165 (**)	0,129	0,135

La variable de profondeur n'étant pas intégrée dans le modèle, il est tout de même intéressant d'observer les tendances qu'elle présente à la Figure III.2.3.1bis. L'ensemble des vers se situe davantage dans les boîtes de terre de superficie (0-10 cm) que dans les boîtes de terre plus profonde (10-25 cm).

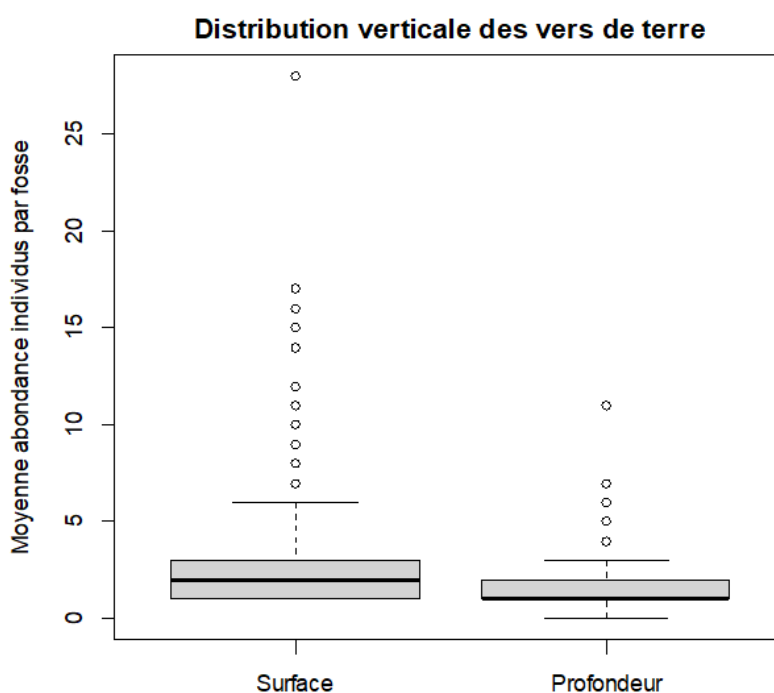


Figure III.2.3.1bis. Distribution verticale des vers de terre entre « surface » et « profondeur »

Une analyse post-hoc informe des différences significatives ou non entre les groupes écologiques (Table III.2.3.2). On peut voir que les vers épi-anéciques partagent des caractéristiques communes aux anéciques stricts et tous deux ne se différencient pas trop des épigés. Les endogés, eux, montrent des différences significatives à ces trois catégories.

Table III.2.3.2. Analyse post-hoc des différences entre groupes écologiques

Duo de groupes écologiques	P-valeur
Epi-anéciques - Anéciques stricts	0,3561
Epi-anéciques - Endogés	< 0,0001 ***
Epi-anéciques - Epigés	0,0650
Anéciques stricts - Endogés	< 0,0001 ***
Anéciques stricts - Epigés	0,8297
Endogés - Epigés	< 0,0001 ***

En ce qui concerne les indicateurs de services écosystémiques (SE), la consommation de substance « bait » ne montre rien de nouveau par rapport au type de pratiques et de sol mais semble avoir lieu préférentiellement dans la moitié supérieure des bandes (Table III.2.3.3 ; Annexe 11), soit 0 à 7,5 cm.

Table III.2.3.3. P-valeur des différentes variables au sein du modèle linéaire généralisé du nombre de trous de « bait » consommés

	Système	Type de sol	Position	Système*Type de sol
P-valeur	0,09532	0,35545	0,01627 (*)	0,27287

Si l'effet des pratiques n'a pas montré d'influence du côté du *Bait lamina*, le deuxième indicateur de SE étudié n'en dévoile pas davantage. La stabilité des agrégats ne varie pas significativement en fonction du système de pratiques (Table III.2.3.4), malgré une légère domination pour les deux modalités qui intègrent des pratiques de conservation (Annexe 12).

Table III.2.3.4. P-valeur des différentes variables au sein du modèle linéaire des classes de stabilité des agrégats

	Système	Type de sol	Système*Type de sol
P-valeur	0,3840	0,7864	0,2066

Ces dernières considérations permettent de s'assurer qu'il n'y a pas de biais créé par le système de pratiques sur les SE. Cela est utile pour l'interprétation des résultats suivants.

2.4. Lien entre l'abondance des vers de terre et les SE

La combinaison des données relatives à l'abondance des vers intra-groupes écologiques et celles des fonctions écologiques révèle des éléments intéressants dans le cercle de corrélation du 1^{er} plan factoriel (Figure III.2.4.1). Il couvre 69,7 % de la variabilité de l'ensemble des données.

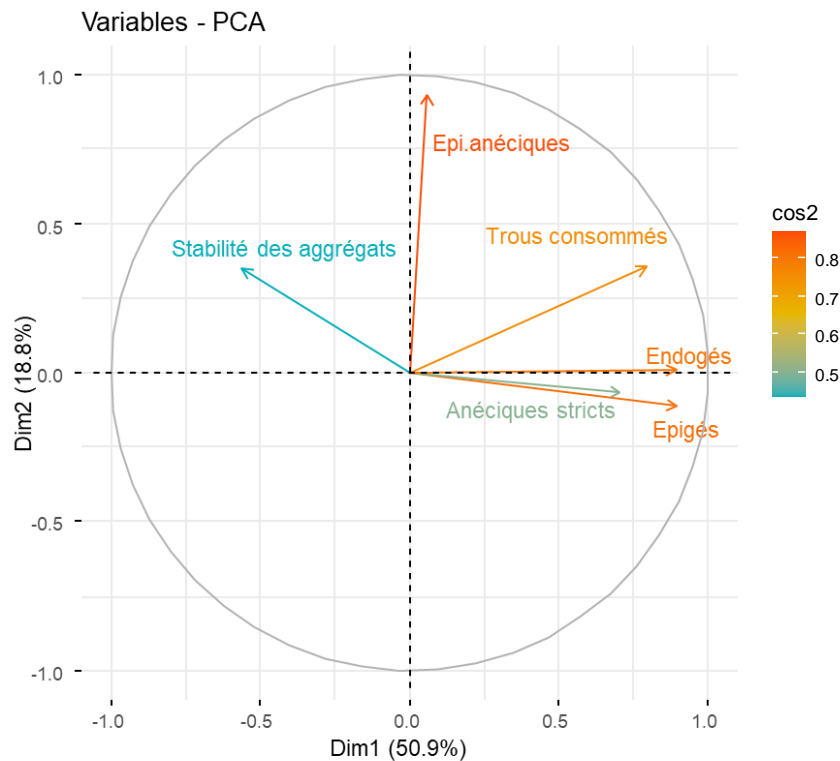


Figure III.2.4.1. Cercle de corrélation de l'ACP du jeu de données des vers combinés aux indicateurs SE.

Les deux axes suivent les différents groupes écologiques et sont donc des bons indicateurs pour la participation des vers à l'un ou l'autre SE. La consommation de la substance « *bait* », avec sa corrélation de 0,827 avec l'axe 1 et 0,367 avec l'axe 2, semble être liée à la présence des vers des quatre groupes. En revanche, la variable « stabilité des agrégats » montre un comportement opposé à l'axe 1 (-0,523) mais lié à 0,551 à l'axe 2. Ce sont donc plutôt les vers épi-anéciques, corrélés à 0,782 à l'axe 2, qui sont plus susceptibles de participer à cette fonction écologique.

Dans le cercle de corrélation du deuxième plan factoriel (Annexe 13), la corrélation des groupes endogés et épigés avec la consommation de substance « *bait* » est confirmée. Le groupe de vers anéciques stricts, quant à lui, se rapproche de la direction de l'axe 2, qui définit toujours autant la stabilité des agrégats.

Bien que la corrélation entre l'abondance des vers et la participation au SE de minéralisation soit évidente, elle l'est moins pour la variable « stabilité des agrégats ».

2.5. Résultats supplémentaires

Afin de dégager quelques tendances, la Figure III.2.5.1 (issue du cercle de corrélation du point 2.4) montre les corrélations de systèmes de pratiques avec la présence des vers sans prétendre à des conclusions significatives.

Le système de pratiques en conventionnel a une corrélation de 1,303 avec l'axe 1 et le système de conservation suit plutôt l'axe 2 (0,725). Le système conventionnel a donc plutôt tendance à accueillir des vers endogés, épigés ou anéciques stricts.

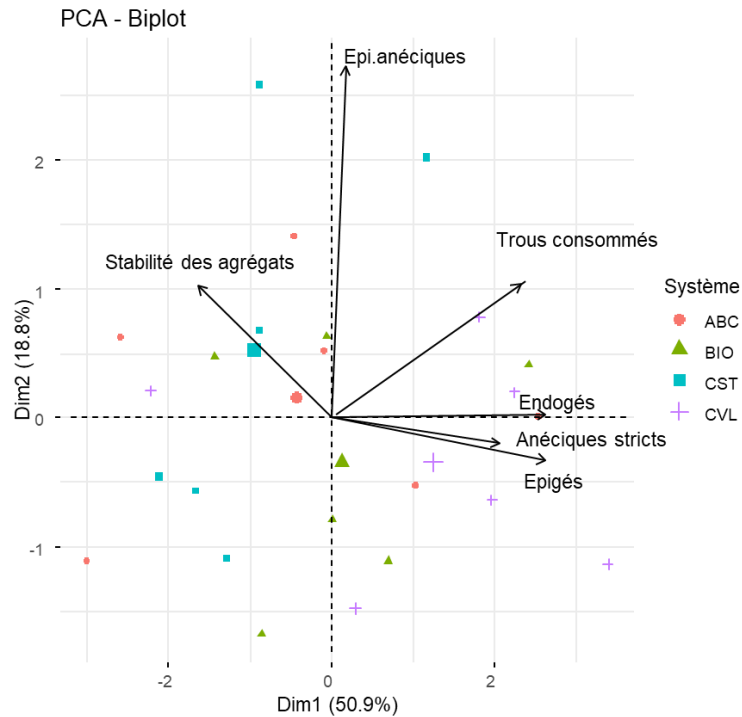


Figure III.2.5.1. La corrélation entre les 4 modalités de système agricole et l'abondance des vers de terre

Ceci amène à considérer le graphique le plus visuel de ce travail (Figure III.2.5.2), qui confronte les moyennes d'abondance de vers recueillis au sein des quatre modalités de systèmes agricoles ainsi que leur répartition dans les quatre groupes écologiques.

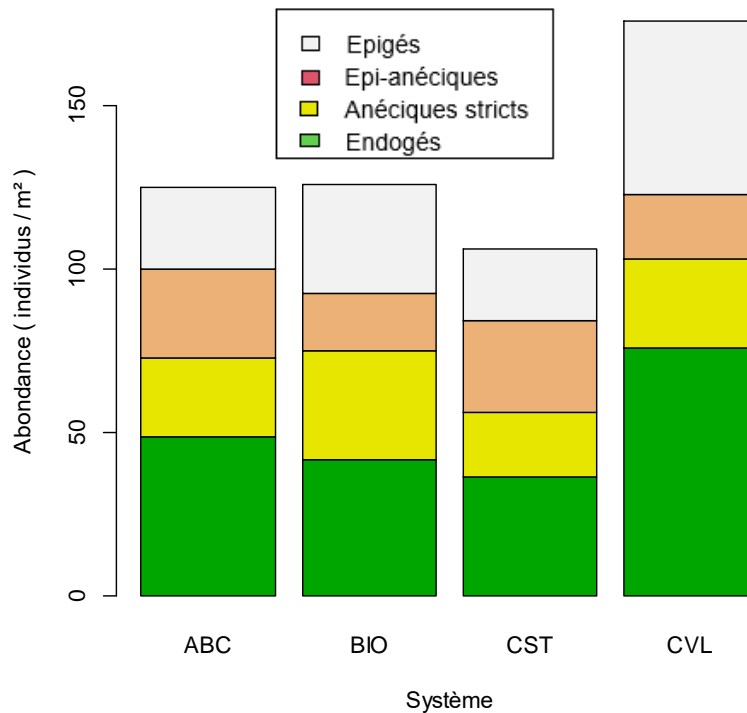


Figure III.2.5.2. La répartition et l'abondance des lombriciens (en nombre d'individus/ m²) par modalité de système agricole

Afin d'étudier l'influence de chacune des pratiques sur les différents groupes écologiques, des résultats supplémentaires ont été générés par modèle linéaire.

Table III.2.5.3. P-valeurs de chaque pratique sur les différents groupes écologiques

Groupe écologique	Couvert d'interculture	Travail du sol avant semis	Travail du sol pendant culture	Apport organique	Apport minéral	Utilisation produit phytosanitaires
<i>Epigés</i>	0.2911	0.8801	0.3163	0.4962	0.3598	0.1802
<i>Epi-anéciques</i>	0.96196	0.81749	0.81107	0.69335	0.02727*	0.89452
<i>Anéciques stricts</i>	0.3873	0.5520	0.6446	0.4824	0.5909	0.6978
<i>Endogés</i>	0.40279	0.68723	0.07289	0.11476	0.76231	0.38518

La seule p-valeur significative de la Table III.2.5.3 montre que l'apport de substances minérales joue sur le groupe des épi-anéciques, or, la répartition de cette influence n'est pas linéaire (Figure III.2.5.4) et aucune conclusion ne peut en être tirée.

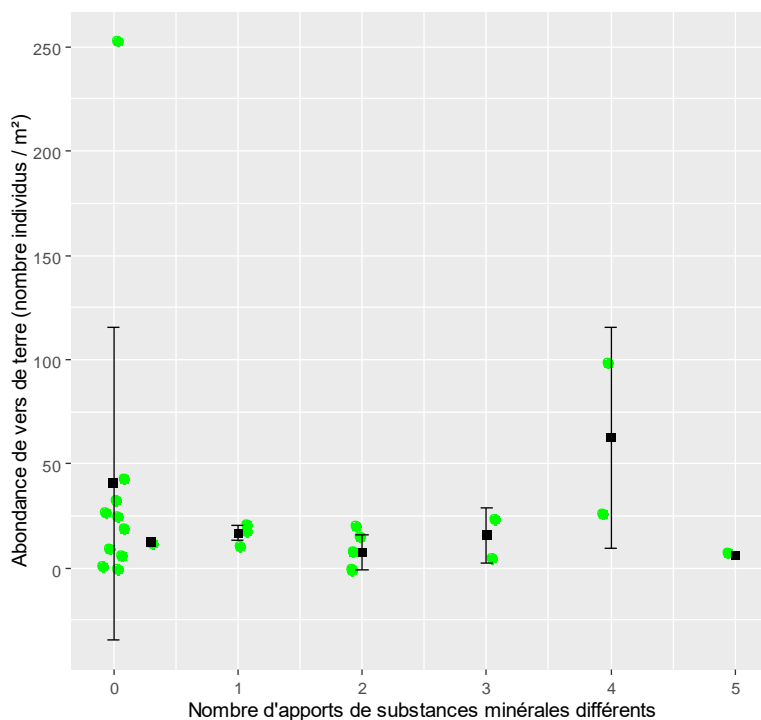


Figure III.2.5.4. Abondance de vers épi-anéciques selon le nombre d'apports de substances minérales réalisés.

Partie IV - Discussion & Interprétations

Cette section interprète les résultats présentés précédemment. Des précautions doivent être prises car peu de résultats sont significatifs. Tout d'abord, il faut garder en tête que cette étude observe la situation à court terme sans prétendre à démontrer une évolution dans le temps. De plus, il s'agit d'une approche système, celle-ci présente donc une multitude de biais. Tant que possible, ceux-ci sont mis en évidence.

Après avoir parcouru les résultats, la méthode est critiquée et des perspectives sont proposées. Pour finir, quelques précautions quant à l'interprétation de ce travail sont soulevées et la contribution de l'étudiant est expliquée.

IV.1. Critiques des résultats

L'abondance moyenne des vers de terre relevée (Table III.1.3 et Figure III.2.5.2) reflète les résultats de la méta-analyse de van Groenigen et al. (2014) selon laquelle les sols arables contiennent généralement 150 à 350 vers de terre par m². Cela est également confirmé dans la Figure IV.1 de l'étude de Bouthier et al. (2014).

Cependant, l'abondance des vers de terre et la participation aux SE ne sont significativement affectées ni par le système agricole ni par le type de sol.

Néanmoins, la tendance du système conventionnel à accueillir des vers épigés, endogés ou anéciques est visible dans les figures III.2.5.1 et 2.5.2.

Bien que de manière globale, les endogés semblent être les plus présents (Table III.1.3 et Figure III.2.5.2), il faut rappeler que ce n'est pas tant la quantité que la qualité qui compte. L'abondance est un indicateur de résultat et il est difficile de relier la cause à l'effet.

Le cercle de corrélation présenté à la Figure III.2.4.1 montre que les vers épi-anéciques d'une part (1^{er} plan factoriel) mais aussi les anéciques stricts d'autre part (2^{ème} plan factoriel) suivent davantage l'axe 2. Ils prennent donc une autre direction dans la participation aux SE. Il est bien connu que ce sont les vers anéciques, par leur comportement et fonctionnalités différents, qui accomplissent plus de fonctions écologiques (comme l'aération des sols par leurs galeries verticales ou la liaison humus-argile par leurs glandes de Morren).

Pour résoudre cet indicateur incomplet, il est plus judicieux de parler en termes de « produits de vers de terre ». L'équation qui le permet est la suivante :

$$\text{Produits des vers de terre} = \text{quantité} \times \text{activité} \times \text{rôle}$$

Ici, la quantité a été mesurée par le comptage des vers. L'activité peut être représentée par la corrélation entre la quantité et la consommation de substance « *bait* ». Enfin, le rôle est amené par la corrélation entre la quantité et l'amélioration de la fonction écologique directement visible, la stabilité des agrégats. Tout cela demanderait une analyse statistique plus approfondie, qui serait intéressante dans le cas de résultats significatifs.

Dans cette étude, les vers épigés forment une catégorie assez bien représentée, alors que, régulièrement, les résultats trouvés en systèmes cultivés soulignent la forte sensibilité de ces individus aux pratiques agricoles (Pérès et al., 2011 cité par Bouthier et al., 2014). La Figure III.2.5.2 peut être comparée à celle-ci-dessous (Figure IV.1.)

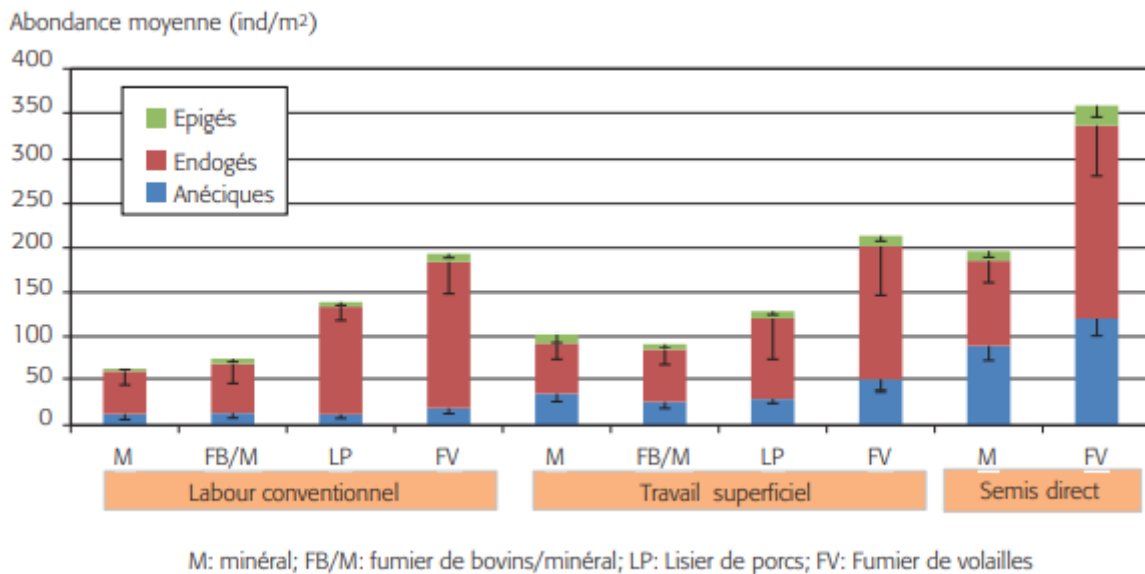


Figure IV.1. Abondance moyenne des lombriciens dans un essai réalisé par la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne. Source : Piron et al., 2014, cité par Bouthier et al., 2014

Dans la Figure IV.1, la pratique de « semis direct » montre des résultats impressionnants et il aurait été intéressant de la recenser. Malheureusement, aucune parcelle du site d'étude ne pratiquait de semis direct.

L'étude de Bouthier et al., qui a l'avantage de présenter ces résultats de manière similaire à la présente étude, reprend quatre ans de relevés réguliers des communautés lombriciennes. L'échelle temporelle différente incite à se méfier de la comparaison mais cela donne néanmoins une idée des tendances pouvant être dégagées à long terme.

En ce qui concerne le comportement des vers de terre, la plupart d'entre eux seraient actifs dans les positions supérieures de la bande *Bait lamina* (qui balaie elle-même les 15 premiers centimètres de sol). De plus, ce sont les boîtes de superficie (0-10 cm) qui comptent le plus de vers de terre. En combinant ces informations, il peut être retenu que les vers de terre se localisent plutôt dans les 0 à 10 premiers centimètres du sol.

Ces conclusions peuvent servir pour le choix de la méthodologie d'échantillonnage des travaux ultérieurs.

Du côté des SE, la *slake test* n'a pas montré de corrélation forte avec l'ensemble des vers de terre (Figure III.2.5.1) et cela est sans doute dû au lien trop indirect qui a été fait entre ce test et l'impact des lombriciens. Comme il a été affirmé plus haut, la stabilité des agrégats montre l'action des bactéries et des champignons, qui est seulement aidée par celle des vers de terre. Ces activités dépendent également de la teneur en matière organique, de l'état calcique, du travail excessif et du tassement des machines (PROSENSOLS, n.d.,b), et ces facteurs n'ont pas été mis en relation ici.

IV.2. Critiques de la méthode

2.1. Stratégie d'échantillonnage

Il a été montré à la Figure III.2.2.1 que la stratégie d'échantillonnage est bien pensée. Elle balaie la diversité de type de sol (en références aux DER) et les quatre modalités agricoles, sans que les parcelles d'une même modalité ne se regroupent dans un même type de sol.

Le type de drainage du sol qui avait été utilisé comme critère de sélection des parcelles, ne différencie pas les parcelles selon leur granulométrie ou leurs paramètres physico-chimiques du sol, mais seulement selon des critères plus visuels (section III.1.2). Dès lors, les différences seraient liées à l'humidité que peuvent retenir ses parcelles. C'est une variable qui n'a pas été analysée ici, or cela représente un facteur considérable pour la vie des lombriciens.

Pour revenir sur les 4 modalités, le point III.2.1 les présente comme étant bien distinctes en termes de pratiques (utilisation de produits phytos, amendement organique/minéral, travail du sol, etc). Il est important de décomposer chaque modalité en ses composantes individuelles pour les vérifier. Par contre, l'étude reste systémique et considère les modalités comme un « tout ». De plus, dans la Figure III.2.5.4, aucune relation nette n'a permis de tirer de conclusion quant à l'effet d'une pratique seule sur l'abondance des lombriciens.

Bien que, lors de la détermination des modalités, le labour était un des premiers critères de classification, les effets observés ne peuvent être exclusivement attribués à la réduction voire l'abandon du travail du sol. Cela n'est qu'une composante du système de culture, et c'est le système de culture dans son ensemble qui est étudié, conjointement aux autres pratiques culturales (rotations, mise en place de couverts végétaux, niveau d'intensification, type de fertilisation) (Bouthier et al., 2014).

Certaines études parlent d'étudier l'effet de combinaison des opérations, et c'est le cas dans la Figure IV.1 notamment.

Aussi, comme l'a très justement souligné un agriculteur lors d'une interview téléphonique, l'effet du « *timing* » adopté peut être parfois plus influent que la pratique en elle-même. Il mentionnait l'exemple très parlant de labourer un sol qui n'est pas encore ressuyé par exemple. L'effet de l'emploi du temps pourrait en effet faire l'objet d'une prochaine étude.

Certaines parcelles à l'intérieur d'une modalité n'ont pas subi le changement de pratiques la même année. Ce changement n'est dès lors pas toujours bien établi. Il faudrait alors soit étudier l'évolution des parcelles pendant 5 à 10 ans après leur changement de pratiques soit cibler l'étude uniquement sur des parcelles qui sont converties depuis le même nombre d'années.

2.2. Echantillonnage – Test-bêche

Selon Marcel Bouché (2014), les pratiques physiques tel que le Test-Bêche présente des défauts car la profondeur des fosses, la plus grande soit-elle, est rarement suffisante. En effet, les galeries peuvent aller jusqu'à deux mètres de profondeur. Ici, le choix d'échantillonner sur 25 cm de profondeur a été déterminé afin de couvrir l'horizon de sol travaillé.

Une amélioration de cette technique serait de réaliser un « Test moutarde » combiné à un « Test-bêche ». Le premier implique d'arroser le fond de la fosse creusée par une solution aqueuse chimique répulsive (la moutarde diluée). Le deuxième test est alors réalisé normalement, mais bénéficie des vers logés plus profondément, qui seront remontés jusqu'à la surface de la fosse par fuite de leur milieu devenu inhospitalier.

Il faut reconnaître que lors du tri manuel, certains vers peuvent échapper à l'attention du trieur. Cependant, même sans l'appui d'un expert lors des premières observations, plus de 90% des vers de terre adultes sont classés dans la bonne catégorie (Capowiez, 2009).

Le nombre de répétitions réalisé dans le Test-Bêche peut être remis en question. Pour analyser statistiquement des observations, un minimum de six observations par zone homogène est requis. Cependant, lorsque l'objectif de l'observation est d'ordre qualitatif, chacun peut adapter le nombre d'observations en fonction du temps disponible (Capowiez, 2009).

2.3. Bait lamina

Le test de *Bait lamina* présente l'inconvénient de rester en place sur le champ et doit ainsi jongler avec les opérations menées par l'agriculteur. C'est ainsi que trois bandes ont été invalidées à cause du passage d'une herse étrille sur la parcelle 06ABCA. Fort heureusement, c'est la seule parcelle qui a présenté des dommages⁹.

Le nombre de répétitions de *Bait lamina* placés dans le sol est souvent plus élevé que 6 (Hamel et al., 2007; Biodivine, n.d.).

2.4. Méthode VSA

Le fait de prélever des mottes pour juger de la présence de racines dépend de la localisation de la motte. Si la motte observée est issue du rang de la céréale, elle montrera une forte proportion de racines. En revanche, si la motte vient de l'inter-rang, il se peut que la proportion de racines ne soit pas représentative. La procédure VSA devrait donc être affinée à ce niveau-là.

2.5. Autres fonctions écologiques

Bien sûr, l'étude d'autres fonctions écologiques menant à des services écosystémiques aurait pu être envisagée. Le test du perméamètre, initialement prévu dans ce travail, ne s'est pas réalisé à cause de la contrainte de temps. Néanmoins, rares sont les techniques faciles à mettre en œuvre dont les relations de cause à effet sont assez démontrées.

⁹ Deux autres parcelles ont été perdues, pour cause de mauvaise compréhension entre l'agriculteur et les étudiants du projet par rapport à la parcelle sélectionnée.

2.6. Groupes écologiques et stades de développement

La classification en groupes écologiques est critiquable.

Ces groupes classent les espèces en fonction de leur niche écologique (habitat et mode de vie) mais une espèce peut avoir des habitats et des modes de vie différents en fonction de son stade juvénile ou adulte. C'est le cas du ver de terre commun *Lumbricus terrestris* avec son double statut d'épi-anécique et d'endo-anécique (Gatineau, 2018). L'intérêt de faire la distinction entre quatre groupes écologiques (plutôt que trois comme la littérature le suggère souvent) et d'identifier les stades de développement, est donc justifié.

2.7. Données de l'interview aux agriculteurs

La récolte de données auprès des agriculteurs pourrait faire l'œuvre d'une adaptation plus complète.

Pour la rubrique des « produits phytosanitaires, apports d'amendement organique ou minéral », le meilleur indicateur semble être l'IFT, l'Indice de fréquence de traitement, qui correspond au nombre de doses de référence par hectare appliquées sur une unité spatiale pendant une période donnée.

De plus, le code STIR n'a pas pu être calculé dans son entièreté car la vitesse d'opération et le pourcentage de surface perturbée n'ont pas été demandés lors de l'interview téléphonique.

IV.3. Perspectives

3.1. Le temps

Le premier frein de cette étude a déjà été identifié comme étant la durée de l'échantillonnage. Les observations réalisées dans ce travail sont limitées à une période d'un mois.

Parmi les précautions à prendre lorsqu'on veut estimer l'importance écologique des lombriciens, il faut veiller à connaître les variations saisonnières (Bouché, 2014).

Une hypothèse émise pour d'autres organismes du sol est qu'un sol labouré est plus vite réchauffé (Bouthier et al., n.d.) et permet d'accomplir les cycles biologiques plus vite. Dans cette idée, le cycle des vers de terre pourrait se trouver accru pendant une période dans les sols labourés, sans pour autant que ce soit le cas toute l'année. Afin d'intégrer ce biais, il faudrait placer des thermomètres dans toutes les parcelles étudiées pour ensuite extrapoler les résultats obtenus dans de courtes durées à l'ensemble de l'année. Le stade de développement est un indice qui permet de se localiser dans le cycle biologique des vers de terre.

D'autre part, si le « Test-Bêche » est réalisé à raison d'une fois par an, les résultats peuvent devenir un outil pour que l'agriculteur puisse rediriger ses pratiques et se questionner sur l'état de son sol¹⁰.

¹⁰ L'idée de l'appropriation de ce travail par les parties prenantes est très importante.

3.2. L'espace

Cette étude s'est focalisée sur les grandes cultures mais elle peut être reprise ou étendue pour le cas des prairies, où les vers de terre sont plus abondants. Là où une moyenne de 215 individus est retrouvée par m² de sol cultivé, c'est 350 individus/m² en moyenne qu'on peut compter en prairie (Bouthier et al. 2014). Les résultats donneront des indications sur d'autres itinéraires techniques et ciblera des paramètres nouveaux comme les amendements ou la composition en espèce du couvert par exemple. Selon David Knoden de l'ASBL « Fourrages Mieux », l'intérêt de ce type d'étude est certain.

Cette étude pourrait couvrir, à l'avenir, non pas une parcelle mais un assolement dans son ensemble. En effet, la gestion des pratiques agricoles est souvent la même au sein d'une exploitation.

3.3. Les observations

L'étude de Pelosi et al. (2014a) n'a pas non plus su détecter d'impact de l'intensité du travail du sol sur l'abondance des vers de terre. En revanche, c'est en observant des traits fonctionnels comme la longueur du corps, le rapport masse corporelle/longueur, le type d'épithélium, le type de typhlosolis, les préférences en matière de carbone et la distribution verticale, qu'un effet du labour a pu être mis en évidence (Pelosi et al., 2014a). Dans les parcelles non labourées, une moindre convergence des traits a entraîné une augmentation des traits fonctionnels : les vers présentent plutôt un typhlosolis ramifié, un épithélium rigide, un rapport masse corporelle/longueur élevé et ils sont capables de vivre soit dans les 5 cm supérieurs du sol ou en dessous de 20 cm (Pelosi et al., 2014a). Dans les sols labourés, la sélection naturelle garde des individus nécessitant un moindre investissement dans le processus de digestion et un besoin moins élevé en carbone (Pelosi et al., 2014a).

3.4. Etude économique

Partant du constat de Véronique Kleiner, cité par Gatineau (2018) « le transit intestinal des vers de terre rapporterait jusqu'à un milliard d'euros à un pays comme l'Irlande », il serait curieux d'approfondir cette question et de ramener l'étude au cas de la Belgique. En effet, il serait très intéressant d'infirmier ou de confirmer l'hypothèse selon laquelle intégrer les vers de terre comme outil agricole revient à déléguer le travail de l'agriculteur, d'un point de vue technique mais aussi économique. Comme présenté à la Figure I.5.3, les SE rendus par les vers de terre mènent à des avantages tels que l'efficacité des engrais et la fertilisation, qui aboutissent à un meilleur rendement.

Il faudrait évaluer les fonctions écologiques de l'agrobiodiversité par leur capacité à fournir des services écosystémiques à l'humanité. Au prorata de cette contribution aux SE, un prix plus ou moins important pourrait alors être attribué aux agriculteurs qui favorisent l'agrobiodiversité. Cette approche pourrait s'appliquer au cas de prévention des populations lombriciennes, dont la littérature a déjà suffisamment prouvé les mérites. De plus, une mesure agro-environnementale (MAE) qui cible les organismes du sol semble être en prévision pour la nouvelle PAC (politique agricole commune).

IV.4. Précautions dans l'interprétation de ce travail

Là où il n'est pas possible d'accueillir des populations de vers anéciques (les sols siliceux notamment), ce sont alors souvent les termites ou les fourmis qui assurent efficacement le mécanisme de régénération du sol par bioturbation. Cela explique pourquoi les vers de terre ne peuvent pas constituer le seul critère d'évaluation de la fertilité d'un sol (Bucaille, 2020).

Les résultats ne sont pas toujours générés à une échelle où ils peuvent être utilisés pour soutenir la prise de décision des agriculteurs ou des gestionnaires du paysage (Andersson et al., 2015). Ce travail a été relu par un agriculteur volontaire, Mr Guillaume Agneessens, dans le but de confronter au mieux les informations avec la pratique du terrain.

IV.5. Contribution de l'étudiant

L'étudiante a pu bénéficier d'un réseau de fermes préétabli par Fanny Boeraeve. Une sélection en a été retenue sur base du critère pertinent de sols limoneux et de la diversité des quatre systèmes de pratiques agricoles.

Ensuite, la méthodologie d'échantillonnage s'est appuyée sur une recherche bibliographique approfondie, de laquelle il en est sorti plusieurs possibilités réalisables en termes de coûts et logistiques, devant parfois être simplifiées en termes de temps. Le soin des adaptations a été laissée à l'étudiante.

La clé de détermination des vers de terre est un outil directement issu des travaux de l'Université de Rennes.

Lors de la phase de terrain, l'étudiante a pris toutes ses dispositions pour commander le matériel requis, réaliser les plannings de terrain, se coordonner entre collègues étudiants et solliciter les aides nécessaires.

De plus, l'organisation d'une interview téléphonique a permis à l'étudiante d'obtenir de plus amples informations, nécessaires à l'interprétation de ses résultats.

Une fois les informations et les résultats acquis, l'étudiante a appris à utiliser le logiciel R et tous les modèles utilisés ont été créés spécialement dans le cadre de ce travail.

Certaines informations sont puisées de références Internet (données IRM, WalOnMap, ...) mais la grande majorité est issue de sources littéraires scientifiques. Pour quelques exceptions, l'étudiante s'est appuyée sur ses cours de bachelier.

Enfin, le code STIR dans son état actuel fait l'objet d'une adaptation nouvelle, aidée et supervisée par le regard pratique de Mr Guillaume Agneessens (agriculteur impliqué dans l'étude).

Ce travail contribue à l'élaboration d'une étude plus large sur l'agrobiodiversité fonctionnelle (*Functional Agro Biodiversity*), portée par la thèse de post doctorat de Mme Fanny Boeraeve.

Partie V – Conclusion

Depuis les travaux de Charles Darwin (entre autres...), l'Homme a pris conscience du rôle important des vers de terre dans nos agroécosystèmes. Cette sensibilisation n'est toutefois pas encore passée à l'étape de mesure agro-environnementale car finalement, on se demande encore quelles sont les pratiques agricoles qui nuisent aux populations lombriciennes.

C'est par une approche systémique que ce travail tente de répondre à cette interrogation. Par différentes notions soulevées, elle appuie l'intérêt de promouvoir la biodiversité auprès de tous et de garantir une terre arable et durable, comme évoqué en introduction.

Le cadre de l'étude s'inscrit dans différentes modalités de systèmes agricoles (ABC, CVL, BIO, CST), définies et différenciables par les pratiques qui les composent. La situation pédologique est connue, comprenant les types de sol (limoneux à drainage normal ou ralenti) et les paramètres intrinsèques qui peuvent varier. Il s'avère que le contexte pédologique, bien représenté, n'a pas affecté les résultats.

L'échantillonnage s'est fait sur une courte durée et n'a pas nécessité de grands moyens financiers. Il a le mérite de balayer tant l'aspect pédologique qu'écologique en approchant deux fonctions des sols et en y relevant des critères plutôt visuels.

Ce travail a deux vocations : La première est de vérifier si les pratiques agricoles ont un réel impact sur l'abondance des vers de terre et la deuxième est d'évaluer le rôle des vers de terre dans la réalisation des services écosystémiques. Cette dernière, plus ambitieuse que l'autre, bénéficie heureusement d'une littérature scientifique plus fournie.

Ni l'une ni l'autre n'ont données de réponses significatives. L'approche très globale de chaque facteur n'aidant pas, plusieurs pistes d'amélioration sont alors émises pour affiner cela.

Toutefois, la communauté lombricienne, au sens large, a fait l'objet de différences en termes de groupes écologiques et de stade de développement. De plus, la zone la plus active des horizons travaillés a pu être ciblée.

Des tendances ont pu être mises en évidence. Les corrélations entre vers de terre et fonctions écologiques sont positives pour le taux de minéralisation, rattachable à la consommation de la substance « *bait* », mais douteuses pour la stabilité des agrégats. La cause de potentiels biais a été questionnée.

Les réflexions sur l'approche systémique choisie et les constats des tendances dégagées vont pouvoir servir d'arguments pour la suite.

Il est désormais possible de comprendre l'agriculteur qui a initié la réflexion sous-jacente à ce travail. En effet, les lombriciens peuvent se retrouver en quantité importante dans des sols d'agriculture conventionnelle. Mais dès lors, quels sont les groupes écologiques relevés ? A quelle utilité peuvent-ils être ramenés ? Quelle évolution et dynamique annuelle présentent-ils ? Pour combien de temps sont-ils présents encore ?

La question initiale en amène une multitude d'autres et ouvre la voie à de nombreuses recherches, plus longues et plus larges.

L'intérêt du lecteur pour les populations de vers de terre ne sera, en tout cas, pas resté intact.

Bibliographie

Andersson, E., Nykvist, B., Malinga, R., Jaramillo, F., Lindborg, R., 2015. A social–ecological analysis of ecosystem services in two different farming systems. *AMBIO* 44, 102–112. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0603-y>

Association VertCarbone, vidéo de présentation du Salon Tech & Bio, 2017

Baldivieso-Freitas, P., Blanco-Moreno, J.M., Gutiérrez-López, M., Peigné, J., Pérez-Ferrer, A., Trigo-Aza, D., Sans, F.X., 2018. Earthworm abundance response to conservation agri culture practices in organic arable farming under Mediterranean climate. *Pedobiologia* 66, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2017.10.002>

Biodivine + LIFE, n.d. Soil biological activity protocol.

Blouin, M., Hodson, M.E., Delgado, E.A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K.R., Dai, J., Dendooven, L., Pérès, G., Tondoh, J.E., 2013. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science* 64, 161–182.

Boeraeve, F., 2019. Agriculture Bio de Conservation: une solution pour restaurer les services écosystémiques?

Boeraeve, F., Dendoncker, N., Dufrêne, M., under review (2020). Contribution of agroecological farming systems to the delivery of ecosystem services. Submitted to *Journal of Environmental Management*.

Bouché, M.B., 2014. Des vers de terre et des hommes : découvrir nos écosystèmes fonctionnant à l'énergie solaire, Arbres en campagne. Actes Sud, Arles.

Bouché, M.B., 1977. Strategies lombriciennes. *Ecological Bulletins* 122–132.

Bouché, M.B., Kretschmar, A., 1977. Real: Un modele du Role Ecologique et Agronomique des Lombriciens. *Ecological Bulletins* 402–408.

Bouthier, A., Cortet, J., Bispo, A., Piron, D., n.d. Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique 25.

Braibant, J., Morelle, M., 2018. L'Agriculture de Conservation enWallonie Diversité et verrouillages (Travail de Fin d'Etude). Université Catholique de Louvain-La-Neuve.

Bucaille, F., 2020. Revitaliser les sols - Diagnostic, fertilisation, protection, Dunod. ed.

Capowiez, Y., 2009. Observer et quantifier les populations de vers de terre. *Projet SolAB*.

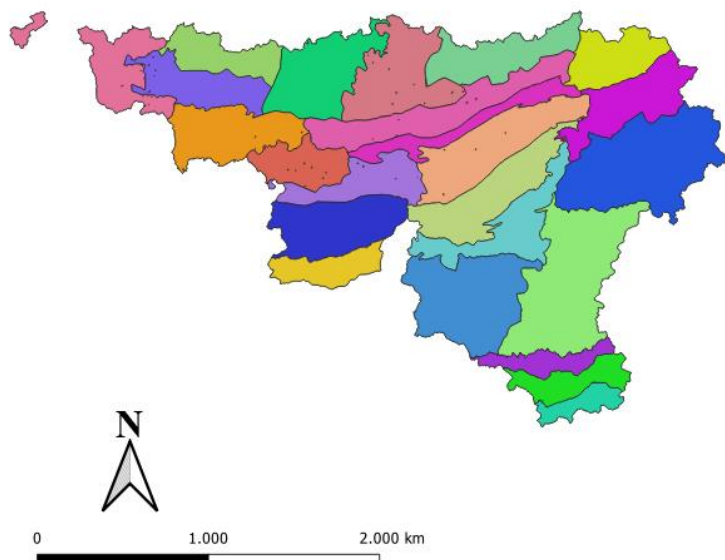
- Chan, K.Y., 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - Implications for functioning in soils. *Soil and Tillage Research* 57, 179–191. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00173-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00173-2)
- Chenu, C., Balabane, M., 2001. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés. Une approche des matières organiques par leurs fonctions. *Perspectives Agricoles* 42–45.
- Crittenden, S.J., Eswaramurthy, T., de Goede, R.G.M., Brussaard, L., Pulleman, M.M., 2014. Effect of tillage on earthworms over short- and medium-term in conventional and organic farming. *Applied Soil Ecology* 83, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.03.001>
- Drinkwater, L.E., 2002. Cropping Systems Research: Reconsidering Agricultural Experimental Approaches. *HortTechnology horttech* 12, 355–361. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.12.3.355>
- Edwards, C.A., Bohlen, P.J., 1996. *Biology and ecology of earthworms*. Springer Science & Business Media.
- Gatineau, C., 2018. *Éloge du ver de terre*, Flammarion. ed, Hors collection - Nature & Animaux.
- Genot, V., Colinet, G., Brahy, V., Bock, L., 2009. L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4 - sol 1 de « L'État de l'Environnement Wallon 2006–2007 »). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 13.
- Ghaley, B.B., Porter, J.R., Sandhu, H.S., 2014. Soil-based ecosystem services: a synthesis of nutrient cycling and carbon sequestration assessment methods. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management* 10, 177–186. <https://doi.org/10.1080/21513732.2014.926990>
- HAMEED, R., SOTO, P., n.d. Interpolabilité et validations des modèles écophysologiques versus les cycles saisonniers. *Problématique et illustration par les lombriciens*.
- Hamel, C., Schellenberg, M.P., Hanson, K., Wang, H., 2007. Evaluation of the “bait-lamina test” to assess soil microfauna feeding activity in mixed grassland. *Applied Soil Ecology* 36, 199–204. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.02.004>
- Hendrix, P.F., Parmelee, R.W., Crossley, D.A., Coleman, D.C., Odum, E.P., Groffman, P.M., 1986. Detritus Food Webs in Conventional and No-Tillage Agroecosystems. *BioScience* 36, 374–380. <https://doi.org/10.2307/1310259>
- Herzog, F., Balázs, K., Dennis, P., Friedel, J., Geijzendorffer, I.R., Jeanneret, P., Kainz, M., Pointereau, P., 2012. *Biodiversity Indicators for European Farming Systems A Guidebook*.

- Koffi, S., Laguesse, M., Leduc, H., Sohy, V., 2015. Influence des pratiques culturales de conservation sur la dynamique du carbone du sol dans des contextes pédologiques contrastés (Rapport de projet thématique No. GERE0015-1). Gembloux Agro-Bio Tech.
- Lemtiri, A., Colinet, G., Alabi, T., Cluzeau, D., Zirbes, L., Haubruge, E., Francis, F., 2014. Impacts des vers de terre sur les composants et la dynamique du sol (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 18, 121–133.
- Lerchs Salazar, A., 2014. bilan de la biodiversité d'une exploitation agricole développant des techniques culturales simplifiées en agriculture biologique (Travail de Fin d'Etude).
- Lightle D. T., CPESC. Conservation Agronomist and National RUSLE2 Database Manager National Soil Survey Center <https://www.mssoy.org/uploads/files/stir-narrative-three.pdf>, (31/05/2021)
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Moore, J.-D., 2017. Les vers de terre exotiques au Québec : état de la situation. *Avis de recherche forestière* 2.
- OPVT, 2015 - Clé d'identification de lombriciens en 4 groupes fonctionnels. Université de Rennes 1/CNRS - OSUR - UMR Ecobio. Site : <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/cle-de-determination/>
- Pelosi, Céline, Barot, S., Capowiez, Y., Hedde, M., Vandembulcke, F., 2014b. Pesticides and earthworms. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34, 199–228. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0151-z>
- Pelosi, C., Pey, B., Hedde, M., Caro, G., Capowiez, Y., Guernion, M., Peigné, J., Piron, D., Bertrand, M., Cluzeau, D., 2014a. Reducing tillage in cultivated fields increases earthworm functional diversity. *Applied Soil Ecology* 83, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.10.005>
- Pérez-Losada, M., Bloch, R., Breinholt, J.W., Pfenninger, M., Domínguez, J., 2012. Taxonomic assessment of Lumbricidae (Oligochaeta) earthworm genera using DNA barcodes. *European Journal of Soil Biology* 48, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.10.003>
- PROSENSOLS, n.d, b. Fiche "Caractériser la stabilité structurale et la battance".
- PROSENSOLS, n.d, a. Fiche "L'estimation des vers de terre".
- Roarty, S., Schmidt, O., 2013. Permanent and new arable field margins support large earthworm communities but do not increase in-field populations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 170, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.02.011>

- Römbke, J., 2014. The feeding activity of invertebrates as a functional indicator in soil. *Plant and Soil* 383, 43–46. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2195-5>
- Sarthou, J-P., 2016. Colloque « AB + AC = ABC Comment associer Agriculture Biologique et Agriculture de conservation », 22
- Shepherd, T. G., Stagnari, F., Pisante, M. and Benites, J. 2008. *Visual Soil Assessment – Field guide for annual crops*. FAO, Rome, Italy.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 2099–2103. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6)
- Stroud, J.L., 2019. Soil health pilot study in England: Outcomes from an on-farm earthworm survey. *PLoS ONE* 14, e0203909. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203909>
- Stroud, J.L., Irons, D., Watts, C.W., Whitmore, A.P., 2016. *Lumbricus terrestris* abundance is not enhanced after three years of compost amendments on a reduced tillage wheat cultivation conversion. *Applied Soil Ecology* 98, 282–284. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.007>
- TILMAN-ORG, 2011. *Reduced tillage and green manures for sustainable organic cropping systems – TILMAN-ORG*. Funding: ORE Organic II Funding Bodies, being partners of the FP7 ERA-Net project CORE Organic II.
- Van der Werf, H.M.G., Knudsen, M.T. & Cederberg, C. Towards better representation of organic agriculture in life cycle assessment. *Nat Sustain* 3, 419–425 (2020)
- van Groenigen, J.W., Lubbers, I.M., Vos, H.M.J., Brown, G.G., De Deyn, G.B., van Groenigen, K.J., 2014. Earthworms increase plant production: a meta-analysis. *Scientific Reports* 4, 6365. <https://doi.org/10.1038/srep06365>
- Vincent, Q., Chartin, C., Krüger, I., van Wesemael, B., Carnol, M., 2019. La qualité biologique et le carbone organique des sols agricoles en Wallonie 38.

Annexes

Annexe 1 – Les 24 Districts de l’Espace Rural en Wallonie



Légende

□ Délimitations District de l'Espace Rural

Districts

- Sols argileux ou limono-caillouteux de La Lorraine méridionale
 - Sols argileux ou sablo-limoneux à sableux de la Dépression de La Haine et des sols limoneux ou limono-caillouteux des bas-plateaux sud-hennuyers
 - Sols argileux ou sablo-limoneux dominants de La Lorraine septentrionale
 - Sols argileux, sablo-limoneux ou limoneux des plaines et bas reliefs de L'Escaut et de La Lys (rive gauche)
 - Sols limoneux dominants des bas-plateaux de La Hesbaye occidentale
 - Sols limoneux dominants des bas-plateaux de La Hesbaye orientale
 - Sols limoneux ou limono-caillouteux de l'Ardenne occidentale (Entre-Sambre-et-Meuse)
 - Sols limoneux ou limono-caillouteux des bas-plateaux sud-hennuyers
 - Sols limoneux ou limono-caillouteux du Sillon sambro-mosan
 - Sols limoneux ou sableux des bas-plateaux hennuyer-brabançons et de leurs bordures
 - Sols limoneux, limono-caillouteux ou argileux de l'Entre-Vesdre-et-Meuse
 - Sols limoneux, sablo-limoneux ou argileux des bas-plateaux nord-hennuyers et de leurs bordures - cours amont de La Dendre et de La Senne
 - Sols limoneux, sablo-limoneux ou argileux des bas-plateaux nord-hennuyers et de leurs bordures - cours aval de La Dendre et de La Senne
 - Sols limono-caillouteux de l'Ardenne centro-occidentale
 - Sols limono-caillouteux de l'Ardenne centro-orientale
 - Sols limono-caillouteux de l'Ardenne centro-septentrionale
 - Sols limono-caillouteux de l'Ardenne nord-orientale
 - Sols limono-caillouteux de l'Ardenne orientale
 - Sols limono-caillouteux ou argileux dominants de La Fagne (Entre-Sambre-et-Meuse)
 - Sols limono-caillouteux ou argileux dominants de La Famenne
 - Sols limono-caillouteux ou limoneux de l'Ardenne condrusienne
 - Sols limono-caillouteux ou limoneux du Condroz en rive droite de Meuse
 - Sols limono-caillouteux ou limoneux du Condroz en rive gauche de Meuse (Entre-Sambre-et-Meuse)
 - Sols sableux ou argileux de La Lorraine centrale
- Parcelle du réseau d'étude (F. Boeraeve)

Source : N. Deville, F. Boeraeve

Annexe 2 – Légende de la Carte Numérique des Sols Wallons

SÉRIES DÉRIVÉES

SUBSTRAT

Préfixe de la série principale

a fortement altéré
f schisteux
g caillouteux / graveleux
j de grès calcaire
k calcaire
m de macigno
n crayeux / crayeux ou marneux
p psammitique
q gréseux
r schisto-gréseux
s sableux
u argileux
v tourbeux
w argilo-sableux
x non défini / de silixite
.u d'argile d'altération de .
.w de sable argileux d'altération de .

(.) Substrat débutant entre 80 et 125 cm de profondeur pour les sols non caillouteux (< 5%)
 .- Profondeur variable d'apparition du substrat
 ./ Substrat discontinu spatialement

si G... Substrat indiqué si "aberrant" (nature lithologique différente de la charge)
 Si substrat "normal": à déduire de la charge et du fait d'une phase de profondeur

SÉRIES PRINCIPALES

TEXTURE

1^{ère} position de la série principale (X .)

Sols organiques
V Tourbe (> 30% M.O.)
W Tourbière haute intacte (inactive)

Sols minéraux
Z Sable
S Sable limoneux
P Limon sableux léger
L Limon sableux
A Limon
E Argile légère
U Argile lourde

(G) Limon peu caillouteux (sols p¹) non
 G Limon peu caillouteux (sols non p) non
 Limon caillouteux (sols p) non²
 Limon (très) caillouteux (sols non p) oui

Précision de la nature de la charge ↓

... COMPLEXES

1 sols sans développement de profil
 2 dans la plupart des cas

DRAINAGE

2^{ème} position de la série principale (. xX .)

Textures L, A, E, U, G - Textures Z, S, P

Drainage :	Définition - sols :	oxydo-réduction	réduction
a	excessif / très secs	-	-
b	favorable / non gleyifiés	> 125	-
c	modéré / faiblement gleyifiés	80-125	-
d	imparfait / modérément secs	60-90	-
		50-80	-
		40-60	-

à engorgement d'eau temporaire - sans horizon réduit

h	assez pauvre / fortement gleyifiés	30-50	-
		20-40	-
i	pauvre / très fortement gleyifiés	0-30	-
		0-20	-

à engorgement d'eau permanent - à horizon réduit

e	assez pauvre / fortement gleyifiés	30-50	> 80
		20-40	> 80
f	pauvre / très fortement gleyifiés	0-30	40-80
		0-20	40-80
g	très pauvre / réduits	-	< 40
		-	< 40

COMPLEXES
A (a)+b+c+d **I** h+i
B a+b **F** e+f
D c+d **G** e+f+g

DÉVELOPPEMENT DE PROFIL

3^{ème} position de la série principale (. . xX)

Horizon :

a B textural
b B structural
c B textural fortement tacheté (textures A, L) ou morcelé (textures Z, S, P)
d B textural jaune rougeâtre

f B humique ou/et ferrique peu distinct
g B humique ou/et ferrique distinct
h B humique ou/et ferrique morcelé

m A humifère anthropogène épais
p Absence de développement de profil
x Développement de profil non défini

COMPLEXES
B a+b
F f+g(+b)
P p+b / p+x

CHARGE EN ÉLÉMENTS GROSSIERS

4^{ème} position de la série principale (. . . xX)

f schisteuse
fi schisto-phylleuse
fp schisto-psammitique
fq quartz-gréseuse
k calcaire
K argilo-calcaire
kf schisto-calcaire
m de macigno
n crayeuse
p psammitique
q gréseuse
r schisto-gréseuse
t de gravier
x de silixite

¹ pour les sols G non p (très) caillouteux pour les sols Z, S, P et U à plus de 5%

SÉRIES SPÉCIALES

Sols artificiels
OE Fosse d'extraction
ON Remblai
OT Terrain remanié

Terrains non différenciés
B Zone de source
H Complexe de sols sur fortes pentes
J Affleurement rocheux
R Ravin ou fond de vallon rocaillieux
S Fond de vallon limoneux

PHASES DE PROFONDEUR

Suffixe de la série principale

Sols non caillouteux (< 5%) et sols organiques

SUBSTRAT DÉBUTANT
(.)¹ entre 80 et 125 cm
2 entre 40 et 80 cm
3 entre 20 et 40 cm

Sols organiques →
 peu caillouteux (5-15%)
 caillouteux (15-50%)
 très caillouteux (> 50%)

SUBSTRAT DÉBUTANT :
0 à plus de 125 cm x x x
1 entre 80 et 125 cm x x x
2 entre 40 et 80 cm x x
3 entre 40 et 80 cm x x
7 entre 40 et 80 cm ; fortement altéré x x x

4 entre 20 et 40 cm x x
5 entre 20 et 40 cm x
6 à moins de 20 cm x x

¹ nature du substrat en préfixe entre parenthèses

PHASES DIVERSES

Suffixe de la série principale

Phases liées à la charge en éléments grossiers en surface

PHASE :
(q) à (gros) cailloux (ou blocs) gréseux (ou quartzitiques) épars (en surface)
(r) à charge modérée de petits cailloux non phyllitiques
1 peu caillouteuse (A-G . p)
c caillouteuse

Phases liées à l'altération
(a) Phase à débris de roches fortement altérées
b Phase rougeâtre

Phase liée à la matière organique
(v) Phase à couverture tourbeuse

VARIANTES DE DÉV. DE PROFIL

Suffixe de la série principale

Sols des plateaux et des pentes :
A (/L/P/S) . a (/b/c/x)
0 Horizon A¹ : | épais (> 40 cm)
1 Horizon A¹ : | mince (< 40 cm)

A b/(c/d) B
 Développement :
1 profond (> 125 cm)
2 moyennement ou peu profond (40-125 cm)
3 superficiel (< 40 cm)

Sols des vallées et des dépressions (. . p) :
(c) Horizon B | entre 40 et 80 cm
1 textural enfoui : | entre 80 et 125 cm
0 Colluvions ou alluvions de plus de 125 cm

¹ ancienne nomenclature (A1+A2) → A+E

VARIANTES DE MAT. PARENTAL MEUBLE

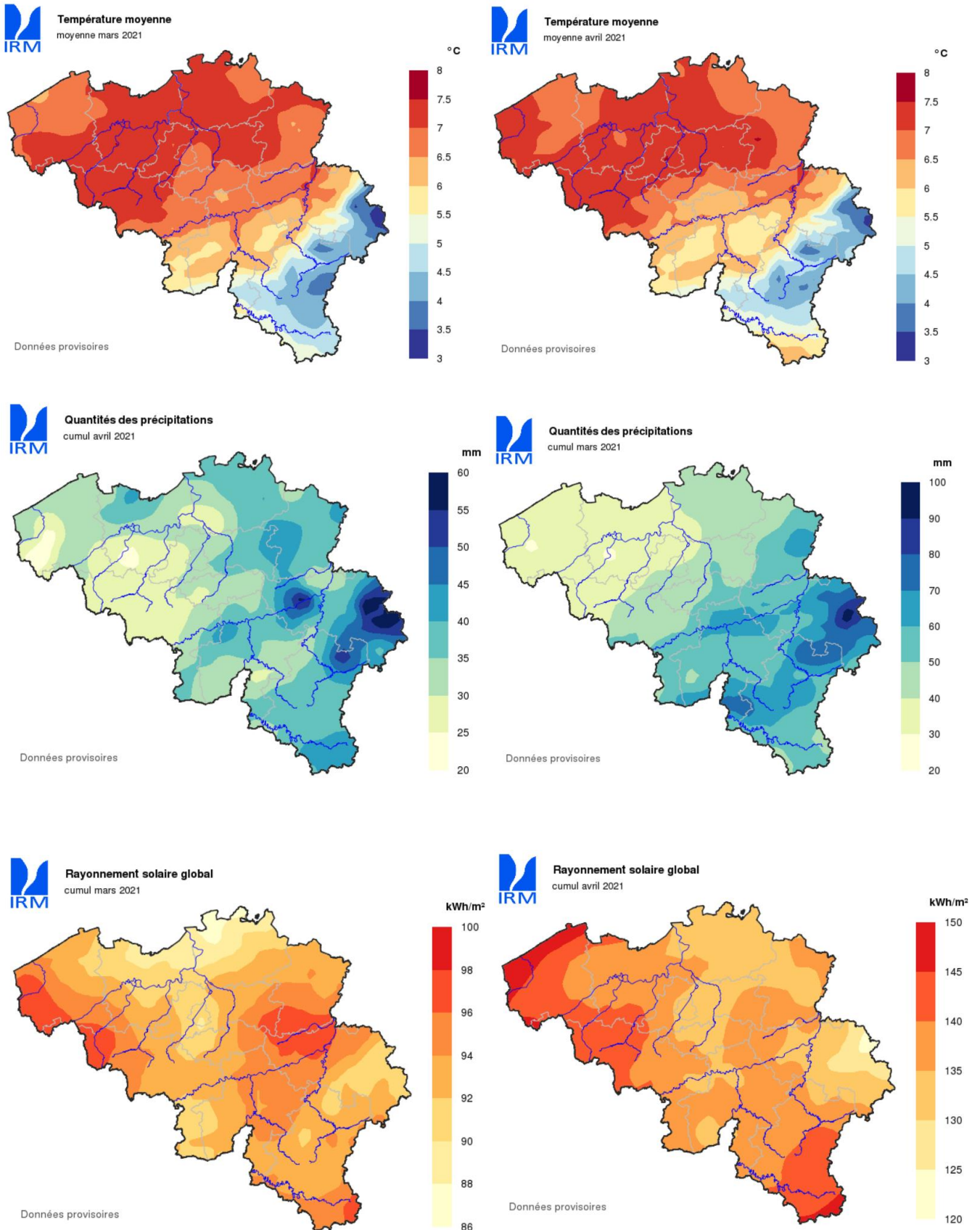
Suffixe de la série principale

a Sols sur limon d'altération (G . . a)
y Sols devenant plus fins (Z, S) ou plus lourds (L, A, E) en profondeur
z Sols devenant plus grossiers (Z, S) ou plus légers (L, A, E) en profondeur

NON CARTOGRAPHIÉ

NC Zones non cartographiées (zones bâties, cours d'eau, canaux, marais, routes, chemins de fer, domaines militaires,...)

Annexe 3 – Données IRM de température (1), précipitations (2) et rayonnement solaire (3) pour les mois de mars (a) et avril (b) 2021



Annexe 4 - Recouvrement et stade de développement

Jour julien 74 (15 mars)				
	Stade (échelle BBHC)	Pourcentage recouvrement		
09CSTA	3	50	0-10 %	
48CSTG	2	50		
33CSTG	3	30	10-30 %	
35CSTB	2	40		
37CSTE	2	40	30-50 %	
28CSTH	3	70		
05ABCA	3	40	50-80 %	
06ABCA	2	40		
07ABCB	2	50	> 80 %	
08ABCB	2	50		
12ABCH	3	50		
13ABCF	3	60		
17ABCE	2	10		
24CVLA	2	40		
36CVLA	3	60		
41CVLB	2	50		
43CVLF	2	60		
47CVLH	3	60		
51CVLE	3	70		
22BIOA	2	40		
25BIOA	2	40		
26BIOC	2	40		
42BIOF	3	80		
53BIOF	2	70		
54BIOB	2	50		
55BIOH	2	30		

Source : M. Plancquaert et Livre Blanc 2008.



Photos prises lors d'une tournée des parcelles, le même jour.

Annexe 5 – Observations terrain, données « Test-bêche »

Parcelle	Observateur	Date (julian)	Météo	Humidité sol	Dernière pluie (J-)	Dernière gelée (J-)
05ABCA	Aimé; Nicolas	74	Couvert	Humide	0	15
06ABCA	Lucie	74	Couvert	Humide	0	15
07ABCB	Lucie	74	Couvert	Humide	0	15
08ABCB	Lucie	81	Couvert	Humide	2	3
09CSTA	Aimé ; Nicolas	74	Couvert	Humide	0	15
12ABCH	Aimé; Marine	81	Couvert	Humide	2	3
13ABCF	Aimé; Marine	81	Couvert	Humide	2	3
17ABCE	Lucie	81	Couvert	Humide	2	3
22BIOA	Lucie	74	Couvert	Humide	0	15
24CVLA	Aimé; Nicolas	74	Couvert	Humide	0	15
25BIOA	Lucie	74	Couvert	Humide	0	15
26BIOC	Aimé; Nicolas	74	Couvert	Humide	0	15
28CSTG	Aimé; Marine	81	Couvert	Humide	2	3
33CSTG	Aimé; Marine	81	Couvert	Humide	2	3
35CSTB	Aimé ; Nicolas	74	Couvert	Humide	0	15
36CVLA	Aimé ; Nicolas	75	Couvert	Humide	0	15
37CSTE	Lucie	81	Couvert	Humide	2	3
41CVLB	Lucie	74	Couvert	Humide	0	15
42BIOF	Aimé; Marine	81	Couvert	Humide	2	3
43CVLF	Aimé; Marine	81	Couvert	Humide	2	3
47CVLH	Lucie	81	Couvert	Humide	2	3
48CSTH	Lucie	81	Couvert	Sec	2	3
51CVLE	Lucie	81	Couvert	Humide	2	3
53BIOF	Aimé; Marine	81	Couvert	Humide	2	3
54BIOB	Lucie	74	Couvert	Humide	0	15
55BIOH	Lucie	81	Couvert	Humide	2	3

Parcelle	Distance bords (m)	Distance arbre (m)	Surface (ha)	Environnement	Abords parcelle
05ABCA	35	35	6,44	Péri-urbain	Agricole
06ABCA	18	200	16,298	Péri-urbain	Agricole
07ABCB	30	35	5,887	Péri-urbain	Maison, Grande route
08ABCB	20	150	2,1	Péri-urbain	Maison, Grande route
09CSTA	85	85	15,41	Rural	Agricole
12ABCH	30	35	11,76	Rural	Agricole
13ABCF	25	25	4,1911	Rural	Maison, Agricole
17ABCE	20	300	1,5	Péri-urbain	Pompe à essence, Grande route
22BIOA	20	20	10,12	Rural	Agricole
24CVLA	30	30	19,73	Rural	agricole
25BIOA	20	20	13,64	Rural	Agricole
26BIOC	50	50	8,75	Rural	Agricole
28CSTG	50	60	7,86	Rural	Agricole
33CSTG	60	80	10,15	Rural	Agricole
35CSTB	40	100	4,51	Rural	Agricole
36CVLA	35	90	5,796	Rural	Pompe à essence, Grande route
37CSTE	20	200	10,67	Péri-urbain	Agricole
41CVLB	30	100	28,35	Agglomération	Maison
42BIOF	40	40	7,2	Rural	Agricole, Tas de fumier à 38m
43CVLF	40	100	4,46	Rural	Péri-urbain
47CVLH	40	40	11,94	Agglomération	Maison
48CSTH	30	100	1,74	Rural	Agricole
51CVLE	25	300	5,98	Rural	Agricole
53BIOF	10	10	0,45	Rural	Agricole, Grande route
54BIOB	20	500	3,78	Rural	Agricole, Grande route
55BIOH	20	20	0,93	Rural	Agricole, Grande route

Annexe 6- Références de porosité du Visual Soil Assessment



GOOD CONDITION VS = 2

Soils have many macropores and coarse micropores between and within aggregates associated with good soil structure.



MODERATE CONDITION VS = 1

Soil macropores and coarse micropores between and within aggregates have declined significantly but are present on close examination in parts of the soil. The soil shows a moderate amount of consolidation.

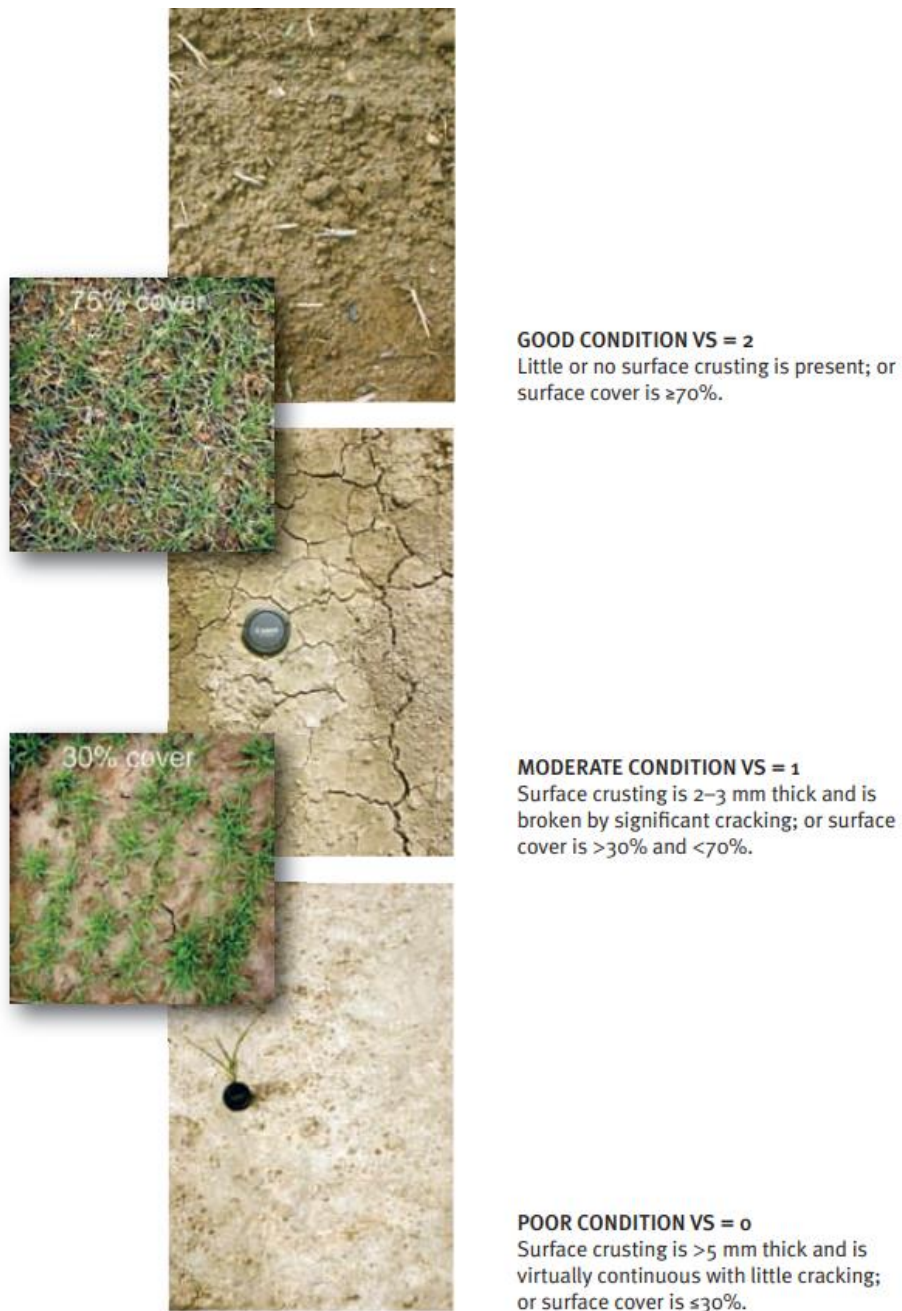


POOR CONDITION VS = 0

No soil macropores and coarse micropores are visually apparent within compact, massive structureless clods. The clod surface is smooth with few or no cracks or holes, and can have sharp angles.

Source : Sheperd et al., 2018.

Annexe 6bis - Références en termes de couvert et de croute de surface



Source : Sheperd et al., 2018.

Annexe 7 – Résultats des deux analyses composites pour chaque parcelle

Référence	P	K	Mg	Ca	pH_KCl	Carbone org
05ABCAC1	5,821000099	25,65289688	10,96189308	150,8181	5,880000114	12,74
05ABCAC2	5,902999878	21,80862808	10,58359241	151,7353821	5,900000095	12,23
09CSTAC1	7,800000191	26,67329979	16,09325409	211,7745514	6,059999943	13,79
09CSTAC2	6,468999863	25,03622246	15,78637123	206,9416199	6,010000229	12,44
24CVLAC1	1,697999954	12,47291374	6,146448135	159,9472656	6,380000114	8,7
24CVLAC2	1,621999979	12,80233574	6,069013119	174,0147858	6,96999979	9,68
25BIOAC1	7,835999966	12,8529129	9,487920761	176,7429199	6,230000019	9,65
25BIOAC2	8,411000252	12,74359226	9,675755501	178,1190948	6,210000038	10,01
06ABCAC1	9,725000381	19,18265533	14,32567501	283,1623535	7,409999847	11,57
06ABCAC2	9,262999535	17,99627113	13,80120277	282,8578186	7,610000134	12,49
41CVLBC1	2,295000076	18,55498314	13,4824419	244,7090607	6,300000191	18,66
41CVLBC2	1,771999955	16,89041138	13,59032726	239,1941071	6,110000134	19,49
07ABCAC1	10,08100033	17,00021172	8,697985649	414,9913025	7,429999828	11,56
07ABCAC2	12,72399998	20,66829872	8,384354591	396,1707458	7,510000229	11,27
26BIOCC1	10,321999955	16,22759628	9,312537193	342,0224304	7,730000019	13,26
26BIOCC2	9,229000092	16,94060135	9,025452614	295,0820007	7,510000229	14,78
54BIOBC1	3,190999985	18,42165184	23,40504456	224,7030792	6,760000229	15,19
54BIOBC2	2,461999893	17,18803215	20,83293724	193,9038696	6,46999979	15,33
22BIOAC1	1,593000054	10,14981747	11,04676342	143,7832947	5,849999905	9,02
22BIOAC2	1,909999967	10,25532246	10,47949028	154,1226044	6,159999847	9,32
33CSTGC1	11,64400005	28,72519112	12,87429428	202,2652283	6,349999905	12,26
33CSTGC2	12,72099972	28,10751915	12,4449749	205,8198395	6,429999828	12,24
53BIOFC1	10,72200012	24,51181793	19,36797333	271,5105896	7,079999924	16,32
53BIOFC2	10,15499973	23,63301659	16,79376602	256,8414001	6,96999979	14,77
43CVLFC1	10,45400047	15,71515083	17,96526337	163,9718475	5,940000057	11,56
43CVLFC2	10,4090004	16,45756912	18,53008842	163,9015198	5,78000021	12,62
13ABCFC1	5,781000137	11,13572598	10,92120552	161,3917236	5,949999809	9,81
13ABCFC2	5,34800005	11,33675289	10,87110233	163,319458	6,059999943	10,49
28CSTGC1	2,898999929	22,79380608	9,789951324	140,5502625	5,050000191	16,58
28CSTGC2	2,480999947	23,17601395	9,789027214	140,1191101	5,059999943	16,6
36CVLBC1	6,308000088	17,20370865	10,33907223	231,1430664	6,489999771	15,85
36CVLBC2	7,218999863	21,44130516	10,44294739	232,4238129	6,650000095	13,14
35CSTBC1	7,909999847	22,88448143	9,989153862	186,9225159	6,199999809	15,98
35CSTBC2	7,364999771	20,90358162	11,06250572	180,7861328	6	14,61
08ABCBC1	4,579999924	20,1846962	12,94148636	147,7058411	5,599999905	24,22
08ABCBC2	4,423999786	18,75709724	12,41622543	138,5662842	5,480000019	21,84
55BIOHC1	4,927000046	11,4587574	40,80533981	325,5677795	7,179999828	25,63
55BIOHC2	4,132999897	12,25338936	32,32318878	286,0935059	6,869999886	31,24
47CVLHC1	5,09100008	14,28466988	13,27568722	196,4038544	6,119999886	16,74
47CVLHC2	4,738999844	15,44986916	12,37574387	196,0005951	6,010000229	18,03
12ABCHC1	2,657999992	21,15900421	16,64525604	153,1621552	6,159999847	13,77
12ABCHC2	2,96600008	21,9811821	18,27619934	152,3357391	6,5	14,54
48CSTHC1	4,916999817	25,06805611	13,5435648	343,7547302	7,110000134	18,17
48CSTHC2	6,644000053	42,84487915	13,80228043	446,4863892	7,269999981	21,45
51CVLEC1	9,583999634	31,21166992	8,177685738	657,2376709	7,610000134	12,63
51CVLEC2	9,862000465	24,55279922	7,541214943	624,302124	7,650000095	14,28
37CSTEC1	4,933000088	14,76211834	11,71902657	211,1364288	6,300000191	11,09
37CSTEC2	4,573999882	13,73247433	11,16100597	213,146225	6,369999886	11,17

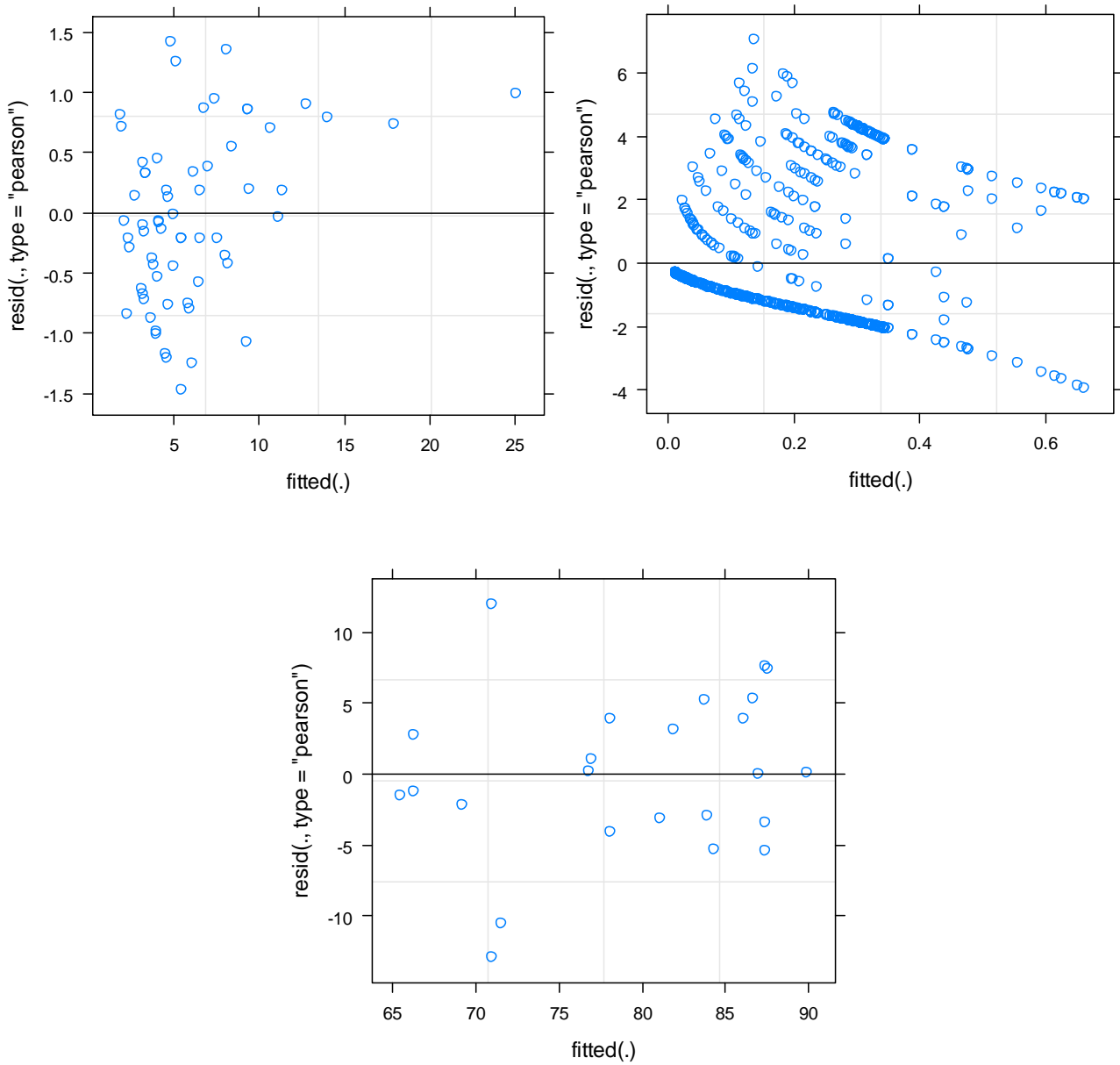
Référence	Humus	Azote total	C/N	pH_eau	CEC	Argile
05ABCAC1	2,547800064	0,129449993	9,840866089	6,889999866	8,265000343	11,10406113
05ABCAC2	2,446000099	0,123130009	9,932591438	6,980000019	8,211000443	10,87970161
09CSTAC1	2,757200003	0,142570004	9,669635773	7,090000153	10,09599972	13,78821278
09CSTAC2	2,487799883	0,132540002	9,385089874	7,139999866	10,45699978	15,19164848
24CVLAC1	1,739599943	0,092639998	9,389032364	7,389999866	8,694999695	10,4927721
24CVLAC2	1,936380029	0,096529998	10,0299387	7,769999981	8,335000038	10,19447899
25BIOAC1	1,930500031	0,100230001	9,630350113	7,369999886	8,022999763	11,76470566
25BIOAC2	2,001399994	0,100469999	9,960186958	7,349999905	8,111000061	12,03416157
06ABCAC1	2,314199924	0,1171	9,881298065	8,130000114	8,586000443	12,15495586
06ABCAC2	2,497200012	0,117409997	10,63452911	8,229999542	8,748999596	13,11814308
41CVLBC1	3,732800007	0,190689996	9,787613869	7,130000114	9,295000076	19,11436844
41CVLBC2	3,897799969	0,194120005	10,03966618	7,079999924	9,647000313	19,34312248
07ABCAC1	2,312599897	0,120719999	9,578362465	8,090000153	8,597999573	14,17099667
07ABCAC2	2,253599882	0,115769997	9,733091354	8,100000381	8,18500042	11,49334145
26BIOCC1	2,65199995	0,134800002	9,836794853	8,18999958	8,692000389	14,0165081
26BIOCC2	2,956399918	0,135179996	10,93505001	8,119999886	8,840999603	13,72549057
54BIOBC1	3,037199974	0,153589994	9,88736248	7,590000153	9,170000076	13,10355759
54BIOBC2	3,066800117	0,150030002	10,22062302	7,440000057	9,131999969	12,9615078
22BIOAC1	1,804800034	0,095030002	9,495948792	7,099999905	8,836999893	12,09992218
22BIOAC2	1,864740014	0,09426	9,891469955	7,309999943	8,843000412	13,21106625
33CSTGC1	2,452399969	0,125589997	9,763516426	7,340000153	9,744000435	13,09523773
33CSTGC2	2,448600054	0,127389997	9,610645294	7,420000076	9,505000114	13,11814308
53BIOFC1	3,263799906	0,144759998	11,27314186	7,909999847	10,29699993	12,08507919
53BIOFC2	2,953799963	0,141080007	10,46852875	7,869999886	10,32199955	12,73479748
43CVLFC1	2,312400103	0,11411	10,13232899	7	7,853347778	12,37815285
43CVLFC2	2,523200035	0,113569997	11,10856724	6,929999828	9,760000229	12,53918457
13ABCFC1	1,962679982	0,100599997	9,754870415	7,119999886	10,05000019	10,77242279
13ABCFC2	2,09800005	0,10396	10,09041977	7,159999847	10,36299992	10,57496452
28CSTGC1	3,316200018	0,157360002	10,5369854	6,21999979	9,302000046	12,3231039
28CSTGC2	3,319000006	0,157240003	10,55393028	6,230000019	9,168000221	13,7039938
36CVLBC1	3,170599937	0,133670002	11,8598032	7,5	9,645999908	15,05308151
36CVLBC2	2,627000093	0,13053	10,06282043	7,539999962	9,633999825	15,42477417
35CSTBC1	3,195600033	0,133809999	11,94081211	7,110000134	8,510000229	13,39848709
35CSTBC2	2,92140007	0,128869995	11,3346796	7,079999924	8,788000107	14,93710709
08ABCBC1	4,843200207	0,154009998	15,7236557	6,739999771	8,850999832	12,6342392
08ABCBC2	4,367000103	0,146060005	14,94933605	6,760000229	8,475000381	11,57222652
55BIOHC1	5,125800133	0,192019999	13,34704781	7,989999771	10,67800045	20,90849495
55BIOHC2	6,24819994	0,200289994	15,59788322	7,820000172	11,18500042	20,30498886
47CVLHC1	3,347599983	0,124310002	13,46472549	7,170000076	9,184000015	15,25369263
47CVLHC2	3,605999947	0,126499996	14,25296497	7,110000134	9,562999725	16,4757576
12ABCHC1	2,753200054	0,12173	11,3086338	7,320000172	8,767999649	14,93945599
12ABCHC2	2,908400059	0,124509998	11,67938423	7,269999981	8,788999557	13,98433781
48CSTHC1	3,63499999	0,169699997	10,71007633	7,710000038	10,19400024	19,23385239
48CSTHC2	4,289599895	0,182390004	11,75941658	7,769999981	10,38099957	19,46787834
51CVLEC1	2,52699995	0,131870002	9,581406593	8,119999886	10,03939056	17,02296066
51CVLEC2	2,856600046	0,133159995	10,72619534	8,18999958	9,829620361	16,49501038
37CSTEC1	2,218800068	0,112620004	9,85082531	7,300000191	10,2	15,86196232
37CSTEC2	2,233999968	0,113310002	9,85791111	7,340000153	10,4	15,66170692

Référence	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Indice de battance	CaCO ₃
05ABCAC1	28,94987297	52,7442894	5,61548233	1,586294413	2,268407583	
05ABCAC2	27,19925308	54,39850616	6,263599396	1,258936882	2,308954239	
09CSTAC1	31,90986443	48,84967041	4,806177139	0,646076262	2,025075674	
09CSTAC2	31,94141388	47,52259445	4,689934731	0,654409468	2,057220936	
24CVLAC1	31,47831535	52,46385956	3,917301416	1,647753716	3,02595067	
24CVLAC2	30,97553253	53,32497025	4,281681538	1,223337531	2,770968199	
25BIOAC1	32,54901886	50,19607925	3,843137264	1,647058845	2,709115744	
25BIOAC2	33,38509369	49,68944168	3,618012428	1,273291945	2,65542078	
06ABCAC1	34,11229706	48,61982346	3,105395317	2,007528305	2,256744146	
06ABCAC2	34,98171234	46,50978088	3,148354292	2,242009878	2,047373056	
41CVLBC1	31,85727882	40,61803055	6,339598656	2,070723057	1,360360026	
41CVLBC2	31,97536659	40,26527786	5,637138844	2,779093742	1,324200749	
07ABCAC1	30,7038269	48,02393341	5,243268967	1,857975125	1,982544184	
07ABCAC2	31,30944824	49,54026794	5,722891331	1,934051991	2,251965761	0,6
26BIOCC1	35,43061829	45,16430283	4,142656803	1,245911837	1,908686161	
26BIOCC2	37,64706039	43,92156982	3,607843161	1,098039269	1,841438293	
54BIOBC1	34,9428215	46,45806885	4,145489216	1,350063562	1,889053941	
54BIOBC2	34,17124939	47,52553177	3,943440676	1,398271799	1,903794646	
22BIOAC1	33,17720413	47,22872925	3,77829814	3,715847015	2,805645943	
22BIOAC2	32,2505455	47,01585388	3,699098587	3,823437929	2,563289881	
33CSTGC1	25,79365158	54,36507797	6,333333492	0,412698418	2,044330835	
33CSTGC2	23,85116959	55,25520706	7,362060547	0,41342026	1,969448328	
53BIOFC1	23,36448669	55,591362	7,669996738	1,289075136	1,533898234	
53BIOFC2	24,67367172	53,32696533	7,338427067	1,926138163	1,647637963	
43CVLFC1	25,52993965	55,31486893	5,91056776	0,866470695	2,247217655	
43CVLFC2	27,03761673	54,46708298	5,172413826	0,783699036	2,155260324	
13ABCFC1	21,54484558	57,85189819	8,554101944	1,27673161	2,466398954	
13ABCFC2	21,14992905	58,74980545	8,365972519	1,159329414	2,369753599	
28CSTGC1	21,06853294	52,47257233	11,41675949	2,719033241	1,560010314	
28CSTGC2	19,96867752	53,24980545	11,02584171	2,051683664	1,490390658	
36CVLBC1	33,27523422	45,95151138	3,406750202	2,313421011	1,704494119	
36CVLBC2	32,03607178	47,06533813	3,622844458	1,850972891	1,891126037	
35CSTBC1	34,28436279	46,89470291	4,003783226	1,418663263	1,887349486	
35CSTBC2	33,80503082	45,59748459	3,962264061	1,698113203	1,907069802	
08ABCBC1	31,19077682	43,43019485	10,61276054	2,132027864	1,299552917	
08ABCBC2	31,52434158	42,69752502	10,69433403	3,511572123	1,435670853	
55BIOHC1	25,41816902	36,89734268	11,15119743	5,62479496	0,713784099	
55BIOHC2	25,27763939	35,22294235	12,53107929	6,663351536	0,613098741	
47CVLHC1	32,51445007	42,95118713	7,466281414	1,814386606	1,627924442	
47CVLHC2	32,9515152	42,36623383	6,731523514	1,474972486	1,523651123	
12ABCHC1	28,30633736	48,35665894	7,312470436	1,085076213	1,789644837	
12ABCHC2	27,96867561	49,54450989	7,319801807	1,182675362	1,782880664	
48CSTHC1	29,25148201	44,87898636	5,145055294	1,490623474	1,2529459	
48CSTHC2	29,20181656	44,20830536	5,353666306	1,768332243	1,080030918	0,7
51CVLEC1	32,4623909	43,94299316	4,259699345	2,31195569	1,706601024	1,3
51CVLEC2	33,39234161	43,85259247	4,151915073	2,108142853	1,603457928	1,1
37CSTEC1	33,27143478	46,03837967	3,203342676	1,62488389	2,159080744	
37CSTEC2	35,23884201	43,46123886	3,398590565	2,239624023	2,180693388	

Annexe 8 - Résultats du *slake test*

Parcelle	Nombre de fois que la classe est attribuée						Somme des 16 classes attribuées
	1	2	3	4	5	6	
05ABCA			1	2	8	5	81
06ABCA			1	2	4	9	85
07ABCB		2	5	6	3		58
08ABCB			3	1	2	10	83
09CSTA					6	10	90
12ABCH			1		3	12	90
13ABCF		1	1		11	3	78
22BIOA		1	3	2	5	5	74
24CVLA		2	3	3	8		65
25BIOA			2	3	2	9	82
26BIOC			2	2	9	3	77
28CSTG				2	10	4	82
33CSTG			2	3		11	84
35CSTB			1	2	11	2	78
36CVLA		3	1	2	8	2	69
37CSTE				3	3	10	87
41CVLB			5	4	6	1	67
43CVLF			5	7	3	1	64
47CVLH		2		4	1	9	79
48CSTG					1	15	95
51CVLE					1	15	95
53BIOF					7	9	89
54BIOB	3		3	2	7	1	61
55BIOH				1	2	13	92

Annexe 9 - Distributions des résidus qui vérifient la normalité du modèle de régression des vers de terre (a), des *Bait lamina* (b) et du *slake test* (c)



Annexe 10 - Codes statistiques utilisés dans R

9.1. Analyses univariées

9.1.1. Modèle linéaire mixte généralisé (glmer)

Vers de terre

```
mod <- glmer((nbindiv)~ Systeme+typeSols+Systeme:typeSols + groupe + stade +
(1|i.parcelle)+(1|prelevement),data= ech_vdt, family=poisson, glmerControl(optimizer="bobyqa",
optCtrl = list(maxfun = 100000)))
```

Résultat : Table III.2.3.1

Bait lamina

```
mod1 <- glmer(cbind(holes,8-holes)~systeme+typeSols+systeme:typeSols+position +
(1|parcelle)+(1|stick), data=baitlamina, family=binomial, glmerControl(optimizer="bobyqa", optCtrl =
list(maxfun = 100000)))
```

Résultat : Table III.2.3.3.

9.1.2. Modèle linéaire mixte (lmer)

Slake test

```
mod <- lmer((Total) ~systeme+TypeSols+systeme:TypeSols+(1|Zone), data=slaketest)
```

Résultat : Table III.2.3.4.

9.1.3. Modèle linéaire (lm)

P-valeur des différences de paramètres physico-chimiques et textures entre type de sol (9.1.3.1)

```
model <- lm(granulo$pH_eau ~ granulo$Type_sol + granulo$Type_sol/granulo$Parcelle)
```

```
Anova (model)
```

Et ainsi de suite pour les autres paramètres...

Résultat : Table III.2.2.4 pour les p-valeurs et Table III.2.2.2 pour les écart-types.

P-valeur des différences de paramètres physico-chimiques et textures entre système (9.1.3.2)

```
model <- lm(granulo$pH_eau ~ granulo$Systeme)
```

```
Anova (model)
```

Et ainsi de suite pour les autres paramètres...

Résultat : Table III.2.2.2.

P-valeur des différences d'abondances de groupes écologiques en fonction des pratiques (9.1.3.4)

```
model <- lm(pratique$Epigés ~ pratique$couvert + pratique$STIR_av + pratique$STIR_pdt +
pratique$score_AC + pratique$organique + pratique$mineral + pratique$phytos + pratique$score_AB +
pratique$systeme)
```

```
Anova (model)
```

Et ainsi de suite pour les autres groupes écologiques et pour le total des vers de terre

Résultat : Table III.2.5.3.

9.2. Analyses multivariées - Analyses en composantes principales (PCA)

9.2.1. 1^{er} cercle de corrélation : lien entre pratiques actuelles et modalité agricole

```
itk.pca <- PCA(itk,quali.sup= c(1,2,3,4))  
fviz_pca_biplot (itk.pca, col.ind = itk$systeme, label = "var",  
  col.var = "black", repel = TRUE, legend.title = "Système")
```

Résultat : Figure III.2.1.

9.2.2. 2^{ème} cercle de corrélation : le lien entre paramètres physico-chimiques/textures et distribution des parcelles (idem pour le fichier « teneurs »)

```
granulo.pca <- PCA(granulo, quali.sup=c(1,2,3,4))  
fviz_pca_var(granulo.pca, col.var = "cos2",  
  gradient.cols = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07"), repel = TRUE, shadow= FALSE)
```

Ellipses système (9.2.2.1)

```
fviz_pca_biplot (granulo.pca, col.ind = granulo$Systeme, label = "var",  
  col.var = "black",addEllipses = TRUE, repel = TRUE, legend.title = "Système")
```

Résultat : Figure III.2.2.1 a

Ellipses type de sol (9.2.2.2)

```
fviz_pca_biplot (granulo.pca, col.ind = granulo$Type_sol, label = "var",  
  col.var = "black",addEllipses = TRUE, repel = TRUE, legend.title = "Type de drainage")
```

Résultat: Figure III.2.2.3.

Moyennes par système

```
niveaux<-length(levels(granulo$Systeme))  
granulo.moyenne<-matrix(nrow=niveaux, ncol=(ncol(granulo)))  
for (i in 1:(ncol(granulo)))  
{ granulo.moyenne[,i]<-tapply(granulo[,i], granulo$Systeme, mean)}  
colnames(granulo.moyenne)<-colnames(granulo[, 1:13])  
rownames(granulo.moyenne)<-levels(granulo$Systeme)  
granulo.moyenne
```

Résultat : Table III.2.2.2

Moyennes par type de sol

```
niveaux<-length(levels(granulo$Type_sol))  
granulo.moyenne<-matrix(nrow=niveaux, ncol=(ncol(granulo)))  
for (i in 1:(ncol(granulo)))  
{ granulo.moyenne[,i]<-tapply(granulo[,i], granulo$Type_sol, mean)}
```

```

colnames(granulo.moyenne)<-colnames(granulo[, 1:13])
rownames(granulo.moyenne)<-levels(granulo$Type_sol)
granulo.moyenne

```

Résultat : Table III.2.2.4.

9.2.3. 3^{ème} cercle de corrélation : Lien entre abondance des vers de terre et réalisation des fonctions écologiques

```

vdtse.pca <- PCA(vdtse, quali.sup=c(1,2))
fviz_pca_var(vdtse.pca, col.var = "cos2",
gradient.cols = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07"), repel = TRUE, shadow= FALSE)

```

Résultat : Figure III.2.4.1

Observations des directions des variables d'abondances par rapport aux fonctions écologiques (9.2.3.1) et par rapport aux différents systèmes de pratiques (9.2.3.2)

```

vdtse.pca <- PCA(vdtse, quali.sup=c(1,2))
fviz_pca_biplot(vdtse.pca, col.ind = vdtse$Système, label = "var",
col.var = "black", repel = TRUE, legend.title = "Système")

```

Résultat : Figure III.2.5.1

Moyenne des groupes de vers de terre par modalité et barplot

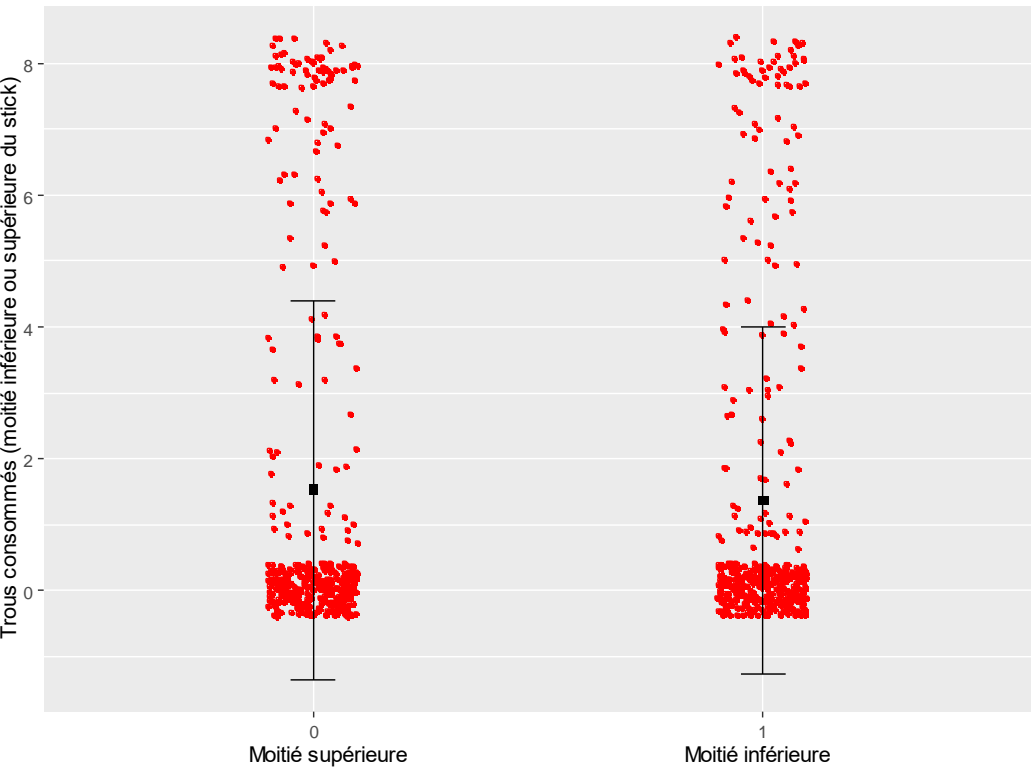
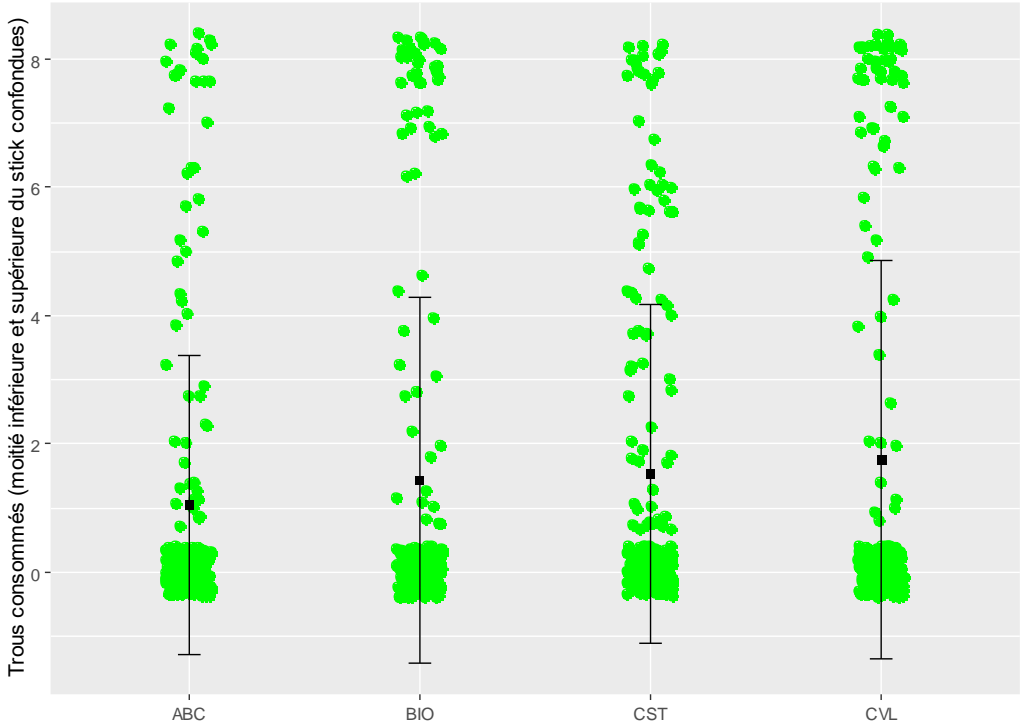
```

niveaux<-length(levels(vdtse$Système))
vdtse.moyenne<-matrix(nrow=niveaux, ncol=(ncol(vdtse)))
for (i in 1:(ncol(vdtse)))
{vdtse.moyenne[,i]<-tapply(vdtse[,i], vdtse$Système, mean)}
colnames(vdtse.moyenne)<-colnames(vdtse[, 1:8])
rownames(vdtse.moyenne)<-levels(vdtse$Système)
vdtse.moyenne
data <- as.matrix(data.frame( ABC= c(48.9683, 23.96, 27.08, 25),
BIO = c(41.66, 33.33, 17.7, 33.33),
CST = c(36.45, 19.79, 28.125, 21.875),
CVL = c(76.04, 27.083, 19.79, 53.125)))
rownames(data) <- c("Endogés", "Anéciques stricts", "Epi-anéciques", "Epigés")
data
barplot(data,1:4, col=terrain.colors(4), xlab="Système", ylab = "Abondance (individus / m²)")

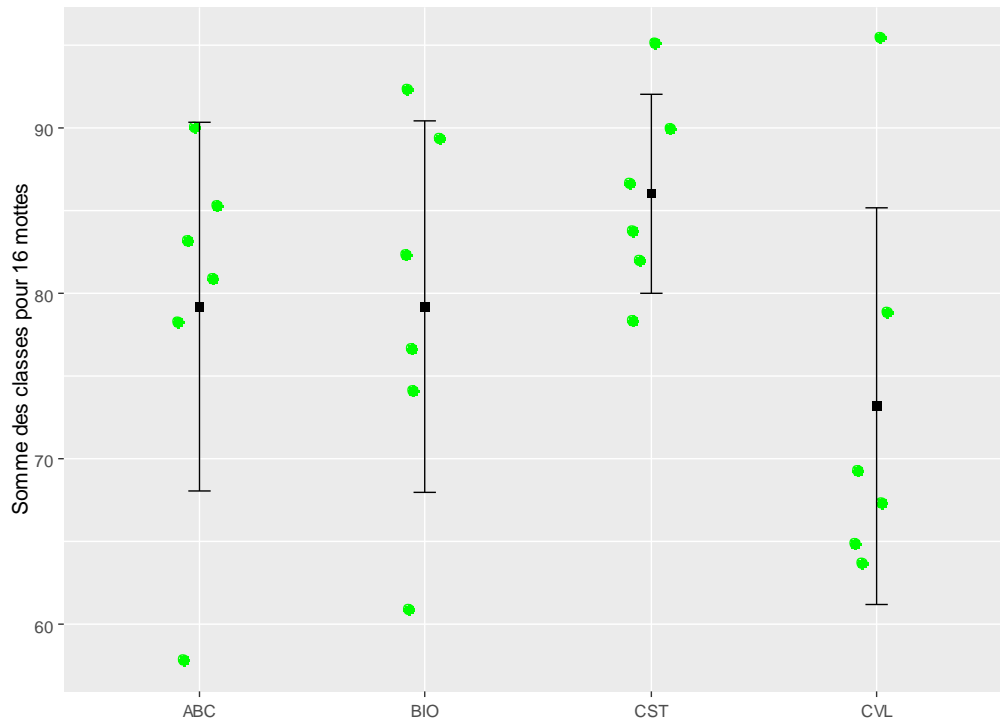
```

Résultat : Figure III.2.5.2

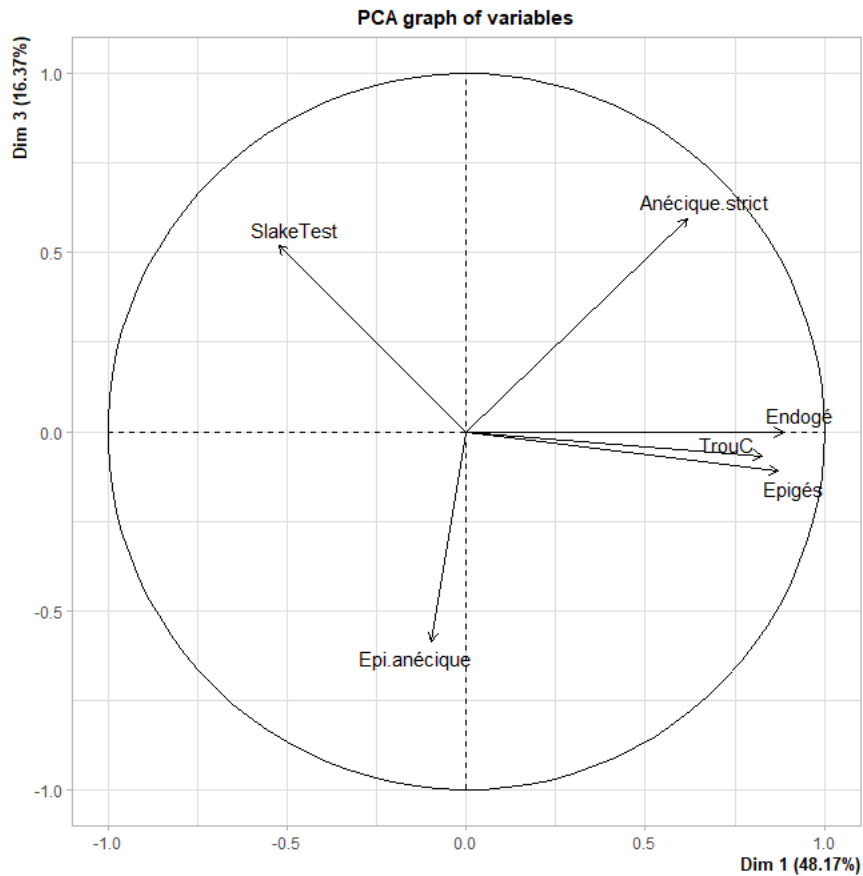
Annexe 11 - Nombre de trous consommés en fonction du système de pratiques (a) et de la position sur la bande (b)



Annexe 12 – Stabilité des agrégats en fonction du système de pratiques



Annexe 13 – Cercle de corrélation du 2ème plan factoriel



Annexe 14 – Photographies des traces de vers de terre

Voici un aperçu de ce qui a été observé durant la phase d'échantillonnage et de comptage : des galeries, des turricules et des vers de terre.

