
Étude multicritère de la qualité et de la fertilité des sols au sein d'agroécosystèmes conduits sous un gradient d'itinéraires techniques

Auteur : Ruykens, Hélène

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin; 26247

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/22304>

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.

**ÉTUDE MULTICRITÈRE DE LA QUALITÉ ET
DE LA FERTILITÉ DES SOLS AU SEIN
D'AGROÉCOSYSTÈMES CONDUITS SOUS UN
GRADIENT D'ITINÉRAIRES TECHNIQUES**

HELENE RUYKENS

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNEE ACADEMIQUE 2024-2025

CO-PROMOTEURS : BENJAMIN DUMONT, CHARLOTTE DE WULF

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 académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**ÉTUDE MULTICRITÈRE DE LA QUALITÉ ET
DE LA FERTILITÉ DES SOLS AU SEIN
D'AGROÉCOSYSTÈMES CONDUITS SOUS UN
GRADIENT D'ITINÉRAIRES TECHNIQUES**

HELENE RUYKENS

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNEE ACADEMIQUE 2024-2025

CO-PROMOTEURS : BENJAMIN DUMONT, CHARLOTTE DE WULF

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais remercier mon promoteur à la faculté, Benjamin Dumont, qui m'a suivi dans la proposition de TFE externe et qui m'a beaucoup apporté tout au long du déroulement du projet.

Ensuite, je tiens à adresser mes remerciements à ma promotrice chez Regenacterre, Charlotte De Wulf, pour sa confiance et son soutien pendant toute la durée du mémoire. Je remercie toute l'équipe de Regenacterre qui m'ont permis de créer les contacts avec les agriculteurs et m'ont partagé leur expertise agronomique.

Je remercie évidemment les agriculteurs qui m'ont permis d'échantillonner leur parcelle et partagé leurs itinéraires techniques avec grand plaisir et amabilité.

Je remercie Caroline De Clerck et Maria Osipenko Afoshina pour m'avoir permis d'utiliser leur laboratoire et d'avoir consacré du temps avec toute leur bienveillance.

Je voudrais également remercier l'unité sol du CRA-W, en particulier Frédéric Vanwindekens et Antoine Mottet qui m'ont permis d'utiliser leur dispositif expérimental et m'ont délivré leurs conseils et expertise sur le sujet.

Je remercie tous mes amis proches qui m'ont soutenu jusqu'au bout, en particulier Elisabeth et Cyrille. J'adresse également mes remerciements à Martin pour le soutien sur le terrain et durant la rédaction de ce mémoire.

Résumé

Le changement climatique, la croissance démographique, la perte de biodiversité, la dégradation des sols et des agroécosystèmes font partie des enjeux que rencontre l'agriculture du XXI^{ème} siècle. Les pratiques agricoles non durables jouent un rôle non négligeable dans ces dégradations. L'agriculture doit se mettre au défi et s'adapter à tous ces changements avec le développement de modes de gestions alternatifs. Pour cela, des acteurs du milieu promeuvent une agriculture régénérative qui se veut respectueuse de l'environnement et de la santé des sols.

Cette étude s'inscrit dans une approche holistique de comparaison d'un gradient d'itinéraires techniques de gestion d'agroécosystèmes dits régénératifs, en transition et conventionnels selon des critères de qualité et de fertilité des sols. Ces critères d'évaluation sont basés sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

Les résultats des différents indicateurs montrent des différences significatives principalement pour les indicateurs physiques du sol, la stabilité structurale des agrégats et l'évaluation visuelle de la structure du sol. L'indicateur chimique des nitrates en surface s'est montré significativement différent selon les systèmes étudiés. Les indicateurs biologiques ne se sont pas statistiquement démarqués. Il semblerait que les systèmes dits régénératifs se distinguent des systèmes conventionnels, principalement par leur travail de sol réduit, le retour fréquent de matière organique et une couverture permanente longue. Quant aux systèmes en transition, ceux-ci bénéficient d'une grande variabilité.

Finalement, les itinéraires considérés comme régénératifs semblent ressortir dans cette étude bien que les conditions climatiques des deux dernières années n'aient pas été favorables. Une étude à long terme pourrait être envisagée en vue d'enrichir la base de données et renforcer les études statistiques. L'ajout de nouveaux indicateurs pour explorer d'autres aspects des propriétés des sols étudiées pourrait être pertinent dans le cadre d'une étude similaire.

Mots clés

Agriculture durable, qualité du sol, fertilité du sol, indicateurs, évaluation de sol, agriculture régénérative.

Abstract

Climate change, population growth, biodiversity loss, soil and agroecosystem degradation are among the challenges facing 21st-century agriculture. Unsustainable agricultural practices play a significant role in these degradations. Agriculture must rise to the challenge and adapt to all these changes by developing alternative management methods. To this end, stakeholders in the field are promoting regenerative agriculture, which aims to be respectful of the environment and soil health.

This study is part of a holistic approach comparing a gradient of technical management itineraries for agroecosystems classified as regenerative, transitional, and conventional, based on soil quality and fertility criteria. These evaluation criteria are based on the soil's physical, chemical, and biological properties.

The results of various indicators show significant differences, mainly in the soil's physical indicators, such as aggregate structural stability and visual soil structure assessment. The chemical indicator for surface nitrates was significantly different depending on the systems studied. Biological indicators did not show statistically significant differences. It appears that so-called regenerative systems differ from conventional systems, mainly through reduced soil tillage, frequent organic matter return, and long-term permanent cover. Transitional systems, however, exhibited considerable variability.

Ultimately, the regenerative itineraries seem to stand out in this study, although the climatic conditions of the past two years were not favorable. A long-term study could be considered to enrich the database and strengthen the statistical studies. Adding new indicators to explore other aspects of the soil properties studied could be relevant for a similar study.

Key words

Sustainable agriculture, soil quality, soil fertility, indicators, soil monitoring, regenerative agriculture.

Abréviations

ACP : analyse des composantes principales (PCA)

AR : agriculture régénérative

BD : bulk density (densité apparente)

CEC : capacité d'échange cationique

DA : densité apparente

FDA : fluorescéine diacétate

LDA : analyse discriminante linéaire

MO : matière organique

OGM : organisme génétiquement modifié

OPVT : observatoire participatif des vers de terre

QST : QuantiSlakeTest

SOC : carbone organique du sol

TCS : technique culturale simplifiée

VESS : évaluation visuelle de la structure du sol

Table des matières

1.	Introduction	1
2.	État de l’art	2
2.1.	L’agriculture régénérative	2
2.1.1.	Définition et intérêts	2
2.1.2.	Certification « Regenerative Agriculture » par Regenacterre asbl.....	4
2.2.	Les sols agricoles	4
2.2.1.	La santé des sols	5
2.2.2.	La qualité des sols	5
2.2.3.	La fertilité des sols	5
2.2.4.	Liens entre les concepts.....	6
2.3.	Les indicateurs d’évaluation de sol	7
2.3.1.	Indicateurs physiques	7
2.3.2.	Indicateurs chimiques.....	8
2.3.3.	Indicateurs biologiques	9
3.	Objectifs	11
4.	Matériels et méthodes.....	12
4.1.	Localisation et conditions pédoclimatiques	12
4.2.	Données d’itinéraires techniques	12
4.3.	Indicateurs d’évaluation de sol.....	13
4.3.1.	Stabilité structurale.....	14
4.3.2.	Densité apparente	14
4.3.3.	Évaluation visuelle de la structure du sol.....	15
4.3.4.	Statut acido-basique	16
4.3.5.	Azote – nitrates.....	16
4.3.6.	Teneur en carbone	16
4.3.7.	Activité microbienne générale.....	16
4.3.8.	Activité de dégradation de la matière organique.....	17
4.3.9.	Vers de terre.....	18
4.4.	Analyses statistiques	19
5.	Résultats	20
5.1.	Analyses univariées.....	20
5.1.1.	Stabilité structurale.....	21
5.1.2.	Densité apparente	22

5.1.3.	Évaluation visuelle de la structure du sol.....	23
5.1.4.	Statut acido-basique	24
5.1.5.	Azote – nitrates.....	25
5.1.6.	Teneur en carbone	26
5.1.7.	Activité microbienne générale.....	27
5.1.8.	Activité de dégradation de la matière organique.....	28
5.1.9.	Vers de Terre.....	29
5.2.	Analyses multivariées des indicateurs mesurés avec répétition.....	30
5.2.1.	Corrélation des variables	30
5.2.2.	Analyse des composantes principales	31
5.2.3.	Analyse discriminante linéaire	33
5.3.	Analyses multivariées des indicateurs consolidés.....	34
5.3.1.	Corrélation des variables	34
5.3.2.	Analyse des composantes principales	35
6.	Discussion	37
7.	Conclusion et perspectives	44
8.	Contribution personnelle et critique de la méthode	45
9.	Références	46
10.	Annexes	53

Table des figures

Figure 1 : les piliers de l'agriculture régénérative, source Regenacterre.....	4
Figure 2 : Schéma de la fertilité du sol : composantes (entourées), interactions entre composantes (processus, flèches vertes), principaux services attendus des sols (flèches blanches) (Peigné, 2018).....	6
Figure 3 : Lien entre la fertilité, qualité et santé des sols (Lehmann et al., 2020).....	6
Figure 4 : Représentation de l'abondance en % des indicateurs d'évaluation des sols dans la littérature (Bünemann et al., 2018).....	7
Figure 5 : Carte de la localisation des parcelles étudiées : régénératives (vert), en transition (jaune), conventionnelles (orange). Générée via Google Maps®.....	12
Figure 6 : Illustration du dispositif du QuantiSlakeTest, CRA-W (Vanwindekens & Hardy, 2023). Ordinateur relié à une balance enregistrant en temps réel la masse d'une motte de terre préalablement sèche immergée dans de l'eau distillée.....	14
Figure 7 : Illustration de la méthodologie de mesure de la densité apparente. (a) volume de sol prélevé à 7.5cm de profondeur ; (b) volume de sol prélevé à 22.5cm de profondeur.....	15
Figure 8 : Clé de décision d'attribution des scores Sq par couches de la motte prélevée (Johannes et al., 2020).....	15
Figure 9 : Illustration simplifiée du dispositif Bait Lamina mis en place.....	17
Figure 10 : Box plots de l'indicateur de stabilité structurale, masse relative W_{end}	21
Figure 11 : Box plots des indicateurs de stabilité structurale, vitesse de pertes de masse des mottes à 60 (a) et 300 secondes. (b).....	21
Figure 12 : Box plots de la densité apparente à 7cm (a) et 22cm (b) en g/cm^3	22
Figure 13 : Régression linéaire de la densité apparente à 7cm en fonction de la densité apparente à 22cm.....	22
Figure 14 : Box plots de l'indicateur de structure du sol Sq.....	23
Figure 15 : Box plots des indicateurs de structure du sol, bioturbation supérieure (a) et inférieure (b).....	23
Figure 16 : Dot plots de l'indicateur de pH (KCl).....	24
Figure 17 : Dot plots des indicateurs d'azote sous forme de nitrates en unité par hectare de nitrates (U/ha de $N-NO_3$) à 30cm (a), 60cm (b), 90cm (c) et totaux (d).....	25
Figure 18 : Dot plot du pourcentage de carbone en %.....	26
Figure 19 : Dot plots de l'indicateur d'activité microbienne générale en μmol de fluorescéine synthétisée par grammes sol sec par heures [$\mu mol/g$ sol sec/h].....	27
Figure 20 : Dot plots de l'indicateur d'activité de dégradation Bait Lamina en % de dégradation par jour [%deg/j].....	28
Figure 21 : Box plots de l'abondance des vers de terre en nombre par m^2	29
Figure 22 : Box plots de l'indice de biodiversité des vers de terre.....	29
Figure 23 : Matrice de corrélation des indicateurs répétés fois.....	30
Figure 24 : Cercle de corrélation des indicateurs répétés fois.....	31
Figure 25 : ACP biplot des indicateurs répétés 4 fois, légendée selon le système de classification.....	32
Figure 26 : Graphique de la projection des points de l'analyse discriminante linéaire.....	33
Figure 27 : Matrice de corrélation de tous les indicateurs consolidés.....	34
Figure 28 : Cercle de corrélation de toutes les indicateurs consolidés.....	35
Figure 29 : ACP biplot de tous les indicateurs consolidés, légendée selon le système de classification.....	36

Table des tableaux

Tableau 1 : Principes agronomiques de l'agriculture régénérative et pratiques (Giller et al., 2021; Khangura et al., 2023; LaCanne & Lundgren, 2018; Schreefel et al., 2022).....	2
Tableau 2 : Résumé des itinéraires techniques des parcelles.	13
Tableau 3 : liste des indicateurs étudiés associés à leur nombre d'observations.	13
Tableau 4 : Scores attribués à la fin de l'expérience des Bait Lamina.	18
Tableau 5 : Codes à attribuer selon l'abondance et de la diversité en vers de terre.....	18
Tableau 6 : Classification par indice de biodiversité des vers de terre, sources : Univ. Rennes et Ecobio, 2015.....	19
Tableau 7 : Synthèse de la structure des données et des analyses statistiques.	19
Tableau 8 : niveaux de signification des indicateurs en fonction des systèmes. Alpha = 0.05. Wend, masse relative. Sl_max, pente de la perte de masse à 60 et 300 secondes. Sq, structure. DA, densité apparente à 7 et 22cm. Bioturbation supérieure et inférieure. pH, statut acido-basique. Azote, nitrates à 0-30, 30-60, 60-90 cm et totaux. Carbone %, teneur en carbone. FDA, fluorescéine diacétate. Bait, lamina, taux de dégradation de la matière organique. Vers de terre, abondance des vers. Indice vers, indice de biodiversité des vers de terre.....	20
Tableau 9 : Matrice de corrélation des variables et des dimensions 1 et 2. En vert : les variables corrélées positivement à $> 0.5 $; en bleu : les variables corrélées négativement à $>- 0.5 $	31
Tableau 10 : Matrice des coefficients des discriminants.....	33
Tableau 11 : Matrice de corrélation des variables et des dimensions 1 et 2. En vert : les variables corrélées positivement à $> 0.5 $; en bleu : les variables corrélées négativement à $>- 0.5 $	35

1. Introduction

L'agriculture du XXI^{ème} est confrontée à de nombreux défis environnementaux. Le changement climatique, la dégradation des sols, la perte en biodiversité sont au cœur de ces défis. Ces problématiques environnementales, largement attribuées aux pratiques agricoles non durables, ont attiré une attention croissante ces dernières années en raison de leur impact profond sur l'équilibre écologique global (Stellacci et al., 2021). Parallèlement, des défis socio-économiques font l'objet d'attention particulière. La constante augmentation de la population mondiale, estimée à 9,7 milliards de personnes, impose une augmentation de la production de denrées alimentaires (Nations Unies, s. d.).

Face à ces enjeux, l'Union européenne a fixé des objectifs ambitieux dans le cadre du Green Deal, visant la neutralité d'émission de gaz à effet de serre et la durabilité en agriculture d'ici l'horizon 2050 (Consilium, 2024). Ce pacte vert inclus une transformation des agroécosystèmes vers des pratiques agricoles durables. Initialement conçus pour maximiser les rendements, les systèmes agricoles s'orientent désormais vers des objectifs de durabilité environnementale afin d'assurer la productivité à long termes et la stabilité écologique des sols (Yang et al., 2020).

La dégradation des sols est au cœur de préoccupation et est la conséquence de nombreuses pressions dont l'acidification, l'érosion, la perte en biodiversité et le manque de matière organique (SPW, 2024). En effet, le sol est le support de nombreuses ressources indispensables à l'être humain. Cependant, les pratiques agricoles dites non durables sont en partie responsables de cette dégradation et, en définitive, induisent des pertes de rendements et des conséquences négatives sur l'environnement (Stellacci et al., 2021).

De plus, des modes d'agriculture alternative bénéficient d'un intérêt croissant, tels que l'agriculture biologique, la permaculture, l'agriculture de conservation, l'agriculture régénérative, l'agroécologie. Ces types d'agriculture sont promus par les acteurs du milieu et s'inscrivent dans la transition écologique des milieux agricoles. Cependant, la mise en place des pratiques durables demeure lente en raison du manque de ressources matérielles et de connaissances mais également de soutien financier (Siebrecht, 2020).

Face à toutes ces contraintes, l'agriculture régénérative veut s'inscrire dans la transition vers une agriculture durable et respectueuse des sols. Elle vise la restauration de la santé des sols et des agroécosystèmes en général. En Belgique, l'agriculture régénérative est peu répandue. Des agriculteurs et acteurs du milieu agricole mettent en avant des pratiques qu'ils considèrent comme adaptées au concept d'agriculture régénérative. Cependant, il existe autant de définitions et principes que d'auteurs sur le sujet. Dès lors, celle-ci doit faire l'objet de plus de recherches scientifiques et agronomiques en développant des indicateurs et mesures afin de quantifier les impacts de cette approche de l'agriculture (Giller et al., 2021).

2. État de l’art

2.1. L’agriculture régénérative

2.1.1. Définition et intérêts

L’agriculture régénérative est un concept de l’agriculture difficile à définir. La littérature elle-même ne délivre pas de définition fixe et précise, car chacun définit l’AR différemment et à sa convenance. En France, il est d’ailleurs d’usage d’utiliser le mot “régénératrice”. Les définitions proposées sont établies selon des points de vue différents, soit du point de vue des objectifs ou des pratiques, parfois les deux combinés (Newton et al., 2020). Il n’existe pas non plus de législation qui permet de fixer des règles précises (Newton et al., 2020), comme il en existe pour l’agriculture biologique (Schreefel et al., 2020), ce qui induit à une obligation d’une définition fixe.

Le terme agriculture régénérative est apparu aux Etats-Unis à la Rodale Institute en 1983. Malheureusement, il n’a pas connu le succès escompté et réapparaît au milieu des années 2010 avec un essor marqué (Giller et al., 2021). Ce succès est porté par les industriels de l’agroalimentaire comme Danone, Nestlé, Bonduelle mais aussi par des ONG environnementales comme la WWF et œuvres caritatives, comme la Fondation IKEA (Duru et al., 2022; Giller et al., 2021).

Les objectifs apparaissant le plus souvent dans la littérature semblent faire partie d’un consensus (Giller et al., 2021; Schreefel et al., 2020). Ceux-ci sont :

- Séquestrer du carbone dans les sols
- Restaurer la santé du sol, améliorer la physique des sols
- Augmenter la biodiversité générale (du sol et de l’environnement).

Afin d’atteindre ces objectifs, l’agriculture régénérative s’articule autour de 5 principes associés à leurs pratiques synthétisés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Principes agronomiques de l’agriculture régénérative et pratiques (Giller et al., 2021; Khangura et al., 2023; LaCanne & Lundgren, 2018; Schreefel et al., 2022)

Principes	Pratiques
Minimiser la perturbation du sol	Réduction du travail du sol, techniques culturales simplifiées, non-labour
Maximiser la couverture spatio-temporelle du sol	Intercultures, couverts, mulch
Diversifier les cultures et allonger la rotation	Maximum d’espèces dans la rotation, couverts multi-espèces, cultures associées
Optimiser la gestion des ressources	Épandage d’engrais organiques, effluents d’élevage, éviter les intrants de synthèses, lutte intégrée des maladies et ravageurs, destruction mécanique des résidus et adventices, incorporation des résidus
Réintégrer l’élevage	Pâturages holistiques, pâturages rotatifs, utilisation des effluents

Finalement, ces objectifs s’inscrivent dans une approche plus globale de l’agriculture et dans l’intérêt du bien commun, voulant atténuer les effets du changement climatique en réduisant les impacts sur l’environnement (Schreefel et al., 2020), améliorer la qualité de l’eau et de l’air

(Duru et al., 2022) et avoir un effet positif sur les fonctions du sol et les services écosystémiques (Khangura et al., 2023). Cependant, le thème recevant le plus d'attention dans la littérature est l'amélioration et la restauration de la santé des sols, se synthétisant par 'régénérer' les sols (Schreefel et al., 2020). Les dimensions sociales et économiques sont peu mentionnées et sont souvent divergentes. Néanmoins, Schreefel et al. mentionnent des objectifs d'amélioration de santé humaine et de la prospérité économique, avec un manque de précision.

Il est d'autant plus difficile de définir l'AR, car sa mise en place dépend du contexte pédoclimatique, social et économique local. Certaines pratiques présentent des effets à la fois positifs et négatifs, ce qui nécessite une certaine nuance. Par exemple, l'épandage d'amendements organiques peut stimuler l'activité des décomposeurs et favoriser la décomposition de la matière organique, mais il peut également entraîner une augmentation des émissions de CO₂ et de N₂O (Li et al., 2023).

Un des nombreux points de divergences sur l'AR est l'utilisation des organismes génétiquement modifiés. En effet, si certains décrivent l'AR comme une agriculture exempte de pesticides et d'OGM (Giller et al., 2021), d'autres voient leur emploi comme une solution innovante pour répondre aux défis de l'agriculture actuelle (Kapoor et al., 2024). Les opinions négatives sur la biotechnologie végétale campent sur leur position malgré le potentiel des OGM à résister aux maladies ou réduire leur besoin en traitements chimiques (Giller et al., 2021). Actuellement, en Belgique, la culture d'OGM est soumise à une réglementation stricte et ceux-ci ne sont pas cultivés à des fins commerciales (SPF Santé publique, 2016). Leur culture reste taboue et non développée.

Certains instituts, pionniers dans l'agriculture régénérative, se sont tournés vers une agriculture régénérative biologique. Il consiste à mettre en place des pratiques régénératives et biologiques, exemptes d'intrants de synthèse (Rodale, s. d.). Cependant, sa mise en place peut être compromise, car des pratiques culturales controversées et considérées comme non régénératives (comme le labour) peuvent se révéler indispensables en agriculture biologique, notamment pour la gestion de la pression des adventices (Peigné et al., 2007), pour assurer des rendements acceptables.

Concernant le contexte social, l'adoption des pratiques régénératives est motivée par des valeurs qui veulent une agriculture plus durable ou une volonté de contrer le système agroalimentaire profondément ancré (Frankel-Goldwater et al., 2024). Cependant, l'AR peut être difficile à instaurer, car elle nécessite souvent des investissements importants ainsi que du matériel moderne et coûteux. Les agriculteurs disposant de ressources financières suffisantes sont généralement mieux placés pour adopter des pratiques culturales simplifiées et investir dans ces nouvelles approches (Luján Soto et al., 2021).

Étant donné l'absence de définition précise et l'existence d'un consensus général autour des objectifs et pratiques, une définition spécifique de l'agriculture régénérative peut être proposée dans le cadre de ce travail. L'agriculture régénérative se distingue par une approche holistique, intégrant des pratiques agricoles durables et respectueuses de l'environnement. Elle vise à régénérer les sols grâce à des pratiques limitant leur perturbation, tout en cherchant à renforcer la résilience des écosystèmes agricoles face aux changements climatiques.

2.1.2. Certification « Regenerative Agriculture » par Regenacterre asbl

Regenacterre est une association sans but lucratif créée en 2015 en Wallonie. Elle délivre du conseil agronomique indépendant et promeut l'agriculture régénérative en Belgique et plus récemment dans le nord de la France. Elle développe une marque de certification pour des coopératives développant des filières de production destinées à l'alimentation humaine, offrant une plus-value sur ceux-ci.

Un cahier des charges confrontant la réalité du terrain des agriculteurs et la littérature représente le moteur de la certification. Il comporte des critères d'inclusion selon les pratiques mises en place par les agriculteurs comme le travail du sol, la couverture du sol, la rotation, le type de fertilisation. Des critères d'exclusion sont présents comme le labour, le bilan carbone ou encore les résidus de pesticides.

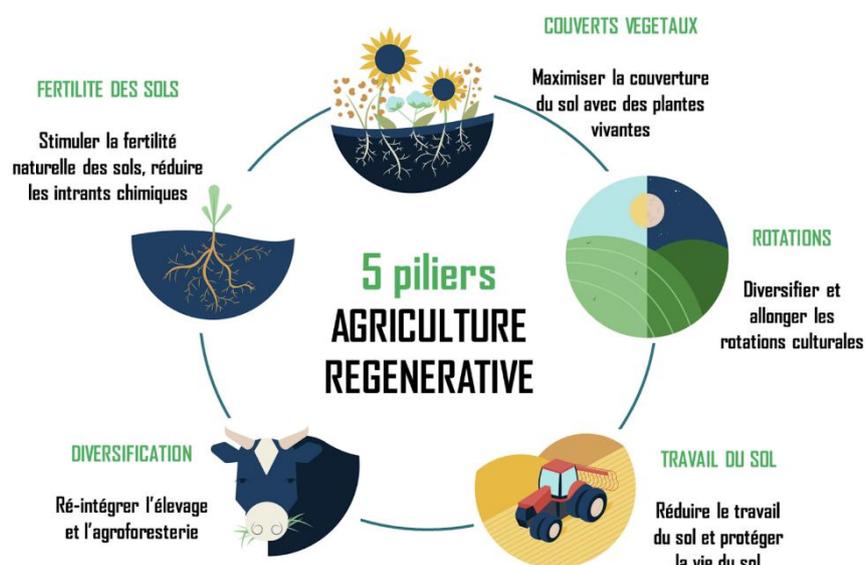


Figure 1 : les piliers de l'agriculture régénérative, source Regenacterre

Le cahier des charges comprend des critères d'inclusion sur les pratiques agricoles. Les agriculteurs sont pré-classés en 3 niveaux selon le nombre de critères pratiques respectés : conventionnel, transition et régénératif. Ensuite, interviennent 2 critères d'exclusion : le bilan carbone et le labour. Un agriculteur pratiquant le labour ne peut passer au niveau régénératif. Un bilan carbone supérieur à 0,5g.eqCO₂ ne permet pas non plus d'atteindre le niveau régénératif.

2.2. Les sols agricoles

L'occupation globale des terres habitables par l'agriculture s'élève à 44%, dont un tiers est exploité par des terres cultivées, les deux tiers restants par des prairies (Ritchie & Roser, 2024). Les terres agricoles en Belgique occupent 44% du territoire, soit 1 350 623 hectares (Statbel, 2024).

Le sol est principalement constitué de trois phases : solide formée de particules de diverses tailles entourées d'une phase solide et liquide, celles-ci variant dans le temps et l'espace à travers des processus physiques, chimiques et biologiques (Nielsen & Winding, 2002).

Les sols jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes en participant aux cycles de l'eau et des éléments, la séquestration du carbone, ainsi qu'à la régulation du climat (Stellacci et al., 2021). Ils servent de support d'habitat et se révèlent indispensables aux activités anthropiques telles que la production de denrées alimentaires, d'énergie et de fibres, assurant la prospérité des êtres humains (SPW, 2024).

Plusieurs concepts autour des sols existent pour les définir et les caractériser. La santé, la qualité, la fertilité mais aussi leurs fonctions et l'état de leurs services écosystémiques peuvent être évalués afin de constater leur état général de bon fonctionnement ou de dégradation.

2.2.1. La santé des sols

Un des concepts les plus couramment cités est la santé des sols. La santé des sols se réfère à la capacité à fournir continuellement des fonctions et des services écosystémiques, exerçant une influence directe ou indirecte sur les êtres humains ainsi que sur la biodiversité végétale et animale (Meersmans et al., 2024). Elle doit soutenir la productivité des plantes et des animaux, améliorer ou préserver la qualité de l'eau et de l'air, et favoriser la santé des organismes vivants (Doran & Zeiss, 2000). Cette définition souligne le rôle fondamental du sol dans le maintien des écosystèmes et des cycles biogéochimiques qui y prennent place.

Dans les systèmes exploités et agricoles, il est possible de maintenir, de promouvoir ou de restaurer cette santé en adoptant des pratiques de gestion durable des sols. Cela inclut des techniques visant à réduire l'érosion, préserver la matière organique, et favoriser la biodiversité souterraine (FAO, 2020).

2.2.2. La qualité des sols

Le concept de qualité des sols s'appuie sur une compréhension intégrée des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et de leur dynamique sous l'influence des pratiques agricoles (Bünemann et al., 2018). Cette dynamique est fortement impactée par les pratiques de gestion, notamment le travail du sol, qui modifie les interactions entre les diverses composantes du sol, influençant ainsi sa fertilité, sa capacité à stocker l'eau et son rôle dans le cycle des éléments nutritifs (Bünemann et al., 2018).

Lehmann et al. expliquent que la qualité des sols est un terme historiquement associé à la « santé des sols », mais avec des distinctions importantes. La qualité des sols désigne la capacité d'un sol à répondre aux besoins agricoles et environnementaux immédiats, englobant des critères tels que l'impact du sol sur la qualité de l'eau, la santé des plantes, et celle des animaux présents dans l'écosystème. En revanche, le terme de « santé des sols » inclut une dimension plus large, visant des objectifs de durabilité qui s'étendent à la santé planétaire. La qualité des sols se concentre ainsi principalement sur les services écosystémiques et la satisfaction des besoins humains, tandis que la santé des sols intègre des enjeux globaux et intergénérationnels de durabilité environnementale (Bünemann et al., 2018; Lehmann et al., 2020).

2.2.3. La fertilité des sols

Selon la FAO (2022), la fertilité est la capacité d'un sol à soutenir la croissance des plantes en fournissant les nutriments essentiels et en maintenant des propriétés chimiques, physiques et biologiques propices à un habitat sain pour les végétaux. C'est la capacité d'un sol à produire la culture désirée comme un aspect qui reflète l'adaptabilité des sols aux exigences spécifiques des plantes cultivées et aux objectifs agricoles (Stockdale et al., 2002).

La fertilité est directement influencée par les pratiques agricoles et les caractéristiques intrinsèques du sol comme sa composition chimique, sa structure physique et sa diversité biologique qui interagissent pour favoriser un environnement propice à la croissance des plantes. La fertilité du sol peut être divisée en 3 piliers, constitués des trois propriétés du sol qui doivent être prises en compte dans l'évaluation de l'état de fertilité d'un sol (Genot et al., 2012). La fertilité physique concerne la structure du sol, son aération, sa capacité à retenir l'eau et à permettre un bon enracinement (Ball et al., 2007). La fertilité chimique constitue la disponibilité des nutriments nécessaires à la croissance des plantes (Genot et al., 2012). La fertilité biologique est stimulée par l'activité biologique du sol tels que la présence de microorganismes jouant un rôle dans la décomposition et la biodisponibilité des nutriments (Genot et al., 2012). Un déséquilibre dans un de ces piliers peut compromettre la fertilité globale du sol.

La fertilité est gérée à l'échelle de la ferme par l'agriculteur dont l'objectif est de produire des récoltes de manière rentable, qu'il s'agisse de nourriture, de carburant ou des fibres. Les pratiques culturales, ayant une influence directe sur la fertilité, doivent assurer des rendements tout en préservant les ressources (Lehmann et al., 2020).

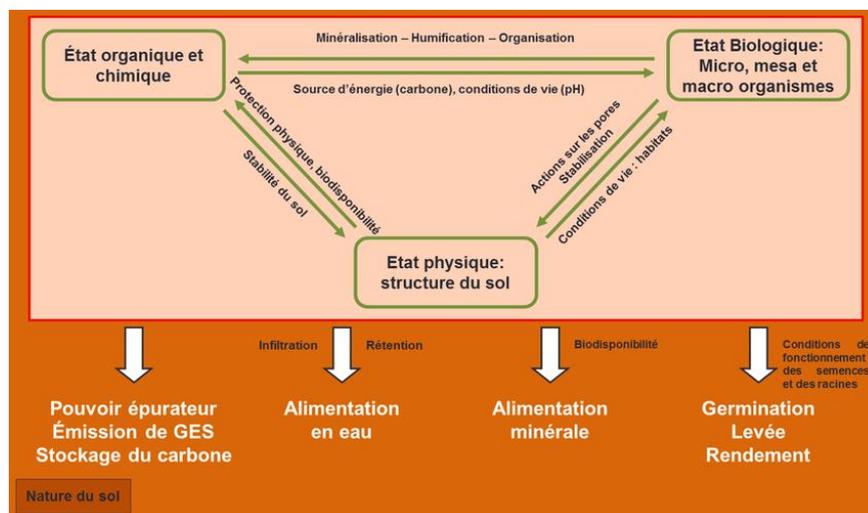


Figure 2 : Schéma de la fertilité du sol : composantes (entourées), interactions entre composantes (processus, flèches vertes), principaux services attendus des sols (flèches blanches) (Peigné, 2018).

2.2.4. Liens entre les concepts

Si certains considèrent ces concepts comme différents, d'autres les associent étroitement. Bünemann et al. considèrent que le concept de qualité et santé du sol sont équivalents, le premier étant employé le plus souvent dans les revues scientifiques et la recherche. Lehmann et al. illustrent ces concepts comme imbriqués, la santé des sols englobant la qualité et la fertilité ainsi que de nombreux services écosystémiques et fonctions.

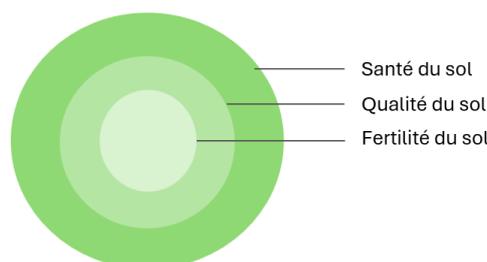


Figure 3 : Lien entre la fertilité, qualité et santé des sols (Lehmann et al., 2020).

2.3. Les indicateurs d'évaluation de sol

Il n'existe pas de mesure unique qui permet de déterminer si le sol est en bonne santé ou non (Friedrichsen et al., 2021). Cependant, il est possible de mesurer une multitude d'indicateurs permettant de quantifier et d'observer les fonctions du sol et les services écosystémiques (Bünemann et al., 2018), contribuant à sa santé, qualité et fertilité. L'évaluation des sols doit refléter les propriétés, les processus et leurs interactions biologiques, chimiques et physiques (Karlen et al., 2003).

La figure 3 présente la fréquence des indicateurs dans la littérature en ce qui concerne l'évaluation des sols. Les indicateurs employés sont détaillés dans les sections suivantes.

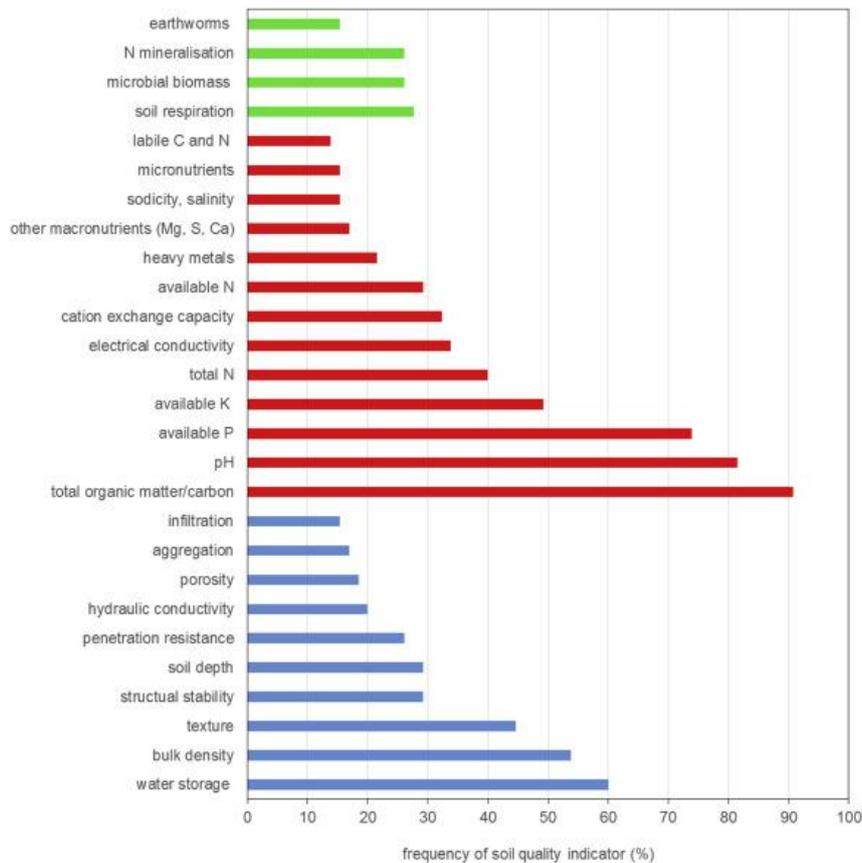


Figure 4 : Représentation de l'abondance en % des indicateurs d'évaluation des sols dans la littérature (Bünemann et al., 2018).

2.3.1. Indicateurs physiques

Bünemann et al. montrent dans leur revue que les indicateurs physiques les plus répandus dans la littérature sont ceux en relation avec la dynamique de l'eau tels que la capacité d'infiltration et la capacité de stockage. Viennent ensuite les indicateurs relatifs à la structure du sol. La structure du sol résulte de l'agrégation et de l'organisation des particules minérales et organiques (Bronick & Lal, 2005). Elle est caractérisée par la forme et la taille de ces agrégats, la porosité et la résistance des éléments liés (Ball et al., 2017). Elle joue un rôle déterminant dans divers processus, tels que la circulation et la rétention de l'eau et de l'air, la prévention de l'érosion, le recyclage des nutriments, la pénétration des racines et l'optimisation des rendements agricoles (Bronick & Lal, 2005). Elle n'est pas seulement liée aux pratiques culturales mais également au contenu en eau et à l'activité biologique (Rabot et al., 2018). De

plus, la structure de sol consiste en un indicateur de changement lent, permettant de mettre en évidence les caractéristiques intrinsèques du sol (Muñoz-Rojas, 2018).

Il est possible d'évaluer la structure du sol grâce à des méthodes visuelles comme le profil cultural ou l'évaluation visuelle d'une bêchée (Ball et al., 2017). Cette évaluation est fortement liée à son degré de compaction, la taille et la forme des agrégats. La manière dont les agrégats se fracturent, en poudre ou en fragments anguleux, est aussi évaluée afin de qualifier le degré de compaction de faible à forte (Rabot et al., 2018). La forme des agrégats est décrite selon plusieurs critères comme anguleuse, arrondie, granulaire. Cependant, la description de profil de sol exige une expérience et connaissances non négligeables (Rabot et al., 2018). Pour cela, des approches simplifiées pour évaluer visuellement la structure du sol ont été élaborées (VESS).

Un autre indicateur lié à la structure du sol décrit dans Rabot et al. est la densité apparente de celui-ci. Il est largement répandu du fait de sa mise en place peu coûteuse et simple. Depuis cette mesure, la porosité du sol peut être également évaluée (Rabot et al. 2018). La densité apparente permet de déterminer l'état de compaction du sol et conclure sur la capacité d'un système racinaire à se développer dans les couches du sol afin d'exploiter tous les éléments nécessaires à sa croissance (eau, oxygène, éléments nutritifs) (Rucknagel et al., 2007). Cependant, cette mesure est dépendante de la texture et du taux de matière organique. Plus la teneur en matière organique augmente, plus la densité apparente diminue (Xu et al., 2022).

Il est possible d'évaluer la stabilité structurale du sol. Cette stabilité est associée à la capacité du sol à maintenir sa structure sous l'action de l'eau et d'autres stress mécaniques (Vanwindekens & Hardy, 2023). Les processus de désagrégation peuvent être de nature différente comme l'impact des gouttes de pluie ou encore lors de cycles d'humidification et d'assèchement (Le Bissonnais, 1996). La couverture du sol influence la stabilité des agrégats en protégeant sa surface des gouttes de pluie. Finalement, la stabilité des agrégats du sol permet de conclure sur sa sensibilité à l'érosion (Bottinelli et al., 2017).

Finalement, évaluer l'état physique du sol permet d'obtenir une indication sur ses capacités à fonctionner correctement. En effet, la stabilité des agrégats, leur forme et leur disposition permettent de réguler la capacité de stockage de la matière organique, la protégeant des attaques excessives par l'activité microbienne (Rabot et al., 2018). De plus, cette stabilité est d'autant plus importante dans la résistance du sol face à l'érosion hydrique. La vulnérabilité du sol à la formation de croûtes de battances est accrue avec une stabilité structurale faible, engendrant une perturbation à la circulation de l'oxygène et de l'infiltration de l'eau (Rabot et al., 2018).

2.3.2. Indicateurs chimiques

Selon Bünemann et al., les indicateurs chimiques les plus répandus dans l'évaluation des sols sont le carbone organiques, le pH, les macronutriments disponibles pour les plantes (P,K), l'azote total, la CEC. Ils permettent de délivrer des informations sur la capacité du sol à rendre disponibles les éléments utiles à la croissance et fonctionnement de la plante, les rendant indispensables dans les diagnostics agronomiques (Genot et al., 2012). Les indicateurs chimiques peuvent être des mesures dynamiques qui répondent à court terme aux changements des écosystèmes (Muñoz-Rojas, 2018).

Le carbone organique du sol contribue aux fonctions du sol (Genot et al., 2012). Ce statut organique est généralement évalué par la mesure du carbone organique total et l'azote total (Genot et al., 2012). Il est possible de mettre en relation ces deux éléments par un rapport C/N

qui indique des informations sur la minéralisation dans le sol. La matière organique représente une grande part des indicateurs mesurés qui sont présentés dans la littérature afin d'évaluer la qualité et santé d'un sol (Bünemann et al., 2018). Elle prend une part intégrante dans la séquestration du carbone, la dynamique de l'eau et la qualité de l'air, donc dans l'environnement. De plus, la matière organique a une influence directe sur la stabilité des agrégats qui augmente avec le contenu en carbone du sol. En effet, la matière organique du sol forme des liaisons avec les particules minérales du sol, créant des complexes organo-minéraux stables (Feng et al., 2014). Il en découle des conséquences directes sur les propriétés biogéochimiques du sol, augmentant la résilience du sol face aux stress biotiques et abiotiques.

Le statut acido-basique du sol peut être mesuré par plusieurs paramètres dont le pH est le plus répandu. Le pH est une mesure de l'activité des protons dans une solution de sol et d'eau ou de sel neutre tel que le chlorure de potassium (KCl). Il représente un indicateur de fertilité du sol chimique. Il informe sur la biodisponibilité des éléments (Genot et al., 2012). En effet, certains éléments sont mobilisables de manière optimale dans le sol dans une certaine gamme de pH comprise généralement entre 6,0 et 7,0.

2.3.3. Indicateurs biologiques

Selon Bünemann et al., les indicateurs liés aux propriétés biologiques du sol sont le taux de respiration du sol et la biomasse microbienne. Viennent ensuite la minéralisation de l'azote ou encore la densité en vers de terre. Il existe bien d'autres indicateurs biologiques tels que ceux relatifs aux nématodes ou à la biodiversité du sol qui requiert une expérience et connaissances approfondies. De plus, les microorganismes répondent rapidement aux changements de l'environnement et consiste en des indicateurs de changement à court terme, représentant ainsi un signal de dégradation ou d'amélioration de l'écosystème (Nielsen & Winding, 2002). L'activité biologique du sol se déroule principalement dans l'horizon de surface du sol, soit à maximum 30cm de profondeur (Nielsen & Winding, 2002).

Évaluer les propriétés biologiques du sol permet de connecter les dynamiques des propriétés biotiques et abiotiques du sol. Les microorganismes jouent un rôle important dans les cycles biochimiques et biophysiques du sol et contribuent à la croissance des plantes en surface (Nielsen & Winding, 2002). En effet, l'activité microbienne permet de décomposer la matière organique et stabilise également les agrégats du sol grâce aux sécrétions de polysaccharides et substances utiles à la structure du sol (Genot et al., 2012; Nielsen & Winding, 2002). Les résidus organiques sont décomposés par les microorganismes et sont minéralisés en CO₂. Muñoz-Rojas affirment que les microorganismes vivants du sol assurent 90% des fonctions des écosystèmes du sol malgré leur faible représentation en termes de volume dans les sols, soit 0,1 à 0,3%.

Il existe plusieurs méthodes afin d'évaluer l'activité biologique des sols. Les méthodes les plus répandues sont celles relatives à la respiration du sol, ou la minéralisation du carbone en CO₂ par l'activité de respiration des microorganismes, et des méthodes de mesure de biodiversité (Bünemann et al., 2018). Certaines méthodes permettent de mesurer l'activité des microorganismes via leur sécrétion d'enzymes impliquées dans différents processus dans le sol tels que la minéralisation des éléments nutritifs rendus disponibles pour les plantes (Paz-Ferreiro & Fu, 2016).

Les microorganismes et la mésofaune du sol comme les collemboles et les acariens (Hamel et al., 2007; Helling et al., 1998), sont des organismes qui jouent un rôle important dans la

décomposition de la matière organique et la litière (Helling et al., 1998; Keuskamp et al., 2013). Cette décomposition contribue à la fois aux émissions de carbone mais également à la production primaire (Keuskamp et al., 2013). Cette matière organique est décomposée et contribue à la fertilité du sol par l'enrichissement en éléments nutritifs biodisponibles pour la croissance des plantes (SPW, 2024). Il est possible d'évaluer le taux de décomposition, ainsi que d'évaluer la dynamique du carbone dans le sol et les flux depuis le sol. Cette évaluation permet de déterminer le bon fonctionnement du sol et l'état général du fonctionnement du biote du sol.

Les vers de terre représentent un indicateur de macrofaune et de diversité. Ils ont un impact considérable sur la structure du sol en ingérant une quantité de matière organique importée. Le genre *Lombricidé* domine en Europe et est réparti dans 4 grands groupes fonctionnels contribuant chacun à différents processus et services écosystémiques (Blouin et al., 2013; EcoBioSoil, s. d.). Par exemple, les espèces appartenant au groupe des anéciques vivent dans des galeries verticales qui permettent de connecter la surface du sol aux profondeurs et, à terme, permet d'accroître la dynamique d'infiltration de l'eau (Blouin et al., 2013). Les espèces épigées vivent dans la litière du sol et permettent de changer la rugosité et la répartition des macropores. Les espèces endogées, quant à elles, creusent des galeries horizontales (Blouin et al., 2013). Les vers de terre permettent l'accélération de la décomposition de la matière organique et son enfouissement dans le sol depuis la surface et contribuent à la minéralisation des éléments chimiques utiles pour la culture en surface (Blouin et al., 2013). En plus de contribuer au cycle biochimique, ils participent au cycle biophysique du sol en modifiant la structure du sol et en stabilisant les macroagrégats. Finalement, la revue de Blouin et al. met en avant les effets positifs sur la production primaire et met en avant une tendance à augmenter les rendements de cette production. Quantifier les vers de terre à travers des indicateurs clés permet de conclure sur la qualité du sol et l'impact sur l'écosystème (Pérès et al., 2011).

3. Objectifs

Cette étude s'inscrit dans le contexte d'une approche holistique d'évaluation de la fertilité, la qualité et de la santé des sols, et de leur capacité à soutenir la production agricole dans le cadre d'un projet de longue durée.

L'objectif principal de cette étude est de comparer un gradient d'itinéraires techniques de gestion d'agroécosystèmes incluant des systèmes dits conventionnels, en transition et régénératifs. Des indicateurs centrés sur la fertilité et la qualité des sols seront proposés afin d'évaluer l'impact des itinéraires sur l'état du sol. Ces indicateurs font partie des 3 propriétés du sol : physique, chimique et biologique. Les méthodes de mesures employées se veulent pratiques, fiables et reproductibles.

4. Matériels et méthodes

4.1. Localisation et conditions pédoclimatiques

Dans le cadre de cette étude, 11 parcelles ont fait l'objet d'analyses en région limoneuse dans les provinces du Brabant Wallon, de Hainaut, de Namur et du Brabant flamand. Ces parcelles font partie du réseau de Regenacterre et sont sélectionnées dans les différents niveaux du cahier des charges de la certification « Regenerative Agriculture ».

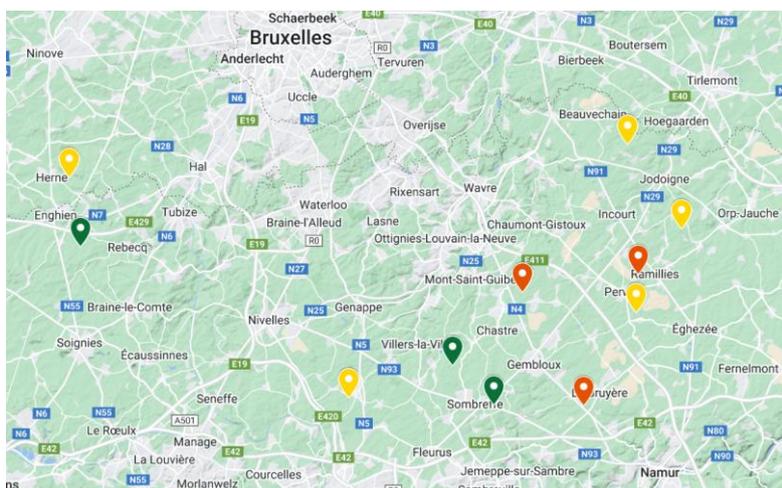


Figure 5 : Carte de la localisation des parcelles étudiées : régénératives (vert), en transition (jaune), conventionnelles (orange). Générée via Google Maps®.

Les principaux types de sols ainsi que les types de sols selon les parcelles se trouvent à l'Annexe 1. Selon la carte des principaux types de sols, les parcelles sont limoneuses à drainage naturel favorable à moyen.

4.2. Données d'itinéraires techniques

Les agriculteurs ont été sélectionnés en fonction de leurs pratiques culturales issues du cahier des charges de la certification. Parmi ceux-ci, 3 parcelles sont considérées comme étant en agriculture régénérative, 5 en transition et 3 en conventionnel. La classification est faite à partir des données disponibles des itinéraires techniques de agriculteurs et selon les critères du cahier des charges de la certification. Cette classification autorise le labour dans le niveau de transition. De ce fait, le niveau transition comporte des niveaux de travail du sol différents.

Toutes les données d'itinéraires techniques ne sont pas prises en compte, car certaines ne sont pas jugées pertinentes dans le cadre de cette étude.

Les parcelles sont classées selon les pratiques des agriculteurs à l'aide d'un code d'identification dans le tableau 2.

Tableau 2 : Résumé des itinéraires techniques des parcelles.

Identification parcelle	Localisation	Type	Travail du sol	Fertilisation	Couverts
R1	50°31'26.5"N 4°38'08.9"E	Régénératif	TCS léger ¹	Mixte ²	Oui
R2	50°39'48.3"N 4°04'00.5"E	Régénératif	TCS léger	Mixte	Oui
R3	50°33'36.5"N 4°34'39.9"E	Régénératif	TCS léger	Mixte	Oui
T1	50°43'20.6"N 4°03'03.7"E	En transition	TCS léger	Minérale	Oui
T2	50°45'12.4"N 4°49'05.0"E	En transition	TCS léger	Minérale	Oui
T3	50°31'50.5"N 4°26'05.6"E	En transition	Labour	Minérale	Oui
T4	50°40'43.8"N 4°53'37.7"E	En transition	Labour	Minérale	Oui
T5	50°36'23.6"N 4°49'52.4"E	En transition	Labour	Minérale	Oui
C1	50°38'22.1"N 4°50'00.4"E	Conventionnel	Labour	Minérale	Non
C2	50°37'27.6"N 4°40'29.8"E	Conventionnel	Labour	Minérale	Non
C3	50°31'30.7"N 4°45'22.6"E	Conventionnel	Labour	Minérale	Non

À l'Annexe 2, les détails des données complètes y figurent.

4.3. Indicateurs d'évaluation de sol

Les indicateurs d'évaluation du sol dans le cadre de cette étude sont ceux présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : liste des indicateurs étudiés associés à leur nombre d'observations.

Propriétés	Indicateurs	Observations par parcelle
Physique	Densité apparente	4
	Stabilité structurale	4
	Structure des agrégats	4
Chimique	pH (KCl)	1
	Azote – nitrates	1
	Carbone (organique)	1
Biologique	Activité microbiologique générale – activité enzymatique	1
	Activité de dégradation de la matière organique	4
	Vers de terre	4

¹ TCS léger : technique culturale simplifiée de type léger signifie que le travail du sol entre le précédent et l'implantation de la culture est de maximum 3 passages et sans utilisation du labour.

² Mixte : signifie qu'au moins 50% de la fertilisation azotée est d'origine organique ou naturelle via les légumineuses. Sinon, la fertilisation est considérée comme essentiellement minérale.

4.3.1. Stabilité structurale

La stabilité structurale du sol se mesure grâce au QuantiSlakeTest (QST) (Vanwindekens & Hardy, 2023). Celui-ci consiste à mesurer la résistance d'une motte de terre sous l'action de l'eau, indiquant ainsi la capacité générale d'une parcelle à résister à l'érosion hydrique. Les agrégats sont liés par la matière organique, fournissant des informations sur la matière organique du sol.

Les échantillons ont été prélevés après la récolte. Ceux-ci sont prélevés sur la couche 2-7cm du sol. L'outil utilisé est un cylindre de Kopecky de 100cm³ afin de prendre le même volume de sol à chaque échantillonnage. Un total de 6 échantillons par parcelle a été prélevé de manière aléatoire et le plus représentatif possible de la parcelle.

Le dispositif consiste en celui décrit dans Vanwindekens et Hardy (2023) (figure 6). Les pesées de la motte immergées sont réalisées ponctuellement pendant environ 1000 secondes.

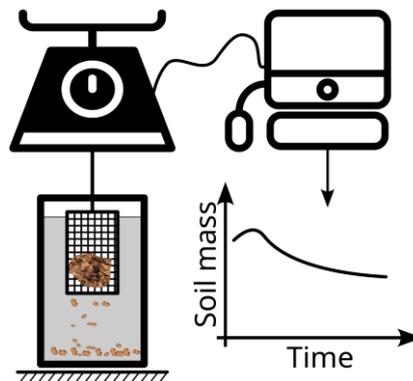


Figure 6 : Illustration du dispositif du QuantiSlakeTest, CRA-W (Vanwindekens & Hardy, 2023). Ordinateur relié à une balance enregistrant en temps réel la masse d'une motte de terre préalablement sèche immergée dans de l'eau distillée.

Une multitude d'indicateurs peuvent être calculés, les plus pertinents seront sélectionnés. Le W_{end} représente la masse relative de la motte après avoir subi l'action de l'eau. Les indicateurs $\text{Slope}_{\text{max-60}}$ et $\text{Slope}_{\text{max-300}}$ représentent la pente entre le point à la masse maximale et la masse à 60 et 300 secondes.

4.3.2. Densité apparente

La densité apparente ou bulk density est mesurée selon une adaptation du protocole fourni par KBS (Corbin & Robertson, s. d.) et de l'INRAE (Vlaud & Lesaint, s. d.). Ce protocole consiste en une mesure de la densité apparente avec un anneau volumétrique comme base d'échantillonnage.

L'échantillonnage a été effectué sur la moyenne des 2 horizons 0-15cm et 15-30cm, soit 7,5cm et 22,5cm respectivement (figure 7). Le cylindre utilisé est en acier inoxydable de 5cm de hauteur et d'un diamètre de 8,1cm, soit un volume de 260cm³. Les mottes de terre humides sont extraites et pesées. Ensuite, elles ont été séchées à 60°C pendant 48 heures. Une fois sèches, elles sont pesées à nouveau. La masse sèche est ensuite introduite dans l'équation suivante :

$$Da = \frac{m_s}{V}$$

Da pour la densité apparente [g/cm³], m_s pour la masse sèche [g] et V pour le volume du cylindre et de la motte [cm³].

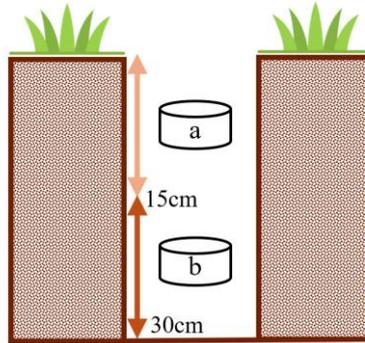


Figure 7 : Illustration de la méthodologie de mesure de la densité apparente. (a) volume de sol prélevé à 7.5cm de profondeur ; (b) volume de sol prélevé à 22.5cm de profondeur.

4.3.3. Évaluation visuelle de la structure du sol

L'évaluation visuelle de la structure du sol (VESS), ou communément appelé test de la bêche, est réalisée dans le cadre de cette étude (Johannes et al., 2020) (Annexe 5). Un bloc de terre de 30cm de hauteur est extrait indemne de l'effet de lissage dans la bêche. La taille et la forme des agrégats y sont ensuite évalués, leur résistance à la pression, la porosité ainsi que l'enracinement de la culture en place grâce à une clé de détermination sous forme de tableau (figure 8).

Une fois le bloc extrait et posé sur la bêche, les différentes couches sont mesurées en [cm] et obtiennent un score Sq de 1 à 5. Le score final du bloc se calcule grâce à la formule suivante :

$$\text{Score final} = \frac{\sum(\text{épaisseur couche } n * \text{score couche } n)}{\text{épaisseur totale}}$$

VESS ₂₀₂₀ Version 10/06/2020	Couche entière: taille des agrégats/mottes	Agrégat/motte intact		Résistance <small>(observable uniquement en conditions d'humidité optimale, après se referer à "aspect après ouverture")</small>	Ouvrir (briser) la motte	Taille et forme des agrégats/fragements ouverts	Aspect après "ouverture"		Racines et couleurs <small>(racines observables uniquement quand les cultures sont bien établies)</small>	cm
		Taille	Forme				Forme	Porosité		
Sq1 Très bien (friable)		La plupart font moins de 6 mm <small>(borne à exclure le travail du sol récent - il se referme uniquement à la forme)</small>	Grumelleux. Agrégats petits et arrondis	Agrégats se désagrègent très facilement avec les doigts	Motte cohésive (ouverte), motte colonisable par des racines. L'ouverture révèle la motte, elle se referme à la façon d'un galet. La motte est composée de plus petits agrégats.	 1.5 cm	Les agrégats sont composés de plus petits agrégats, maintenus ensemble par des racines	Très poreux	Racines à l'intérieur des agrégats	0-1
Sq2 Bien (intact)		De 2 mm à 7 cm (borne à exclure le travail du sol récent - il se referme uniquement à la forme)	Agrégats arrondis. Pas de mottes fermées	Agrégats se désagrègent facilement avec les doigts	Motte cohésive (ouverte), motte colonisable par des racines. L'ouverture révèle la motte, elle se referme à la façon d'un galet. La motte est composée de plus petits agrégats.	 6 cm	L'ouverture des agrégats révèle quelques agrégats plus petits et des faces irrégulières	Poreux	Racines à l'intérieur des agrégats	1-5
Sq3 Moyen (ferme)		De 2 mm à 10 cm, 2/3 font plus de 2cm	Mélange d'agrégats arrondis de différentes tailles. Mottes anguleuses fermées aussi possible	La plupart des agrégats se désagrègent facilement entre les doigts	Motte cohésive (ouverte), motte colonisable par des racines. L'ouverture révèle la motte, elle se referme à la façon d'un galet. La motte est composée de plus petits agrégats.	 faces légèrement irrégulières	L'ouverture révèle des faces plus ou moins rugueuses. Possibilité de faces planes	Peu poreux. Présence possible de quelques macropores et fissures.	Racines en général dans les agrégats	5-10
Sq4 Mauvais (compact)		Environ 2/3 des mottes font plus de 10 cm, 1/3 des mottes peuvent faire moins de 7 cm	Motte fermée sub- angulaire. Possibilité de bords anguleux. Structure lamellaire ou fissurée	Assez difficile de briser les mottes avec une seule main	Motte non poreuse (fermée), motte difficilement ou pas colonisable par des racines. L'ouverture ouvre la motte, elle se referme à la façon d'un galet. La motte est composée de plus petits agrégats.	 13 cm macropores distincts face plane	L'ouverture des mottes révèle des faces plutôt planes	Peu ou pas de porosité visible sauf macropores biologiques	Racines généralement regroupées dans les macropores et fissures ou autour des mottes fermées	10-15
Sq5 Très mauvais (très compact)		La plupart font plus de 10 cm	Motte fermée anguleuse	Très difficile de briser les mottes avec la main	Motte non poreuse (fermée), motte difficilement ou pas colonisable par des racines. L'ouverture ouvre la motte, elle se referme à la façon d'un galet. La motte est composée de plus petits agrégats.	 15 cm bords anguleux racines restreintes	Révéle des faces planes avec des bords anguleux. Possible de faire des cubes à bords nets	Non poreux. Porosité restreinte à quelques macropores et fissures	Zones anoxiques avec couleur gris- bleu possible. S'il y a des racines, elles sont uniquement dans les fissures ou autour des mottes	15-20

Figure 8 : Clé de décision d'attribution des scores Sq par couches de la motte prélevée (Johannes et al., 2020)

4.3.4. Statut acido-basique

Le pH KCl est repris comme indicateur chimique. Les mesures sont effectuées par les laboratoires provinciaux du Brabant wallon (La Hulpe), de Namur et du Hainaut (Carah). Il est disponible sur les analyses de sol avant implantation de la culture. La mesure du pH suit la norme ISO 10390 dans tous les laboratoires. La solution KCl est de 1N en général dans les laboratoires (Genot et al., 2012).

4.3.5. Azote – nitrates

Un des indicateurs chimiques à disposition est la disponibilité en azote avant la culture d'orge brassicole.

Les mesures sont effectuées par les laboratoires provinciaux du Brabant wallon (La Hulpe), de Namur et du Hainaut (Carah). Ceux-ci utilisent la même méthode d'échantillonnage sur 3 profondeurs : 0-30cm, 30-60cm et 60-90cm. Ils respectent la norme ISO 14256-2 pour la mesure des nitrates N-NO₃ qui est délivrée en Unité d'azote par hectare [U/ha].

4.3.6. Teneur en carbone

Les mesures sont effectuées par les laboratoires provinciaux du Brabant wallon (La Hulpe), de Namur et du Hainaut (Carah). Ceux-ci utilisent la même méthode d'échantillonnage.

Le carbone est une valeur déterminée directement par méthode de référence ou indirectement par spectrométrie proche infrarouge. Cette teneur en carbone en pourcentage est mesurée sur l'horizon 0-30cm.

La méthode de référence pour déterminer le contenu en carbone du sol est la combustion sèche. Elle consiste à porter à haute température (900°C) un échantillon de sol. Lors de cette combustion, le carbone est oxydé en CO₂. Le dioxyde de carbone émis est ensuite mesuré par méthode infrarouge.

Requasud décrit la méthode par infrarouge (Minet et al., 2016). Celle-ci se base sur des données de mesures de carbone effectuées par méthode de référence. Cette mesure est indirecte et se base sur des modèles de prédiction. Elle consiste à placer un échantillon de sol sec dans un Quarter Cup introduit dans un spectromètre Foss XDS (400-2498 ; 2nm)³. Le spectromètre ressort un spectre contenant des bandes d'absorption. Ensuite, ce spectre est traité dans un modèle de prédiction permettant de déterminer le spectre de la base de données la plus proche.

4.3.7. Activité microbienne générale

L'activité microbienne générale du sol est mesurée grâce à la FDA dans le cadre de cette étude. La méthode est basée sur la mesure de la réaction d'hydrolyse de la 3',6'-diacetyl fluorescéine (FAD) en fluorescéine avec les enzymes les plus répandues comme la protéase, lipase ou encore

³ Foss WDS 400-2498 ; 2nm : modèle du spectromètre, gamme de longueur d'onde et pas du spectromètre, c'est-à-dire pas de 2 en 2 nm.

estérase. Des suites de cette réaction d'hydrolyse, la fluorescéine est mesurée par spectrophotométrie par un spectromètre de marque Tecan©.

L'échantillonnage est complètement aléatoire, composite avec un parcours en forme de W, sur 10cm de profondeur.

Le protocole suivi est celui suivi par laboratoire du département Gestion durable des bioagresseurs (Annexe 6). Dans chaque échantillon, 1,25g de sol est pesé pour être mis en solution. La solution de sol est ensuite placée dans 8 puits de la microplaque avec les réactifs à fluorés. Cette manipulation est répétée pour tous les échantillons de sol. La plaque est placée dans le spectromètre et la mesure de la fluorescence est retenue après 2 heures.

Une courbe de calibration doit être réalisée pour obtenir de manière empirique la dose de fluorescéine synthétisée en réagissant avec les enzymes. 20g d'échantillons de sol sont pesés et séchés afin de connaître la teneur en eau de chaque échantillon de sol pour obtenir le résultat final en [$\mu\text{mol/g sol sec/h}$].

4.3.8. Activité de dégradation de la matière organique

Ce test consiste en un indicateur révélant l'activité de la microfaune et mésofaune du sol qui dégrade la matière organique, délivrant un taux de dégradation de celle-ci (Helling et al. 1998). Le protocole suivi est celui délivré par Biofunctool® (Thoumazeau et al., 2019) et Helling et al. (Annexe 7).

Le dispositif se présente comme des languettes plates appelées laminas de 1cm de large, 15cm de long et 1.2mm d'épaisseur. Les laminas sont percées de 16 trous de 1,5mm à intervalle de 6mm. Ces trous sont ensuite remplis d'un substrat appétant pour les organismes cibles composé de 70% de cellulose microcristalline et 30% de poudre d'ortie, le tout lié par une solution de 1% d'agar.

Sept bait lamina sont alignés à intervalles de 30cm et enterrés verticalement, le dernier trou à 0,5cm sous la surface du sol (figure 9). Le dispositif a été placé aléatoirement 4 fois dans chaque parcelle les 12 et 13 octobre. Les bait lamina ont été relevés 12 jours plus tard, les 25 et 26 octobre.

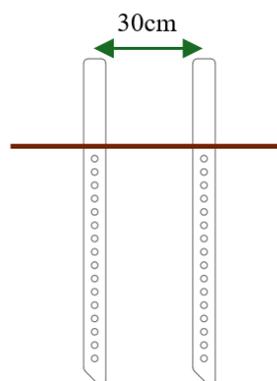


Figure 9 : Illustration simplifiée du dispositif Bait Lamina mis en place.

Le pourcentage de dégradation est calculé à partir du nombre de trous vides et du temps d'incubation. L'état de dégradation des bait lamina obtiennent des scores tels que présentés dans le tableau 4 ci-dessous :

Tableau 4 : Scores attribués à la fin de l'expérience des Bait Lamina.

Dégradation	Non	Partielle	Totale
Score	0	0.5	1

Le pourcentage de dégradation par bait s'obtient par la formule :

$$\text{Score par lamina} = \frac{\text{moyenne(score des 16 trous)}}{\text{temps d'incubation(jour)}}$$

En pourcentage de dégradation par jour [%deg/j].

Le score par point d'échantillonnage en [%deg/j] s'obtient en moyennant les scores des 7 lamina par placette d'échantillonnage.

4.3.9. Vers de terre

L'abondance en vers de terre et l'indice de diversité des groupes fonctionnels consistent en des indicateurs de macrofaune.

La méthode employée est une adaptation de protocole du « test bêche vers de terre » de l'OPVT de Rennes (EcoBioSoil, s. d.). Une motte de 25cm*25cm*25cm est extraite à l'aide d'une bêche. La motte est déliée délicatement sur une bêche. Les vers de terre présents sont comptés et identifiés selon leurs groupes fonctionnels à l'aide d'une clé de décision (Annexe 8).

Le nombre de vers de terre rapporté au m² constitue l'abondance. Un indice de biodiversité est calculé selon la diversité des groupes fonctionnels et de l'abondance. Pour cela, il faut choisir le code correspondant à l'abondance et celui correspondant à la diversité spécifique (ici, le groupe fonctionnel).

Tableau 5 : Codes à attribuer selon l'abondance et de la diversité en vers de terre.

Abondance des vers de terre		Code	Diversité spécifique des vers de terre		Code
<25 ind/m ²	Très faible	1	<1 taxon	Très faible	1
Entre 25 et 150 ind/m ²	Faible	2	entre 1 et 2 taxons	Faible	2
Entre 150 et 300 ind/m ²	Moyenne	3	entre 3 et 4 taxons	Moyenne	3
Entre 300 et 600 ind/m ²	Elevée	4	entre 5 et 7 taxons	Elevée	4
> 600 ind/m ²	Très élevée	5	8 ou plus taxons	Très élevée	5

(Source Univ. Rennes &, UMR 6553 Ecobio, 2015)

(Source Univ. Rennes &, UMR 6553 Ecobio, 2015)

Ensuite, la somme des codes sélectionnés correspond à l'indice de biodiversité des vers de terre.

Tableau 6 : Classification par indice de biodiversité des vers de terre, sources : Univ. Rennes et Ecobio, 2015.

Classes	Indice biodiversité	signification
=2	1	très faible
]2;4]	2	faible
]4;6]	3	moyen
]6;8]	4	élevé
>8	5	très élevé

4.4. Analyses statistiques

Trois bases de données sont obtenues à la suite des différentes expériences et récoltes de données (tableau 3). Une première base comporte des indicateurs avec 4 observations. Une autre base de données est construite avec les résultats comportant une seule observation. La troisième base de données est construite à partir des deux précédentes où les données comportant une seule valeur sont multipliées par 4. En effectuant cette manipulation, cela permet d'augmenter la puissance des diverses analyses multivariées. Cependant, il ne sera pas possible d'appliquer des méthodes d'inférence statistique, car le caractère indépendant des valeurs répliquées sera perdu.

Le niveau de signification des analyses statistiques est $\alpha = 0.05$. Les analyses statistiques ont été effectuées en fonction du facteur système : régénératif, transition et conventionnel. Certaines évaluations ont été effectuées en fonction du facteur travail du sol (TCS léger ou labour) et sont présentées en Annexe 3.

Le tableau 7 ci-dessous présente les analyses statistiques effectuées.

Tableau 7 : Synthèse de la structure des données et des analyses statistiques.

Données	Variables	Observations par variables	Analyses
Database 1	Earthworms, Sq, BaitLamina, Bulk Density, Wend, Sl_max_60, Sl_max_300	4	AV1 ACP, Permanova LDA, Manova
Database 2	Rendement, %carbone, C/A, azote_30, azote_60, azote_90, pH, FDA	1	AV1
Database 3	DataBase1 + multiplication des variables de la DataBase2	4	ACP

5. Résultats

5.1. Analyses univariées

Le tableau 8 présente tous les indicateurs mesurés et le rendement en fonction de leur niveau de signification et leur répartition en groupes. En raison du peu de représentation des indicateurs de la Database 2 (Tableau 7 – Database 2), les résultats de ceux-ci sont représentés sous forme de dot plots.

Les lettres indiquent les groupes formés par les différences significatives.

Tableau 8 : niveaux de signification des indicateurs en fonction des systèmes. Alpha = 0.05. W_{end}, masse relative. SI_{max}, pente de la perte de masse à 60 et 300 secondes. Sq, structure. DA, densité apparente à 7 et 22cm. Bioturbation supérieure et inférieure. pH, statut acido-basique. Azote, nitrates à 0-30, 30-60, 60-90 cm et totaux. Carbone %, teneur en carbone. FDA, fluorescéine diacétate. Bait, lamina, taux de dégradation de la matière organique. Vers de terre, abondance des vers. Indice vers, indice de biodiversité des vers de terre.

	W _{end}	SI _{max} 60	SI _{max} 300	Sq	DA 7cm	DA 22cm	Bioturbation supérieure	Bioturbation inférieure
Régénératif	a ^{***}	a ^{**}	a ^{***}	b ^{***}	a	a	a ^{**}	a ^{**}
Transition	b ^{***}	b ^{**}	b ^{***}	b ^{***}	a	a	b ^{**}	b ^{**}
Conventionnel	b ^{***}	b ^{**}	b ^{***}	a ^{***}	a	a	b ^{**}	b ^{**}

	pH	Azote 30	Azote 60	Azote 90	Azote total	Carbone %	FDA	Bait Lamina	Vers de terre	Indice vers
Régénératif	a	a [*]	a	a	a	a	a	a	a	a
Transition	a	b [*]	a	a	a	a	a	a	a	a
Conventionnel	a	b [*]	a	a	a	a	a	a	a	a

5.1.1. Stabilité structurale

L'analyse univariée de la stabilité structurale au travers de l'indicateur de masse relative des mottes W_{end} révèle une différence très hautement significative entre le système régénératifs et les systèmes en transition et conventionnels (figure 10). Les systèmes régénératifs ont une masse relative finale de la motte de sol plus élevée, traduisant une perte de masse moins importante. Les systèmes en transition présentent une grande variabilité dans la distribution des observations.

Il en est de même avec les indicateurs de vitesse de pertes de masse des mottes après 60 secondes, SI_{max_60} , et 300 secondes, SI_{max_300} , comme le montre la figure 11. Les systèmes régénératifs obtiennent une vitesse de perte de masse moins importante, traduisant une désagrégation de la motte moins importante.

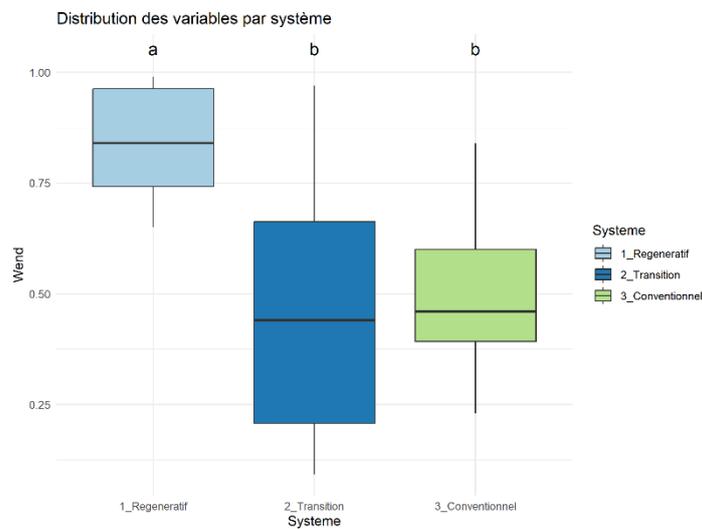


Figure 10 : Box plots de l'indicateur de stabilité structurale, masse relative W_{end} .

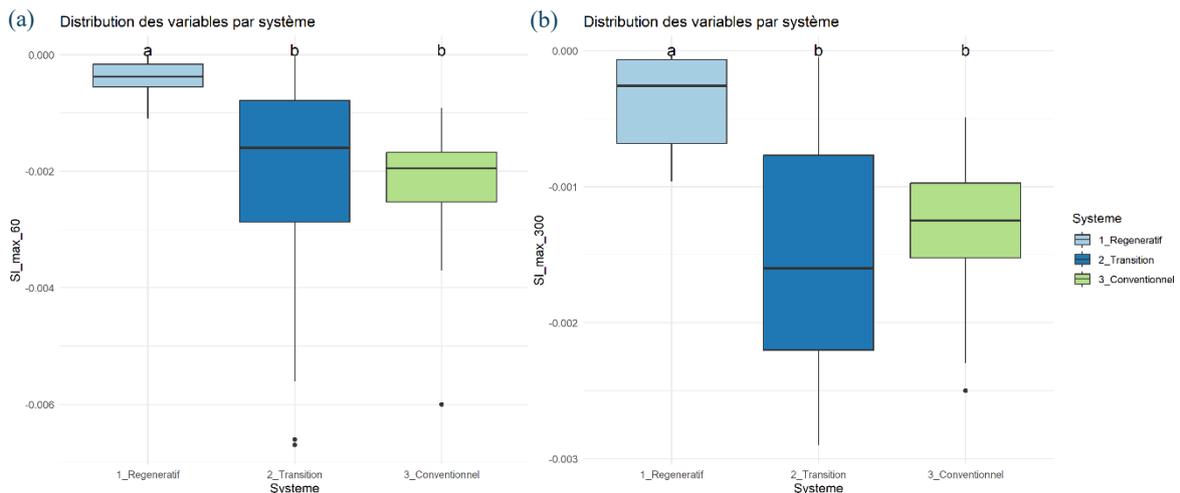


Figure 11 : Box plots des indicateurs de stabilité structurale, vitesse de pertes de masse des mottes à 60 (a) et 300 secondes. (b).

5.1.2. Densité apparente

L'analyse univariée de la densité apparente en g/cm^3 ne montre pas de différence significative des densités entre les différents systèmes (figure 12). La grande majorité des valeurs de densité se trouvent entre 1,4 et 1,6 g/cm^3 .

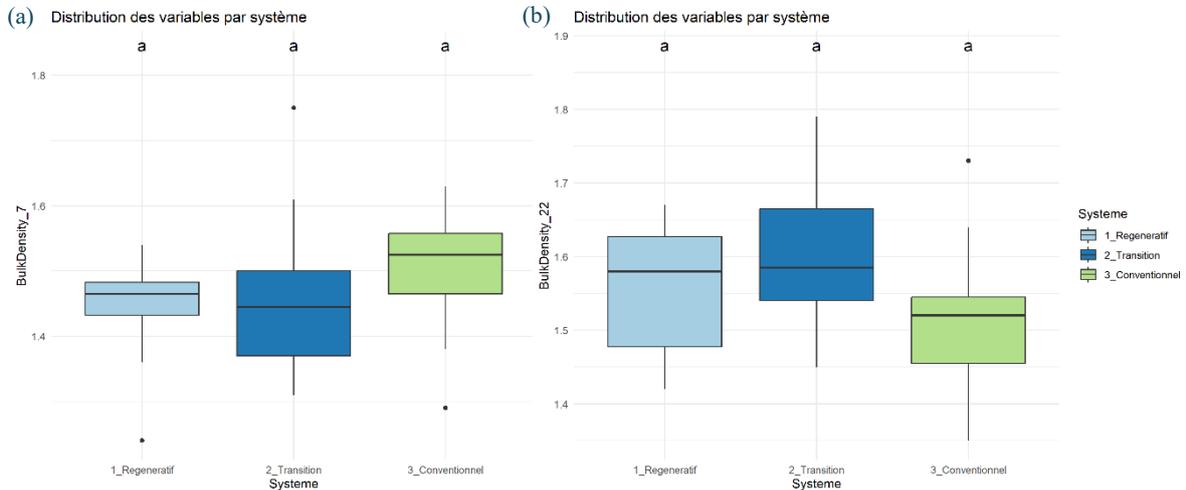


Figure 12 : Box plots de la densité apparente à 7cm (a) et 22cm (b) en g/cm^3 .

Les densités apparentes sont mises en relation via une régression linéaire (figure 13). Bien que la pente soit positive et semble révéler une augmentation, le p-valeur de celle-ci est égale à 0.05. Cette valeur induit l'acceptation de l'hypothèse nulle, la pente de la droite est statistiquement égale à 0.

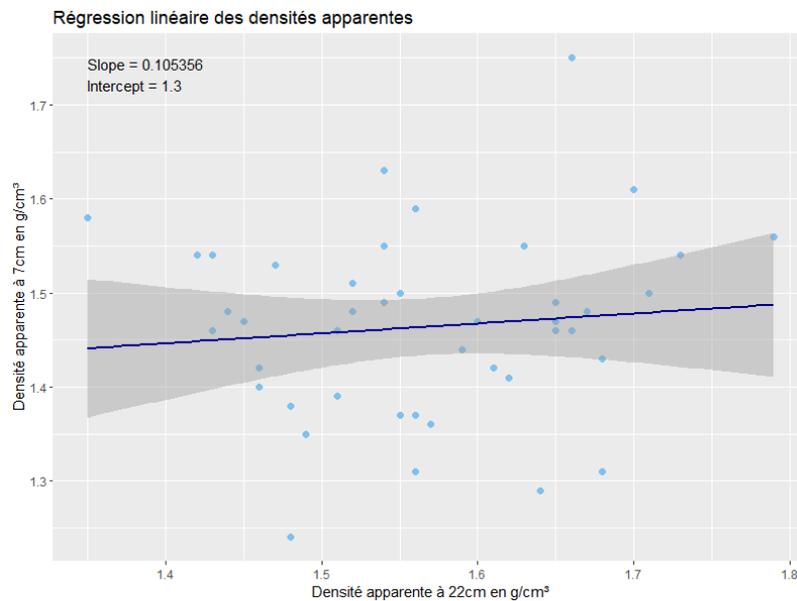


Figure 13 : Régression linéaire de la densité apparente à 7cm en fonction de la densité apparente à 22cm.

5.1.3. Évaluation visuelle de la structure du sol

L'analyse univariée de la structure du sol au travers de l'indicateur Sq révèle une différence très hautement significative entre le système régénératifs et les systèmes en transition et conventionnels (figure 14). Les systèmes conventionnels récoltent les valeurs les plus haute. Les horizons obtenant les meilleures scores, composés d'agrégats plus petits et arrondis, sont plus épais dans les systèmes régénératifs et certains en transition. Ces horizons mieux structurés sont plus prononcés, de 7 à 12cm contre 3 à 5cm dans les systèmes conventionnels. Les racines ont mieux colonisé ces horizons. Néanmoins, tous les systèmes de cultures comportent un horizon, plus ou moins épais, de mottes anguleuses, peu malléables et perméables.

Il en est de même avec les indicateurs de bioturbation supérieure et inférieure comme le montre la figure 15. Les lettres indiquent les groupes formés par les différences significatives. Les systèmes régénératifs ne comportent qu'une seule valeur de bioturbation sans variabilité.

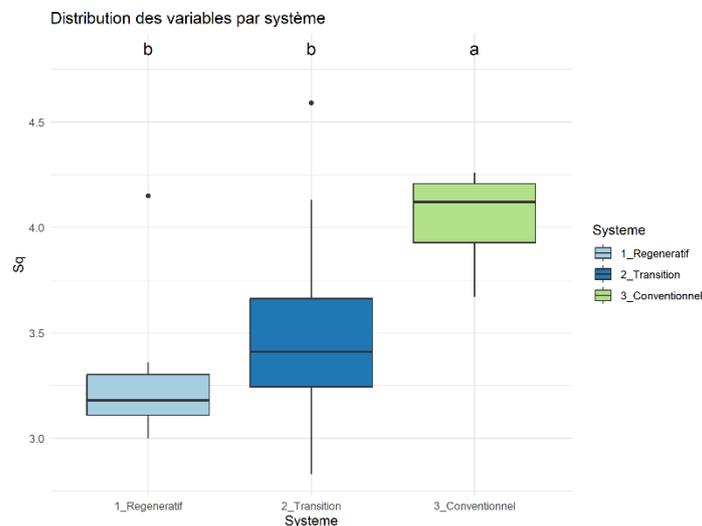


Figure 14 : Box plots de l'indicateur de structure du sol Sq.

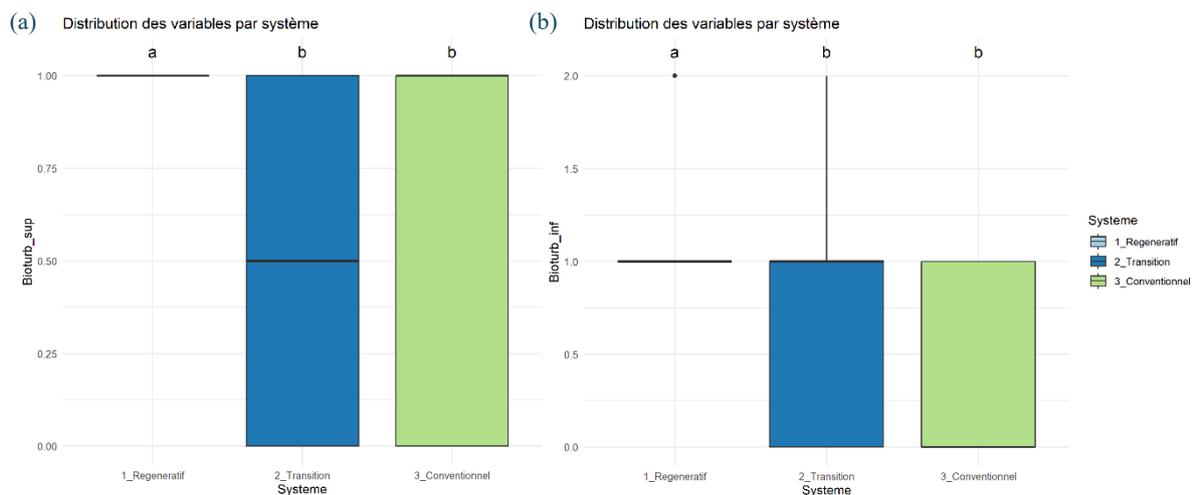


Figure 15 : Box plots des indicateurs de structure du sol, bioturbation supérieure (a) et inférieure (b).

5.1.4. Statut acido-basique

L'analyse univariée du pH (KCl) ne montre pas de différence significative des densités entre les différents systèmes (figure 16). Les valeurs se situent entre 5,6 et 7,7 et sont très variables dans l'ensemble.

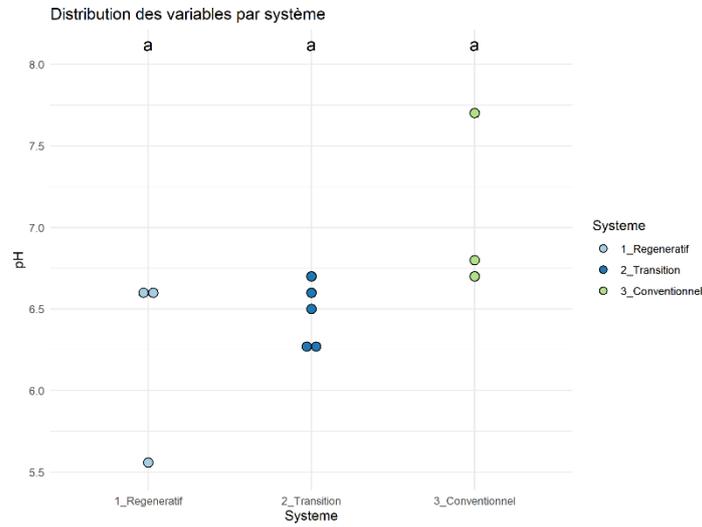


Figure 16 : Dot plots de l'indicateur de pH (KCl).

5.1.5. Azote – nitrates

L'analyse univariée de l'azote sous forme de nitrates révèle une différence significative entre les systèmes uniquement dans l'horizon 0-30cm, avec un taux d'azote plus élevé dans les systèmes régénératifs (figure 17a).

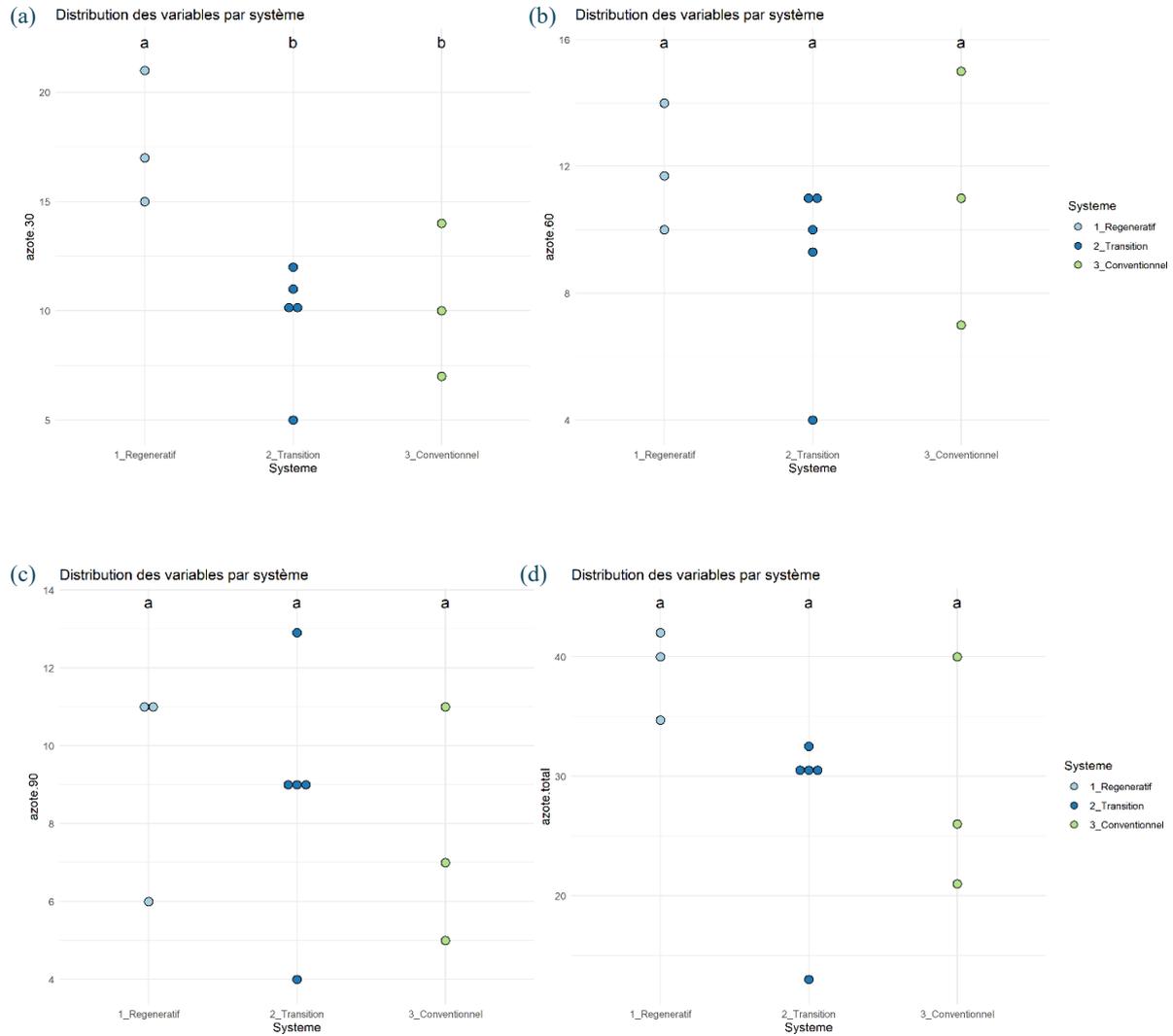


Figure 17 : Dot plots des indicateurs d'azote sous forme de nitrates en unité par hectare de nitrates (U/ha de N-NO₃) à 30cm (a), 60cm (b), 90cm (c) et totaux (d).

5.1.6. Teneur en carbone

L'analyse univariée du pourcentage de carbone présent dans le sol ne montre pas de différence significative des densités entre les différents systèmes (figure 18). Bien qu'il n'y ait pas de différence significative entre les classes, il semblerait que les systèmes conventionnels et de transition obtiennent des valeurs en moyenne moins élevées de la teneur en carbone.

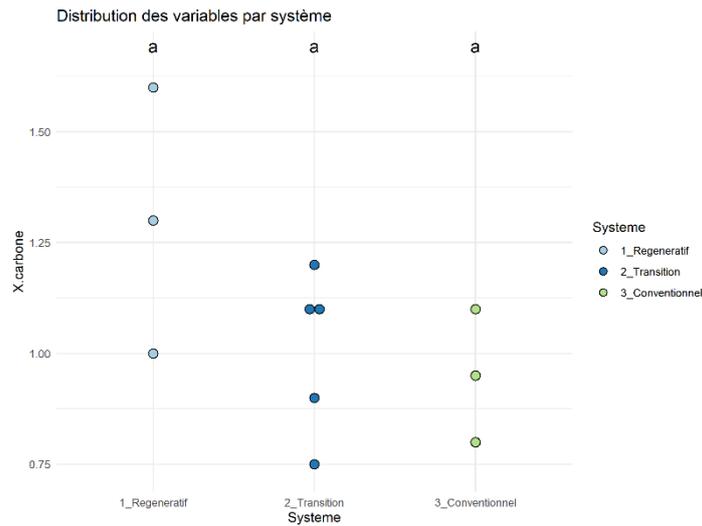


Figure 18 : Dot plot du pourcentage de carbone en %.

5.1.7. Activité microbienne générale

L'analyse univariée de l'indicateur d'activité microbienne générale, nommé FDA, ne montre pas de différence significative des densités entre les différents systèmes (figure 19). Les mesures présentent une grande variabilité dans les systèmes conventionnels et régénératifs. Les résultats par parcelles étudiées sont disponibles à l'Annexe 3 (Supplementary 1).

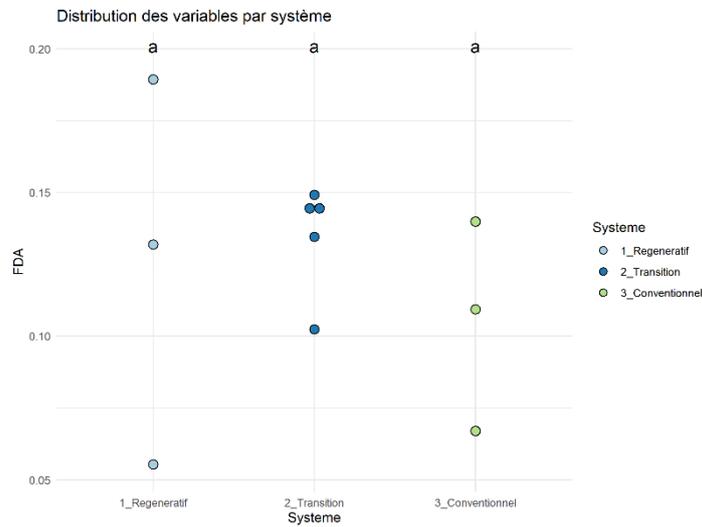


Figure 19 : Dot plots de l'indicateur d'activité microbienne générale en μmol de fluorescéine synthétisée par grammes sol sec par heures [$\mu\text{mol/g sol sec/h}$].

5.1.8. Activité de dégradation de la matière organique

L'analyse univariée de l'indicateur d'activité de dégradation de la matière organique au travers de Bait Lamina ne montre pas de différence significative des densités entre les différents systèmes (figure 20). La majorité des observations sont à 4,3%deg/j ou au-delà. Le système régénératif montre une grande variabilité.

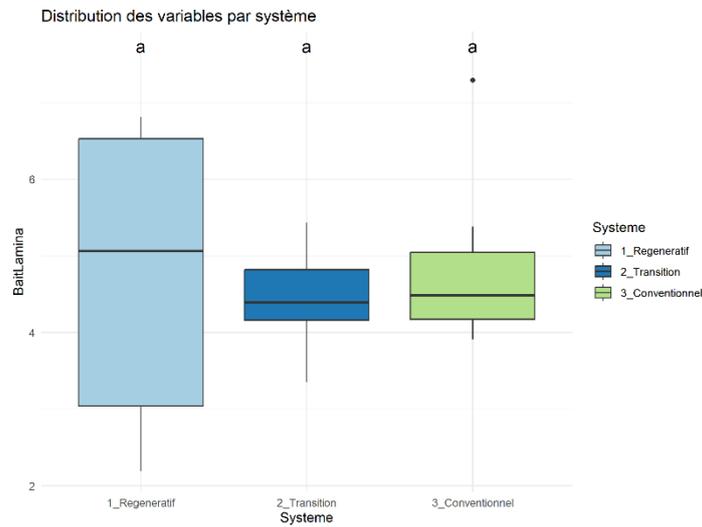


Figure 20 : Dot plots de l'indicateur d'activité de dégradation Bait Lamina en % de dégradation par jour [%deg/j].

5.1.9. Vers de Terre

L'analyse univariée de l'abondance des vers de terre n'illustre pas de différence significative (figure 21).

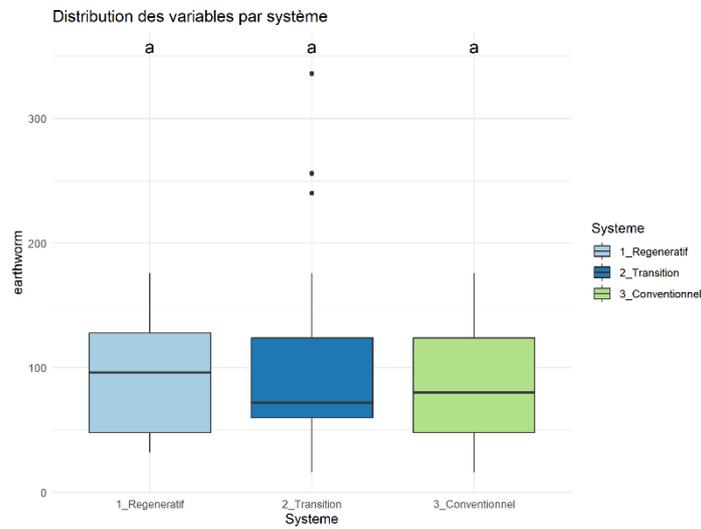


Figure 21 : Box plots de l'abondance des vers de terre en nombre par m².

L'analyse de l'indice de biodiversité ne montre pas non plus de différence significative (figure 22). Toutefois, les systèmes régénératifs et une partie des systèmes en transition présentent une diversité des groupes fonctionnels supérieure à celle des systèmes conventionnels (vue détaillée dans l'Annexe 3 – supplementary 2). L'indice de biodiversité des vers de terre varie entre 1 et 4, avec une dominance pour les niveaux 2 et 3. Cela montre une diversité faible à moyenne dans les parcelles (Tableau 6).

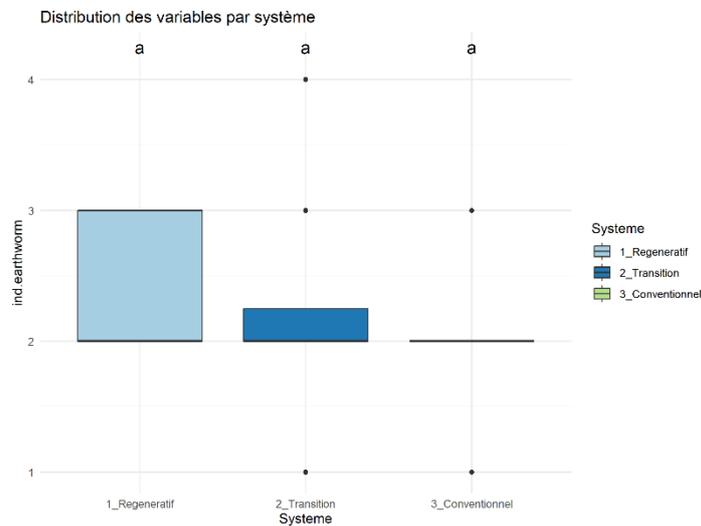


Figure 22 : Box plots de l'indice de biodiversité des vers de terre.

5.2. Analyses multivariées des indicateurs mesurés avec répétition

5.2.1. Corrélations des variables

La figure 23 présente la matrice de corrélation générée illustre les relations entre les différentes variables mesurées (Tableau 7 – Database 1). L'échelle de couleur varie du bleu au rouge, du positif au négatif. Les corrélations sont particulièrement fortes entre les indicateurs liés aux vers de terre, l'abondance et l'indice de biodiversité. Les variables liées à la stabilité structure, Wend et SI_max_300, sont corrélés positivement. C'est pour cela que les variables de l'abondance (earthworm) et SI_max_300 seront exclues des tests statistiques multivariés.

Les variables de bioturbation seront exclues également, car celles-ci sont des fausses variables quantitatives binaires, qui ont pris les scores de 0 ou 1. Les interprétations pourraient devenir erronées, car les tests statistiques deviendraient inadéquats au type de variable.

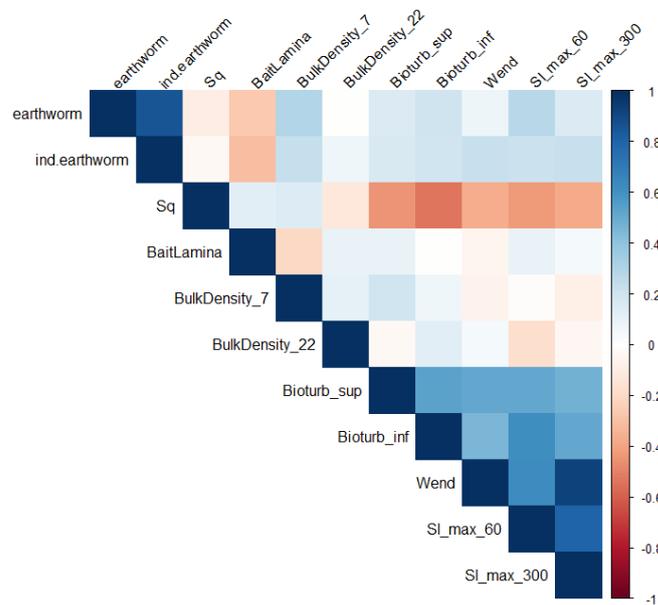


Figure 23 : Matrice de corrélation des indicateurs répétés fois.

5.2.2. Analyse des composantes principales

L'exploration des données à travers l'analyse en composantes principales met en évidence les indicateurs qui expliquent la plus grande part de variance totale et capturent les tendances principales au sein du jeu de données.

Le cercle de corrélation (figure 24) du premier plan factoriel montre que 50,4% (29,3% et 21,1%) de la variance totale est expliquée par le modèle. Par la matrice de corrélation (tableau X), il est possible de décrire la corrélation des variables avec les différentes dimensions. L'axe horizontal représentant la première dimension est positivement corrélé à plus de 0.5 aux variables W_{end} et Sl_max_60 . Ce même axe est négativement corrélé à moins de -0.5 à la variable Sq . L'axe vertical représentant la deuxième dimension est positivement corrélé aux variables $ind.earthworm$ et $BulkDensity_7$, négativement corrélé à la variable $BaitLamina$. Toutes ces variables sont relativement proches du cercle de corrélation et sont donc assez bien représentées.

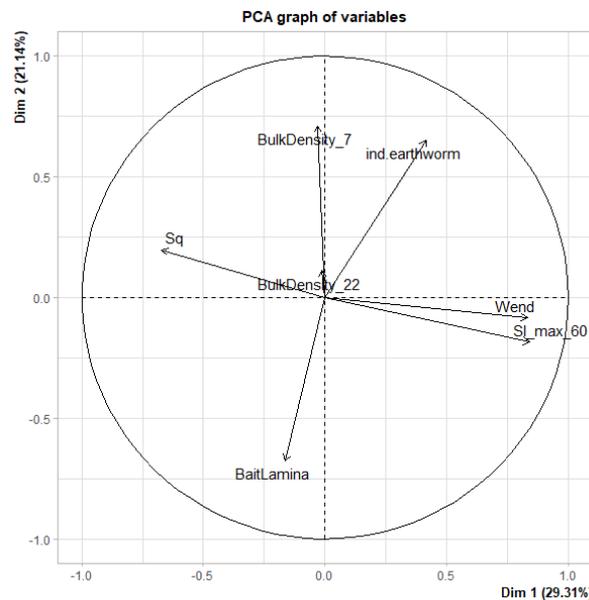


Figure 24 : Cercle de corrélation des indicateurs répétés fois.

Tableau 9 : Matrice de corrélation des variables et des dimensions 1 et 2. En vert : les variables corrélées positivement à $>|0.5|$; en bleu : les variables corrélées négativement à $>|-0.5|$.

	Dim1 (29,3%)	Dim2 (21,1%)
Ind.earthworm	0.41566363	0.65123872
Sq	-0.67111674	0.19710069
BaitLamina	-0.16208250	-0.67644899
BulkDensity_7	-0.02988676	0.71096117
Bulk_density_22	-0.01234762	0.11037001
Wend	0.83343549	-0.08378067
Sl_max_60	0.84039330	-0.18517794

L'ACP est mise en couleur sur la figure 25 selon les différents systèmes avec la projection de toutes les observations. En Annexe 3, une représentation similaire est générée selon le travail du sol. Grâce à cette représentation, l'organisation du jeu de données peu apparaît clairement. Les ellipses des systèmes sont organisées le long de l'axe horizontal selon les indicateurs les

plus fortement corrélés (en valeur absolue), ce qui permet de distinguer visuellement le système régénératif du système conventionnel. Le système de transition est réparti dans tout l'espace, balayant les deux systèmes.



Figure 25 : ACP biplot des indicateurs répétés 4 fois, légendée selon le système de classification.

L'analyse de variance multivariée par permutation (Permanova) permet d'évaluer l'hypothèse d'équivalence entre les groupes via les centroïdes de chaque groupe. La p-valeur est inférieure à 0.001, ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle d'égalité des groupes et met en évidence une différence significative. Une évaluation par paires décrit alors la séparation des groupes les uns par rapport aux autres, où les systèmes régénératifs et conventionnels sont séparés.

5.2.3. Analyse discriminante linéaire

Les points sont projetés dans l'espace discriminant selon le système agricole auquel ils appartiennent (figure 26). Les ellipses de confiance, qui représentent la dispersion des points autour du centre de gravité de chaque groupe, montrent une grande variabilité dans la catégorie transition. En revanche, les ellipses des systèmes régénératif et conventionnel sont presque distincts, indiquant une séparation entre les deux systèmes.

Les variables qui contribuent le plus à la séparation des classes selon l'axe de la dimension 1 (LD1) qui explique 67% de la variance, sont les indicateurs physiques Sq et la densité apparente à 7cm (tableau 10). Cette dimension sépare horizontalement les classes majoritairement par la structure du sol. Le coefficient positif pour Sq déplace les systèmes conventionnels, caractérisés par des valeurs plus élevées, vers la droite du graphique, tandis que les systèmes régénératifs se positionnent à gauche.

Quant à la dimension 2 (LD2), expliquant 32% de la variance, elle est principalement influencée par les indicateurs physiques W_{end} et la densité apparente à 22cm (tableau 10). Le coefficient négatif pour W_{end} positionne les systèmes vers le haut du graphique tandis que le coefficient négatif de la densité tend à positionner les données vers le bas.

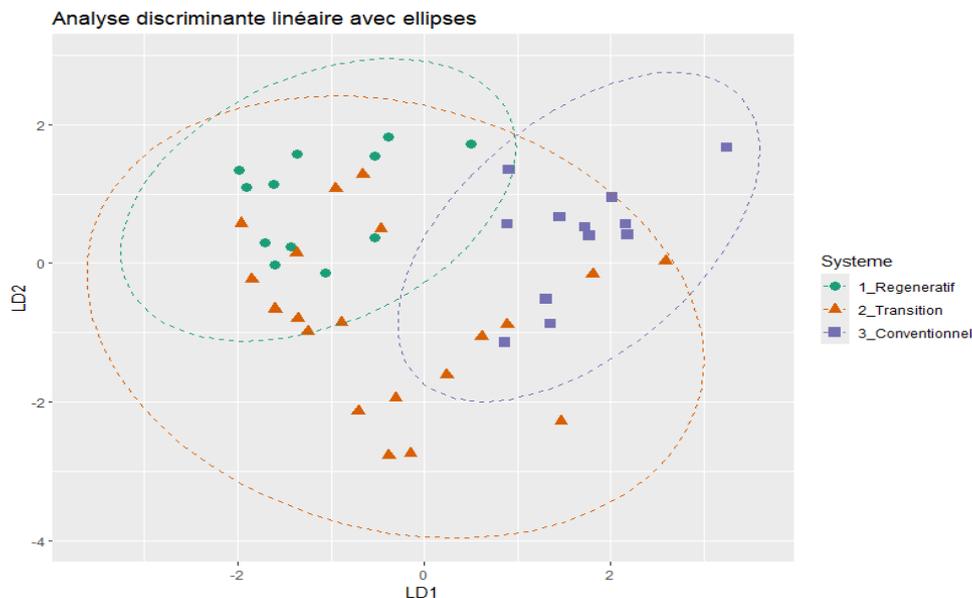


Figure 26 : Graphique de la projection des points de l'analyse discriminante linéaire.

Tableau 10 : Matrice des coefficients des discriminants.

	LD1 (67,89%)	LD2 (32,11%)
Ind.earthworm	-0.304589584	-0.05885130
Sq	1.215804181	0.25867635
BaitLamina	-0.102601697	0.37880856
BulkDensity_7	0.329507512	0.26699531
Bulk_density_22	-0.308469987	-0.60822124
Wend	-0.143232204	1.14295566
Sl_max_60	-0.008535043	-0.02157153

5.3. Analyses multivariées des indicateurs consolidés

5.3.1. Corrélation des variables

La figure 27 présente la matrice de corrélation générée des relations entre toutes les variables, reprenant les mesures sans répétitions et avec répétitions (Tableau 7 – Database 3). L'échelle de couleur varie du bleu au rouge, du positif au négatif. Les corrélations présentées dans le point 5.2.1. restent identiques et mènent au même principe d'exclusion. Les variables liées à l'azote sont assez bien corrélées entre elles, en particulier avec l'azote total. Seule la variable de l'azote à 30cm (azote.30) sera gardée dans l'analyse statistique multivariée.

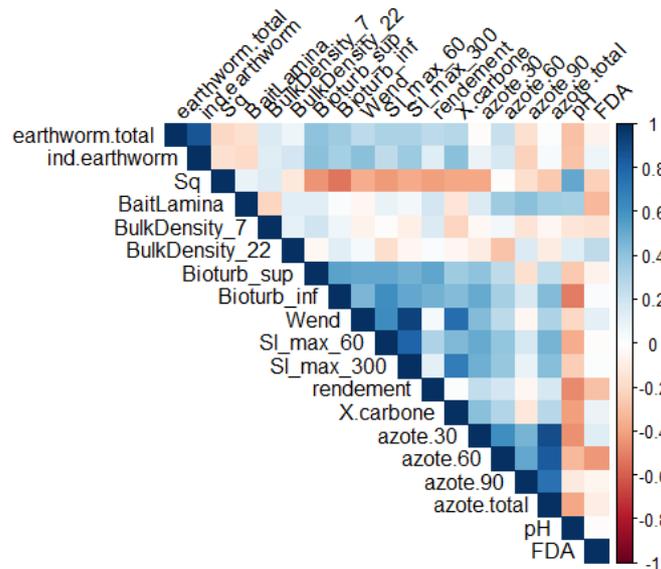


Figure 27 : Matrice de corrélation de tous les indicateurs consolidés.

5.3.2. Analyse des composantes principales

Le cercle de corrélation (figure 28) du premier plan factoriel montre que 45,8% (31,7% et 14,1%) de la variance totale est expliquée par le modèle. Par la matrice de corrélation (tableau 11), il est possible de décrire la corrélation des variables avec les différentes dimensions. L'axe horizontal représentant la première dimension est positivement corrélé à plus de 0.5 aux variables W_{end} , % en carbone, Sl_{max_60} et l'azote 30cm. Ce même axe est négativement corrélé à moins de -0,5 aux variables Sq et le pH. L'axe vertical représentant la deuxième dimension est positivement corrélé à la variable BaitLamina. Toutes ces variables sont relativement proches du cercle de corrélation et sont donc assez bien représentées.

Le rendement est intégré dans l'analyse en tant que variable quantitative supplémentaire afin de garder les caractéristiques intrinsèques de l'agroécosystème. Sa projection sur le cercle de corrélation se fait de la même manière que pour les variables actives, mais sans influencer la construction des axes principaux. Cette approche permet d'interpréter les relations potentielles entre le rendement, les composantes principales et les autres variables.

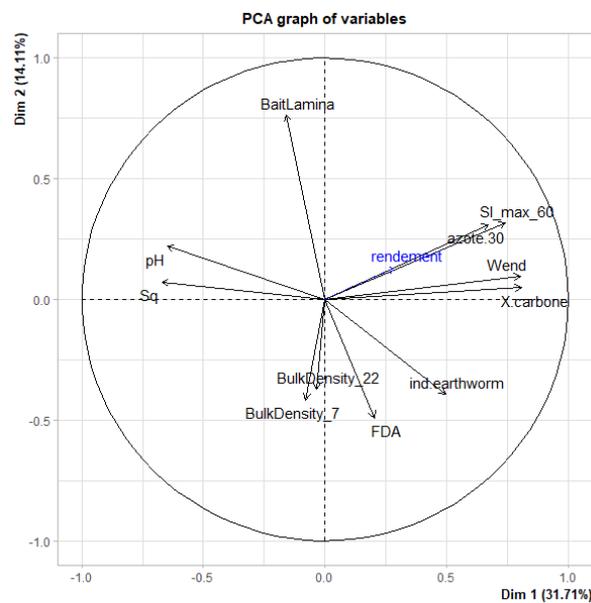


Figure 28: Cercle de corrélation de toutes les indicateurs consolidés.

Tableau 11 : Matrice de corrélation des variables et des dimensions 1 et 2. En vert : les variables corrélées positivement à $>|0.5|$; en bleu : les variables corrélées négativement à $>|0.5|$.

	Dim1 (31,71%)	Dim2 (14,11%)
Ind.earthworm	0.49624742	-0.39227404
Sq	-0.67073593	0.07062121
BaitLamina	-0.15893358	0.76401778
BulkDensity_7	-0.08002908	-0.41616787
BulkDensity_22	-0.03500533	-0.37367601
Wend	0.80253603	0.09610781
Sl_max_60	0.74157656	0.31560712
X.carbone	0.80913184	0.04907472
Azote.30	0.67086613	0.30892827
pH	-0.64792424	0.21921821
FDA	0.20136530	-0.49175500

L'ACP est mise en couleur sur la figure 29 selon les différents systèmes avec la projection de toutes les observations. En annexe 2, une représentation similaire est générée selon le travail du sol. Grâce à cette représentation, l'organisation du jeu de données peu apparaître clairement. Les ellipses des systèmes sont organisées le long de l'axe horizontal selon les indicateurs les plus fortement corrélés (en valeur absolue), ce qui permet de distinguer visuellement le système régénératif séparé du système conventionnel. Le système de transition est réparti dans tout l'espace, balayant les deux systèmes.

Le vecteur du rendement se calque sur le vecteur de l'azote sur 30cm.

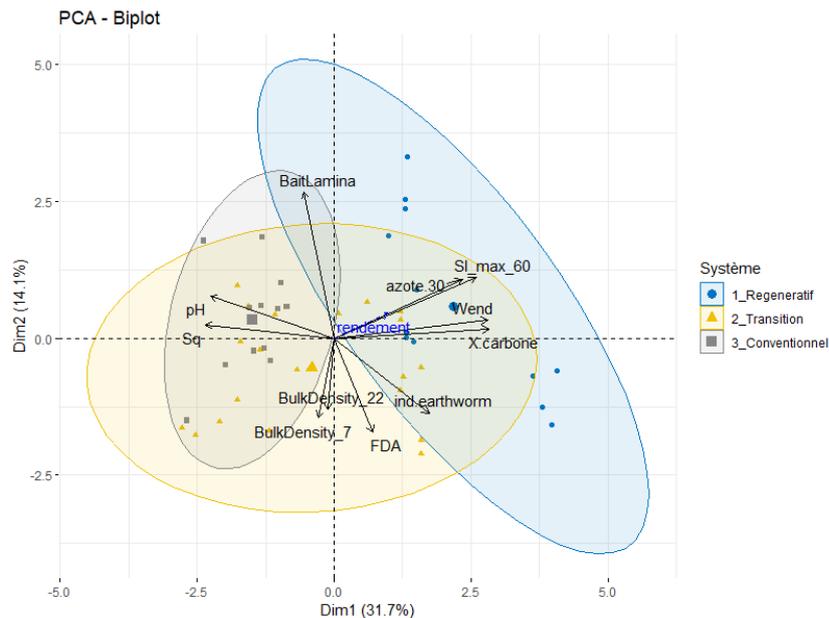


Figure 29 : ACP biplot de tous les indicateurs consolidés, légendée selon le système de classification.

6. Discussion

Dans ce chapitre de discussion, les résultats obtenus dans cette étude seront examinés en profondeur. La démarche suivie est structurée en deux étapes. Premièrement, l'attention sera portée aux analyses univariées pour traiter les indicateurs d'évaluation du sol individuellement. Ensuite, la discussion se concentrera sur les analyses multivariées. Cette approche permettra de valider ou d'infirmer les hypothèses de départ, mais également de mettre en évidence les éventuelles relations entre variables et facteurs étudiés. Pour rappel, l'objectif principal de cette étude est de comparer des itinéraires techniques dits régénératifs, en transition et conventionnels selon la fertilité et la qualité des sols.

La stabilité structurale

La stabilité structurale, évaluée à l'aide trois indicateurs, mesure la résistance des agrégats du sol à l'action de l'eau. Les résultats mettent en évidence une différence significative entre les systèmes régénératifs et les deux autres types de systèmes étudiés.

Tout d'abord, l'indicateur W_{end} est plus élevé dans les systèmes régénératifs, se traduit par une masse relative finale plus élevée. Par ailleurs, les indicateurs de pente qui traduisent la vitesse de pertes de masse à 60 et 300 secondes sont plus moins abruptes pour les systèmes régénératifs, attestant d'une meilleure stabilité des agrégats. Ces systèmes, caractérisés par l'absence de labour depuis plus de 20 ans et des apports réguliers de matière organique (résidus, couverts ou amendements), minimisent la perturbation du sol, favorisant ainsi sa stabilisation. De nombreuses études ont démontré que la stabilité structurale des agrégats est fortement influencée par le travail du sol et le type de fertilisation.

Cette stabilité tend à être meilleure en travail du sol réduit, ou sans inversion de la matrice du sol et avec une fertilisation organique prédominante (Bottinelli et al., 2017). Vanwindekens et Hardy ont démontré que le régime de travail du sol influence directement sa stabilité. Les systèmes utilisant le labour présentent généralement une stabilité moindre, les rendant plus vulnérables à l'érosion (Obalum et al., 2019). Cette sensibilité accrue s'explique par l'effet splash (impact des gouttes de pluie) et le ruissellement de l'eau en surface (Le Bissonnais, 1996). De plus, les systèmes de travail du sol sans labour et intégrant des couvertures de sol régulières peuvent montrer une stabilité structurale plus grande (Abdollahi & Munkholm, 2014). Les systèmes présentant une stabilité plus grande pourraient bénéficier d'une qualité de sol supérieure grâce à une résilience supérieure face à l'érosion.

Concernant la méthode, le dispositif mis en place par Vanwindekens et Hardy est simple et facile à prendre en main. Cependant, il n'est pas encore très accessible et reproductible, car il est sujet à quelques améliorations étant donné qu'il fait partie d'un projet de recherche toujours en cours. Toutefois, la mesure peut s'effectuer de manière plus simple et visuellement si une évaluation rapide est nécessaire. En revanche, cette simplification met de côté l'aspect quantitatif de la mesure et se base plutôt sur une estimation.

La densité apparente

Les densités apparentes mesurées aux moyennes des horizons 0-15 et 15-30cm ne présentent pas de différence significative entre les systèmes. Ces mesures semblaient pertinentes à mesurer afin de déterminer indirectement l'état de compaction.

La mesure de la densité apparente permet de conclure également sur la capacité des racines à pouvoir grandir dans le sol. Dans le cas des céréales par exemple, les racines peuvent descendre à plus de 1m de profondeur dans les sols non compactés (Kautz et al., 2013). Une DA de sol adéquate est requise pour permettre à ces racines de pénétrer dans les horizons de sol et optimiser ses prélèvements en ressources nécessaires. En effet, la DA a un impact sur la sélection du chemin qu'empruntent les racines lors de leur développement (Phalempin et al., 2021). Dans le cadre de cette étude, les valeurs de DA se trouvent généralement être supérieures à 1,4g/cm³. Or, cette valeur de densité devient critique pour les sols limoneux pour le développement racinaire, impactant négativement la pénétration des racines (Dal Ferro et al., 2014).

Une étude récente conduite par Zhang et al. (2024) a montré qu'une DA élevée, supérieure à 1,4g/cm³, pouvait réduire la biodisponibilité des éléments nutritifs. La DA des parcelles étudiées semble élevée et ne permet pas la pénétration optimale des racines et l'allocation des nutriments aux racines sur tous les horizons de sol.

Par ailleurs, le travail du sol ne semble pas avoir eu d'influence sur la DA. Pourtant, Abid et Lal ont montré que la densité apparente du sol est plus basse en travail du sol réduit. Cette année climatique a été caractérisée par des fortes pluies régulières, laissant la matrice du sol très humide tout au long de l'année. En 2023 et 2024, les précipitations ont atteint respectivement 1011,4 mm et 1170,7 mm, contre une normale annuelle de 837,1 mm (IRM, 2025). La durée prolongée d'épisodes pluvieux peut induire une augmentation de la densité apparente (Augeard et al., 2008). Les conditions d'humidité pourraient donc expliquer les valeurs élevées de densité.

L'état de compaction du sol joue un rôle dans la disponibilité des éléments et le développement des cultures, donc sur la fertilité, affectant directement le rendement. De manière plus large, la densité apparente semble être un indicateur clé dans l'évaluation de l'état de fertilité et la qualité physique d'un sol.

Concernant la méthodologie, celle-ci pourrait être sujet à des améliorations grâce à l'emploi d'outils plus pratiques. La méthode d'échantillonnage telle qu'utilisée dans cette étude est fastidieuse et longue. Elle est sujette à de l'imprécision au moment de l'extraction de l'anneau volumétrique.

L'évaluation visuelle de la structure du sol

L'évaluation visuelle de la structure du sol par le test à la bêche a montré des différences significatives entre les systèmes, plaçant le système régénératif et en transition à part grâce à ses scores plus faibles (échelle inverse), indiquant une meilleure structure.

Askari et al. ont montré des résultats similaires, avec des scores plus faibles en travail du sol sans labour, décrivant une qualité du sol supérieure. Les racines peuvent mieux coloniser les horizons en profondeur, permettant ainsi aux plantes d'exploiter au mieux les ressources

disponibles pour leur croissance. Les horizons aux mottes compactes sont présents dans tous les systèmes mais prédominent dans les régimes conventionnels. Ces résultats pourraient confirmer les tendances retrouvées dans l'évaluation de la densité apparente. Généralement, ce sont les systèmes en labour qui comportent cette tendance à avoir un score plus élevé et qui pourraient donc posséder une qualité de structure amoindrie (Askari et al., 2013).

De plus, la longueur des racines peut être réduite, limitant l'accès aux ressources dans le sol et le développement global de la culture (Lipiec et al., 2012). Il semblerait donc que l'indicateur S_q soit approprié dans l'évaluation de la fertilité et la qualité d'un sol grâce à son évaluation de l'état physique global.

La méthode VESS s'est montrée pratique à mettre en place pour évaluer l'impact des pratiques culturales sur la qualité de la structure du sol par les agriculteurs et conseillers, comme démontré par Ball et al. (2007) et Askari et al. (2013). Quant à sa fiabilité, celle-ci peut être nuancée, car elle est dépendante de l'expérimentateur.

Les indicateurs de bioturbations semblent peu aboutis. Certes, ils sont significatifs mais semblent biaisés tant dans la manière de prendre la mesure que dans l'attribution du score. Ce sont des valeurs qualitatives qui sont transformées en valeurs quantitatives pour les analyses statistiques. Elle porte peu d'information, elle n'est pas précise, basée sur une évaluation superficielle. La méthode d'évaluation de la bioturbation ne s'est dès lors pas montrée pertinente et fiable dans le cadre de cette étude.

Le statut acido-basique

Le pH du sol constitue un paramètre essentiel pour évaluer la fertilité des parcelles agricoles. Son influence directe sur la disponibilité des nutriments et sur l'activité microbienne en fait un indicateur crucial dans la gestion des sols. Cependant, la variabilité à court terme du pH rend difficile la mise en évidence de tendances claires entre différents systèmes de gestion. Les systèmes sans labour, favorisant l'accumulation de matière organique et la libération d'ions H^+ lors de sa décomposition, tendent à présenter des pH plus acides (Zhao et al., 2022), bien que les résultats de cette étude soient non significatifs. Cette acidification, pouvant se révéler problématique dans certains contextes de cultures (Kunhikrishnan et al., 2016), peut être associée à des concentrations plus élevées en carbone et en nitrates (Allam et al., 2022), renforçant l'importance d'une gestion précise et individualisée du pH pour chaque parcelle (Genot et al., 2012). Il reste néanmoins indispensable de l'évaluer individuellement pour chaque parcelle afin d'optimiser, à termes, la gestion de la production primaire (Genot et al., 2012).

Par ailleurs, l'indicateur de pH peut se mesurer facilement par le biais d'analyses de sol régulièrement effectuées par les agriculteurs pour la gestion de la fertilité de leur exploitation. Cependant, il semble insuffisant à lui seul pour évaluer la qualité et la fertilité chimique d'un agroécosystème.

L'azote

Les nitrates ne présentent une différence significative que pour l'horizon 0-30cm en sortie d'hiver. En effet, les systèmes dits régénératifs obtiennent des valeurs plus élevées dans leur

horizon de surface. Ces systèmes sont caractérisés par un travail de sol réduit, une fertilisation en majorité d'origine organique et des couverts réguliers. D'autres études ont déjà montré que ces facteurs de gestion d'itinéraires techniques favorisent l'accumulation des nitrates en surface (Allam et al., 2022). Cette accumulation peut se révéler bénéfique pour les cultures lors de leur reprise de croissance au printemps mais peut être sujet au lessivage si les nitrates ne sont pas absorbés rapidement par la végétation (Hess et al., 2020).

De plus, la fertilisation organique est souvent associée à des émissions de N_2O accrues, qui est un gaz à effet de serre au pouvoir réchauffant supérieur au CO_2 (Li et al., 2023). En revanche, la fertilisation minérale, bien qu'efficace à court terme, est souvent associée à des pertes par lixiviation et également à une acidification du sol (Kuśmierz et al., 2023). Les sols labourés présentent également des risques de lessivage d'azote aggravés, pouvant contaminer les nappes phréatiques (Hess et al., 2020). Or, les systèmes conventionnels sont gérés en labour et fertilisés majoritairement par la voie minérale. Cela souligne l'intérêt des pratiques intégrant des apports organiques pour améliorer la rétention de nitrates et limiter les effets négatifs sur le pH.

L'acquisition des mesures d'azote est simple seulement si l'agriculteur effectue des analyses afin de contrôler sa fertilisation. Cependant, l'absence d'harmonisation des unités (ppm, g/kg) complique la comparaison des données et ne permet pas toujours de calculer facilement un rapport C/N, fournissant un regard plus critique sur les apports organiques et la fertilité (Zhang et al., 2020).

Le carbone

Le pourcentage en carbone ne s'est pas révélé significativement différent entre les différents systèmes. Cependant, les systèmes régénératifs et certains en transition comportent des valeurs plus élevées du carbone que les systèmes en conventionnels par exemple.

La gestion du carbone organique dans le sol varie selon les pratiques culturales (Krauss et al., 2022). Les systèmes en non-labour et ceux utilisant principalement des fertilisants organiques afficheraient des niveaux de carbone plus élevés, grâce à la réduction des perturbations du sol et à une stabilisation de la matière organique (Abid & Lal, 2008). L'augmentation du carbone lié au non-labour peut prendre du temps à montrer des différences significatives et sa séquestration peut prendre du temps (Laamrani et al., 2020). À l'inverse, le labour tend à redistribuer le carbone en profondeur et l'exposer à nouveau à l'environnement extérieur où il est soumis à des processus de minéralisation (Krauss et al., 2022).

La texture du sol joue un rôle important dans sa capacité à stocker du carbone et sa séquestration. En effet, la proportion d'argile dans le sol est directement liée à une augmentation du stockage de carbone, car les textures plus fines possèdent une meilleure capacité à protéger le carbone organique en formant des liaisons avec le complexe organo minéral (Dignac et al., 2017; Krause et al., 2018). Dans cette étude, les sols des parcelles étudiées sont de type limoneux, une texture qui favorise généralement un stockage plus important de carbone en travail du sol réduit (Abid & Lal, 2008). Si des parcelles de textures différentes sont ajoutées, le rapport carbone sur l'argile serait alors pertinent à évaluer pour comparer les parcelles entre elles.

Comme pour l'indicateur d'azote, il serait d'autant plus révélateur de parler en rapport C/N pour conclure sur la fertilité des sols. En revanche, le carbone total paraît être une mesure importante dans la qualité des sols et la capacité à séquestrer du carbone.

L'activité microbiologique générale

Les résultats de l'activité microbiologique générale ne montrent pas de différence significative entre les systèmes. L'activité microbiologique est un élément du sol qui peut varier très vite en fonction de son environnement, caractérisé par le travail du sol, les conditions d'humidité et de température, des conditions chimiques telles que le pH etc.

Par ailleurs, la préparation des échantillons de sol se fait avec 1,25g de sol, ce qui pourrait induire un effet aléatoire conséquent dans l'échantillonnage. En effet, il peut suffire que ces 1,25g comportent une grande quantité de microorganismes ou inversement.

Igalavithana et al. (2017) ont montré qu'une fertilisation à base d'engrais organiques peut engendrer une activité enzymatique significativement plus élevée, donc des valeurs de FDA plus élevées. Dans le cadre de cette étude, les parcelles apportant le plus de fertilisants organiques ne montrent cette différence.

La répartition des microorganismes dans le sol est dépendante d'une multitude de facteurs tels que le pH, la température, le contenu en eau, la matière organique, la culture en cours (Drenovsky et al., 2010; Hargreaves et al., 2015). En fait, l'activité des microorganismes étant très variable dans le temps et l'espace, il n'est pas possible de conclure sur les raisons du manque de signification.

Enfin, bien que peu coûteuse parmi les nombreuses techniques d'évaluation microbienne, cette technique demande du matériel de pointe comme un spectromètre. Elle est donc peu accessible malgré sa simplicité.

L'activité de dégradation de la matière organique

Les résultats de l'indicateur d'activité de dégradation de la matière organique via la méthode des Bait Lamina ne se sont pas révélés significatifs. Les conditions d'humidité étaient très élevées, ce qui peut avoir un impact ambivalent sur l'activité des organismes du sol. Certains groupes montrent une activité accrue dans des conditions d'humidité élevées, d'autres sont limités par l'anoxie provoquée par la saturation en eau du sol (Pelosi et al., 2020; Scheunemann & Russell, 2023). Les conditions d'humidité peuvent donc exercer une grande influence sur le taux de dégradation.

De plus, ils se pourraient que le taux de dégradation soit surestimé, car il n'est pas certain que le substrat soit assez stable dans des conditions d'humidités élevées et prolongées (Hamel et al., 2007; Scheunemann & Russell, 2023), même si des petits tests de résistances ont été menés avant la mise en place du dispositif. Bien que le taux de nutrition des organismes décomposeurs qui ressort à l'issue de ce test pouvaient se montrer révélateur dans cette étude de la fertilité et la qualité du sol, il n'a pas été concluant. Certes, l'expérience est plus rapide que le sachet de thé ou le test du slip en coton, elle ne paraît pas très fiable dans les conditions de l'année 2024.

Les vers de terre

Les résultats concernant les vers de terre ne montrent pas de différences significatives. Cependant, les parcelles bénéficiant de travail du sol réduit présentent tout de même une diversité supérieure. Cela pourrait s'expliquer par la minimisation de la perturbation du sol, permettant l'augmentation de la diversité des groupes fonctionnels (Pelosi et al., 2014).

Le groupe endogé se révèle être le plus abondant. Pelosi et al. (2014) ont montré que le travail du sol n'avait pas d'influence sur l'abondance relative spécifiquement de ce groupe, similaire à cette étude.

Les facteurs influençant les vers de terre et les effets de la présence des vers sur les propriétés du sol sont multiples et sont sujets à de nombreuses incertitudes et recherches (Ahmed & Al-Mutairi, 2022; Johnston et al., 2015; Singh et al., 2020). Cependant, le faible résultat de l'indice de biodiversité s'est déjà démarqué dans des agroécosystèmes européens. Cela pourrait être expliqué par l'emploi régulier des pesticides (Pelosi et al., 2013).

L'abondance des vers de terre ainsi que la diversité semblent être de bons indicateurs biologiques, bien qu'ils soient très variables selon les conditions du milieu. La présence des vers de terre peut favoriser la décomposition de la litière, augmentant ainsi la disponibilité des éléments nutritifs, et à terme, améliorer la fertilité (Wöhl et al., 2023).

L'indicateur de biodiversité est simple à mettre en place. Cependant, il semblerait que le calcul ne donne que peu de poids aux divers groupes fonctionnels. Ils seraient plus pertinents de descendre d'un niveau de taxon vers le genre ou le sous-groupe afin de diviser les groupes et augmenter le poids des taxons. En revanche, cela demande des connaissances approfondies dans la reconnaissance spécifique.

Enfin, la méthode par extraction de motte est fastidieuse et nécessite au minimum 2 personnes. Pour plus de précision, l'utilisation de la méthode de la moutarde serait peut-être à envisager (Pelosi et al., 2020).

Les analyses multivariées

Afin de connaître la façon dont les systèmes sont structurés, une ACP est effectuée sur les variables répétées 4 fois. Celle-ci révèle que les systèmes régénératifs et conventionnels se distinguent presque parfaitement selon les indicateurs physiques de stabilité structurale et de structure des agrégats. L'indicateur Sq et Wend sont opposés, ce qui traduit une stabilité structurale plus faible pour des scores Sq plus grands, donc une structure visuelle moins bonne.

Le système de transition présente la plus grande variabilité et balaie tout l'espace du premier plan factoriel. La position de ceux-ci au milieu fait sens : ce sont des systèmes intermédiaires dont la finalité est de se rapprocher des systèmes régénératifs sur certains indicateurs.

L'analyse des centroïdes de chaque groupe montre une différence significative, ce qui confirme que les systèmes conventionnels et régénératifs sont distincts. Il semblerait que le travail du sol, les couverts et la fertilisation organique pourraient être responsables de cette distinction, améliorant la structure et stabilité des agrégats.

L'analyse discriminante linéaire permet de confirmer que les groupes régénératifs et conventionnels sont presque distinctement séparés selon la LD1 dont le plus grand contributeur à la séparation est l'indicateur Sq. Cela confirme les résultats obtenus dans cette étude et les conclusions tirées par l'ACP mais ne montre pas de résultats complémentaires.

L'ACP de tous les indicateurs montrent que les indicateurs physiques, à savoir le Wend, Sq et le pourcentage de carbone, sont les variables les plus corrélés à la dimension 1, qui expliquent le plus gros pourcentage de variabilité du jeu de données. Dans cette analyse exploratoire, les systèmes conventionnels et régénératifs se distinguent, malgré l'ajout de nouveaux indicateurs. Les systèmes en transition présentent des caractéristiques intermédiaires.

L'ajout du rendement en variable quantitative supplémentaire permet de voir que les rendements ont été potentiellement influencés par l'azote en surface. Il pourrait être le driver des rendements en sortie d'hiver. De plus, ce vecteur des rendements pointe vers les systèmes régénératifs. Cela ne veut pas dire que les rendements sont plus élevés mais que ceux-ci sont plus stables, contrairement aux systèmes conventionnels. Cette stabilisation des rendements pourrait traduire une plus grande résilience des systèmes dits régénératifs dans des années climatiques difficiles. En effet, les systèmes régénératifs présentent des rendements plus stables, moins variables. Les systèmes conventionnels quant à eux montrent de grandes variations dans les rendements. Les épisodes d'instabilité climatique se renforçant d'année en année, il serait bénéfique pour le secteur agricole de se tourner vers des pratiques qui tendent à une plus grande résilience des systèmes.

Néanmoins, cette analyse ne bénéficie pas d'inférence permettant de confirmer les tendances globales. Elle ne consiste qu'en une analyse exploratoire et ne permet pas de prouver des relations de causalités strictes mais seulement d'émettre des hypothèses.

La robustesse des analyses statistiques pourrait être limitée par la taille restreinte de l'échantillon, qui est de 11 parcelles. La puissance des tests et la possibilité de généraliser et tirer des conclusions claires sont réduites. Par ailleurs, la diversité des indicateurs utilisés, leurs échelles différentes et leur modalité de mesures compliquent l'inférence statistique et la comparaison directe entre les variables.

7. Conclusion et perspectives

Les deux années climatiques précédentes sont connues pour avoir été particulièrement difficiles pour les agriculteurs et ont probablement eu un impact sur les résultats. Il serait intéressant de travailler dans des conditions plus favorables comme la période printanière.

Ainsi, les résultats de cette étude mettent en évidence que les systèmes régénératifs classés comme tels se distinguent des systèmes en agriculture conventionnelle. À l'issue des différentes mesures, certaines peuvent être retenues avec grand intérêt par leur aspect pratique, fiable et peu coûteux. Les indicateurs physiques qui décrivent au mieux les systèmes sont l'échelle Sq (VESS) et les variables du QuantiSlakeTest. Ces indicateurs se sont montrés les plus sensibles parmi l'ensemble des mesures. Le carbone et le pH semblent être des mesures pertinentes à retenir dans le cadre d'évaluation des sols. Enfin, les indicateurs biologiques doivent être sujet à plus de recherches et être mis en place dans des conditions environnementales favorables. Il faut retenir que les indicateurs biologiques sont très dépendants des conditions environnementales de l'agroécosystème et peuvent réagir relativement rapidement aux changements. Tous ces indicateurs sont simples à obtenir et peuvent permettre l'établissement d'un bilan rapide de la fertilité et la qualité d'un sol à l'échelle de la parcelle. D'autres indicateurs pourraient se révéler adéquats dans l'évaluation de l'état de fertilité des sols comme le rapport C/N ou des bilans d'éléments nutritifs comme le phosphore et le potassium. Des indicateurs relatifs à la dynamique de l'eau pourraient être mesurés dans conditions pédoclimatiques favorables ou encore des indicateurs de résistance à la pénétration.

Ces premiers résultats démontrent l'intérêt d'enrichir la base de données, notamment en intégrant un plus grand nombre de parcelles afin de renforcer la robustesse des tests statistiques.

Cette étude s'est concentrée sur les aspects traitant du sol et constitue un premier pas dans l'évaluation holistique d'un système entier. Il serait pertinent de traiter d'autres piliers de l'agriculture régénérative comme l'optimisation des ressources via l'utilisation des pesticides et des engrais. Les effets de ces intrants chimiques sur la vie du sol pourraient constituer des recherches ultérieures. Par ailleurs, l'impact des pratiques culturales sur la biodiversité du sol et de l'environnement pourrait être sujet à des approfondissements afin d'explorer un nouveau pilier de l'agriculture régénérative telle que présentée dans cette étude.

Enfin, cette étude pose les bases pour un projet de quantification de la qualité des sols et, à termes, quantifier des services écosystémiques dans une approche d'évaluation de la santé des sols.

Ces interactions montrent l'importance d'une gestion intégrée des sols, visant à optimiser les équilibres entre ces paramètres tout en minimisant leurs impacts négatifs sur la fertilité et la durabilité des systèmes agricoles.

8. Contribution personnelle et critique de la méthode

Cette étude a permis de lancer un nouveau projet en collaboration avec l'ASBL Regenacterre et la coopérative agricole CultivAé. L'objectif principal était d'évaluer la qualité des sols en agriculture régénérative, conformément aux critères établis dans le cahier des charges de la certification « Regenerative Agriculture », en utilisant des méthodes simples et adaptées au terrain.

Le projet s'est déroulé en plusieurs étapes. Dans un premier temps, j'ai effectué une recherche bibliographique pour recenser les pratiques existantes et les paramètres couramment utilisés pour évaluer la qualité et la fertilité des sols. Ensuite, j'ai pris contact avec les agriculteurs pour obtenir leur accord en vue de prélever des échantillons sur leurs parcelles et me procurer des analyses de sol utiles.

La phase d'échantillonnage s'est déroulée sans encombre et rapidement pour prélever dans des conditions météorologiques similaires.

Ensuite, j'ai récolté et compilé toutes les mesures et données mises à ma disposition. Tous les outils nécessaires rassemblés, j'ai effectué les analyses statistiques les plus pertinentes possibles.

Finalement, la méthode employée est en générale satisfaisante. Si je devais reprendre depuis le début, je choisirais une approche contenant plus de parcelles et moins d'indicateurs. L'approche holistique était ambitieuse, néanmoins complexe à certains moments de l'organisation de l'échantillonnage. Heureusement, j'ai pu tirer un grand nombre de leçon tout au long de ce travail sur lequel j'y ai travaillé la majeure partie seule.

9. Références

- Abdollahi, L., & Munkholm, L. J. (2014). Tillage System and Cover Crop Effects on Soil Quality : I. Chemical, Mechanical, and Biological Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 78(1), 262-270. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.07.0301>
- Abid, M., & Lal, R. (2008). Tillage and drainage impact on soil qualityI. Aggregate stability, carbon and nitrogen pools. *Soil and Tillage Research*, 100(1-2), 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.04.012>
- Ahmed, N., & Al-Mutairi, K. A. (2022). Earthworms Effect on Microbial Population and Soil Fertility as Well as Their Interaction with Agriculture Practices. *Sustainability*, 14(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/su14137803>
- Allam, M., Radicetti, E., Quintarelli, V., Petroselli, V., Marinari, S., & Mancinelli, R. (2022). Influence of Organic and Mineral Fertilizers on Soil Organic Carbon and Crop Productivity under Different Tillage Systems : A Meta-Analysis. *Agriculture*, 12(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040464>
- Askari, M. S., Cui, J., & Holden, N. M. (2013). The visual evaluation of soil structure under arable management. *Soil and Tillage Research*, 134, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.06.004>
- Augeard, B., Bresson, L. M., Assouline, S., Kao, C., & Vauclin, M. (2008). Dynamics of Soil Surface Bulk Density : Role of Water Table Elevation and Rainfall Duration. *Soil Science Society of America Journal*, 72(2), 412-423. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0429>
- Ball, B. C., Guimarães, R. M. L., Cloy, J. M., Hargreaves, P. R., Shepherd, T. G., & McKenzie, B. M. (2017). Visual soil evaluation : A summary of some applications and potential developments for agriculture. *Soil and Tillage Research*, 173, 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.006>
- Ball, B. C., Watson, C. A., & Baddeley, J. A. (2007). Soil physical fertility, soil structure and rooting conditions after ploughing organically managed grass/clover swards. *Soil Use and Management*, 23(1), 20-27. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00059.x>
- Blouin, M., Hodson, M. E., Delgado, E. A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K. R., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J. E., Cluzeau, D., & Brun, J.-J. (2013). A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, 64(2), 161-182. <https://doi.org/10.1111/ejss.12025>
- Bottinelli, N., Angers, D. A., Hallaire, V., Michot, D., Le Guillou, C., Cluzeau, D., Heddadj, D., & Menasseri-Aubry, S. (2017). Tillage and fertilization practices affect soil aggregate stability in a Humic Cambisol of Northwest France. *Soil and Tillage Research*, 170, 14-17. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.02.008>
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management : A review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., De Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., Van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

- Corbin, D., & Robertson, P. (s. d.). *Protocol—Soil Bulk Density—Deep Cores*. Consulté 3 janvier 2025, à l'adresse <https://lter.kbs.msu.edu/protocols/110>
- Dal Ferro, N., Sartori, L., Simonetti, G., Berti, A., & Morari, F. (2014). Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. *Soil and Tillage Research*, *140*, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.003>
- Dignac, M.-F., Derrien, D., Barré, P., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Freschet, G. T., Garnier, P., Guenet, B., Hedde, M., Klumpp, K., Lashermes, G., Maron, P.-A., Nunan, N., Roumet, C., & Basile-Doelsch, I. (2017). Increasing soil carbon storage : Mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *37*(2), 14. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2>
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability : Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, *15*(1), 3-11. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6)
- Drenovsky, R. E., Steenwerth, K. L., Jackson, L. E., & Scow, K. M. (2010). Land use and climatic factors structure regional patterns in soil microbial communities. *Global Ecology and Biogeography*, *19*(1), 27-39. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00486.x>
- Duru, M., Sarthou, J.-P., & Therond, O. (2022). L'agriculture régénératrice : Summum de l'agroécologie ou *greenwashing*? *Cahiers Agricultures*, *31*, 17. <https://doi.org/10.1051/cagri/2022014>
- EcoBioSoil. (s. d.). *Test Bêche Vers de Terre | EcoBioSoil*. Consulté 3 janvier 2025, à l'adresse <https://projets.ecobio.univ-rennes.fr/opvt/testb%C3%A0cheversdeterre>
- FAO. (2020). *Towards a definition of soil health*.
- FAO. (2022). *Soils for nutrition : State of the art*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0900en>
- Feng, W., Plante, A. F., Aufdenkampe, A. K., & Six, J. (2014). Soil organic matter stability in organo-mineral complexes as a function of increasing C loading. *Soil Biology and Biochemistry*, *69*, 398-405. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.11.024>
- Frankel-Goldwater, L., Wojtynia, N., & Dueñas-Ocampo, S. (2024). Healthy people, soils, and ecosystems : Uncovering primary drivers in the adoption of regenerative agriculture by US farmers and ranchers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *7*, 1070518. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1070518>
- Friedrichsen, C. N., Hagen-Zakarison, S., Friesen, M. L., McFarland, C. R., Tao, H., & Wulfhorst, J. D. (2021). Soil health and well-being : Redefining soil health based upon a plurality of values. *Soil Security*, *2*, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100004>
- Genot, Renneson, Colinet, G., Goffaux, Cugnon, Toussaint, Buffet, & Oger. (2012). *Base de données sols de REQUASUD, 3ème synthèse*. https://www.requasud.be/wp-content/uploads/2017/07/brochure_sols_2012.pdf
- Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A., & Sumberg, J. (2021). Regenerative Agriculture : An agronomic perspective. *Outlook on Agriculture*, *50*(1), 13-25. <https://doi.org/10.1177/0030727021998063>

- 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(2), 199-204. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.02.004>
- Hargreaves, S. K., Williams, R. J., & Hofmockel, K. S. (2015). Environmental Filtering of Microbial Communities in Agricultural Soil Shifts with Crop Growth. *PLOS ONE*, 10(7), e0134345. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134345>
- Helling, B., Pfeiff, G., & Larink, O. (1998). A comparison of feeding activity of collembolan and enchytraeid in laboratory studies using the bait-lamina test. *Applied Soil Ecology*, 7(3), 207-212. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(97\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(97)00065-6)
- Hess, L. J. T., Hinckley, E.-L. S., Robertson, G. P., & Matson, P. A. (2020). Rainfall intensification increases nitrate leaching from tilled but not no-till cropping systems in the U.S. Midwest. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 290, 106747. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106747>
- Igalavithana, A. D., Lee, S. S., Niazi, N. K., Lee, Y.-H., Kim, K. H., Park, J.-H., Moon, D. H., & Ok, Y. S. (2017). Assessment of Soil Health in Urban Agriculture : Soil Enzymes and Microbial Properties. *Sustainability*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su9020310>
- IRM. (2025). *IRM - Année*. KMI. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2024/annee>
- Johannes, A., Weisskopf, P., Boivin, P., Gondret, K., Leopizzi, P., Lamy, F., Füllemann, F., Boizard, H., Baize, D., Ball, B., Cloy, J., Munkholm, L., & Guimarães. (2020, juin 10). *VESS2020 Evaluation visuelle de la structure du sol*. Agroscope. <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/publication/44240>
- Johnston, A. S. A., Sibly, R. M., Hodson, M. E., Alvarez, T., & Thorbek, P. (2015). Effects of agricultural management practices on earthworm populations and crop yield : Validation and application of a mechanistic modelling approach. *Journal of Applied Ecology*, 52(5), 1334-1342. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12501>
- Kapoor, P., Kamboj, M., Langaya, S., Swami, S., Yadav, S., Panigrahi, S., Goswami, R., & Saini, M. (2024). Biotechnology for Advancing Regenerative Agriculture : Opportunities and Challenges. In S. Kumar, R. S. Meena, P. Sheoran, & M. K. Jhariya (Éds.), *Regenerative Agriculture for Sustainable Food Systems* (p. 453-493). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-97-6691-8_14
- Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality : Why and how? *Geoderma*, 114(3), 145-156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)
- Kautz, T., Perkons, U., Athmann, M., Pude, R., & Köpke, U. (2013). Barley roots are not constrained to large-sized biopores in the subsoil of a deep Haplic Luvisol. *Biology and Fertility of Soils*, 49(7), 959-963. <https://doi.org/10.1007/s00374-013-0783-9>
- Keuskamp, J. A., Dingemans, B. J. J., Lehtinen, T., Sarneel, J. M., & Hefting, M. M. (2013). Tea Bag Index : A novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(11), 1070-1075. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>
- Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., & Bowyer, J. (2023). Regenerative Agriculture—A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. *Sustainability*, 15(3), 2338. <https://doi.org/10.3390/su15032338>

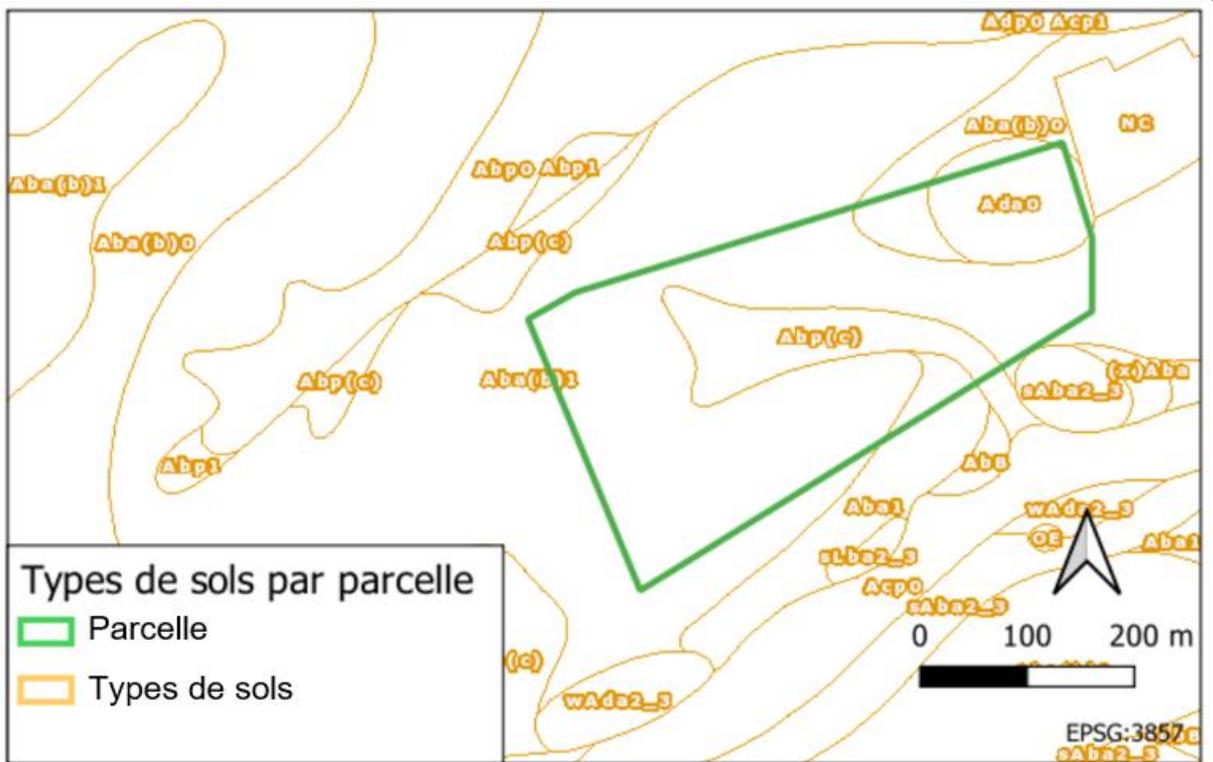
- Krause, L., Rodionov, A., Schweizer, S. A., Siebers, N., Lehdorff, E., Klumpp, E., & Amelung, W. (2018). Microaggregate stability and storage of organic carbon is affected by clay content in arable Luvisols. *Soil and Tillage Research*, 182, 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.05.003>
- Krauss, M., Wiesmeier, M., Don, A., Cuperus, F., Gattinger, A., Gruber, S., Haagsma, W. K., Peigné, J., Palazzoli, M. C., Schulz, F., Van Der Heijden, M. G. A., Vincent-Caboud, L., Wittwer, R. A., Zikeli, S., & Steffens, M. (2022). Reduced tillage in organic farming affects soil organic carbon stocks in temperate Europe. *Soil and Tillage Research*, 216, 105262. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105262>
- Kunhikrishnan, A., Thangarajan, R., Bolan, N. S., Xu, Y., Mandal, S., Gleeson, D. B., Seshadri, B., Zaman, M., Barton, L., Tang, C., Luo, J., Dalal, R., Ding, W., Kirkham, M. B., & Naidu, R. (2016). Functional Relationships of Soil Acidification, Liming, and Greenhouse Gas Flux. In *Advances in Agronomy* (Vol. 139, p. 1-71). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.05.001>
- Kuśmierz, S., Skowrońska, M., Tkaczyk, P., Lipiński, W., & Mielniczuk, J. (2023). Soil Organic Carbon and Mineral Nitrogen Contents in Soils as Affected by Their pH, Texture and Fertilization. *Agronomy*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010267>
- Laamrani, A., Voroney, P. R., Berg, A. A., Gillespie, A. W., March, M., Deen, B., & Martin, R. C. (2020). Temporal Change of Soil Carbon on a Long-Term Experimental Site with Variable Crop Rotations and Tillage Systems. *Agronomy*, 10(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060840>
- LaCanne, C. E., & Lundgren, J. G. (2018). Regenerative agriculture : Merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ*, 6, e4428. <https://doi.org/10.7717/peerj.4428>
- Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47(4), 425-437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Les vers de terre | EcoBioSoil.* (s. d.). Consulté 3 janvier 2025, à l'adresse <https://projets.ecobio.univ-rennes.fr/opvt/node/3>
- Li, X., Qiao, L., Huang, Y., Li, D., Xu, M., Ge, T., Meersmans, J., & Zhang, W. (2023). Manuring improves soil health by sustaining multifunction at relatively high levels in subtropical area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 353, 108539. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108539>
- Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J., & Siczek, A. (2012). Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil and Tillage Research*, 121, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.013>
- Luján Soto, R., Cuéllar Padilla, M., Rivera Méndez, M., Pinto-Correia, T., Boix-Fayos, C., & De Vente, J. (2021). Participatory monitoring and evaluation to enable social learning, adoption, and out-scaling of regenerative agriculture. *Ecology and Society*, 26(4). <https://doi.org/10.5751/es-12796-260429>

- Meersmans, J., Colinet, G., & Negassa, W. (2024). Editorial : Soil health, functions, and ecosystem services: insights into soil parameters and methods of integration. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1358548. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1358548>
- Minet, O., Ferber, F., Jacob, L., Lecler, B., Agneessens, R., Cugnon, T., Decruyenaere, V., Genot, V., Gofflot, S., Pitchugina, E., Planchon, V., Renneson, M., Sinnaeve, G., Wavreille, B., Dardenne, P., & Baeten, V. (2016). *La spectrométrie proche infrarouge*. Requasud. https://www.requasud.be/wp-content/uploads/2017/07/brochure_requasud_spectrometrie_proche_infrarouge.pdf
- Muñoz-Rojas, M. (2018). Soil quality indicators : Critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007>
- Nations, U. (s. d.). *Population | Nations Unies*. United Nations; United Nations. Consulté 3 janvier 2025, à l'adresse <https://www.un.org/fr/global-issues/population>
- Newton, P., Civita, N., Frankel-Goldwater, L., Bartel, K., & Johns, C. (2020). What Is Regenerative Agriculture? A Review of Scholar and Practitioner Definitions Based on Processes and Outcomes. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 577723. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.577723>
- Nielsen, M. N., & Winding, A. (2002). *Microorganisms as Indicators of Soil Health*.
- Obalum, S. E., Uteau-Puschmann, D., & Peth, S. (2019). Reduced tillage and compost effects on soil aggregate stability of a silt-loam Luvisol using different aggregate stability tests. *Soil and Tillage Research*, 189, 217-228. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.002>
- OGM autorisés. (2016, avril 4). SPF Santé publique. <https://www.health.belgium.be/fr/animaux-et-vegetaux/vegetaux/organismes-genetiquement-modifies-ogm/banques-de-donnees-ogm/ogm>
- Pacte vert pour l'Europe. (2024). Consilium. <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/green-deal/>
- Paz-Ferreiro, J., & Fu, S. (2016). Biological Indices for Soil Quality Evaluation : Perspectives and Limitations. *Land Degradation & Development*, 27(1), 14-25. <https://doi.org/10.1002/ldr.2262>
- Peigné, J. (2018, novembre). *Mémoire d'Habilitation à Diriger la Recherche (HDR) : Les pratiques de l'agriculture de conservation : un levier d'amélioration de la fertilité des sols et d'innovation en agriculture biologique ?* ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/328902506_Memoire_d'Habilitation_a_Diriger_la_Recherche_HDR_Les_pratiques_de_l'agriculture_de_conservation_un_levier_d'amelioration_de_la_fertilite_des_sols_et_d'innovation_en_agriculture_biologique
- Peigné, J., Ball, B. C., Roger-Estrade, J., & David, C. (2007). Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management*, 23(2), 129-144. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00082.x>
- Pelosi, C., Boros, G., van Oort, F., & Schmidt, O. (2020). *Soil Oligochaeta communities after 9 decades of continuous fertilization in a bare fallow experiment*. <https://doi.org/10.25674/SO92ISS2PP129>
- Pelosi, C., Pey, B., Hedde, M., Caro, G., Capowiez, Y., Guernion, M., Peigné, J., Piron, D., Bertrand, M., & Cluzeau, D. (2014). Reducing tillage in cultivated fields increases

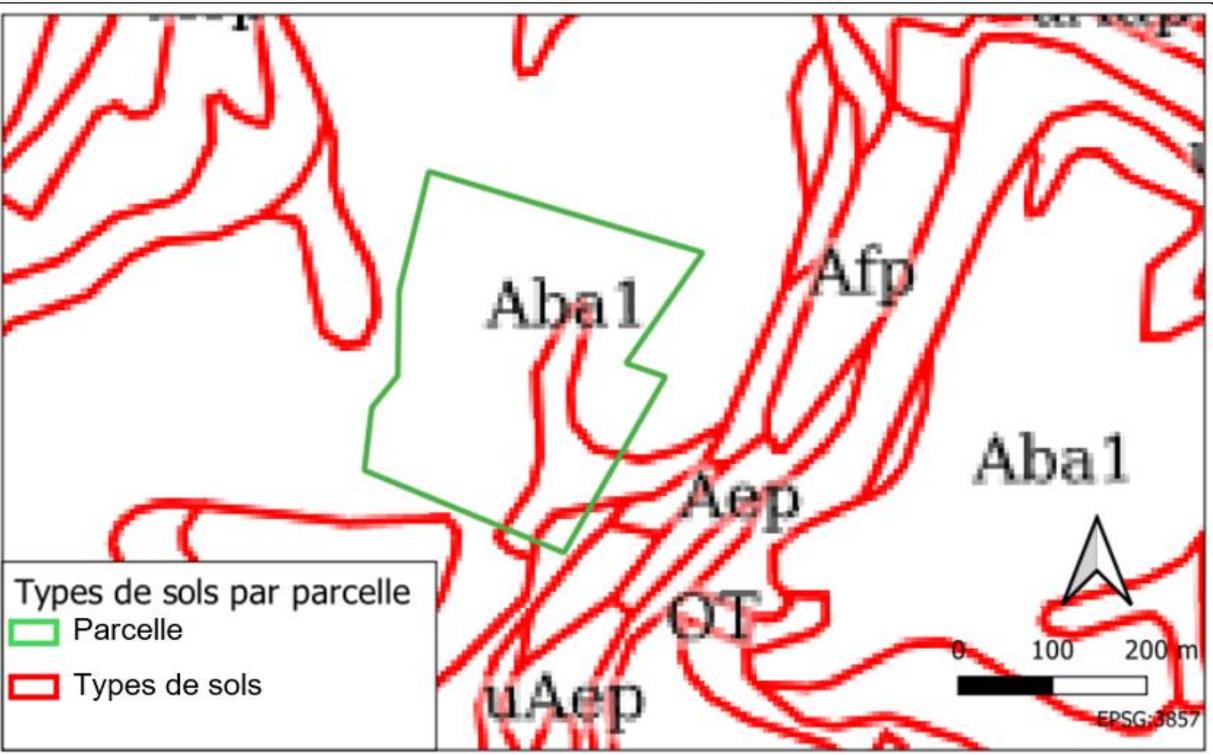
- earthworm functional diversity. *Applied Soil Ecology*, 83, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.10.005>
- Pelosi, C., Toutous, L., Chiron, F., Dubs, F., Hedde, M., Muratet, A., Ponge, J.-F., Salmon, S., & Makowski, D. (2013). Reduction of pesticide use can increase earthworm populations in wheat crops in a European temperate region. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 181, 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.003>
- Pères, G., Vandenbulcke, F., Guernion, M., Hedde, M., Beguiristain, T., Douay, F., Houot, S., Piron, D., Richard, A., Bispo, A., Grand, C., Galsomies, L., & Cluzeau, D. (2011). Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment. An example from the national Bioindicator programme (France). *Pedobiologia*, 54, S77-S87. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.09.015>
- Phalempin, M., Lippold, E., Vetterlein, D., & Schlüter, S. (2021). Soil texture and structure heterogeneity predominantly governs bulk density gradients around roots. *Vadose Zone Journal*, 20(5), e20147. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20147>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H.-J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions : A review. *Geoderma*, 314, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2024). Half of the world's habitable land is used for agriculture. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/global-land-for-agriculture>
- Rodale. (s. d.). Regenerative Organic Agriculture. *Rodale Institute*. Consulté 5 janvier 2025, à l'adresse <https://rodaleinstitute.org/why-organic/organic-basics/regenerative-organic-agriculture/>
- Rucknagel, J., Hofmann, B., Paul, R., Christen, O., & Hulsbergen, K. (2007). Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil and Tillage Research*, 92(1-2), 213-220. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.004>
- Scheunemann, N., & Russell, D. J. (2023). Hydrological regime and forest development have indirect effects on soil fauna feeding activity in Central European hardwood floodplain forests. *Nature Conservation*, 53, 257-278. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.53.106260>
- Schreefel, L., De Boer, I. J. M., Timler, C. J., Groot, J. C. J., Zwetsloot, M. J., Creamer, R. E., Schrijver, A. P., Van Zanten, H. H. E., & Schulte, R. P. O. (2022). How to make regenerative practices work on the farm : A modelling framework. *Agricultural Systems*, 198, 103371. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103371>
- Schreefel, L., Schulte, R. P. O., De Boer, I. J. M., Schrijver, A. P., & Van Zanten, H. H. E. (2020). Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security*, 26, 100404. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>
- Siebrecht, N. (2020). Sustainable Agriculture and Its Implementation Gap—Overcoming Obstacles to Implementation. *Sustainability*, 12(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/su12093853>
- Singh, S., Singh, J., Vig, A. P., Verma, F., & Suthar, S. (2020). Earthworm Communities and Soil Structural Properties. In S. A. Bhat, A. P. Vig, F. Li, & B. Ravindran (Éds.), *Earthworm Assisted Remediation of Effluents and Wastes* (p. 333-350). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4522-1_19

- SPW. (2024). *Sols—État de l'environnement wallon*. Etat de l'environnement wallon. <https://etat.environnement.wallonie.be/home/diagnostic/sols-1.html>
- Stellacci, A. M., Castellini, M., Diacono, M., Rossi, R., & Gattullo, C. E. (2021). Assessment of Soil Quality under Different Soil Management Strategies: Combined Use of Statistical Approaches to Select the Most Informative Soil Physico-Chemical Indicators. *Applied Sciences*, *11*(11), 5099. <https://doi.org/10.3390/app11115099>
- Stockdale, E. a., Shepherd, M. a., Fortune, S., & Cuttle, S. p. (2002). Soil fertility in organic farming systems – fundamentally different? *Soil Use and Management*, *18*(s1), 301-308. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00272.x>
- Thoumazeau, A., Bessou, C., Renevier, M.-S., Trap, J., Marichal, R., Mareschal, L., Decaëns, T., Bottinelli, N., Jaillard, B., Chevallier, T., Suvannang, N., Sajjaphan, K., Thaler, P., Gay, F., & Brauman, A. (2019). Biofunctool® : A new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. *Ecological Indicators*, *97*, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.023>
- Utilisation du sol* | *Statbel*. (2024). <https://statbel.fgov.be/fr/themes/environnement/sol/utilisation-du-sol#news>
- Vanwindekens, F. M., & Hardy, B. F. (2023). The QuantiSlakeTest, measuring soil structural stability by dynamic weighing of undisturbed samples immersed in water. *SOIL*, *9*(2), 573-591. <https://doi.org/10.5194/soil-9-573-2023>
- Vlaud, V., & Lesaint, L. (s. d.). *Protocole d'évaluation du stockage additionnel de carbone dans les sols au voisinage de haies*. AFAC Agroforesteries. https://afac-agroforesteries.fr/wp-content/uploads/2023/01/mep_fiche_methodo_C_sol_V2.pdf
- Wöhl, L., Ruf, T., Emmerling, C., Thiele, J., & Schrader, S. (2023). Assessment of Earthworm Services on Litter Mineralisation and Nutrient Release in Annual and Perennial Energy Crops (*Zea mays* vs. *Silphium perfoliatum*). *Agriculture*, *13*(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020494>
- Xu, N., Amgain, N. R., Rabbany, A., Capasso, J., Korus, K., Swanson, S., & Bhadha, J. H. (2022). Interaction of soil health indicators to different regenerative farming practices on mineral soils. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, *5*(1), e20243. <https://doi.org/10.1002/agg2.20243>
- Yang, T., Siddique, K. H. M., & Liu, K. (2020). Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review. *Global Ecology and Conservation*, *23*, e01118. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01118>
- Zhang, J., He, N., Liu, C., Xu, L., Chen, Z., Li, Y., Wang, R., Yu, G., Sun, W., Xiao, C., Chen, H. Y. H., & Reich, P. B. (2020). Variation and evolution of C:N ratio among different organs enable plants to adapt to N-limited environments. *Global Change Biology*, *26*(4), 2534-2543. <https://doi.org/10.1111/gcb.14973>
- Zhang, M., Dai, S., Gul, S., He, L., Chen, H., & Liu, D. (2024). Effect of Plow Pan on the Redistribution Dynamics of Water and Nutrient Transport in Soils. *Sustainability*, *16*(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/su16208859>
- Zhao, X., He, C., Liu, W.-S., Liu, W.-X., Liu, Q.-Y., Bai, W., Li, L.-J., Lal, R., & Zhang, H.-L. (2022). Responses of soil pH to no-till and the factors affecting it: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, *28*(1), 154-166. <https://doi.org/10.1111/gcb.15930>

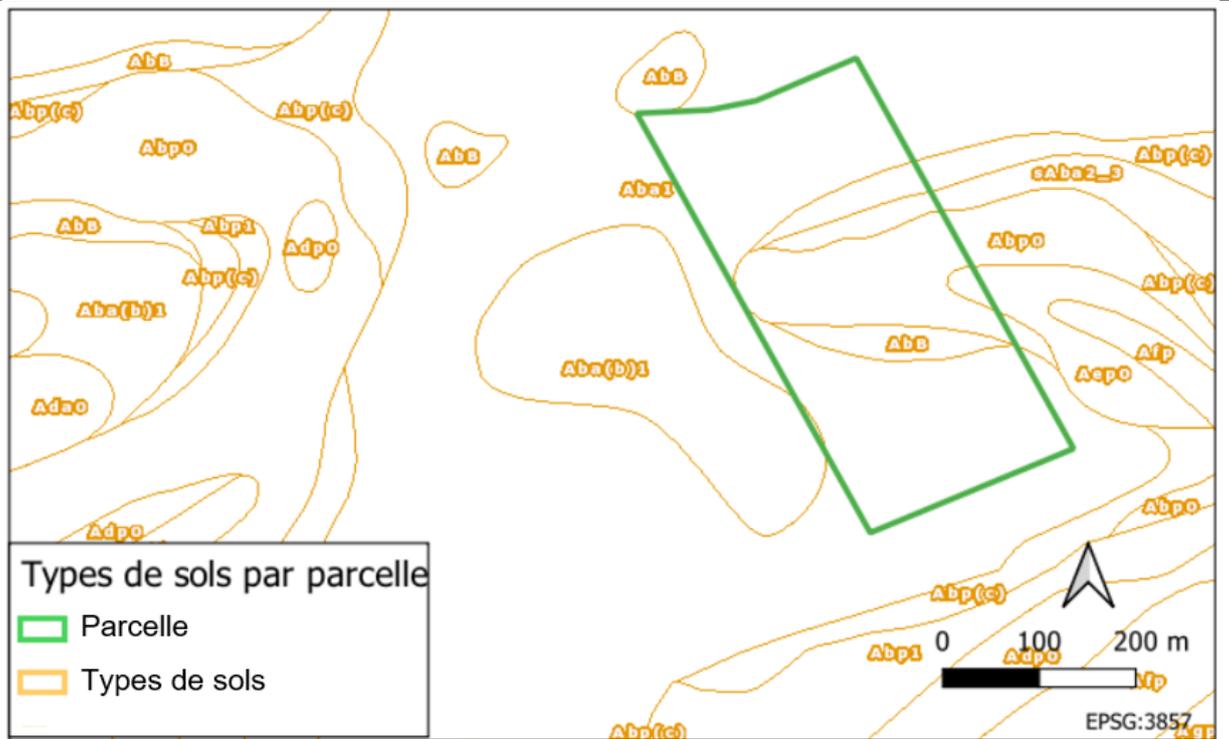
R3



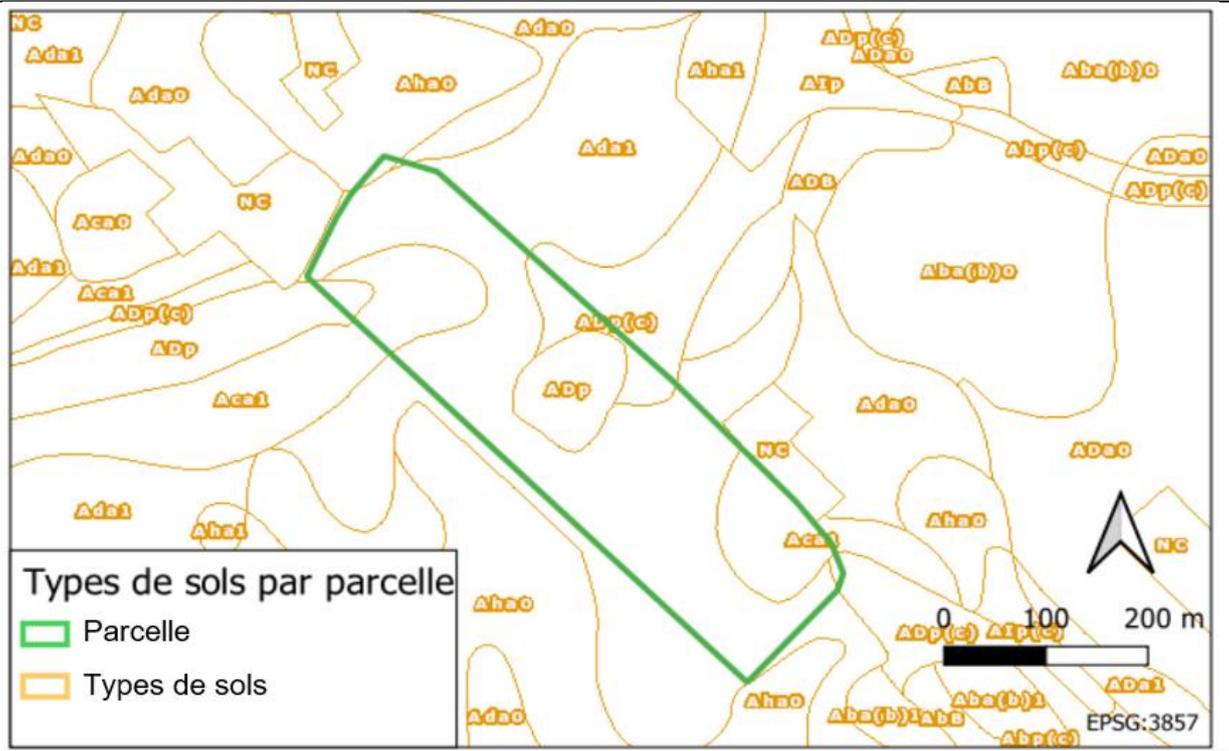
T1



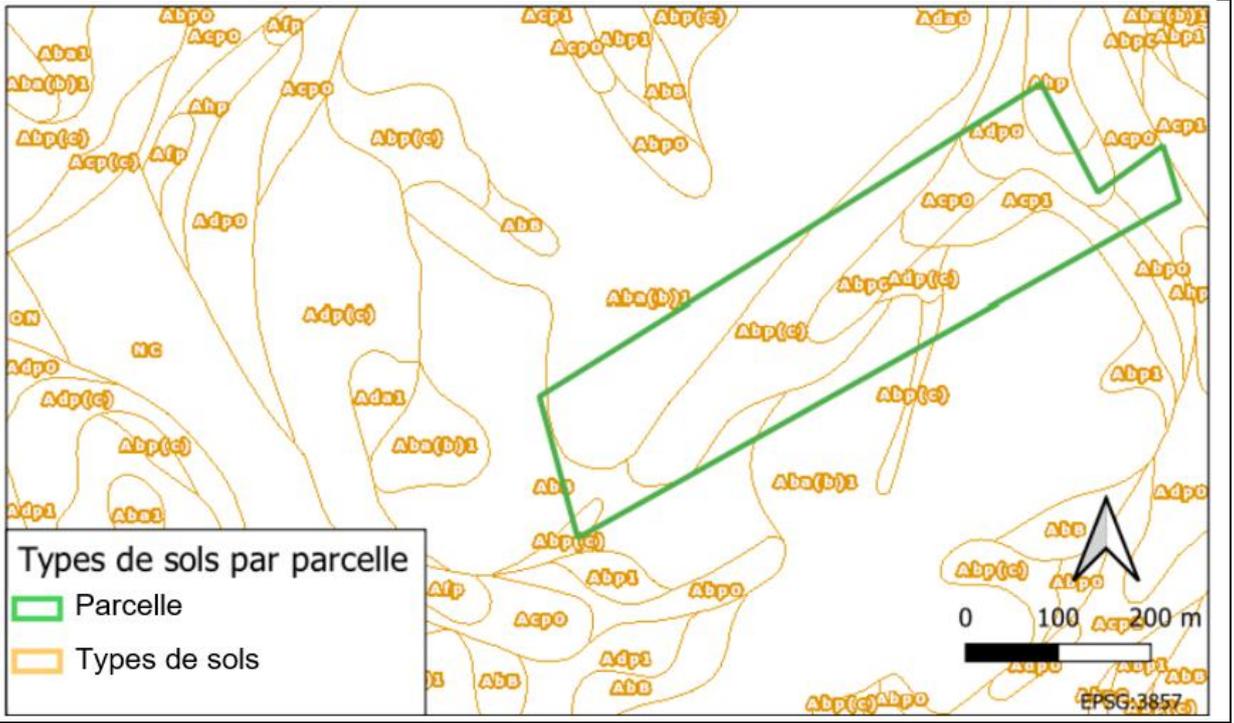
C1



C2



C3

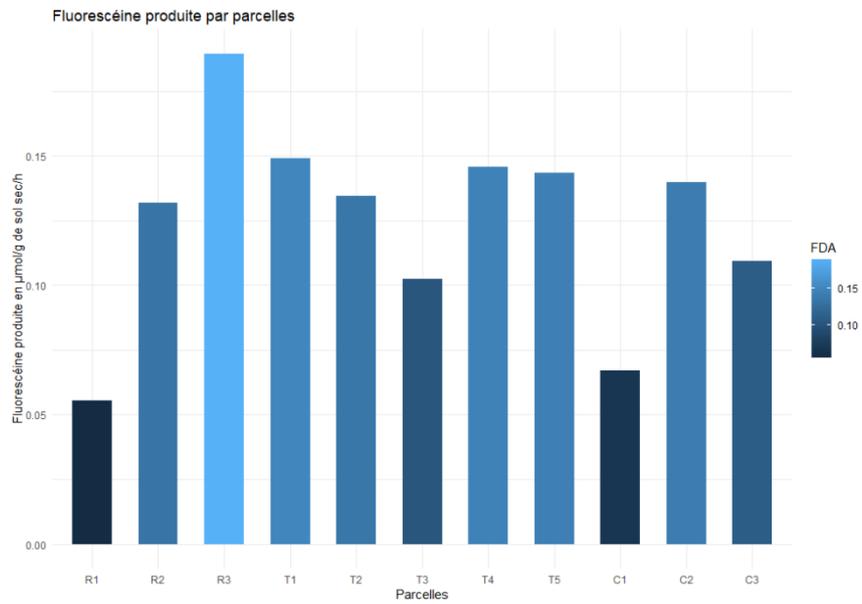


Annexe 2 : données complètes des parcelles

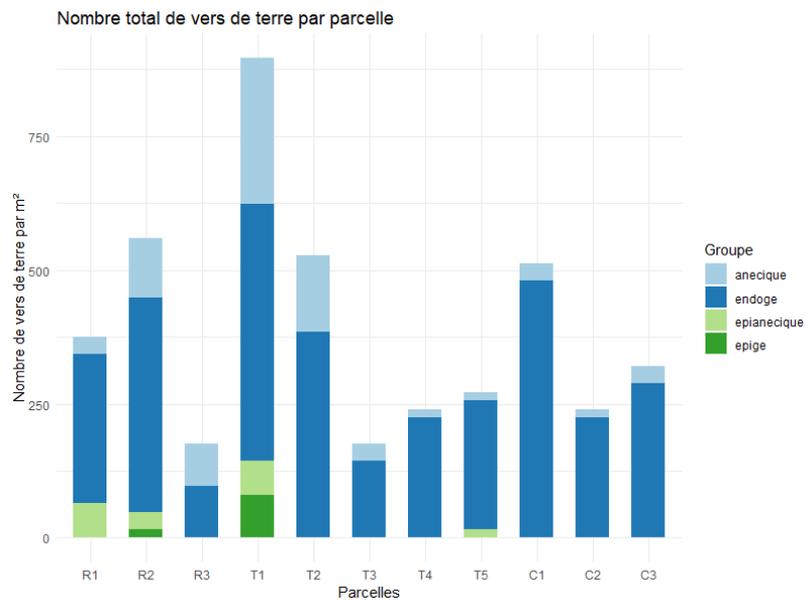
Parcelle	Système	Type de sol	Précédent	Travail du sol	Date de semis	Fertilisation
R1	Régénératif	Limoneux	Betterave sucrière	TCS léger	Novembre	Mixte
R2	Régénératif	Limoneux	Froment d'hiver	TCS léger	Mars	Mixte
R3	Régénératif	Limoneux	Froment d'hiver	TCS léger	Janvier	Mixte
T1	Transition	Limoneux	Colza	TCS léger	Mars	Minérale
T2	Transition	Limoneux	Froment d'hiver	TCS léger	Janvier	Minérale
T3	Transition	Limoneux	Lin	Labour	Novembre	Minérale
T4	Transition	Limoneux	Betterave sucrière	Labour	Novembre	Minérale
T5	Transition	Limoneux	Pomme de terre	Labour	Novembre	Minérale
C1	Conventionnel	Limoneux	Froment d'hiver	Labour	Mars	Minérale
C2	Conventionnel	Limoneux	Froment d'hiver	Labour	Novembre	Minérale
C3	Conventionnel	Limoneux	Froment d'hiver	Labour	Janvier	Minérale

Parcelle	Couverts diversifiés >2 espèces	Destruction couvert	Couverture du sol <2 mois	Labour depuis >20 ans	Rotation >4 espèces	Cultures associées	Culture (semi)pérenne	Bétail
R1	o		o	o	o	o		o
R2	o		o	o	o	o	o	o
R3	o		o	o	o	o		o
T1	o		o	o	o	o		
T2	o		o	o	o			
T3	o							
T4	o				o			
T5	o				o	o	o	o
C1					o			
C2					o			
C3					o			

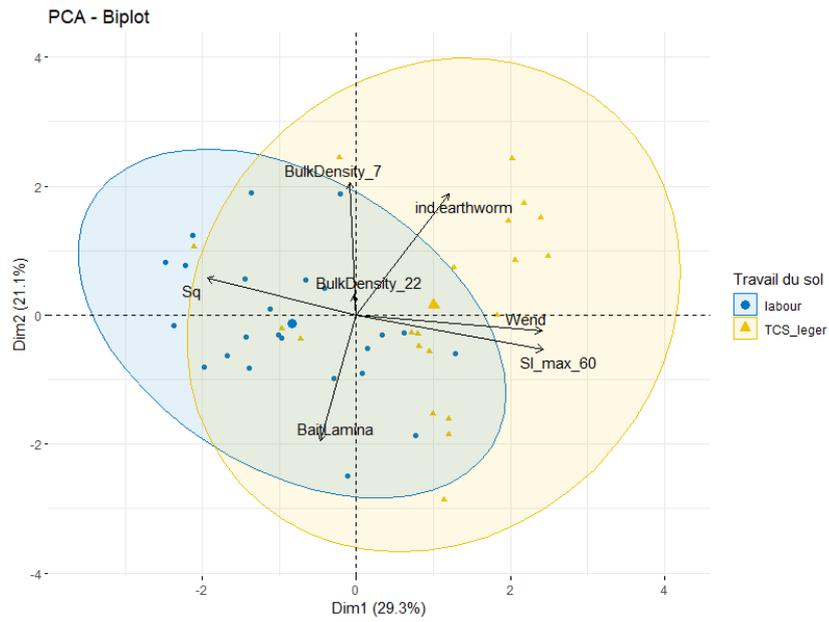
Annexe 3 : résultats supplémentaires



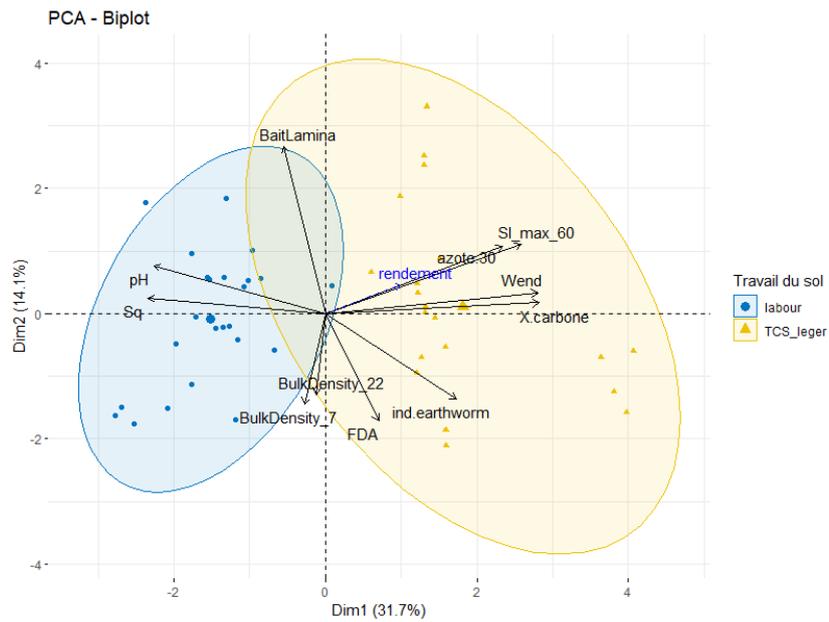
Supplementary 1 : Graphique de la production de fluorescéine par parcelles en $\mu\text{mol/g/h}$.



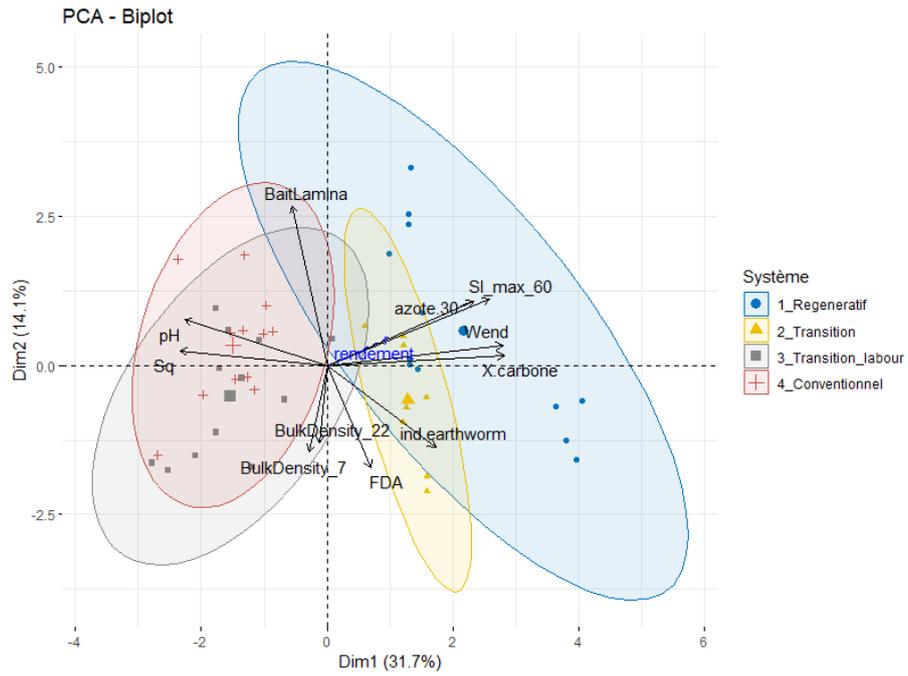
Supplementary 2 : Graphique de l'abondance et de la diversité des vers de terre en fonction de la parcelle et du système.



Supplementary 3 : ACP biplot des indicateurs mesurés légendée en type de travail du sol. Permanova : p-valeur <0.001***.



Supplementary 4 : ACP biplot de tous les indicateurs, légendée selon le type de travail du sol.



Supplementary 5 : ACP biplot selon 4 systèmes différents. Ajout du groupe 'transition en labour' : distinction du travail du sol selon le type de travail du sol.

Annexe 4 : protocoles détaillés des indicateurs

Protocole adapté de KBS et de l'INRAE (Corbin & Robertson, s. d.; Vlaud & Lesaint, s. d.).

Matériel

- Bêche
- Transplantoir
- Cylindre en acier inoxydable de volume connu (260cm³)
- Tête de frappe en acier inoxydable avec trait de démarcation
- Maillet
- Couteau à enduis ou truelle
- Couteau
- Sachets préalablement étiquetés
- Barquettes en aluminium pour le séchage
- Étuve
- Balance

Méthode d'échantillonnage

- Repérer au préalable sur WalOnMap les types de sols.
- Repérer une placette dans un endroit homogène et représentatif de la parcelle.
- Creuser jusqu'à 5cm de profondeur.
- Enfoncez le cylindre grâce à la tête de frappe.
- Creuser autour du cylindre et insérer le couteau à enduis sous le cylindre afin de l'extraire complètement rempli.
- Gratter délicatement le dessus des parties ouvertes du cylindre afin d'obtenir une motte du volume attendu.
- Démouler le cylindre dans un sachet préalablement étiqueté avec les informations suivantes : nom de la parcelle, numéro de la placette et profondeur.
- Répéter la manipulation à 20cm de profondeur.

Au laboratoire

- Peser les mottes humides.
- Placer dans les barquettes d'aluminium compatibles à l'étuve.
- Placer les échantillons dans l'étuve au moins 48 heures à 60°C.
- Après le temps requis, repeser les échantillons secs.
- Introduire les valeurs dans le calcul de la densité apparente :

$$Da = \frac{m_s}{V}$$

Da pour la densité apparente [g/cm³], m_s pour la masse sèche [g] et V pour le volume du cylindre et de la motte [cm³].

Annexe 5 : protocole VESS

VESS ²⁰²⁰ Version 10.06.2020	Couche entière: taille des agrégats/mottes	Agrégat/motte intact		Résistance <small>[observable seulement en conditions d'humidité optimales, sinon se référer à "aspect après ouverture"]</small>	Ouvrir (briser) la motte	Taille et forme des agrégats/fragments ouverts	Aspect après "ouverture"		Racines et couleurs <small>[racines observables uniquement quand les cultures sont bien établies]</small>
		Taille	Forme				Forme	Porosité	
Sq1 Très bien (friable)		La plupart font moins de 6 mm <small>[critère à exclure si travail du sol récent -- > se référer uniquement à la forme]</small>	Grumeleux. Agrégats petits et arrondis	Agrégats se désagrègent très facilement avec les doigts	Motte poreuse (ouverte): motte colorisable par des racines. Lorsqu'on ouvre la motte, elle se brise de façon irrégulière. Pas exactement où on veut. Pour Sq1-2 la motte semble être composée de plus petits agrégats.	 1.5 cm	Les agrégats sont composés de plus petits agrégats, maintenus ensemble par des racines	Très poreux	Racines à l'intérieur des agrégats
Sq2 Bien (intact)		De 2 mm à 7 cm <small>[critère à exclure si travail du sol récent -- > se référer uniquement à la forme]</small>	Agrégats arrondis. Pas de mottes fermées	Agrégats se désagrègent facilement avec les doigts	Motte non poreuse (fermée): motte difficilement ou pas colorisable par les racines. Lorsqu'on ouvre la motte, elle se brise exactement où on veut ou bien le long de fissures et révèle des faces planes.	 6 cm	L'ouverture des agrégats révèle quelques agrégats plus petits et des faces irrégulières	Poreux	Racines à l'intérieur des agrégats
Sq3 Moyen (ferme)		De 2 mm à 10 cm. 2/3 font plus de 2cm	Mélange d'agrégats arrondis de différentes tailles. Mottes anguleuses fermées aussi possible	La plupart des agrégats se désagrègent facilement entre les doigts		 faces légèrement irrégulières	L'ouverture révèle des faces plus ou moins rugueuses. Possibilité de faces planes	Peu poreux. Présence possible de quelques macropores et fissures.	Racines en général dans les agrégats
Sq4 Mauvais (compact)		Environ 2/3 des mottes font plus de 10 cm. 1/3 des mottes peuvent faire moins de 7 cm	Motte fermée sub- angulaire. Possibilité de bords anguleux. Structure lamellaire ou fissurée	Assez difficile de briser les mottes avec une seule main	Motte non poreuse (fermée): motte difficilement ou pas colorisable par les racines. Lorsqu'on ouvre la motte, elle se brise exactement où on veut ou bien le long de fissures et révèle des faces planes.	 13 cm macropores distincts face plane	L'ouverture des mottes révèle des faces plutôt planes	Peu ou pas de porosité visible sauf macropores biologiques	Racines généralement regroupées dans les macropores et fissures ou autour des mottes fermées
Sq5 Très mauvais (très compact)		La plupart font plus de 10 cm	Motte fermée anguleuse	Très difficile de briser les mottes avec la main		 bords anguleux 15 cm racines restreintes	Révèle des faces planes avec des bords anguleux. Possible de faire des cubes à bords nets	Non poreux. Porosité restreinte à quelques macropores et fissures	Zones anoxiques avec couleur gris- bleu possible . S'il y a des racines, elles sont uniquement dans les fissures ou autour des mottes





VESS₂₀₂₀ Evaluation visuelle de la structure du sol (v.10.06.2020)

Méthodologie sur le terrain

Équipement? Bêche, mètre, appareil photo, papier, crayon, bêche.

A quel moment? Éviter le sol trop sec (dur) ou trop humide (déformable)

Éviter un travail du sol récent. Privilégier un moment où les racines sont bien visibles.

Où et combien? 5 prélèvements sont nécessaires pour évaluer une parcelle homogène.

Comment procéder?

1. Extraire un bloc de sol avec la bêche de 25 à 35 cm de profondeur
 - **Ne pas piétiner ou compresser la zone qui va être évaluée avec la bêche.**
 - Il peut être utile d'effectuer un «pré-trou», afin de faciliter l'extraction d'un bloc.
 - Pour les sols labourés, **le bloc doit comprendre la semelle de labour.**
2. Ouvrir le bloc et manipuler avec précaution pour révéler des possibles couches compactes **la méthode de labour.**
 - Soit ouvrir comme un livre pour révéler la structure.
 - Soit en enlevant les traces de tassement causées par la bêche.
3. Identifier les couches
 - Observer s'il y a des changements dans la structure du sol (compacité, taille et forme des agrégats ou des mottes, comportement des racines) et identifier le nombre de couches avec des structures différentes.
 - Mesurer l'épaisseur de chaque couche.
 - Noter chaque couche individuellement à l'aide de la grille d'évaluation.
 - Si le bloc contient le sous-sol, **évaluer le sous-sol séparément avec la fiche SubVESS₂₀₂₀**.
4. Observer et noter les agrégats et les mottes
 1. Commencer par observer les agrégats/mottes entiers pour évaluer leurs tailles et leurs formes générales (arrondis? anguleux?). Identifier à quelle note cela correspond dans la grille.
 2. Puis ouvrir (briser) ces agrégats/mottes pour révéler leurs structures internes (sont-ils composés de plus petits agrégats? Sont-ils poreux? Les racines passent-elles partout?). Confirmer (ou pas) la note choisie.



Video explicative de la méthode sur la chaîne Youtube Agroscopevideo

Extraction d'un bloc de sol avec «pré-trou»

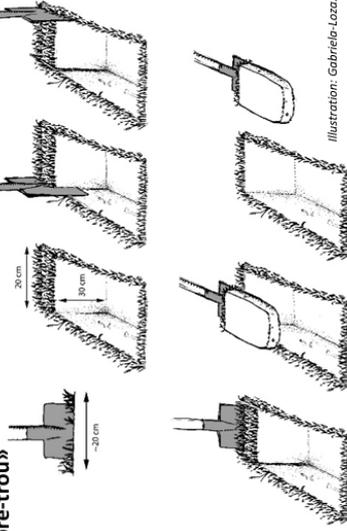


Illustration: Gabriela-Laza.com



Adaptation aux sols remaniés. Ces sols sont plus hétérogènes que des sols naturels. Les différentes qualités structurales ne sont pas distribuées uniquement verticalement en couches, mais également latéralement au sein d'une couche. Il faut donc noter pour chaque couche la proportion de chaque type de qualité structurale et faire une moyenne pondérée de ces notes pour la couche. La moyenne pondérée de la couche sera ensuite utilisée pour calculer la moyenne pondérée du bloc. Cette façon de faire permet également de garder une trace de l'hétérogénéité observée.

Calcul de la note globale du bloc

Note du bloc = [(épaisseur couche_1 x note couche_1) + (épaisseur couche_2 x note couche_2) + (épaisseur couche_n x note couche_n)] / épaisseur totale du bloc

Exemple de calcul: Bloc de 27 cm qui comprend une couche de 9 cm d'épaisseur ayant une note de Sq2 et une couche de 18 cm d'épaisseur ayant une note de Sq3.

Score du bloc = [(9x2)+(18x3)]/27 = 2.7



Application VESS

Une application pour smartphone et iPhone est disponible gratuitement



Adaptation de la fiche VESS (Ball et al., 2007; Guimarães et al., 2011) (https://www.sruc.ac.uk/info/120625/visual_evaluation_of_soil_structure) Adaptation effectuée dans le cadre du projet STRUDEL (www.strudel.agroscope.ch)

Contact: Alice Johannes, Agroscope (alice.johannes@agroscope.admin.ch), Frédéric Lamy (Changins), François Rüllemann (DGE Vaud), Hubert Boizard (INRAE), Denis Baize (INRAE), Bruce Ball (SRUC), Joanna Cloy (SRUC), Lars Munkholm (Aarhus University), Rachel Guimarães (UTPR)



Annexe 6 : Protocole hydrolyse de la fluorescéine diacétate comme mesure de l'activité microbienne totale du sol

A. Réactifs

- Tampon phosphate à pH 7.6
- Acétone pure : Lot #22114003
- Fluorescéine diacétate en poudre (Sigma-aldrich) Lot #MKCC8346
- Fluorescéine en poudre (Sigma-aldrich)

B. Avant de commencer

- Préparer le tampon phosphate à pH 7.6 (étapes d'autoclave)

C. Équipements et matériel

- Balance de précision
- Tubes Falcon de 50mL (n par répliquas + 2 tubes pour les solutions de FDA)
- Agitateur-incubateur
- Sonicateur
- Feuilles d'aluminium pour recouvrir les tubes
- Microplaque noire
- Spectromètre lecteur de microplaque type Tecan.

D. Manipulation

- 1) Préparer la solution de sol
 - Peser environ 1,250g de sol et mettre dans un tube Falcon de 50mL.
 - Ajouter 20mL du tampon phosphate.
 - Mettre dans l'agitateur pendant 10 minutes à 335 rpm (répétition par minute).
 - Place dans la cuve à ultrason pendant 2 minutes.
 - Mettre à nouveau dans l'agitateur pendant 5 minutes à 335 rpm.
- 2) Préparer la solution de FDA
 - FDA1 :
 - o Peser 50mg de FDA et placer dans un tube Eppendorf, ajouter 1mL d'acétone et ensuite transférer dans un tube Falcon de 50mL recouvert d'aluminium afin de protéger de la lumière.
 - o Ajouter 9mL d'acétone pour dissoudre.
 - o Stocker à 4°C protégé de la lumière.
 - FDA2 (à préparer frais pour chaque manipulation) :
 - o Dans un tube de 50mL recouvert d'aluminium ajouter : 4,8mL de tampon phosphate, 4,8mL d'acétone et 400µL de FDA1.
- 3) Remplir la microplaque
 - Pour chaque répliquas biologiques, répéter au moins 4 fois des répliquas techniques.
 - Pour le blanc, répéter 8 fois.
 - Faire attention à l'homogénéisation des solutions.

	Sol	Blanc
Tampon phosphate	195µL	220µL
Solution de sol	25µL	/
FDA2	30µL	30µL

- 4) Lecture de la fluorescence

- Insérer la plaque dans le spectromètre Tecan : longueur d'onde d'excitation 495nm, longueur d'onde d'émission 535nm.
- Mesurer la fluorescence toutes les 5 minutes pendant 2 heures.

E. Composition du tampon

- Dans un bouteille Schott de 1L ajouter : 8,7g de K_2HPO_4 , 1,3 KH_2PO_4 , 800mL d'eau distillée.
- Utiliser l'agitateur magnétique jusqu'à ce que la poudre soit dissoute.
- Ajuster le pH à 7.6 : 200mL d'eau distillée.
- Autoclave pendant 20 minutes à 120°C.

F. Courbe de calibration pour la fluorescéine

1) Solution stock A 0,5mg/mL :

- Peser 6,7mg de fluorescéine dans un tube Eppendorf de 1,5mL recouvert d'une feuille d'aluminium.
- Ajouter 1mL d'acétone.
- Transférer la solution depuis l'Eppendorf dans un tube Falcon de 50mL recouvert d'aluminium avec 12,4mL d'acétone.
- Stocker à 4°C à l'abri de la lumière.

2) Solution B DF 40X, 0,0125mg/mL :

- Prendre 200µL de solution A et placer dans un tube de 50mL avec 7,8 mL d'acétone.
- Si une solution C DF800X de 0,625µg/mL est nécessaire : prendre 500µL de solution B et place dans un tube de 50mL avec 9,5mL d'acétone.

3) Remplir la microplaque noire :

- Faire minimum 3 répliquas.
- Bien homogénéiser.
- Avant de faire la courbe de calibration, mesurer la fluorescence d'une quantité connue de solution A et B. Choisir une solution pour la courbe de calibration.
- Le volume final des puits est de 250µL.

µL	1	2	3	4	5
Tampon phosphate	225	220	215	210	205
Solution de sol	25	25	25	25	25
Fluorescéine	0	5	10	15	20

Annexe 7 : protocole Bait Lamina

(Helling et al., 1998; Thoumazeau et al., 2019)

Préparation des Bait Lamina

- Languettes percées de 16 trous d'une longueur de 15cm par parcelles.
- 0,3g de poudre d'ortie
- 0,7g de poudre de cellulose
- Solution de 1% d'agar

Matériel pour le terrain

- 4*7 languettes par parcelle
- Couteau pour trancher le sol
- Rubalise
- Tuteur ou piquet de marquage
- Mètre en cm
- Point GPS

Méthode

- Repérer une placette dans un endroit homogène de la parcelle.
- Placer le repère : piquet et la rubalise
- Trancher le sol 7 fois à intervalle de 30 cm et à une profondeur d'environ 10cm.
- Placer les languettes verticalement dans le sol.
- Pincer la surface du sol autour de la languette.
- Retirer les languettes entre 10 et 15 jours après.
- Les conserver dans des sachets étiquetés pour le comptage ou compter sur place.

Annexe 8 : protocole et clé de d'identification des vers de terre

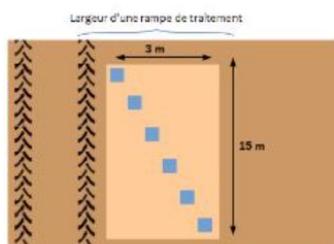
Protocole adapté de l'OPVT (EcoBioSoil, s. d.).

Protocole

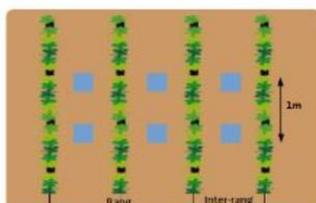
Étape 1 : Disposition des blocs de sol

La disposition des blocs peut varier en fonction du milieu dans lequel les observations sont réalisées.

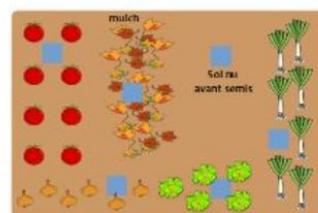
Grandes cultures / Prairies / Pelouses



Vignobles



Jardins potagers



■ = blocs de sol

Échantillonnage dans une zone homogène représentative de la parcelle, éloignée du bord (10 mètres minimum).

Échantillonnage représentatif de l'hétérogénéité du jardin.

Précaution à prendre : ne pas piétiner la zone choisie pour extraire le bloc de sol

Étape 2

Extraction des blocs de sol



Elle doit être rapide pour éviter au maximum la fuite des vers de terre sensibles aux vibrations du sol.

La surface de chaque bloc de sol doit être de 20 x 20 cm (largeur de la bêche) pour une profondeur de 25 cm (Vous pouvez faire un repère sur la bêche). Il est important d'enfoncer la bêche le plus verticalement possible pour respecter le volume de sol à prélever.

Les 6 blocs de sol sont extraits les uns après les autres et disposés dans des bacs.

Penser à les couvrir en cas de pluie pour faciliter le tri manuel (et le protocole structure).

Étape 3

Récupération des vers de terre



Séparément pour chaque bloc de sol, effriter les mottes pour récupérer les vers de terre.

Les déposer dans une boîte remplie d'eau. Le tri est terminé lorsque le diamètre des mottes est inférieur à 1 cm.

Étape 4

Identification



Laver les vers et les disposer sur une surface de couleur claire.

Les déterminer à l'aide de la clé d'identification et les séparer selon les 4 groupes fonctionnels.

Compter les individus par groupe et reporter les résultats sur la feuille de terrain "Fiche comptage vers de terre et description parcelle".

Reboucher le trou avec la terre triée puis remettre les vers de terre à la surface : les épigés ne creusant pas de galeries, ils ne survivraient pas à un enfouissement.

