

## **Etude comparative du fonctionnement biogéochimique des sols soumis à différentes pratiques culturales de maraîchage dans la région du Luxembourg (Belgique)**

**Auteur :** Lorge, Olivier

**Promoteur(s) :** Cornelis, Jean-Thomas

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2020-2021

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/11012>

---

### *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.*

---

**ETUDE COMPARATIVE DU  
FONCTIONNEMENT BIOGEOCHIMIQUE DES  
SOLS SOUMIS A DIFFERENTES PRATIQUES  
CULTURALES DE MARAICHAGE DANS LA  
REGION DU LUXEMBOURG (BELGIQUE)**

**LORGE OLIVIER**

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

**ANNEE ACADEMIQUE 2019-2020**

**PROMOTEUR: JEAN-THOMAS CORNELIS**

*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<sub>3</sub> de Gembloux Agro-Bio Tech."*

Le présent document n'engage que son auteur.

# **ETUDE COMPARATIVE DU FONCTIONNEMENT BIOGEOCHIMIQUE DES SOLS SOUMIS A DIFFERENTES PRATIQUES CULTURALES DE MARAICHAGE DANS LA REGION DU LUXEMBOURG (BELGIQUE)**

**LORGE OLIVIER**

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

**ANNEE ACADEMIQUE 2019-2020**

**PROMOTEUR : JEAN-THOMAS CORNELIS**

## Remerciements

Lors de la rédaction de ce travail de fin d'étude, de nombreuses personnes ont contribué de près ou de loin à sa réalisation. Je souhaiterais les remercier :

M<sup>me</sup> Aurore Degrés, pour m'avoir permis de reprendre confiance en la finalisation de mon parcours universitaire.

M. Jean-Thomas Cornélis, pour le soutien et la dimension humaine apportés lors de ce travail.

Les membres du personnel du bâtiment GP. A savoir : M. Colinet, M. Tarantino et Emilie Marit pour l'aide lors de la mise en place de la phase expérimentale et pour la solidarité face à la situation sociétale des précédents mois.

M<sup>me</sup> Monique Carnol, pour l'aide fournie lors de l'analyse de certains indicateurs de ce travail.

Je terminerai cette partie en remerciant mes proches pour le soutien indéfectible et l'énergie transmise dans le but de terminer mes études. Le parcours universitaire relève plus du marathon que du sprint et les amitiés créées durant cette aventure ont permis à ce voyage d'être rempli d'émotions, de découvertes et de sincères relations humaines.

*“The thin layer of soil covering the earth's surface represents the difference between survival and extinction for most terrestrial life” (Doran & Parkin, 1994)*

## Résumé français :

Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, la qualité des sols a été évaluée via la notion de rendement des milieux. Par la suite, un point de vue environnemental a été adopté donnant naissance au concept de santé des sols qui prend en considération la multifonctionnalité, les services écosystémiques, la résistance et la résilience des sols. Cette évolution s'est faite en parallèle d'une prise de conscience de l'importance des micro-organismes dans les cycles bio-géochimiques des sols et de l'impact de certaines pratiques culturales sur les organismes vivants des sols. Cet enchaînement d'événements a induit l'apparition de systèmes agricoles alternatifs tels que les fermes agroécologiques qui tentent : 1) de diversifier les communautés de végétaux et d'augmenter la couverture des sols. 2) de minimiser les perturbations mécaniques et chimiques des sols. 3) d'améliorer la régulation biologique. De tels types d'agriculture ne sont encore que peu étudiés et l'impact qu'ils ont sur l'environnement est donc encore mal compris. C'est pourquoi ce travail de fin d'étude tente d'évaluer la qualité physico-chimique et biologique d'une ferme en maraîchage de conservation (= CONS) en comparaison avec une ferme en maraîchage biologique (BIOL). CONS suit les principes agroécologiques avec un apport important de matières organiques (BREF et Bokashi). BIOL est une ferme biologique qui utilise des engrais biologiques et produit de légères perturbations mécaniques du sol. Le but étant de mettre en évidence les pratiques culturales permettant d'améliorer les fonctionnements bio-géochimiques des sols. Un set de 17 paramètres concernant la qualité physico-chimique et biologique est étudié dans cette optique. Les résultats montrent une amélioration assez nette des paramètres physico-chimiques et biologiques pour CONS tandis que BIOL a une influence neutre à tendance négative sur ces derniers par rapport à la parcelle témoin (prairie). Il semblerait donc que les pratiques culturales employées par CONS seraient une solution potentielle au maintien des fonctions biogéochimiques des sols d'exploitations maraîchères.

Mots clefs : agroécosystème, agriculture biologique, maraîchage, qualité des sols, santé des sols, biologie des sols, labour, non-labour, méthode fumigation/extraction.

## English abstract:

During the 20th century, soil quality was assessed through the notion of environmental yield. Subsequently, an environmental point of view was adopted, giving rise to the concept of soil health, which takes into account the multifunctionality, ecosystem services, resistance and resilience of soils. This development took place in parallel with an awareness of the importance of microorganisms in the bio-geochemical cycles of soils and the impact of some cultural practices on living soil organisms. This chain of events has led to the emergence of alternative farming systems such as agroecological farms which attempt to: 1) diversify plant communities and increase land cover. 2) minimize mechanical and chemical disturbances to soils. 3) improve biological regulation. Such types of agriculture are still little studied and the impact they have on the environment is therefore still poorly understood. This is why this end of study work attempts to assess the physico-chemical and biological quality of a conservation market gardening (CONS) in comparison with an organic market gardening (BIOL). CONS follows agroecological principles with a high input of organic matter (BREF and Bokashi). BIOL is an organic farm that use organic fertilizer and produce a slight mechanical disturbance of soil. The aim is to highlight the cultivation practices allowing to improve the bio-geochemical functions of soils. A set of 17 parameters concerning the physico-chemical and biological quality is studied with this in mind. The results show a fairly clear improvement in the physico-chemical and biological parameters for CONS while the BIOL has a neutral influence with a negative trend on the latter. It would therefore seem that the cultural practices employed in CONS would be a potential solution to the maintenance of the biogeochemical functions of the soils of market gardening farms.

Key words: agroecosystem, organic farming, market gardening, soil quality, soil health, soil biology, tillage, no-till, fumigation/extraction method.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1	Le sol, un milieu fascinant .....	1
1.2	Histoire et évolution du concept de la qualité des sols ainsi que les méthodes d'évaluations ...	1
1.3	Importance des organismes vivants dans les sols.....	4
1.4	Implication des micro-organismes dans la minéralisation et la séquestration des matières organiques et la dynamique des nutriments .....	5
1.5	Facteurs naturels et déterminants dans la diversité et l'activité des micro-organismes dans les sols .....	6
1.6	Facteurs anthropiques et déterminants dans la diversité et l'activité des micro-organismes.....	6
1.6.1	Impact de la fertilisation sur la microbiologie .....	6
1.6.2	Labour versus non-labour .....	7
1.7	Les systèmes agroécologiques .....	8
1.8	Question de recherche.....	9
<b>2</b>	<b>Matériel et méthode .....</b>	<b>11</b>
2.1	Situations des milieux d'études.....	11
2.2	Echantillonnage.....	13
2.3	Pratiques culturales étudiées et itinéraires techniques des parcelles .....	14
2.3.1	Ferme Arc-en-ciel (CONS).....	14
2.3.2	Ferme de Gailly-Jourdan (BIOL).....	17
2.4	Analyses à destination des indicateurs biologiques .....	17
2.4.1	Carbone et azote microbien.....	17
2.4.2	Protocole de la technique de respirométrie .....	20
2.4.3	Autres variables biologiques .....	23
2.5	Synthèse des informations concernant les paramètres biologiques : Indice global de qualité biologique des sols (IGB).....	24
2.6	Analyses physico-chimiques.....	25
2.6.1	Analyse carbone organique total.....	25
2.6.2	Analyse éléments biodisponibles (P, K, Mg, Ca) .....	26
2.6.3	Analyse pH eau et KCl.....	26
2.6.4	Analyse CEC.....	26
2.6.5	Analyse granulométrie .....	26
2.6.6	Analyse Azote total .....	26
<b>3</b>	<b>Résultats .....</b>	<b>27</b>
3.1	Traitements statistiques des données : Informations générales.....	27
3.2	Résultats des variables physico-chimiques .....	27
3.2.1	Analyse des fractions granulométriques .....	27

3.2.2	Analyses des pH-eau et pH-KCl .....	28
3.2.3	Analyse de la CEC .....	29
3.2.4	Analyses des éléments biodisponibles .....	30
3.2.5	Analyse de l'azote total.....	31
3.2.6	Analyse du rapport C/N .....	32
3.3	Résultats des variables utiles à l'évaluation de la qualité biologique des sols .....	32
3.3.1	Analyse du carbone organique .....	32
3.3.2	Analyse du carbone eau froide/chaude .....	33
3.3.3	Analyse de la minéralisation de l'azote .....	34
3.3.4	Analyse du rapport entre l'azote extrait à l'eau chaude/froide .....	35
3.3.5	Analyse du carbone et de l'azote microbien .....	36
3.3.6	Rapport $C_{mic} / N_{mic}$ .....	36
3.3.7	Analyse de la respiration potentielle.....	37
3.3.8	Analyse du quotient métabolique.....	38
3.3.9	Analyse du quotient microbien .....	39
3.3.10	Analyse de l'indice global de qualité biologique des sols .....	40
4	Discussion .....	42
4.1	Contextualisation des résultats .....	42
4.2	Caractérisation des milieux selon les paramètres physico-chimiques.....	42
4.2.1	Contexte géo-pédologique .....	42
4.2.2	Le statut acido-basique des terres étudiées .....	47
4.3	Caractérisation des milieux selon les paramètres biologiques .....	48
4.4	Mise en évidence des interactions entre les variables physico-chimiques et biologiques.....	55
5	Conclusion .....	57
6	Bibliographie.....	58
7	Annexes.....	63
7.1	Vérification des égalités des variances des fractions granulométriques .....	63
7.1.1	Argile .....	63
7.1.2	Limon.....	63
7.1.3	Sable.....	64
7.2	Analyses des variances à un facteur explicatif (parcelles) des fractions granulométriques .....	64
7.2.1	Argile .....	64
7.2.2	Limon.....	64
7.2.3	Sable.....	64
7.3	Vérification des égalités des variances des pH_eau et pH_KCl .....	65
7.4	Analyses de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des pH_eau et pH_KCl .....	66



7.4.1	pH_eau .....	66
7.4.2	pH_KCl.....	66
7.4.3	Différences pH_eau et pH_KCl .....	66
7.5	Vérification de l'égalité des variances de la CEC.....	66
7.6	Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) de la CEC .....	67
7.7	Vérification de l'égalité des variances des éléments biodisponibles .....	67
7.7.1	Phosphore.....	67
7.7.2	Potassium .....	67
7.7.3	Magnésium.....	68
7.7.4	Calcium.....	68
7.8	Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des éléments biodisponibles .....	68
7.8.1	Phosphore.....	68
7.8.2	Potassium .....	68
7.8.3	Magnésium.....	69
7.8.4	Calcium.....	69
7.9	Vérification de l'égalité des variances de l'azote total des parcelles .....	69
7.10	Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) de l'azote total des parcelles.....	69
7.11	Vérification de l'égalité des variances du rapport C/N des parcelles.....	70
7.12	Vérification de l'égalité des variances du carbone organique total des parcelles .....	70
7.13	Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) du carbone total des sol .....	70
7.14	Analyse de la variance à un facteur explicatif du carbone organique des parcelles.....	70
7.15	Vérification de l'égalité des variances du carbone extrait à l'eau chaude (carbone labile) et extrait à l'eau froide .....	71
7.16	Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) du carbone extrait à l'eau chaude et extrait à l'eau froide .....	71
7.16.1	Carbone extrait à l'eau chaude.....	71
7.16.2	Carbone extrait à l'eau froide.....	71
7.17	Vérification de l'égalité des variances de la minéralisation nette de l'azote .....	72
7.18	Vérification de l'égalité des variances des rapports azote extrait à l'eau chaude/ extrait à l'eau froide .....	72
7.19	Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des rapports d'azote extrait à l'eau chaude/froide.....	72
7.20	Vérification de l'égalité des variances du carbone et de l'azote microbien ainsi que du rapport $C_{mic}/N_{mic}$ .....	73
7.21	Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) de l'azote et le carbone microbien. 74	
7.21.1	Carbone microbien.....	74
7.21.2	Azote microbien.....	74
7.22	Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) du rapport $C_{mic}/N_{mic}$ .....	74
7.23	Vérification de l'égalité des variances des respirations potentielles .....	74

7.24 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des respirations potentielles .....	74
7.25 Vérification de l'égalité des variances des quotients métaboliques .....	75
7.26 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des quotients métaboliques.....	75
7.27 Vérification de l'égalité des variances des quotients microbiens.....	75
7.28 Analyse de la variance à un facteur explicatif du quotient microbien .....	75
7.29 Résumé des structurations des moyennes pour les différentes variables étudiées .....	76
7.30 Valeur des S(Ind <sub>i</sub> ) par échantillon.....	77
7.31 Vérification de l'égalité des variances d'IGB .....	77
7.32 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) de l'IGB.....	77

## Table des figures

Figure 1 : Histoire des objectifs principaux, des outils et des approches mises en place dans le cadre de l'évaluation de la qualité des sols. Image tirée de Bünnemann et al. (2018).....	2
Figure 2 : Mise en évidence des interactions nichées entre la qualité des sols, de l'environnement et la durabilité des agroécosystèmes tout en prenant en compte les fonctions premières qu'assurent la qualité des sols (cfr « fig. 1. Nested hierarchy of agroecosystem sustainability showing the relationship of soil quality to the larger agroecosystem » Andrews et al. (2002) ) .....	2
Figure 3 : «Les principales voies de transformation biologique de l'azote sont liées par leurs enzymes et les gènes associés, [...] » (Canfield et al., 2010) .....	5
Figure 4 : Position géographique des sites étudiés.....	11
Figure 5 : Sols présents dans la ferme CONS .....	11
Figure 6 : Représentation du village de Wellin sur la carte de Ferraris (1777). Mise en évidence de l'occupation passée des sols. ....	12
Figure 7 : Sols présents dans la parcelle BIOL.....	13
Figure 8 : Localisation des parcelles étudiées dans la ferme CONS.....	14
Figure 9 : Itinéraire technique de la parcelle ayant reçu quatre applications de bokashi ainsi que les cultures en place durant ces périodes.....	15
Figure 10 : Itinéraire technique de la parcelle ayant reçu deux applications de bokashi ainsi que les cultures en place durant ces périodes .....	15
Figure 11 : Itinéraire technique de la parcelle soumise à du BREF et les cultures présentes durant ces périodes.....	17
Figure 12 : Bocal contenant l'échantillon de terre sèche et le pilulier contenant la solution de NaOH pour le test de respirométrie.....	22
Figure 13 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des différentes fractions granulométriques des parcelles étudiées. ....	27

Figure 14 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des différents $pH_{eau}$ , $pH_{KCl}$ , et des différences entre les $pH_{eau}$ et $pH_{KCl}$ des parcelles étudiées. ....	28
Figure 15 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des capacités d'échange cationique des parcelles étudiées. ....	29
Figure 16 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des contenus en éléments biodisponibles des parcelles étudiées. ....	30
Figure 17 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des contenus en azote total des parcelles étudiées. ....	32
Figure 18 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des contenus en carbone organique total (COT) des parcelles étudiées. ....	33
Figure 19 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des contenus en $C_{eau\ chaude}$ (carbone extrait à l'eau chaude) et $C_{eau\ froide}$ (carbone extrait à l'eau froide) des parcelles étudiées. ....	34
Figure 20 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des rapports entre $N_{chaude}/N_{froide}$ des parcelles étudiées. ...	35
Figure 21 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des contenus en carbone microbien ( $C_{mic}$ ) et en azote microbien ( $N_{mic}$ ) des parcelles étudiées. ....	36
Figure 22 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des rapports entre le carbone microbien et l'azote microbien ( $C_{mic}/N_{mic}$ ) des parcelles étudiées. ....	37
Figure 23 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des valeurs de respiration potentielle des parcelles étudiées. ....	38
Figure 24 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des valeurs de quotient métabolique des parcelles étudiées. ....	39
Figure 25 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des valeurs de quotient microbien des parcelles étudiées. ....	40
Figure 26 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des valeurs d'indice global de la qualité biologique des parcelles étudiées. ....	41
Figure 27 : Sites ayant servi à l'établissement de gammes de valeurs tenant compte de la variabilité spatiale et saisonnière des paramètres biologiques. Régions agricoles: 1-Sablo-limoneuse, 2-	

Limoneuse, 3-Campine Hennuyère, 4-Condroz, 5-Herbagère Liège, 6-Herbagère Fagnes, 7-Famenne, 8-Ardenne, 9-Jurassique, et 10-Haute Ardenne (Vincent et al., 2019) ..... 42

Figure 28 : Mise en relation de la capacité d'échange cationique (CEC) en fonction du contenu en argile ..... 43

Figure 29 : Mise en relation de la CEC en fonction du contenu en carbone organique..... 44

Figure 30 : Mise en relation du contenu en éléments biodisponibles avec le contenu en argile des sols ..... 45

Figure 31 : Mise en relation du contenu en éléments biodisponibles avec le contenu en sable des sols ..... 45

Figure 32 : Mise en relation du contenu en calcium des sols en fonction du contenu en argile. .... 47

Figure 33 : Disponibilité des nutriments pour les plantes selon les valeurs de pH\_eau (issu de Mérelle (1998) et lu dans (Genot et al., 2009)). ..... 48

Figure 34 : « Gammes de valeurs des teneurs en COT des sols (%C) sous cultures (en haut) et prairies (en bas) en Wallonie. Les gammes sont produites à partir de la base de données centralisée de REQUASUD (période 2004-2014 ; licence n° A06/2017). Les couleurs montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (orange), 'faibles' (jaune), 'moyennes' (vert), 'élevées' (bleu) et 'très élevées' (violet) » (Vincent et al., 2019)..... 49

Figure 35 : « Gammes de valeurs calculées du carbone extrait à l'eau froide (mg C.kg-1) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation » (Vincent et al., 2019) ..... 49

Figure 36 : Mise en relation du contenu en carbone labile (extrait à l'eau chaude) et le carbone microbien ..... 50

Figure 37 : « Gammes de valeurs calculées du carbone extrait à l'eau chaude (mg C.kg-1) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation. » (Vincent et al., 2019) ..... 50

Figure 38 : « Gammes de valeurs calculées de la biomasse microbienne (mg C.kg-1) dans les sols en culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert), 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation » (Vincent et al., 2019). ..... 51

Figure 39 : « Gammes de valeurs calculées du rapport Cmic/Nmic dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en

dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation » (Vincent et al., 2019). ..... 51

Figure 40 : « Gammes de valeurs calculées du quotient microbien (%) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert), 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation. » (Vincent et al., 2019). ..... 52

Figure 41 : « Gammes de valeurs calculées de l'azote extrait à l'eau froide et à l'eau chaude dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation » (Vincent et al., 2019). ..... 52

Figure 42 : « Gammes de valeurs calculées de la minéralisation nette de l'azote ( $\text{mg N.kg}^{-1} \text{sol sec. j}^{-1}$ ) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert), 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation. » (Vincent et al., 2019). ..... 53

Figure 43 : « Corrélogramme des indicateurs mesurés dans le RSS CARBIOSOL dans des sols cultivés dont l'échantillonnage a eu lieu en 2013, 2014 (carbioso1 1), 2015 (carbioso1 2), 2016 (carbioso1 3) et 2017 (carbioso1 4). n minimal=120 et n maximal=366. Jaune -  $p < 0,05$  ; Bleu -  $p < 0,01$  ; Vert -  $p < 0,001$  ; Blanc -  $p > 0,05$ . Test rho de Spearman. » (Vincent et al., 2019). ..... 53

Figure 44 : Evolution des émissions de dioxyde de carbone par échantillon durant la période d'incubation ..... 54

Figure 45 : Emissions cumulées de dioxyde de carbone par unité de carbone organique total (COT). 55

## Table des tableaux

Tableau 1 : Résumé des informations concernant les concepts de qualité et de santé des sols ..... 4

Tableau 2 : Description des méthodes d'analyse du carbone et de l'azote microbien (issus des métadonnées fournies avec les analyses) ..... 20

Tableau 3 : Description, principes et outils de mesure des analyses traitant des variables biologiques. (Tableau inspiré de (Vincent et al., 2019) et modifié sur base des métadonnées fournies avec les résultats d'analyses de l'université de Liège via madame Monique Carnol) ..... 23

Tableau 4 : Structuration des moyennes des fractions granulométriques selon la méthode de Fisher. 28

Tableau 5 : Structuration des moyennes de  $\text{pH}_{\text{eau}}$ ,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ , et des différences entre le  $\text{pH}_{\text{eau}}$  et  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  des parcelles. .... 29

Tableau 6 : Structuration des moyennes de capacité d'échange cationique des parcelles étudiées. .... 30

Tableau 7 : Structuration des moyennes des contenus en éléments biodisponibles des parcelles étudiées. ....	31
Tableau 8 : Structuration des moyennes de contenu en azote total des parcelles étudiées. ....	32
Tableau 9 : Résultat de l'analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des rapports C/N des parcelles étudiées. ....	32
Tableau 10 : Structuration des moyennes de contenu en carbone organique total des parcelles étudiées. ....	33
Tableau 11 : Structuration des moyennes de contenu en carbone extrait à l'eau froide et en carbone extrait à l'eau chaude des parcelles étudiées. ....	34
Tableau 12 : Tableau d'analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) pour la minéralisation nette de l'azote.....	35
Tableau 13 : Structuration des moyennes de rapport $N_{chaude}/N_{froide}$ des parcelles étudiées. ....	35
Tableau 14 : Structuration des moyennes de carbone microbien ( $C_{mic}$ ) et d'azote microbien ( $N_{mic}$ ) des parcelles étudiées. ....	36
Tableau 15 : Structuration des moyennes de rapport entre le carbone et l'azote microbien ( $C_{mic}/N_{mic}$ ) des parcelles étudiées. ....	37
Tableau 16 : Structuration des moyennes des valeurs de respiration potentielle des parcelles étudiées. ....	38
Tableau 17 : Structuration des moyennes de quotient métabolique des parcelles étudiées. ....	39
Tableau 18 : Structuration des moyennes de quotient microbien des parcelles étudiées. ....	40
Tableau 19 : Structuration des moyennes d'indice global de la qualité biologique (IGB) des parcelles étudiées. ....	41

## Préface

Le parcours que j'ai réalisé, aussi bien en termes académiques qu'en termes philosophiques et qu'en développement personnel a été influencé par de nombreux événements. Notamment des rencontres humaines qui ont changé ma vision de la vie en tant que telle et qui m'ont fait prendre conscience des éléments importants qui construisent une vie. A cela, s'ajoutent les événements qui constituent le chemin que nous nous devons de parcourir et qui changent la direction initiale que l'on décide de suivre.

Une envie persiste en moi, et ce, depuis toujours, celle de changer les éléments du monde qui sont négatifs aussi bien pour la collectivité que pour l'individualité. En effet, la société telle qu'on la connaît m'a souvent donné envie de me retirer du schéma classique de vie. Un ami m'a alors fait prendre conscience que si on voulait changer le monde dans lequel on évolue, on ne pouvait pas se retirer et vivre en ermite. Il fallait au contraire s'ancrer et prendre sa place afin de mener la vie telle qu'on le souhaite et à ce moment-là seulement, les gens intéressés par l'idéologie qui nous est chère, profiteront ou non des expériences qui nous ont construits. C'est comme cela que les choses évoluent à petite échelle. Cela a donc contribué à ce grand rêve que j'ai depuis tout petit qui est de faire évoluer les éléments du quotidien même à petite échelle.

J'ai donc d'abord pensé à faire des études de médecine afin de soulager les humains de leurs douleurs physiologiques. Mon chemin a ensuite légèrement bifurqué car je me suis rendu compte qu'il était possible de faire le bien sur terre d'une autre manière qu'en soignant les gens. Je me suis alors engagé dans les études de bio-ingénieurs dans le but d'accomplir des actes qui permettraient de faciliter la vie humaine. A tout cela s'est ajouté une envie assez animée de retourner à des valeurs plus simples et plus élémentaires. Dès lors, un intérêt grandissant s'est porté sur l'alimentation et les modes de productions. Le but de la manœuvre étant de minimiser l'impact de l'être humain sur la nature qui est essentielle au maintien de la vie lors de la production alimentaire.

Mon parcours académique a suivi cette réflexion plutôt philosophique et je me suis dirigé vers des stages en lien avec tout ce que j'ai cité précédemment. C'est ainsi que j'ai décidé de suivre un maraîcher qui utilisait des techniques dites de conservation pendant une semaine lors du stage de troisième bachelier. Cela m'a permis de me connecter avec la réalité professionnelle et au travail passionné. Je me suis alors rendu compte que le chemin que je m'apprêtais à emprunter ne serait pas forcément des plus aisés car il faut se retrousser les manches chaque jour pour faire avancer l'utilisation de ces pratiques. Etant donné l'affinité que j'ai pour les défis, l'idée de me lancer dans des projets parsemés de challenges m'est apparue comme une évidence.

L'année suivante, j'ai passé les deux mois de stage de master 1 dans une asbl qui fournissait des conseils agricoles. Certes, cela ne faisait pas parfaitement partie de mon cadre d'étude mais cela m'a permis de prendre conscience des défis majeurs qu'il fallait relever dans le domaine de l'agriculture actuelle. En parallèle à cela, j'ai appris à mettre en place un projet depuis les prémisses jusqu'à la conclusion des expérimentations mises en place. La débrouillardise dans ce type de projet n'était pas une capacité innée pour moi, il a fallu apprendre à mener le travail à terme, me rapprochant un peu plus encore de mes objectifs de vie.

Ensuite, le moment du TFE est venu. Le premier choix que j'ai réalisé s'est, une fois encore, porté sur une diminution de l'impact humain sur la nature. En effet, je suis parti au Japon dans l'idée d'étudier l'influence des toitures végétales sur la qualité des eaux de percolation. Cependant, suite à des ennuis de santé, ce projet a été avorté pour une convalescence d'une année qui a empêché l'avancement de mon TFE. Après une réflexion importante, j'ai enfin décidé de reprendre mon parcours et terminer ce marathon que représentent les études de bio-ingénieur. J'ai donc décidé de prendre un sujet un peu plus en lien encore avec mes idéologies et donc renouer avec l'agriculture et l'amélioration de ses pratiques. Mon choix s'est alors porté sur les «nouvelles» pratiques culturelles en vogue pour le moment. Le mot «nouvelles» est mis entre guillemets car, comme je le présenterai plus tard dans ce document, il s'agit

bien d'anciennes pratiques qui sont remises au goût du jour afin de trouver des alternatives aux problèmes rencontrés actuellement en agriculture (lixiviation des intrants, maladies décimant les cultures, eutrophisation des milieux aquatiques, etc). Le sujet que j'ai choisi est en fait le prolongement d'un travail réalisé lors de la première année de master. La base de ce TFE est issue de ce travail car il avait montré des résultats plutôt encourageants et qui laissaient penser qu'un approfondissement du sujet serait intéressant. C'est pourquoi des analyses supplémentaires sont réalisées mais ceci sera plus amplement détaillé dans la partie "Matériel et méthode".

Ce sujet correspond donc au fruit d'une continuité philosophique et académique suivie durant les six années d'études réalisées. Il allie le retour aux valeurs qui me sont essentielles à l'occasion d'apporter une petite pierre à l'édifice de la connaissance.



# 1 Introduction

## 1.1 Le sol, un milieu fascinant

Les sols sont des milieux dynamiques et vivants qui occupent une place clé dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Pour appuyer cela, Doran & Parkin (1994) vont même jusqu'à dire que : « la fine couche de sol couvrant la surface de la terre représente la différence entre la survie et l'extinction pour la majorité des vies terrestres ». En effet, les sols sont le lieu d'une partie essentielle des cycles biogéochimiques (C, N, P, S) ainsi que du cycle de l'eau. Tout ceci est principalement supporté par les interactions entre la biologie des sols (micro-organismes, macro-organismes) et les propriétés physico-chimiques des sols (Doran & Parkin, 1994). La matière organique, et donc la biologie des sols, influencent la disponibilité des éléments (C, N, P, S) par une minéralisation et une immobilisation de ces derniers. Les constituants inorganiques, quant à eux, et via la capacité d'échange, assurent la rétention des cations (CEC : capacité d'échange cationique) et des anions (CEA : capacité d'échange anionique). Les composés organiques non-polaires, remplissent cette même fonction (Doran & Parkin, 1994).

Malgré l'importance indéniable des sols citée ci-dessus, Sanders (1992) relève une dégradation conséquente des terres végétalisées au cours des années 80. Cette évolution, serait, selon lui, le résultat de nombreux facteurs tels que l'érosion des sols, la pollution atmosphérique, le labour excessif, le surpâturage, la mise à blanc des terres, la salinisation et la désertification des sols. Comme décrit plus loin dans ce document, les sols font partie de l'environnement et ce dernier englobe aussi l'air et l'eau. Les interactions entre ces trois piliers sont irréfutables (Andrews et al., 2002). Dans leur article, Doran & Parkin (1996) évoquent l'importance de la gestion des terres vis-à-vis de la qualité des eaux car certaines pratiques induisent un déséquilibre dans les cycles du carbone et de l'azote ainsi que dans le cycle de l'eau. En effet, le labour, les enchaînements de culture ainsi que l'utilisation de pesticide et de fertilisant sont reconnus comme étant des actions ayant un impact sur la qualité de l'eau. L'air se retrouve tout aussi impacté par les pratiques culturales. En effet, Mosier et al. (1991) ont démontré l'implication de la fertilisation azotée dans les processus d'émission et de rétention, respectivement, du protoxyde d'azote et du méthane.

Les éléments cités précédemment montrent à quel point les sols sont importants pour l'humanité et à quel point ils sont menacés. Le monde scientifique s'est donc attelé à définir le concept de qualité des sols dans le but de les protéger des menaces naturelles et anthropiques.

## 1.2 Histoire et évolution du concept de la qualité des sols ainsi que les méthodes d'évaluations

La thématique de la qualité des sols est parcourue par les scientifiques depuis déjà plus d'une cinquantaine d'années. Les objectifs associés aux sols et les définitions de la qualité des sols ont donc évolué au cours des dernières décennies. Il en a été de même pour ce qui est des outils et des méthodes d'analyses à disposition (figure 1). Dans les années 70, l'attention se portait principalement sur le maintien de la croissance des plantes mises en culture. Cela caractérisait la fonction première des sols. Dans le courant des années qui suivirent, la tendance se portait sur la productivité du milieu. La qualité des sols était alors définie sur base du rendement des terres. L'évolution des définitions s'est poursuivie durant les années qui ont suivi. L'homme associait, au cours des années 90 à 2010, la notion de productivité à la qualité de l'environnement et la santé animale/humaine. Par la suite, les scientifiques ont développé un point de vue plus large prenant en compte la multifonctionnalité des sols, les services écosystémiques et la manière dont les sols se comportent face aux contraintes du milieu (Bünemann et al., 2018).

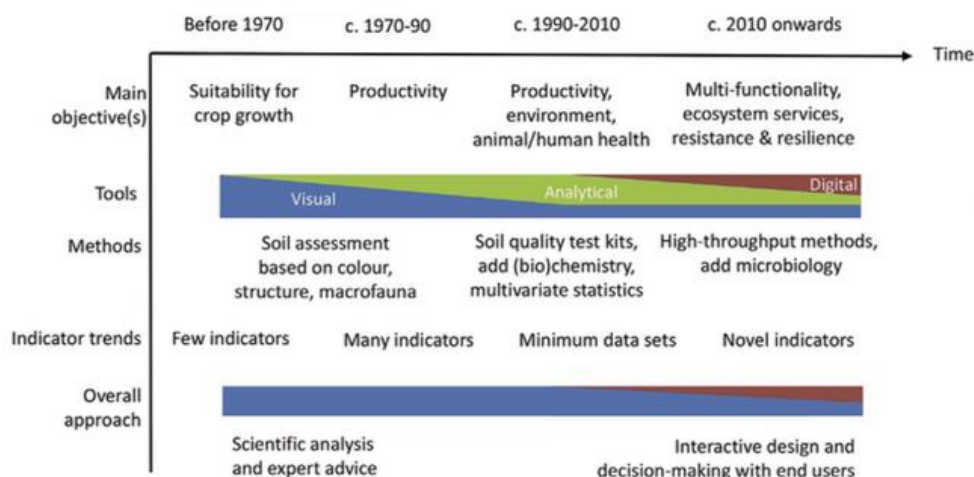


Figure 1 : Histoire des objectifs principaux, des outils et des approches mises en place dans le cadre de l'évaluation de la qualité des sols. Image tirée de Bünemann et al. (2018).

Andrews et al. (2002) montrent dans leurs articles que la qualité des sols est en lien avec ce qui l'entoure (eau, air, biosphère, ...) et présente de nombreuses interactions avec ces derniers. Dans leur étude, ils ont mis en évidence une hiérarchie nichée présente dans les agroécosystèmes durables (figure 2). La qualité des sols se situe au même niveau que la qualité des eaux et de l'air et tout ceci est compris dans la qualité de l'environnement qui est lui-même compris dans le développement durable des agroécosystèmes.

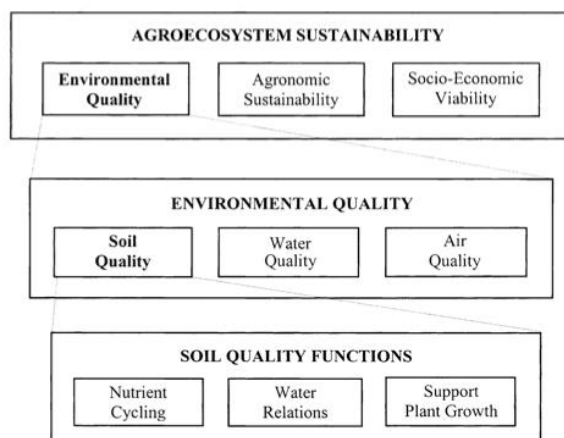


Figure 2 : Mise en évidence des interactions nichées entre la qualité des sols, de l'environnement et la durabilité des agroécosystèmes tout en prenant en compte les fonctions premières qu'assurent la qualité des sols (cfr « fig. 1. Nested hierarchy of agroecosystem sustainability showing the relationship of soil quality to the larger agroecosystem » Andrews et al. (2002) )

Contrairement à la qualité des sols, la qualité de l'air et de l'eau est aisément estimable sur base du niveau de pollution impactant directement la santé animale/humaine, la consommation animale/humaine et les écosystèmes naturels (Carter et al., 1997). Doran & Parkin (1996) expriment la même idée en d'autres mots en disant que la complexité d'évaluation de la qualité des sols résulte du fait qu'il n'est pas directement ingérable par les animaux et les humains comme peuvent l'être l'air et l'eau. De plus, selon Bünemann et al. (2018) la qualité des sols n'est pas limitée au niveau de pollution de ces derniers. Nortcliff (2002) soutient ces propos en écrivant qu'il est relativement aisé de quantifier la respirabilité de l'air ou encore la potabilité de l'eau mais cela est considérablement plus compliqué d'appliquer des critères similaires aux sols. Cela serait selon lui le résultat de trois caractéristiques de ces derniers :

- Les terres sont soumises à de nombreuses utilisations différentes
- La complexité du système que constitue le sol
- La possibilité que les changements dans les sols puissent prendre un temps plus ou moins long et arrivent souvent en cas de dépassement d'une valeur seuil.

(Nortcliff, 2002)

Tous les éléments cités précédemment mettent en avant la complexité de construction du concept de la qualité des sols par rapport à ceux retrouvés pour la qualité de l'air et l'eau.

Durant les premières décennies, l'évolution de la définition du concept de qualité des sols portait principalement sur la définition propre du terme. Par la suite, l'appellation du concept de qualité des sols a été soumis à débat (Bünemann et al., 2018). La distinction se fait entre le terme de qualité des sols (traduit de l'anglais : « soil quality ») et le terme de santé des sols (traduit de l'anglais : « soil health »)

Pankhurst et al. (1997) mettent en évidence que : « la qualité des sols est étroitement liée à la production des espèces de plantes individuelles ou des communautés de plantes. Les propriétés intrinsèques du sol (composition minérale, texture et profondeur) sont, dès lors, des attributs importants de la qualité des sols.

Tóth et al. (2007) définissent la qualité des sols par : « une mesure de l'aptitude d'un sol à fournir des services écosystémiques et sociaux au travers de sa capacité à maintenir ses fonctions et sa capacité à répondre à des influences externes ».

Le concept de santé des sols est, quant à lui, caractérisé par : « [...] une prise en compte des attributs écologiques du sol et qui ont des implications au-delà de la qualité ou la capacité d'un sol à produire une culture particulière. Ces attributs sont principalement en lien avec le biota du sol et donc sa biodiversité, sa structure de réseau trophique (traduit de l'anglais : « food web structure »), son activité et l'étendue des fonctions qu'il remplit. » (Pankhurst et al., 1997). Les auteurs de l'article vont même jusqu'à dire que : « le concept de santé des sols englobe la nature vivante et dynamique du sol » et cela le différencie de la qualité des sols. Il est possible de dire que la santé des sols englobe la qualité de ces derniers mais avec la notion du long terme et sans tenir compte de l'utilisation des sols (Vincent et al., 2019).

Néanmoins, les auteurs reconnaissent que les concepts de qualité et de santé des sols présentent de fortes similarités et sont souvent utilisés en synonyme. Selon ces derniers, encore, les seules différences seraient que : « la qualité des sols se concentre sur la capacité du sol à rencontrer des besoins humains spécifiques [...], tandis que la santé des sols se concentre plus sur la capacité de ces derniers à continuer de maintenir ses fonctions et la croissance des plantes » (Vincent et al., 2019). La définition du premier concept opte pour un point de vue plus anthropocentriste tandis que le second opte pour un point de vue plus environnemental.

Kibblewhite et al. (2008) décrivent la santé des sols comme étant : « [...] une propriété intégrative qui reflète la capacité du sol à répondre à l'intervention agricole, de sorte qu'il continue à soutenir à la fois la production agricole et la fourniture d'autres services écosystémiques. Le principal défi de la gestion durable des sols consiste à préserver la fourniture de services écosystémiques tout en optimisant les rendements agricoles ».

Les informations concernant les concepts précédemment cités sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Résumé des informations concernant les concepts de qualité et de santé des sols

Concept	Caractéristiques	Attributs	Notion de temps
Qualité des sols	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vision anthropocentrée</li> <li>- Capacité des sols à rencontrer les besoins humains</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Composition minérale</li> <li>- Texture</li> <li>- Profondeur</li> </ul>	Notion de conservation des qualités nécessaires aux fonctions attribuées
Santé des sols	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vision environnementale</li> <li>- Capacité des sols à continuer de maintenir ses fonctions et la croissance des plantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diversité biologique</li> <li>- Structure de réseaux trophiques</li> <li>- Activité biologique</li> <li>- Etendue des fonctions remplies par la biologie</li> </ul>	Notion de long terme sans considération pour l'utilisation des sols

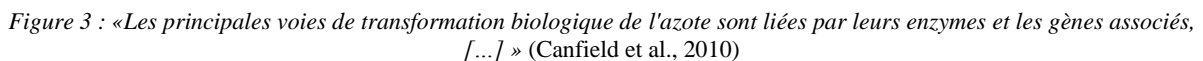
Ce document utilisera principalement le terme de qualité des sols car il semble être plus communément accepté dans la communauté scientifique et permet des recherches plus vastes sur le sujet. Cependant, les notions retenues pour ce terme se rapproche plus de la définition de la santé des sols (Soil health) présentée ci-dessus afin d'englober un plus vaste système et donc une compréhension plus globale du système sol (Kibblewhite et al., 2008). Cela n'engendre pas d'incompréhension car les termes sont souvent utilisés en tant que synonyme (Bünemann et al., 2018).

### 1.3 Importance des organismes vivants dans les sols

Pulleman et al. (2012) mettent en avant le fait que : « le biota du sol est essentiel pour de nombreux processus et fonctions de ce dernier, pourtant, une pression croissante sur la biodiversité et la dégradation des sols restent un soucis pertinent ». L'importance des micro-organismes dans les cycles biogéochimiques est mise en avant dans de multiples articles (Van Veen & Paul, 1981; Dick, 1992; Doran & Parkin, 1994; Kremer & Li, 2003). En effet, les micro-organismes fournissent, notamment, l'énergie nécessaire au développement des décomposeurs primaires de la matière organique qui ont un rôle majeur dans le cycle des nutriments (Dick, 1992). Gupta & Germida (1988) mettent aussi en avant la corrélation entre la biomasse microbienne et le contenu en nutriments minéralisés.

A cela s'ajoute le fait qu'il y ait un manque de connaissances en termes d'impact des contraintes naturelles ou anthropiques sur les organismes des sols (Cluzeau et al., 2012). Il y a cependant quelques conclusions clairement établies. En effet, il est notable que la quantité de biomasse microbienne est directement corrélée à l'apport de fertilisants organiques. De plus, un apport suffisant d'azote permet d'atteindre de hautes valeurs de biomasse microbienne (Cluzeau et al., 2012). Il apparaîtrait encore que la présence ou non de labour influencerait la quantité de BM (Kremer & Li, 2003; Balota et al., 2004; Lupwayi et al., 2004; Cluzeau et al., 2012). Mais ce sujet reste à débattre au vu des avantages et des inconvénients que présentent les différents modes de culture. Ceci sera discuté plus amplement dans le point traitant du labour (voir partie 1.6.2).

Les micro-organismes, à savoir certains procaryotes, eucaryotes et bactéries, jouent un rôle majeur dans le cycle de l'azote (Canfield et al., 2010)(figure 3). La figure 3 met en évidence les relations entre les enzymes libérés par les micro-organismes (et donc gènes associés) du sol et les transformations subies par les différentes formes d'azote au cours de son cycle.



Le carbone présent dans les sols subit de nombreux processus tels que la minéralisation et la séquestration. Ce dernier processus correspond à : « [...], l'augmentation du carbone à long terme dans les stocks terrestres et aquatiques et par conséquent à la diminution du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. » (West & Marland, 2002). Ce transfert de carbone dans les sols est le résultat de la décomposition des matériaux végétaux initialement produits par la photosynthèse (capture du dioxyde de carbone lors du processus) (West & Marland, 2002). Le retour de la biomasse aérienne dans les sols et ce, sous forme de résidus, favorise le développement des micro-organismes dans les sols. Autrement dit, au plus cette dernière est importante, au plus le développement du biota est favorisé (Dick, 1992; Karlen & Stott, 1994; Kremer & Li, 2003). La biomasse se constitue de matières organiques et d'éléments minéraux qui sont en partie digérés. La biomasse microbienne (inclue dans la biomasse) peut représenter le réservoir de carbone le plus conséquent dans les sols (Zwart & Brussaard, 1989).

Le phénomène opposé à la séquestration est la minéralisation du carbone qui correspond au flux de dioxyde de carbone émis par l'écosystème, et dans le cas présent, par le système sol, vers l'atmosphère, (Alvarez et al., 2002).

Il est important de noter que la biomasse fongique joue un rôle majeur dans la constitution de la matière organique (MO) labile qui est une source primaire de carbone et de nutriments pour les cultures suivantes (Gupta & Germida, 1988).

La stabilité des agrégats est liée au contenu en matières organiques. En effet, suite à une immersion répétée d'agrégats de sol dans l'eau, Kremer & Li (2003) démontrent que la présence accrue de matières organiques induit une augmentation de la stabilité de ces agrégats. Ceci étant en lien avec l'activité microbienne. Cette dernière impacte donc indirectement la stabilité des agrégats de par son activité métabolique et la libération d'excrétions (Zwart & Brussaard, 1989). Les auteurs démontrent aussi que : « La faune des sols induit la création de nouveaux pores par le creusement ou l'élargissement de certains d'entre eux », ou encore que : « la faune réduit ces pores par l'action de pressions latérales quelque part dans le sol ».

Encore une fois, la biomasse fongique joue un rôle majeur dans les mécanismes du sol de par une aide à la formation des macro-agrégats (Gupta & Germida, 1988).

### 1.5 Facteurs naturels et déterminants dans la diversité et l'activité des micro-organismes dans les sols

Il est important de noter que l'environnement chimique et physique est déterminant dans l'activité microbienne (Fraser et al., 1988). En effet, certaines conditions physico-chimiques favorables permettraient de développer une diversité plus importante des populations microbiennes par rapport à d'autres milieux. Ce qui permet encore d'atteindre des niveaux de richesse biologique largement supérieurs à ceux des prairies ou des terres soumises au labour (Gomez et al., 2004).

Cependant, l'influence du contexte pédologique sur la diversité et la richesse microbiologique est encore mal comprise à l'heure actuelle (Degruene et al., 2019). Malgré cela, leur étude montre que le contexte pédologique module, avec une certaine ampleur, la réponse des propriétés physico-chimiques des sols face aux pratiques culturales mises en place sur les terres. A terme, il y a des implications directes avec les communautés microbiennes et fongiques des sols. Leurs résultats montrent que le contexte pédologique prend un rôle dans la forme des populations bactériennes (explication respective de 27 et 29% de la variation de la  $\beta$ -diversité<sup>1</sup> fongique et bactérienne). Les bactéries sont influencées de manière plus prononcée par les conditions pédologiques que par les pratiques culturales appliquées (Degruene et al., 2019). Les communautés fongiques sont, quant à elles, influencées de manière égale par le contexte pédologique et les pratiques culturales.

### 1.6 Facteurs anthropiques et déterminants dans la diversité et l'activité des micro-organismes.

#### 1.6.1 Impact de la fertilisation sur la microbiologie

L'impact de la fertilisation ou des amendements organiques présente un effet non-négligeable sur les micro-organismes. En effet, l'apport de résidus de plantes, de fumier, de boues d'épuration et des pailles permet au sol de produire du carbone organique en plus grande quantité que les sols recevant des fertilisants inorganiques (Marschner et al., 2003). Fraser et al. (1988) vont même jusqu'à présenter l'utilisation de fertilisants de synthèse comme un élément perturbateur de la chimie et de la biologie des

---

<sup>1</sup>  **$\beta$ -diversité** : Cette variable montre les différences entre les communautés microbiennes issues d'environnements différents. L'attention est principalement portée sur les différences d'abondance taxonomique venant des différents échantillons.

sols. Lupwayi et al. (2004) appuient cette hypothèse en disant que les fertilisants inorganiques seuls ne stimulent pas la croissance des populations microbiennes.

Fraser et al., (1988) précisent encore en relevant le fait que l'application de fumure induit une augmentation du carbone organique dans les terres et donc, à terme l'activité et la qualité des populations microbiennes.

Cependant, une étude belge montre que le retrait ou le dépôt de résidus de culture n'aurait pas d'impact sur la richesse ou la composition des communautés microbiennes et fongiques dans certains sols de Belgique. Les auteurs expliquent cette absence de potentiel enrichissement par une haute fertilité déjà présente dans cette région. En effet, l'apport de résidus de culture pourrait être négligeable en comparaison avec le contenu en carbone organique déjà présent initialement (Degruene et al., 2016).

### 1.6.2 Labour versus non-labour

La mise en place de cultures a naturellement tendance à diminuer la biomasse microbienne des sols ainsi que son activité enzymatique (Fraser et al., 1988; Gupta & Germida, 1988). De plus, l'agriculture (supposée avec labour) induit une diminution de la stabilité du milieu cultivé par rapport aux sols natifs (Elliott, 1986). L'auteur explique cette diminution principalement par une réduction de la concentration en carbone organique. Ceci est appuyé par Chaney & Swift (1984) qui montrent le lien très hautement significatif entre le contenu en matière organique (obtenu sur base du contenu en carbone organique) et la stabilité des agrégats.

Il est important de noter que les macro-agrégats constitueraient le milieu de vie principal des micro-organismes (Gupta & Germida, 1988). En effet, les auteurs relèvent le fait que les micro-agrégats (<0.25 mm) des sols natifs et cultivés de leur étude contiennent moins de carbone organique, de biomasse microbienne et une activité enzymatique plus faible que les macro-agrégats (>0.25 mm).

Sur base de ce raisonnement, les pertes en carbone organique engendrées par l'agriculture (Elliott, 1986) influencent les populations de micro-organismes (Kremer & Li, 2003) qui à terme induisent des pertes de stabilité structurale supplémentaire à celles des travaux mécaniques et donc une augmentation des micro-agrégats (Gupta & Germida, 1988).

De nombreux articles relatent les pertes de biomasse microbienne en présence de terres labourées par rapport aux terres non-soumises au labour (Dick, 1992; Kremer & Li, 2003; Balota et al., 2004; Lupwayi et al., 2004). Cela s'explique par le fait que le maintien d'une couverture végétale accrue diminue la température des sols et augmente le contenu en eau, l'agrégation et le contenu en carbone des sols. Cela fournit donc des conditions favorables au développement des micro-organismes (Balota et al., 2004).

Il est important d'apporter des nuances à ces propos car les différences de biomasse microbienne (BM) peuvent parfois être observées seulement sur les sept premiers centimètres du sol (Lupwayi et al., 2004). En effet, suite à une comparaison des résultats de BM prélevés sur des profondeurs différentes, ces chercheurs ont vu qu'il n'y avait pas de variation de BM dans les échantillons prélevés sur 20 cm de profondeur (au lieu de 7cm pour les autres) entre les cultures soumises au labour et celles qui ne l'étaient pas. Cela s'explique par une stratification de la microbiologie qui se placerait majoritairement dans les strates contenant du substrat à consommer. Les terres n'étant pas retournées en absence de labour, la microbiologie des sols n'est pas déplacée dans les différentes couches du sol. Degruene et al., (2016), appuient cette hypothèse au vu des résultats similaires montrant une richesse bactérienne et fongique plus importante dans le top sol (0-5cm) que dans le sol profond (15-20 cm).

Les articles cités plus haut mettent en évidence l'impact du labour sur la microbiologie des sols mais ces connaissances constituent un sujet soumis à la controverse. En effet, l'application du labour ne présenterait pas d'impact direct sur la microbiologie des sols (Zwart & Brussaard, 1989; Dick, 1992). Cependant, lors du déroulement de leur expérience, Zwart & Brussaard (1989) observent une augmentation de la BM durant la croissance du blé implanté sur des terres soumises au labour. Mais les

chercheurs expliquent cela par des différences de température et d'humidité entre les localisations (Elliott et al., 1984), par la présence accrue ou non de résidus de cultures sur les terres (Granatstein et al., 1987), par des différences de prédateurs entre les milieux (Schnürer et al., 1986) et non pas, par application ou non du labour. Holland & Coleman (1987) vont même jusqu'à dire que le labour permet une interaction bénéfique entre l'azote et le carbone grâce au mélange des terres. Ceci a pour effet de fournir un milieu adéquat pour les micro-organismes.

Il a aussi été remarqué que le passage au labour réduit (RT= « reduced tillage) (mécanisation rentrant sur les 20 premiers centimètres de sol) depuis le labour conventionnel (CT = « conventional tillage ») mène à une diminution de la richesse taxonomique microbienne et fongique (Degrun et al., 2016). Les micro-organismes seraient présents en plus grande quantité dans les sols perturbés. Les auteurs l'expliquent cela par une absence de renouvellement taxonomique spécifique à la pratique du labour superficiel. Le milieu étudié est caractérisé comme étant encore en transition, ce qui expliquerait l'absence de taxons spécifiques au labour superficiel. Degrun et al. (2017) vont même jusqu'à dire que les terres en labour conventionnel accueillent une plus grande richesse taxonomique et des communautés bactériennes et fongiques plus différentes en comparaison avec le labour réduit. Ils fournissent l'hypothèse que le labour pourrait favoriser les micro-organismes ayant une « stratégie r »<sup>2</sup>. De plus, l'application de RT produit une semelle de labour moins profonde dans les sols. Ceci réduit l'espace disponible pour le développement racinaire et pourrait avoir, à terme, des répercussions négatives sur la production alimentaire. Le RT favoriserait les populations se développant dans des conditions plus limitées mais il n'y a pas encore d'évidences d'une influence quelconque sur la productivité et la santé des cultures (Degrun et al., 2017).

Comme c'est observable plus haut dans le texte, la thématique du labour reste encore obscure et aucun avis tranché ne peut encore être établi à l'heure actuelle. Il apparaît intéressant de se pencher au plus près sur les questionnements entourant ce sujet. Il est important de noter que ces contradictions sont peut-être liées à l'évolution des techniques utilisées pour la réalisation des expérimentations.

## 1.7 Les systèmes agroécologiques

Le contexte environnemental et politique actuel pousse l'humain à mener une réflexion nouvelle sur les méthodes de cultures. En effet, Veteto & Lockyer (2008) relèvent le fait que : « le comportement humain vis-à-vis de l'environnement dans le contexte capitaliste est très complexe et mène à des résultats de plus en plus injustes et non-durables. [...], il est important que les anthropologues environnementaux et écologistes utilisent des recherches empiriques dans le but de développer à la fois des approches théoriques et pratiques pour faire face au challenge de la durabilité. ». Un changement de paradigme est en train d'être opéré. Au cours du siècle dernier, l'agriculture avait pour objectif de fournir la plus grande production alimentaire possible alors qu'actuellement l'être humain tente de minimiser son impact sur l'environnement dans le but de préserver les ressources alimentaires des générations futures.

De nombreuses voies d'agricultures alternatives font partie de ce changement de paradigme et sont fortement discutées actuellement. Il y a notamment la permaculture, la biodynamie, l'agriculture naturelle, les techniques de conservations des sols (TCS),... (Barbié, 2007)

Dans le cadre de ce TFE, une des fermes étudiées (Ferme Arc-en-ciel (CONS) : partie 2.3.1) s'inspire de multiples sources d'informations venant de l'agroécologie. Ce terme englobe les pratiques telles que la permaculture, l'agriculture naturelle et les TCS, ...

---

<sup>2</sup> Stratégie "r" : elle est caractéristique d'espèces qui ont une grande vitesse de multiplication, ce qui leur permet, sous certaines conditions favorables, d'occuper l'espace et de mobiliser la ressource. Les individus des populations ainsi générées sont alors en forte compétition, ce qui entraîne une mortalité importante. C'est le cas des espèces pionnières.



L'agroécologie fonctionne selon les trois principes suivants :

- Les terres en agroécologie tentent de diversifier les plantes et d'augmenter la couverture des sols au moyen d'alternance de cultures adaptées. Ces actions diminuent la perte en nutriments et en chaleur et augmentent la production de biomasse souterraine
- Les agriculteurs tentent de minimiser les perturbations mécaniques et chimiques du sol. Le non-labour est conseillé afin d'augmenter le contenu en carbone organique et donc améliorer les propriétés physiques (infiltration) et de supporter la microbiologie des sols.
- Les agriculteurs doivent organiser l'occupation des sols (habitat, cultures, haies, ...) pour améliorer la régulation biologique.

(Duru et al., 2015)

Le terme permaculture peut être défini comme étant : « [...] une philosophie de développement global et un mouvement durable qui englobe un ensemble de principes éthiques, des lignes directrices concernant la conception et des techniques permettant la création d'une agriculture et d'une culture durable et permanente. » (Veteto & Lockyer, 2008). D'un point de vue pratique, la pluie peut être récoltée sur les toitures afin de subvenir aux besoins en eau. La mise en place de plantes compagnons (Issu de l'anglais : « compagnion planting ») est réalisée. Cela consiste à connaître ce dont les plantes ont besoin et dans quelles mesures elles peuvent interagir pour subvenir aux besoins des unes et des autres (Brain & Thomas, 2013).

L'agriculture naturelle est caractérisée par des traditions agricoles locales et des principes repris par le terme de permaculture tels que l'absence de labour, d'engrais, de sarclage et de désherbants (Barbié, 2007). Il y a de nombreuses similarités dans ces deux modes de cultures alternatifs

La ferme Arc-en-ciel (CONS) s'inscrit parfaitement dans le modèle d'agroécologie et sera donc définie en tant que système agroécologique n'appliquant aucune forme de labour sur leurs terres et en maraîchage de conservation.

Ces modes de cultures restent en marge du système principal et cela peut s'expliquer par deux erreurs initiales mises en avant par Olivier Barbié (Barbié, 2007). La première erreur se cache derrière le fait que les réflexions sont menées dans le but de copier les systèmes forestiers qui ont une production largement inférieure aux systèmes agricoles industriels. La seconde erreur réside dans l'utilisation d'espèces héliophiles et qui éprouvent donc des difficultés à se développer dans des milieux ombragés. De plus, les espèces actuellement employées ont été le résultat de sélections permettant l'hypertrophie d'un des membres. Cela induit des perturbations dans les cycles biogéochimiques de par leurs demandes accrues vis-à-vis de certains nutriments comme l'azote (Barbié, 2007).

## 1.8 Question de recherche

Sur base des informations ci-mentionnées, il apparaît clairement que la microbiologie des sols joue un rôle clé dans les mécanismes bio-géochimiques tels que le cycle des nutriments, la formation des agrégats, la stabilisation du carbone dans les sols et bien d'autres encore. Malgré cela, les informations concernant le sujet ne sont pas encore développées. Ce TFE aura donc pour objectif de mieux comprendre les relations interdépendantes entre propriétés physico-chimiques et processus microbiens au sein des sols en maraîchage.

Il apparaît donc intéressant de se pencher sur les deux sujets ci-mentionnés dans le but de mettre en évidence des potentielles techniques permettant de limiter l'impact de l'agriculture sur la qualité de l'environnement. C'est pourquoi, j'ai décidé de comparer l'impact sur la microbiologie des sols de différents modes de cultures sur des sols similaires. J'en viens donc à la formulation de la question de recherche de ce travail de fin d'études :

***L'application de certaines pratiques culturales telles que les systèmes agroécologiques et l'agriculture biologique peut-elle influencer positivement le fonctionnement biogéochimique des sols limoneux de Wallonie ?***

Ce travail de fin d'étude a donc pour but de mieux comprendre l'impact de certaines pratiques culturales sur le fonctionnement des sols via les interactions potentielles entre les facteurs physico-chimiques et les processus liés aux micro-organismes. Pour ce faire, deux fermes ont été sélectionnées pour leurs pratiques culturales, leur proximité et leurs similarités pédologiques dans le but de prélever des échantillons de terre. Certains tests mettant en évidence différents facteurs du fonctionnement biogéochimique des sols sont mis en place. Tout ceci est plus amplement décrit dans les paragraphes rédigés ci-après.

## 2 Matériel et méthode

Cette partie matériel et méthode caractérise les milieux étudiés, les pratiques culturales rencontrées et étudiées sur les terres de la ferme Arc-en-ciel ainsi que celles de la ferme Gailly-Jourdan. Les différentes techniques permettant l'évaluation de la qualité des sols selon la définition utilisée par ce travail sont aussi décrites dans cette section. Cela comprend donc les techniques à destination des indicateurs biologiques ainsi que celles destinées aux indicateurs physico-chimiques. Le but étant de comprendre au mieux les systèmes sols mis en place pour pouvoir, à terme, les comparer et évaluer leur qualité biologique.

### 2.1 Situations des milieux d'études

Comme cité précédemment, deux fermes sont étudiées dans le cadre de ce TFE et sont situées dans la province du Luxembourg. La ferme Arc-en-ciel se situe à Wellin (Figure 4) et sera nommée CONS dans le reste de ce travail car elle est qualifiée de maraîchage de conservation. CONS présente des sols de type fGdb2 (Figure 5). Cela est traduit par un sol principalement limoneux, peu caillouteux, sur substrat schisteux et présentant un drainage naturel modéré à assez pauvre.



Figure 4 : Position géographique des sites étudiés

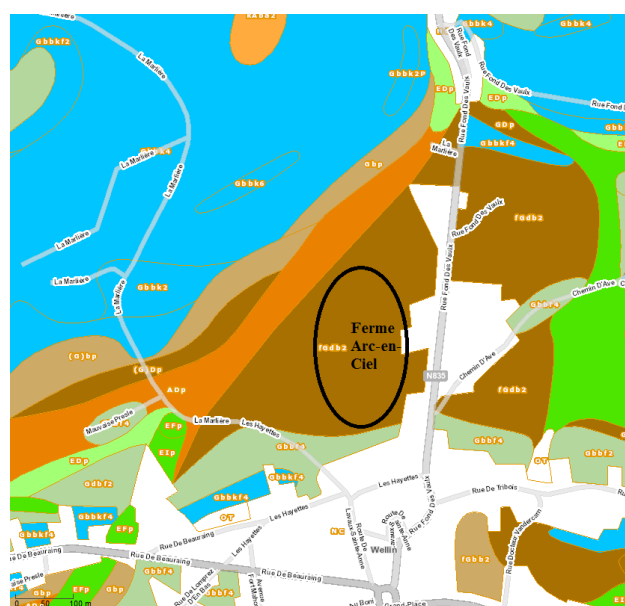


Figure 5 : Sols présents dans la ferme CONS

Cette ferme, au pied de la Calestienne, a pour particularité de présenter un grand nombre de techniques agricoles dites de conservations. Parmi ces dernières, les techniques du Bokashi et du BREF sont ciblées dans le cadre de cette étude. Tout ceci sera détaillé plus amplement dans les pages à venir (voir partie 2.3.1). Les terres de l'exploitation présentent une parcelle sous prairie n'ayant subi presque aucune modification à l'exception de la présence de chèvres à certains moments de l'année. Cette parcelle est constituée d'une prairie permanente et servira de témoin pour l'étude réalisée dans ce document. De plus, l'analyse de la carte de Ferraris (1777) montre que les terres de Serge Peerebroom (CONS) étaient, à cette époque, recouvertes de prairie et le haut de la pente était couvert d'une végétation arborée (figure 6).



Figure 6 : Représentation du village de Wellin sur la carte de Ferraris (1777). Mise en évidence de l'occupation passée des sols.

La seconde exploitation agricole, quant à elle, se situe à Paliseul (figure 4) et est qualifiée de maraîchage biologique. Cette dernière sera nommée BIOL dans le reste de ce travail. BIOL présente des sols repris sous l'appellation Gbbfi4 (Figure 7). Cela traduit la présence de sols limoneux avec une charge schisto-phyladeuse à drainage quasi exclusivement favorable. Il est important de noter que cela induit une légère différence avec les sols de CONS. En effet, les charges peu caillouteuses et schisto-phyladeuses pourraient induire des différences de drainage et donc influencer les paramètres étudiés.

Cependant, au vu de la faible distance et de la présence des deux fermes dans des milieux similaires, il sera considéré que les fermes ont évolué dans des contextes géopédologiques quasiment similaires (voir point 4.2.1). Cette différence impose un traitement et une interprétation prudente des résultats obtenus. Ceci est aussi un facteur important car la biomasse microbienne présente des variations non négligeables d'abondance selon les localités étudiées (Dequiedt et al., 2011).

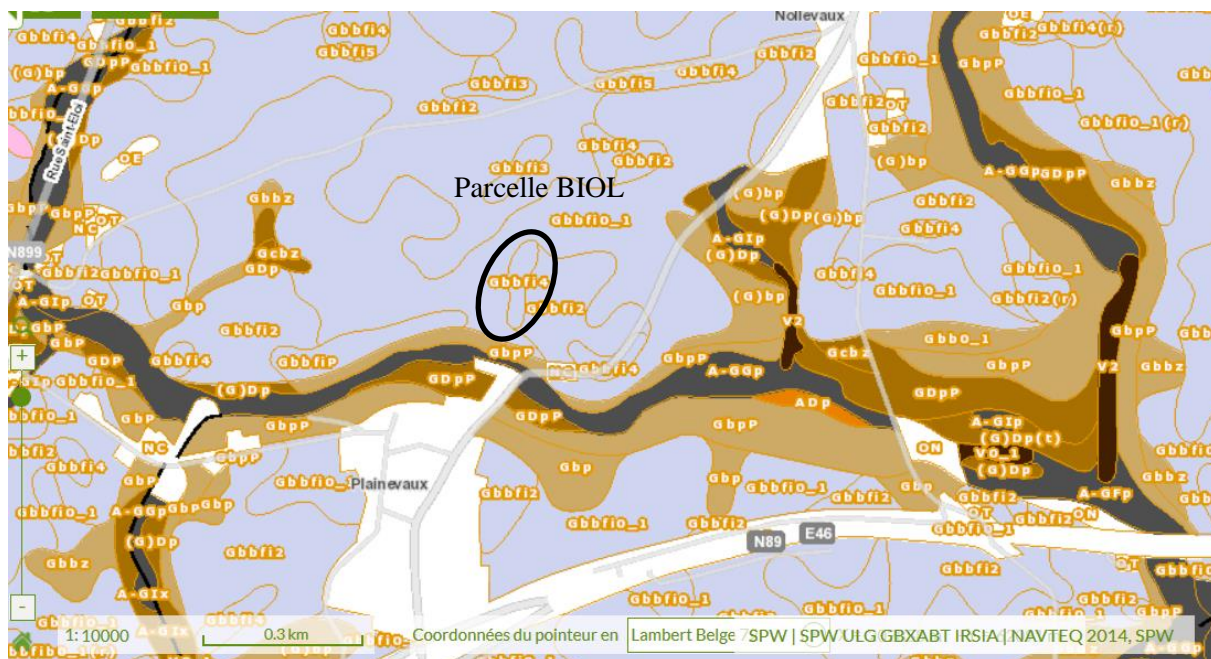


Figure 7 : Sols présents dans la parcelle BIOL

## 2.2 Echantillonnage

Les terres des deux fermes ont été échantillonnées le 28 février 2020. Cette date a été choisie pour correspondre au mieux aux conditions optimales d'échantillonnage et être en adéquation avec les échéances initialement mises en place. Il est important d'éviter l'échantillonnage durant les périodes où la terre est trop sèche ou trop humide. Il faut aussi éviter la présence de gel dans les sols étudiés. Une différenciation entre les échantillons destinés aux analyses concernant les indicateurs biologiques et les analyses destinées aux indicateurs physico-chimiques est mise en place pour satisfaire aux conditions optimales d'analyses (Vincent et al., 2019).

Les échantillons à destination des analyses physico-chimiques doivent être prélevés sur une profondeur de 0-20cm. Ensuite, ils sont séchés à l'air libre durant plusieurs jours ou à l'étuve (40°C maximum) puis tamisés à 2mm. La terre peut alors être conservée à température ambiante dans un contenant hermétique et à l'abri de la lumière (Vincent et al., 2019).

Les échantillons à destination des analyses biologiques doivent être prélevés sur une profondeur de 0-10cm pour assurer la prise de la couche ayant l'activité biologique la plus élevée. Par la suite, la terre fraîche est tamisée à 4mm. L'humidité doit alors être ajustée à 50-60% de la capacité au champ. Il est impératif d'éviter un dessèchement total de la terre pour empêcher une extermination totale de la microbiologie. Les échantillons frais sont ensuite conservés à une température de 4°C dans l'attente des analyses (Vincent et al., 2019).

Dans un souci de praticité durant les manipulations sur le terrain, la terre a été prélevée sur une profondeur de 0-15cm afin de combiner les conditions requises pour les deux types d'analyses futures.

Les cinq parcelles étudiées ont été subdivisées en trois parties de surface similaires afin d'avoir trois répliques par sous-parcelle. Cette dernière est alors échantillonnée selon un tracé en zig-zag pour atteindre une homogénéité plus importante des répliques (Crémer & Lambert, 2013).

En raison des conditions de travail liées à la pandémie du Covid-19, le séchage des terres a été prolongé pour une durée totale de deux mois et onze jours. Ceci ne respecte donc pas les recommandations de séchage mentionnées ci-dessus.



## 2.3 Pratiques culturales étudiées et itinéraires techniques des parcelles

### 2.3.1 Ferme Arc-en-ciel (CONS)

#### 2.3.1.1 Bokashi

##### 2.3.1.1.1 Informations générales

Deux parcelles différentes ont été soumises à l'application de bokashi. Cette technique a été appliquée deux fois sur une parcelle (bokashi 2X) tandis que sur la seconde, quatre applications ont été réalisées (bokashi 4X) (Figure 8).



Figure 8 : Localisation des parcelles étudiées dans la ferme CONS

Le bokashi tire son origine des pays d'Asie de l'est mais est aussi largement utilisé dans les exploitations agricoles des pays d'Afrique du sud et centrale. Cette technique est le résultat de l'utilisation d'un mélange de bactéries primaires produisant de l'acide lactique et qui coexistent dans une solution dont le pH avoisine les 3,5 (Christel, 2017). Cette solution bactérienne est utilisée dans le but de réaliser une décomposition fermentée de déchets organiques. Il apparaît aussi que l'utilisation de cette dernière en aspersion sur les feuilles des plantes permet un accroissement des rendements ainsi qu'une protection contre les maladies (Christel, 2017).

Une caractéristique importante du bokashi est de présenter un rapport C/N très faible (10) avec un contenu en ions ammonium élevé comme principale source d'azote. De plus, le pH faible de la solution présente dans les tonneaux empêche la propagation de microbes néfastes à la fermentation des résidus organiques. En conséquence de ceci, la concentration en acide aminé augmente grâce à la présence accrue de *Lactobacillus* (Yamada & Xu, 2012).

Il est important de noter que la qualité d'un bokashi dépend principalement de son contenu en eau lors de sa réalisation. En effet, un pourcentage trop faible en eau induirait une croissance accrue des micro-organismes aérobies qui empêchent le bon déroulement des mécanismes précédemment cités. Ceci a pour résultat de produire une préparation de faible qualité. Pour assurer la décroissance voulue de pH, il est nécessaire d'avoir une concentration en eau de minimum 30 %. Il est à noter que le relevé du pH est un bon indicateur de la qualité du bokashi (Yamada & Xu, 2012).

Il a été reporté maintes fois que le bokashi a un effet bénéfique sur la qualité des sols et la production malgré un usage peu fréquent de cette technique dans ce but. En effet, les micro-organismes effectifs du bokashi sont plus souvent utilisés dans les procédés agroalimentaires. Il est cependant reconnu comme étant un fertilisant organique au même titre que les autres (Yamada & Xu, 2012).

#### 2.3.1.1.2 Itinéraire technique et pratiques agricoles des parcelles

L'ensemble des cultures est repris dans la figure 9. On remarquera également l'utilisation de biochar lors de la première et la quatrième application de bokashi ainsi que lors de la dernière culture. A chaque fois, du foin est rajouté pour servir de couverture.

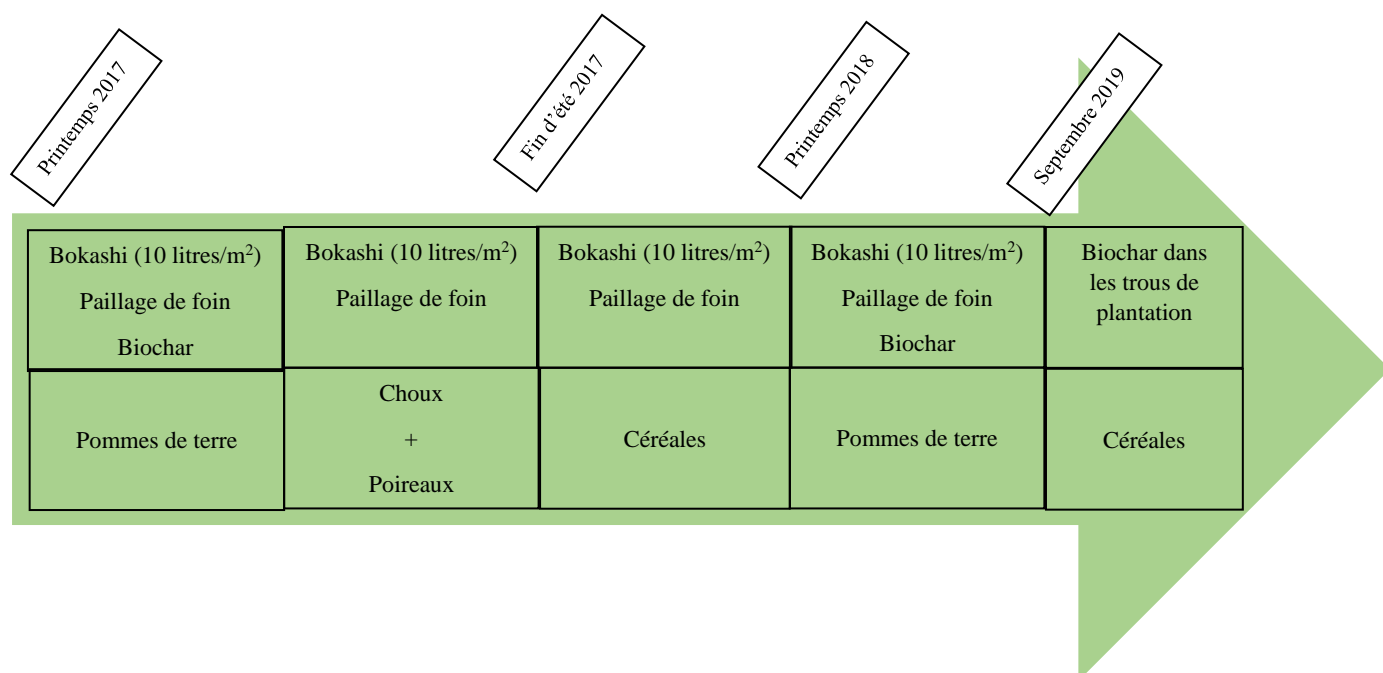


Figure 9 : Itinéraire technique de la parcelle ayant reçu quatre applications de bokashi ainsi que les cultures en place durant ces périodes

En ce qui concerne la seconde parcelle en bokashi, deux applications sont à notifier. Les cultures appliquées sur les terres sont reprises par la figure 10.

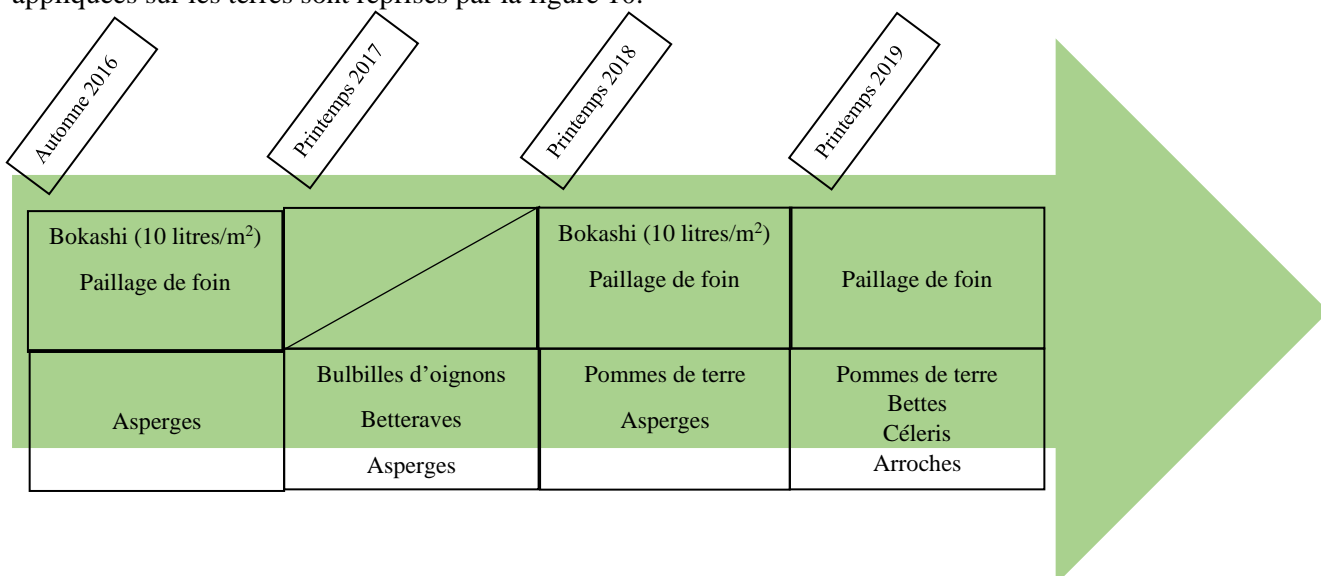


Figure 10 : Itinéraire technique de la parcelle ayant reçu deux applications de bokashi ainsi que les cultures en place durant ces périodes

#### 2.3.1.2 BREF

##### 2.3.1.2.1 Informations générales

Le BREF, ou “branchages raméaux entassés foulés”, est issu d’une technique fort similaire appelée BRF, ou encore « bois raméal fragmenté ». Cette dernière technique consiste en un enfouissement de tiges de bois de faible diamètre (Lemieux, 1996) dans le sol afin d’imiter les caractéristiques d’un écosystème forestier (Barthès et al., 2010). Le BREF s’approche plus encore du système forestier car les branches sont installées en butes et sont seulement écrasées pour entamer le travail de décomposition. Aucune étude n’a encore été réalisée sur cette technique à proprement parler mais le BRF, par contre, est bien documenté. Les caractéristiques présentées pour le BRF sont considérées comme fort similaires à celles du BREF utilisé par la ferme CONS .

Il a été remarqué que l’utilisation du BRF avait tendance à induire une diminution des rendements lors de la première de culture et ceci pour les sols à fraction sableuse importante. Cette baisse s’explique par une immobilisation de l’azote par la microflore pour consommer le carbone. Cette dernière peut être compensée par un apport organique ou minéral de cet élément. Par contre, les sols présentant une fraction limono-argileuse plus importante affichent une augmentation des rendements dès la première année (Barthès et al., 2010).

Le BRF permet d’améliorer les propriétés physiques et hydriques des sols. En effet, l’infiltration, l’humidité, la porosité et la stabilité structurale sont améliorées. De plus, la compacité des sols est amenuisée et le profil de température moyen est plus stable au cours du temps (Barthès et al., 2010). En ce qui concerne le BREF plus directement, il apparaîtrait qu’il diminue l’érosion des sols (Barthès et al., 2010).

Au vu de ces considérations, il semble que le BREF présente des qualités non négligeables dans le cadre d’une agriculture qui se veut protectrice de la biologie des sols. Le faible nombre d’études sur le sujet nécessite une analyse plus approfondie du thème afin de le caractériser plus amplement.

##### 2.3.1.2.2 Itinéraire technique et pratiques agricoles des parcelles

La parcelle de BREF a été soumise à d’autres cultures que celles en bokashi. Ces dernières sont reprises dans la figure 11. De plus, il est important de remarquer la nette différence de hauteur de la butte entre l’année 2019 et l’année 2020. La taille du monticule a diminué de plus de moitié. Cela met en évidence le travail important des organismes présents dans les sols.



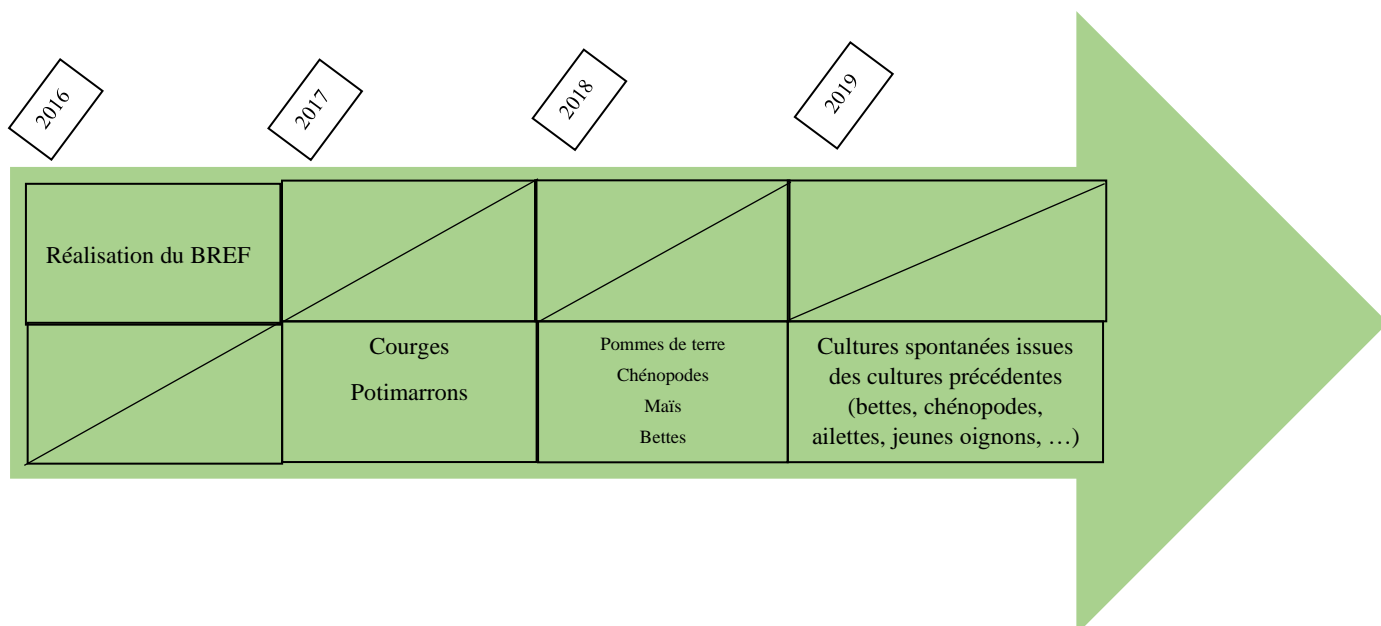


Figure 11 : Itinéraire technique de la parcelle soumise à du BREF et les cultures présentes durant ces périodes

### 2.3.1.3 Prairie

CONS présente une parcelle de terre sur laquelle aucune pratique culturale n'a été réalisée durant les trois voire quatre dernières décennies. Cette parcelle abrite un petit cheptel de chèvres et sera donc référencée comme la parcelle « prairie ». Elle est utilisée comme unité témoin afin de comparer les techniques entre elles.

### 2.3.2 Ferme de Gailly-Jourdan (BIOL)

Cette exploitation agricole est reprise sous le label d'agriculture biologique. Il s'agit d'une ferme dite en maraîchage biologique (BIOL). Les terres ne peuvent donc subir aucun apport d'intrant d'origine inorganique. La famille Jourdan apporte annuellement du fumier afin d'assurer une certaine fertilité. Il y a aussi un apport d'engrais biologique (N:P:K, 10:3:3). Un chaulage est réalisé annuellement durant l'hiver pour rehausser légèrement le pH. Une seule parcelle est prise en considération et cette dernière est soumise à la culture de légumes depuis les six dernières années. Il est important de noter que les sols y sont travaillés mécaniquement au moyen d'une bineuse. De plus, un travail de formation de butte est réalisé lors de la culture des poireaux qui est en place actuellement. Lors des jachères, le maraîcher applique de la fiente de poule à raison de sept tonnes à l'hectare.

## 2.4 Analyses à destination des indicateurs biologiques

### 2.4.1 Carbone et azote microbien

#### 2.4.1.1 Informations générales

La détermination du carbone et de l'azote microbien est le résultat de la mise en place d'une technique de Fumigation/Extraction (Vance et al., 1987). La BM permet, sur base de différences d'abondance, de discriminer l'utilisation des sols tels que les forêts, les prairies et les cultures (Marschner et al., 2003). Cela est appuyé par l'influence claire de l'homme sur la quantité de BM retrouvée dans un milieu donné (Nicolardot et al., 2007; Cluzeau et al., 2012). Le but étant, par cette technique, de révéler la présence ou non de différences d'activité microbienne dans les pratiques culturales étudiées. De plus, les données obtenues par ces analyses permettent le calcul de certains quotients (voir tableau 3) caractérisant le fonctionnement de la microbiologie des sols.

#### 2.4.1.2 Méthode

Les analyses de Fumigation/Extraction ont été réalisées par le laboratoire de l'université de Liège sous la direction de madame Monique Carnol. Cette technique n'a donc pas été réalisée par mes soins mais

une description de sa réalisation est détaillée dans les paragraphes suivants et issue, dans les grandes lignes, des métadonnées fournies avec les résultats d'analyses.

La biomasse microbienne carbonée (Cmic) est déterminée en soustrayant le contenu en carbone organique des extraits des échantillons fumigés (exposition aux vapeurs de chloroforme) et non-fumigés. Pour ce faire, chaque échantillon de sol est réparti en deux aliquotes ; l'une est directement soumise à une extraction au K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5M, l'autre est incubée pendant trois jours et fumigée avec du chloroforme sans éthanol avant l'extraction. Les contenus en carbone sont alors révélés via l'analyseur de TOC (Analytik Jena multi N/C 3100). La soustraction de ces deux contenus indique la quantité en carbone libérée lors de la lyse des micro-organismes. Par la suite, un facteur correcteur k<sub>ec</sub>, représentant la partie extractible de biomasses microbiennes carbonées après fumigation (Joergensen, 1996) doit être appliqué pour obtenir les valeurs de carbone microbien. Ceci se traduit par l'équation suivante (Eq (1)) :

$$\text{Carbone microbien} = E_c / k_{ec}$$

Eq ( 1)

(Joergensen, 1996)

Où : E<sub>c</sub> = soustraction des contenus en carbone organique extraits au K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> des sols fumigés et non-fumigés

K<sub>ec</sub> = partie extractible de la biomasse microbienne carbonée après fumigation

Vance et al. (1987) ont étudié les régressions linéaires entre les contenus en biomasse carbonée (Biomasse C) obtenu via la Fumigation/Incubation method<sup>3</sup> (F/ I) et E<sub>c</sub> résultant de la F/E (Fumigation/Extraction method). L'équation se traduit de la sorte (Eq(2)) :

$$\text{Biomasse C} = (2.64 \pm 0.06) \times E_c$$

Eq ( 2)

Le facteur k<sub>ec</sub> équivaut donc à  $1 / (2.64 \pm 0.06) = 0.38$  (Vance et al., 1987). Cependant, Joergensen (1996) relève la grande variabilité des valeurs de facteurs k<sub>ec</sub> selon les sols étudiés et les méthodes d'oxydation utilisées ((1)titrage en retour du dichromate n'ayant pas réagi durant l'oxydation au dichromate du carbone organique ; (2)UV-persulfate ou oxydation au four). Il a donc réalisé une régression linéaire entre les biomasses C et les E<sub>c</sub> des données récoltées dans les articles publiés traitant du sujet. Les résultats obtenus mènent aux conclusions suivantes : (1) k<sub>ec</sub> = 0.38 est correctement applicable à la méthode utilisée dans ce travail et (2) k<sub>ec</sub> = 0.45 est correctement applicable à la seconde méthode d'oxydation). Finalement, la valeur retenue pour le facteur k<sub>ec</sub> représentant l'ensemble des données et utilisée dans ce TFE est 0.45 car cette dernière se base sur un plus grand nombre de réplicas.

En ce qui concerne la biomasse microbienne azotée (Nmic), la méthode est similaire à celle du Cmic. L'azote total est mesuré via un Auto-analyseur (Auto-Analyser 3, Bran & Luebbe, Germany) dans les sols fumigés et non-fumigés. La soustraction des deux contenus (E<sub>N</sub>) rapportée au facteur k<sub>en</sub> équivaut au contenu en biomasse microbienne azotée des échantillons (Eq (3)) :

<sup>3</sup> La « Chloroform Fumigation Incubation Method » (CFIM ou F/I) est une technique permettant de calculer la biomasse microbienne d'un sol sur base des dynamiques gazeuses résultant de l'activité des microorganismes présents dans ce dernier (Voroney, 1983)

$$\text{Azote microbien} = E_n / k_{en}$$

Eq ( 3)

La valeur de  $k_{en}$  (0.54) est le résultat de l'étude de la relation entre le Flush N ( $F_N$ ) issu de la F/I et la soustraction des contenus en azote total des échantillons fumigés (deux modalités : 1 jour d'exposition et 5 jours d'exposition) et non-fumigés. Les relations résultant des régressions linéaires indiquent que l'azote extrait après un et cinq jours de fumigation (1jour\_CHCL<sub>3</sub>, -N et 5jours\_CHCl<sub>3</sub>, -N) représentent respectivement environ 79 et 101% du flush trouvé avec la méthode de F/I ( $F_n$ ) et est décrit dans les équations suivantes (Eq (4 et 5) :

$$1\text{jour\_CHCL}_3\text{,-N} = (0.79 \pm 0.022) F_N$$

Eq ( 4)

$$5\text{jours\_CHCl-N} = (1.01 \pm 0.027) F_N$$

Eq ( 5)

(Brookes et al., 1985)

L'article ci-mentionné suggère que les deux durées d'exposition au CHCL<sub>3</sub> mesurent le même réservoir d'azote et sont donc équivalentes. Par la suite, il suffit d'introduire Eq (4 ou 5) dans l'équation de la détermination de la biomasse azotée fournie par la F/I (Eq (6)) :

$$B_N = F_N / k_N$$

Eq ( 6)

(Shen et al., 1984)

Avec  $k_N$  = Fraction de la biomasse azotée minéralisée ( $k_N = 0.68$ , (Shen et al., 1984)).

On obtient finalement l'équation suivante (Eq (7)) avec le facteur  $k_{en} = 0.54$ .

$$\begin{aligned} B_N &= F_N / 0.68 \\ &= [(1\text{jour\_CHCL}_3\text{,-N}) / 0.79] / 0.68 \\ &= (1 \text{ day CHCl}_3\text{,-N}) / 0.54 \end{aligned}$$

Eq ( 7)

(Brookes et al., 1985)

Un résumé des méthodes est proposé dans le tableau 2.

Tableau 2 : Description des méthodes d'analyse du carbone et de l'azote microbien (issus des métadonnées fournies avec les analyses)

Variables	Méthodes	Outils d'analyses
Carbone microbien	Le carbone organique est extrait par une solution à 0.5 M de K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> avant et après fumigation (72 h avec du chloroforme sans éthanol). Un facteur K <sub>c</sub> de 0.45 est appliqué à la différence du C extrait après et avant fumigation pour le convertir en C microbien.	Analyseur de TOC (Analytik Jena multi N/C 3100)
Azote microbien	L'azote organique est extrait par une solution à 0.5 M de K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> avant et après fumigation (72 h avec du chloroforme sans éthanol). Un facteur K <sub>en</sub> de 0.54 est appliqué à la différence du N extrait après et avant fumigation pour le convertir en N microbien.	Auto-analyseur (Auto-Analyser 3, Bran & Luebbe, Germany)

## 2.4.2 Protocole de la technique de respirométrie

### 2.4.2.1 Informations générales

La technique de respirométrie est une méthode permettant de mettre en évidence les dégagements en CO<sub>2</sub> d'un sol dans un environnement fermé et contrôlé et correspond donc à la respiration potentielle (Alvarez et al., 2002). La production de dioxyde de carbone est le résultat de la minéralisation du carbone. Cette dernière est un processus au cours duquel la matière organique morte (DOM= Dead Organic Matter) est transformée en un biopolymère simple et stable depuis un biopolymère complexe et labile (Zwart & Brussaard, 1989). La DOM est issue de sources multiples telles que les résidus de culture, les micro-organismes, les exsudats racinaires, la fumure végétale ou animale ainsi que les racines en dégradation issues des cultures précédentes (Zwart & Brussaard, 1989). Il est important de noter que la respiration d'un sol peut être séparée en deux, à savoir la respiration directe et la respiration indirecte (Zwart & Brussaard, 1989). La minéralisation directe résulte de la libération de minéraux par les différents groupes trophiques présents au sein des sols. La minéralisation indirecte, quant à elle, résulte de la formation nouvelle ainsi que de la décomposition partielle de la biomasse présente dans les sols.

Schnürer et al (1985) nous montrent par la même occasion que la minéralisation du carbone est positivement corrélée au contenu en matière organique des sols.

Les émissions cumulées de dioxyde de carbone relâchées durant l'expérience permettent notamment de calculer le quotient métabolique. Ce dernier correspond au rapport entre la quantité de CO<sub>2</sub> émise et la biomasse microbienne carbonée présente dans les sols (Balota et al., 2004). Cela caractérise la quantité de CO<sub>2</sub> émise par unité de biomasse microbienne et de temps. Comme le mentionne Alvarez et al. (2002), ce quotient métabolique ou respiration spécifique prend en compte la notion de temps. Cela permet donc d'accéder à : « la taille du compartiment vivant du sol et à son taux de renouvellement apparent » (Alvarez et al., 2002).

Le potentiel de minéralisation est aussi calculable sur base du ratio entre les émissions de CO<sub>2</sub> et le carbone total des sols. Cela caractérise la capacité de la microbiologie des sols à minéraliser le carbone présent dans le milieu (voir partie 4.3).

Il est important de noter que l'activité microbienne est corrélée avec le taux de saturation des pores (WFP = Water Filled Pores) (Linn & Doran, 1984). Sachant que l'activité microbienne est en lien avec la production de dioxyde de carbone, Doran et Linn (1984) ont démontré que les variations observées dans les émissions gazeuses étaient principalement influencées par le pourcentage de WFP mais aussi en partie par le carbone présent dans la solution du sol. Il est donc nécessaire de garder une humidité suffisante pour le développement bactérien. Ils ont notamment notifié le fait que la respiration et la nitrification des sols suivaient une croissance en lien avec l'augmentation du pourcentage de WFP. Ceci est vrai jusqu'à une valeur seuil équivalent à environ 60% du WFP. Au-delà de cette valeur seuil, les rendements décroissent. Cela s'expliquerait par une limitation des processus aérobie au sein des sols (Linn & Doran, 1984).

Ceci est confirmé par Vincent et al (2019) qui caractérisent le comportement des microorganismes face au contenu en eau des sols durant les expérimentations nécessitant une incubation comme le test de respirométrie. En effet, lorsque le contenu en eau est inférieur à 55-60% de la capacité au champ, les organismes souffrent de sécheresse. A contrario, lorsque le contenu en eau est supérieur à 85% de la capacité au champ, l'oxygène des sols est insuffisant.

#### *2.4.2.2 Etapes de routine des prises de mesure*

- Sortie et ouverture des pots un à la fois
- Mesure de la conductivité électrique de la solution de NaOH et écriture des résultats
- Fermeture des pots un à la fois et remise en place des bocaux dans la chambre climatisée

#### *2.4.2.3 Détail de la méthode*

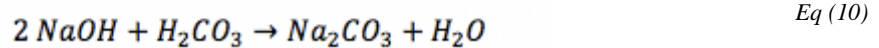
La méthodologie utilisée est celle présentée par Kévin Lefébure dans son travail de fin d'étude (2016) à quelques détails près et est approfondie ci-après. Cette méthodologie diffère de ce qui est proposé par Vincent et al. (2019) pour déterminer la respiration potentielle mais ne présente pas de soucis majeurs car ce TFE réalise une comparaison entre des parcelles. La comparaison est possible tant que les conditions appliquées aux différents échantillons sont identiques.

Après avoir été séchés à l'air libre durant 73 jours (en raison des conditions sociétales résultant du covid\_19), les échantillons sont tamisés à deux millimètres afin d'assurer une homogénéité des terres dans les différents bocaux et donc éviter la présence d'agréats de différentes tailles induisant des différences de respirations. Suite au séchage, les 20 grammes de terre sont insérés dans les bocaux et réhumidifiés au moyen de six aspersions d'eau (soit environ 6ml) afin de réactiver la microbiologie. Le nombre d'aspersions doit être identique d'un échantillon à l'autre afin d'assurer une homogénéité dans les processus appliqués à la terre. La solution de NaOH (30ml, 0.5M) est également insérée dans le pilulier en plastique. Ce dernier est fixé au fond du bocal afin d'éviter un renversement de la solution. Les bocaux sont ensuite fermés et placés dans une chambre climatisée afin d'assurer une température constante avoisinant les 20 °C. En effet, l'augmentation des températures se traduit par une excitation des bactéries et une diminution de la solubilité des gaz, ce qui a pour résultat d'augmenter la production gazeuse des échantillons (Linn & Doran, 1984). Ces manipulations mènent au résultat présenté dans la figure 12.



Figure 12 : Bocal contenant l'échantillon de terre sèche et le pilulier contenant la solution de NaOH pour le test de respirométrie

Durant la période d'incubation, la minéralisation du carbone présent dans la terre induit l'émission de dioxyde de carbone. Ce dernier est ensuite capté par la solution de NaOH. Par réaction avec l'eau, le dioxyde de carbone se transforme en acide carbonique. Ce dernier réagit par après avec l'hydroxyde de sodium pour finalement produire du carbonate de sodium. L'enchaînement des réactions est décrit par les équations suivantes :



Les ions  $OH^-$  de la solution initiale vont être neutralisés par les ions d'hydrogène pour produire de l'eau et des ions carbonates. La conductivité électrique des deux ions étant différente, ( $OH^-$  environ 2,5 fois supérieur à  $CO_3^{2-}$ ), il est possible de suivre l'évolution de l'absorption du dioxyde de carbone par la solution, et donc de l'émission par l'échantillon, en utilisant l'équation suivante :

$$m_{CO_2} = M_{CO_2} \left( \frac{CE_{NaOH} - CE_x}{CE_{NaOH} - CE_{Na_2CO_3}} \right) \frac{CV}{2} \quad Eq (11)$$

(Rodella & Saboya, 1999; Critter et al., 2004)

Sachant que :

- $m_{CO_2}$  = Masse de dioxyde de carbone totale émise [mg].
- $M_{CO_2}$  = Masse molaire du dioxyde de carbone.
- $CE_{NaOH}$  = Conductivité électrique initiale du NaOH (afin de corriger les variations potentielles dues à l'environnement, les valeurs des solutions témoins sont prises pour cette valeur) [mS/cm].

- $CE_x$  = Conductivité électrique de la solution dans le bocal [mS/cm].
- $CE_{Na_2CO_3}$  = Conductivité électrique du  $Na_2CO_3$  (Considérée comme égale à la moitié de la conductivité électrique de la solution de NaOH) [mS/cm].

Sur base de l'évolution de la conductivité électrique, il est donc possible de définir la quantité de  $CO_2$  émise par les échantillons en milligrammes. Le résultat de cette analyse donne donc la quantité de dioxyde de carbone cumulée sur l'entièreté de la période d'expérimentation et les valeurs de respiration potentiel sont le résultat du rapport entre les émissions cumulées de dioxyde de carbone et la masse de l'échantillon multiplié par la durée d'expérimentation afin d'obtenir une notion de vitesse [ $mg\ CO_2 \cdot g_{\text{échantillon}}^{-1} \cdot \text{heure}^{-1}$ ].

#### 2.4.2.4 Remarques

- Il est important de vérifier l'humidité de l'échantillon afin de rester aux abords des 60% du WFP. Cela permet de garder l'activité microbienne dans des conditions idéales de développement.
- Ne pas hésiter à remuer légèrement la terre afin d'éviter l'apparition de moisissures qui ont tendance à induire une surestimation de la respiration des sols dans les pots hermétiques.
- La méthode utilisée dans ce travail diffère de la méthode utilisée dans le projet CARBIOSOL (Vincent et al., 2019) par souci matériel. Une telle expérience n'a pu être mise en place dans le cadre de ce TFE. Malgré cela, le test de respirométrie permet quand même de fournir des valeurs de respiration potentielle mais qui ne peuvent être comparées directement au projet CRABIOSOL.

#### 2.4.3 Autres variables biologiques

Vincent et al. (2019) mettent en avant de nombreux autres indicateurs permettant la caractérisation de la biologie des sols. Tout ceci est décrit dans le tableau 3, ci-après et est en partie issu de leur rapport pour les définitions et complété avec les métadonnées fournies par le laboratoire de l'université de Liège pour les principes et les outils de mesure.

Tableau 3 : Description, principes et outils de mesure des analyses traitant des variables biologiques. (Tableau inspiré de (Vincent et al., 2019) et modifié sur base des métadonnées fournies avec les résultats d'analyses de l'université de Liège via madame Monique Carnol)

Indicateurs	Définition	Principe	Outils de mesure
<b>Carbone extrait à l'eau froide</b>	Le carbone extrait à l'eau froide est le carbone disponible pour les micro-organismes.	Extraction du carbone soluble par l'eau à température ambiante après 1 h d'agitation et centrifugation	Analyseur de TOC (Analytik Jena multi N/C 3100)
<b>Carbone extrait à l'eau chaude (labile)</b>	Le carbone extrait à l'eau chaude présente une fraction active qui inclut le carbone microbien, mais n'est pas limité à celui-ci.	Extraction du carbone labile par l'eau à 80°C pendant 16 h et centrifugation	Analyseur de TOC (Analytik Jena multi N/C 3100)
<b>Minéralisation nette de l'azote</b>	Transformation de l'azote sous forme organique en azote minéral ( $NH_4^+$ , $NO_2^-$ , $NO_3^-$ ). Elle donne des informations sur la disponibilité de l'azote	Différence entre les concentrations en N minéral avant et après une incubation de 28 jours à 20°C	Auto-analyseur (Auto-Analyser 3, Bran & Luebbe, Germany)

	pour les plantes, indispensable à leur croissance.		
<b>Azote total extrait à l'eau froide</b>	Mesure permettant le calcul d'indices comme les rapports eau chaude/eau froide ou azote/carbone	Extraction de l'azote total soluble par l'eau à température ambiante après 1 h d'agitation et centrifugation	Auto-analyseur (Auto-Analyser 3, Bran & Luebbe, Germany)
<b>Azote total extrait à l'eau chaude</b>	Mesure de la quantité d'azote inorganique et organique (minéralisable) potentiellement disponible pour les plantes.	Extraction de l'azote total par l'eau à 80°C pendant 16 h et centrifugation	Auto-analyseur (Auto-Analyser 3, Bran & Luebbe, Germany)
<b>Rapport <math>C_{mic}/N_{mic}</math></b>	Donne des informations sur la composition relative de la communauté microbienne en bactéries et en champignons	$C_{mic} / N_{mic}$	
<b>Quotient métabolique</b>	Quotient éco-physiologique correspondant au rapport entre la respiration potentielle et le carbone microbien. Il représente la quantité de CO <sub>2</sub> respirée par unité de biomasse microbienne	(Respiration potentielle) / $C_{mic}$	
<b>Quotient microbien</b>	Quotient éco-physiologique correspondant au rapport entre le carbone microbien et le carbone organique total. Il donne des renseignements sur la disponibilité de substrat pour les micro-organismes.	$C_{mic} / C_{org\_tot}$	

## 2.5 Synthèse des informations concernant les paramètres biologiques : Indice global de qualité biologique des sols (IGB)

Karlen & Stott (1994) proposent de définir un score sans unité pour chacun des paramètres biologiques et de les additionner pour constituer un indice unique par échantillon. Cela permet donc de synthétiser



les informations. Cependant, le calcul d'un score unique induit une perte d'informations sur les scores individuels (Krüger et al., 2017). C'est pourquoi cette analyse est réalisée en parallèle de l'étude séparée des différents indicateurs biologiques.

Le calcul des scores par échantillon et par indicateur biologique est réalisé selon la formule suivante :

$$S Ind_i = \frac{Ind_i - \min(Ind)}{\max(Ind) - \min(Ind)}$$

Eq (12)

(Van Der Plas et al., 2016)

Sachant que :  $S Ind_i$  = Score d'un échantillon pour un indicateur biologique donné  
 $Ind_i$  = Valeur brute de l'indicateur biologique pour un échantillon donné  
 $Max(Ind)$  = Valeur maximale observée pour un indicateur donné  
 $Min(Ind)$  = Valeur minimale observée pour un indicateur donné

Cette méthode permet donc d'obtenir un score sans unité variant de 0 à 1 pour chacun des indicateurs biologiques étudiés et pour chacun des échantillons. Krüger et al. (2017) ont utilisé un set de six indicateurs biologiques (respiration potentielle, biomasse microbienne ( $C_{mic}$  et  $N_{mic}$ ), minéralisation nette de l'azote, potentiel métabolique, abondance des bactéries et des vers de terre) qui ont montré un pouvoir de discrimination entre les utilisations des sols étudiés. Cependant, ils expliquent qu'en fonction de la question de recherche, des paramètres pouvaient être ajoutés ou supprimés. C'est pourquoi dans le cadre de ce travail, les indicateurs biologiques retenus pour constituer l'IGB par parcelle sont : la biomasse microbienne ( $C_{mic}$  et  $N_{mic}$ ), la minéralisation nette de l'azote ( $N_{min\_nette}$ ), le carbone extrait à l'eau froide et chaude, l'azote extrait à l'eau froide et chaude, la respiration potentielle, le quotient métabolique et le quotient microbien. L'abondance des bactéries et vers de terres ainsi que le potentiel métabolique ne sont pas utilisés dans le calcul de l'indice global de l'échantillon car ils n'ont pas été mesurés dans ce travail. Les valeurs opposées du quotients métabolique (- Quotient métabolique) sont utilisées car des valeurs importantes de cet indicateur révèlent un stress des micro-organismes des sols (voir partie 4.3). Le rapport  $C_{mic}/N_{mic}$  n'est pas utilisé dans le calcul de l'indice total de qualité biologique car il s'agit de valeur caractérisant la composition des populations de micro-organismes.

## 2.6 Analyses physico-chimiques

Les analyses donnent un aperçu du comportement physico-chimique des sols étudiés. Cela donne une vision globale du fonctionnement des sols et rend possible l'interprétation des résultats obtenus via les différents tests décrits plus bas. Les informations présentes ci-dessous sont le résultat d'une discussion (année 2019) avec Clémence Mariage, membre de Requasud.

### 2.6.1 Analyse carbone organique total

La norme iso 10694 est utilisée pour certifier ce test. Elle décrit la méthode du Flash-Dry combustion. Cette technique consiste à oxyder le carbone présent dans les sols en dioxyde de carbone. Cela est réalisé par chauffage (minimum 900 °C) dans un flux de gaz contenant de l'oxygène et exempt de dioxyde de carbone. Le dégagement de  $CO_2$  est mesuré par titrimétrie, gravimétrie, conductimétrie, chromatographie en phase gazeuse ou par une technique de détection par infrarouge selon l'appareil utilisé. Les carbonates sont préalablement extraits des échantillons par application d'acide chlorhydrique afin d'éviter leur participation aux émissions de dioxyde de carbone lors du chauffage des échantillons.

### 2.6.2 Analyse éléments biodisponibles (P, K, Mg, Ca)

L'analyse des éléments biodisponibles se fait sur base de la méthodologie développée par Lakanen & Erviö (1971) et reprise dans la synthèse formulée par Réquasud (Colinet et al., 2003). Ceci s'inscrit dans une norme de la région wallonne. Cette technique a pour but de mesurer les éléments pouvant être absorbables par la végétation. Pour ce faire, une solution d'acétate d'ammonium 0.5 n EDTA est appliquée sur les échantillons. Cette solution est tamponnée à pH 4,65 avec un rapport sol/ solution de 10g/50ml<sup>5</sup>. Un dosage par absorption atomique est ensuite réalisé afin de déterminer les teneurs des éléments.

### 2.6.3 Analyse pH eau et KCl

L'analyse du pH se fait à l'aide d'une électrode en verre plongée dans une suspension de sol dont la répartition des volumes sol et solution est de 1:5. La solution peut être de l'eau, du chlorure de potassium (1mol/l) ou encore du chlorure de calcium (0,01 mol/l). Cette dernière induit un relargage des ions d'hydrogène fixés sur le complexe organo-minéral. Il aura donc tendance à être égal ou inférieur au pH eau. Ceci sera détaillé plus amplement dans la discussion des résultats de pH. La méthodologie à suivre est décrite dans la norme Iso 10390

### 2.6.4 Analyse CEC

La norme ISO 23470 décrit la méthodologie à appliquer pour déterminer la CEC effective. Les sols sont mis en présence d'une solution de trichlorure de cobalthixamine comme extractant. Les cations présents dans l'échantillon vont migrer vers le cobalt qui sera ensuite dosé afin de définir la CEC.

### 2.6.5 Analyse granulométrie

Les particules supérieures à 50 µm sont séparées par tamisage. Pour ce qui est du reste des fractions, elles sont mises en suspension. Grâce à la loi de Stokes concernant la sédimentation, la taille des particules est définie. Ceci est décrit par la norme NF X 31107.

### 2.6.6 Analyse Azote total

La méthode Kjeldhal est utilisée dans le but de doser l'azote total des échantillons. Cette dernière permet de doser l'azote sous forme d'amines et de sels d'ammonium quaternaire. Les nitrates, nitrites, nitrosyles et cyanures doivent d'abord être réduits en ammoniac avant d'être mesurés. Tout ceci est décrit dans la norme ISO 13878.

---

<sup>5</sup> [http://www.requasud.be/wp-content/uploads/2017/07/brochure\\_cr2451\\_requasud\\_ld.pdf](http://www.requasud.be/wp-content/uploads/2017/07/brochure_cr2451_requasud_ld.pdf)

### 3 Résultats

#### 3.1 Traitements statistiques des données : Informations générales

L'expérimentation mise en place tente de mettre en évidence des différences potentielles pour les variables étudiées. Le traitement statistique approprié dans le cas présent consiste en une réalisation d'analyse de la variance (ANOVA) à un facteur explicatif (la parcelle) pour chacune des variables étudiées. Préalablement à ce traitement statistique, il faut vérifier la normalité et l'égalité des variances des échantillons. Le nombre de répétitions par parcelle étant inférieur à 10, la normalité des populations est acceptée par hypothèse. Par la suite, l'égalité des variances a été vérifiée via le test de Levene ( $p\text{-valeur} > 0.05 \rightarrow H_0$  : Egalité des variances vérifiées).

Une fois les hypothèses confirmées, l'ANOVA peut être réalisée. Si les  $p$ -valeurs obtenues sont inférieures à 0.05, des différences significatives entre les parcelles sont présentes et une structuration des moyennes via le test de Fisher est réalisée.

Toutes les analyses statistiques sont réalisées via le logiciel Minitab (2019).

Les graphiques d'égalité des variances et tableaux d'ANOVA sont répertoriés dans les rubriques annexes.

#### 3.2 Résultats des variables physico-chimiques

##### 3.2.1 Analyse des fractions granulométriques

L'analyse des égalités des variances des différentes fractions granulométriques est vérifiée (voir annexe 7.1) et l'analyse de la variance montre des différences significatives entre les fractions granulométriques des parcelles car les  $p$ -valeurs sont inférieures à  $\alpha = 0.05$  (voir annexes 7.2). Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentées via les boîtes de Turkey (boxplot) (figure 13).

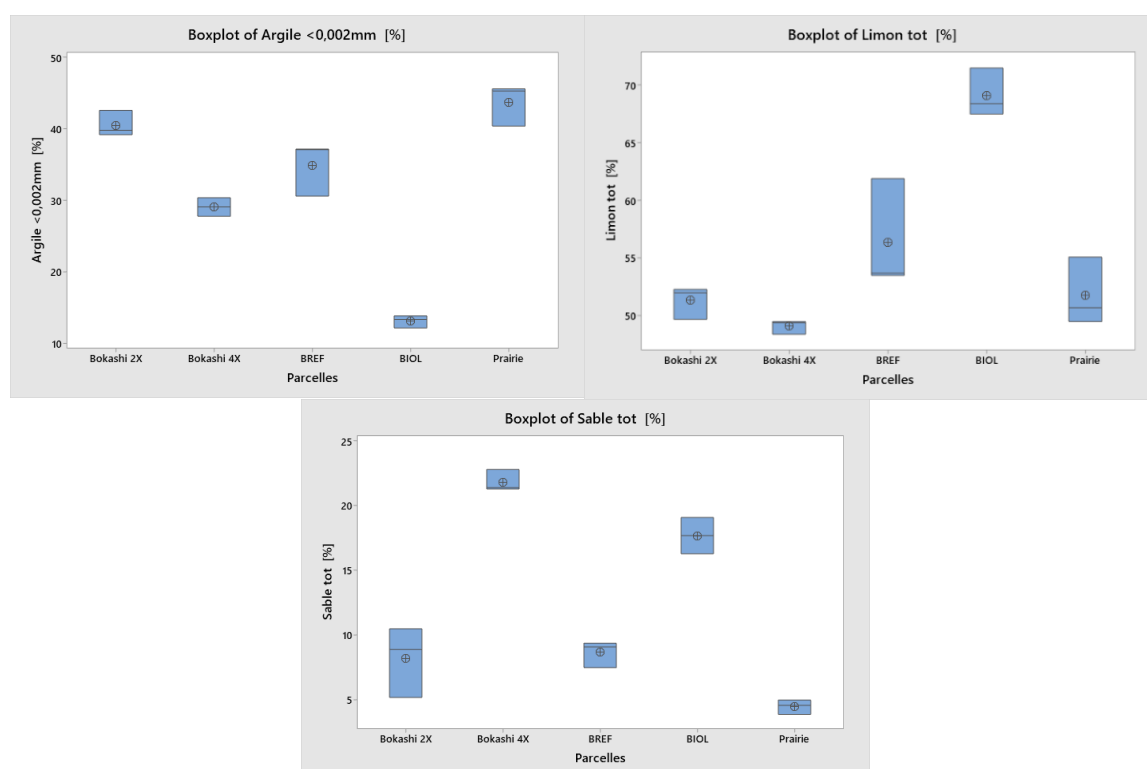


Figure 13 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des différentes fractions granulométriques des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 4).

Tableau 4 : Structuration des moyennes des fractions granulométriques selon la méthode de Fisher.

#### Argile

Parcelles	N	Moyennes [%]	Regroupements
Prairie	3	43,77	A
Bokashi 2X	3	40,53	A
BREF	3	34,97	B
Bokashi 4X	3	29,100	C
BIOL	3	13,167	D

#### Sables totaux

Parcelles	N	Moyennes [%]	Regroupements
Bokashi 4X	3	21,833	A
BIOL	3	17,700	B
BREF	3	8,667	C
Bokashi 2X	3	8,20	C
Prairie	3	4,500	D

#### Limons totaux

Parcelles	N	Moyennes [%]	Regroupements
BIOL	3	69,13	A
BREF	3	56,37	B
Prairie	3	51,77	B C
Bokashi 2X	3	51,333	B C
Bokashi 4X	3	49,100	C

La parcelle BIOL, le bokashi 4X et le BREF ont des valeurs significativement différentes et respectivement croissantes de contenu en argile. La prairie et le bokashi 2X ont des contenus en argile similaires et supérieurs aux trois autres parcelles.

En ce qui concerne les limons, les quatre parcelles de la ferme CONS ont des valeurs similaires à savoir que le BREF est significativement supérieur au bokashi 4X. BIOL obtient la plus grande fraction limoneuse.

La structuration des moyennes a constitué quatre groupes distincts avec le bokashi 4X qui présente le contenu le plus élevé en sable. BIOL vient en second. Le bokashi 2X et le BREF viennent en troisième position et la prairie a le plus faible pourcentage de sable.

### 3.2.2 Analyses des pH-eau et pH-KCl

Les tests de Levene révèlent l'égalité des variances des pH\_eau et pH\_KCl et de leurs différences (voir annexes 7.3). Les analyses de la variance à un facteur explicatif montrent des différences significatives entre les parcelles (Annexe 7.4). Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) (figure 14).

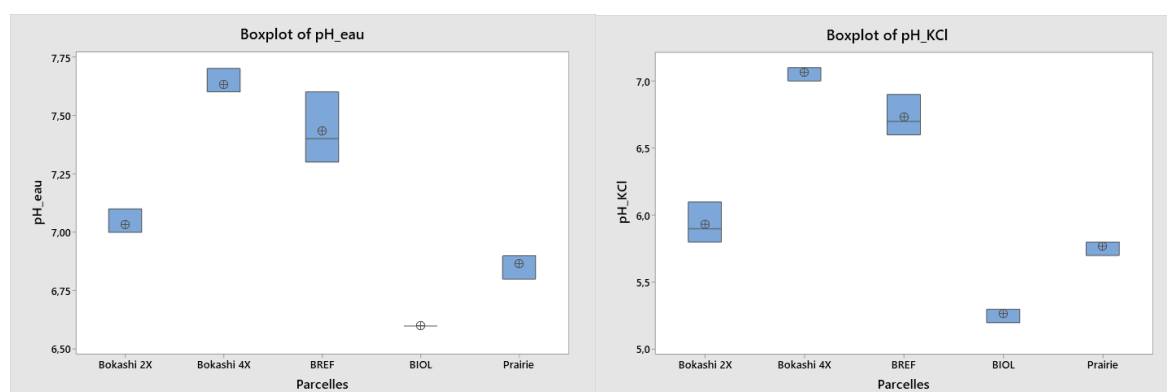


Figure 14 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des différents  $pH_{eau}$ ,  $pH_{KCl}$ , et des différences entre les  $pH_{eau}$  et  $pH_{KCl}$  des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 5).

Tableau 5 : Structuration des moyennes de  $pH_{eau}$ ,  $pH_{KCl}$ , et des différences entre le  $pH_{eau}$  et  $pH_{KCl}$  des parcelles.

$pH_{eau}$				$pH_{KCl}$			
Parcelles	N	Moyennes	Regroupements	Parcelles	N	Moyennes	Regroupements
Bokashi 4X	3	7,6333	A	Bokashi 4X	3	7,0667	A
BREF	3	7,4333	B	BREF	3	6,7333	B
Bokashi 2X	3	7,0333	C	Bokashi 2X	3	5,9333	C
Prairie	3	6,8667	D	Prairie	3	5,7667	C
BIOL	3	6,600	E	BIOL	3	5,2667	D

Différence entre $pH_{eau}$ et $pH_{KCl}$			
Parcelles	N	Moyennes	Regroupements
BIOL	3	1,3333	A
Prairie	3	1,1000	B
Bokashi 2X	3	1,1000	B
BREF	3	0,700000	C
Bokashi 4X	3	0,5667	D

Les  $pH_{eau}$  des parcelles sont tous significativement différents.

Le  $pH_{KCl}$  est plus élevé dans le bokashi 4X et est suivi par le BREF. La prairie et le bokashi 2X ont des valeurs significativement similaires. BIOL présente les valeurs les plus faibles de  $pH_{KCl}$ .

BIOL et le bokashi 4X ont, respectivement les différences entre  $pH_{eau}$  et  $pH_{KCl}$  la plus élevée et la plus faible. Le bokashi 2X obtient des valeurs similaires à la prairie tandis que le BREF arrive en troisième position.

### 3.2.3 Analyse de la CEC

La p-valeur du test de Levene s'élève à 0.540 (voir annexe 7.5). L'égalité des variances est donc vérifiée. L'analyse de la variance à un facteur explicatif (la parcelle) révèle une p-valeur inférieure à  $\alpha = 0.05$  (voir annexe 7.6). Il y a donc des différences significatives entre les moyennes de CEC des parcelles. Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 15.

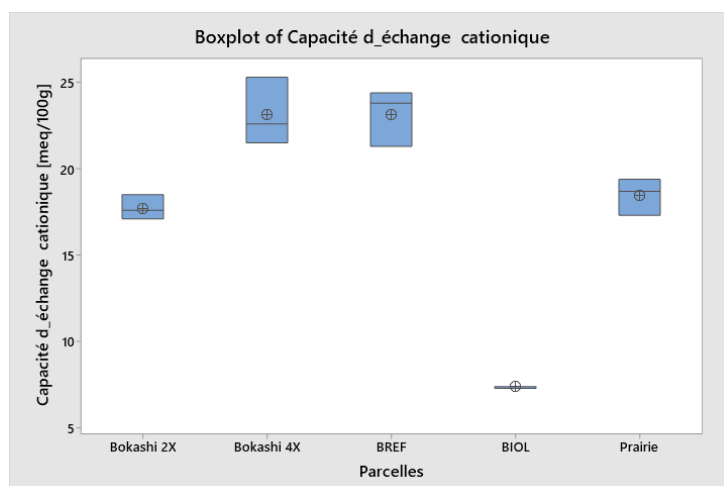


Figure 15 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des capacités d'échange cationique des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 6).

Tableau 6 : Structuration des moyennes de capacité d'échange cationique des parcelles étudiées.

Parcelles	N	Moyennes [meq/100g]	Regroupements
<b>BREF</b>	3	23,167	A
<b>Bokashi 4X</b>	3	23,13	A
<b>Prairie</b>	3	18,467	B
<b>Bokashi 2X</b>	3	17,733	B
<b>BIOL</b>	3	7,3667	C

Le traitement statistique révèle trois regroupements de parcelles. Le bokashi 4X et le BREF présentent les valeurs de CEC les plus élevées. Il y a ensuite la prairie et le bokashi 2X qui ont des valeurs statistiquement similaires. BIOL possède la CEC la plus faible.

### 3.2.4 Analyses des éléments biodisponibles

Les tests d'égalité des variances des éléments biodisponibles sont vérifiés car les p-valeurs sont supérieures à  $\alpha = 0.05$  (voir annexes 7.7). Les analyses de la variance montrent des différences significatives entre les moyennes des variables (p-valeurs  $< \alpha = 0.05$  : voir annexes 7.8). Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 16.

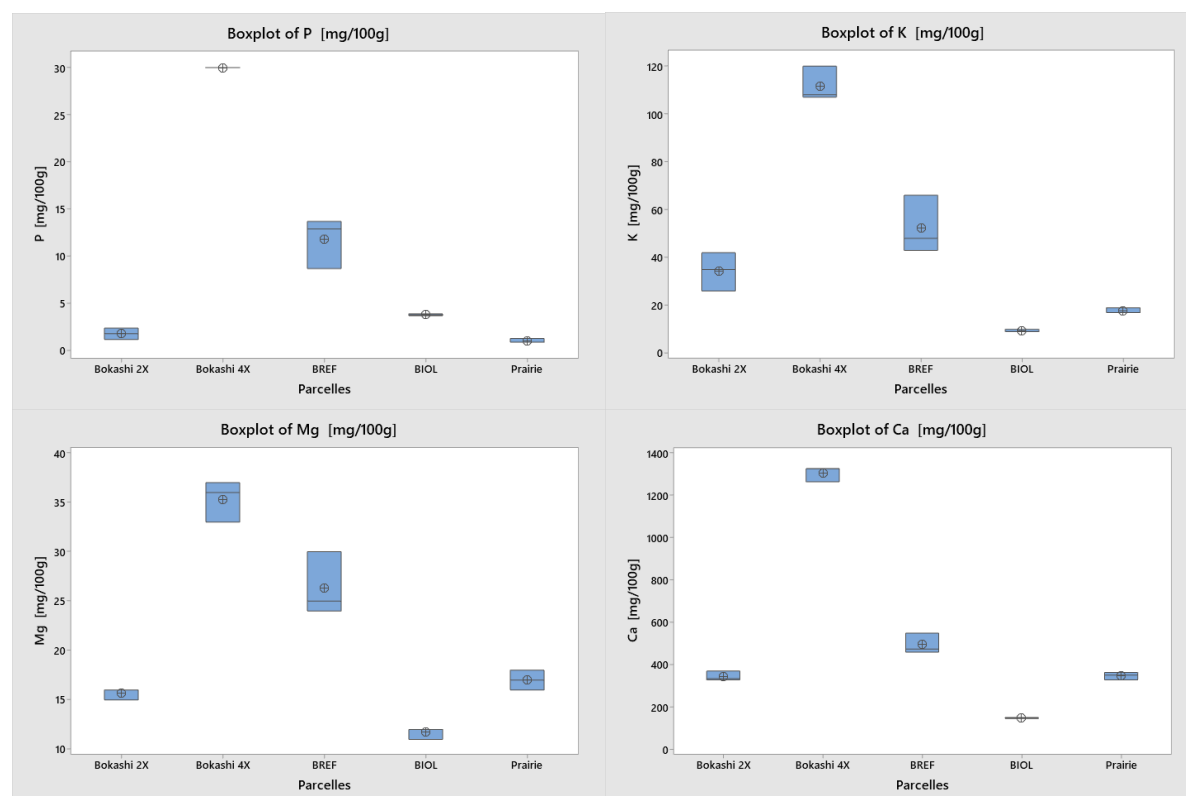


Figure 16 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des contenus en éléments biodisponibles des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 7).

Tableau 7 : Structuration des moyennes des contenus en éléments biodisponibles des parcelles étudiées.

#### Phosphore

Parcelles	N	Moyennes [mg/100g]	Regroupements
<b>Bokashi 4X</b>	3	30,00	A
<b>BREF</b>	3	11,77	B
<b>BIOL</b>	3	3,8000	C
<b>Bokashi 2X</b>	3	1,800	C D
<b>Prairie</b>	3	1,033	D

#### Magnésium

Parcelles	N	Moyennes [mg/100g]	Regroupements
<b>Bokashi 4X</b>	3	35,33	A
<b>BREF</b>	3	26,33	B
<b>Prairie</b>	3	17,000	C
<b>Bokashi 2X</b>	3	15,667	C
<b>BIOL</b>	3	11,667	D

#### Potassium

Parcelles	N	Moyennes [mg/100g]	Regroupements
<b>Bokashi 4X</b>	3	111,67	A
<b>BREF</b>	3	52,33	B
<b>Bokashi 2X</b>	3	34,33	C
<b>Prairie</b>	3	17,667	D
<b>BIOL</b>	3	9,333	D

#### Calcium

Parcelles	N	Moyennes [mg/100g]	Regroupements
<b>Bokashi 4X</b>	3	1305,0	A
<b>BREF</b>	3	495,0	B
<b>Prairie</b>	3	348,7	C
<b>Bokashi 2X</b>	3	345,0	C
<b>BIOL</b>	3	149,33	D

Le phosphore est présent en plus grande quantité dans le bokashi 4X. Les valeurs moyennes du BREF obtiennent la seconde place. BIOL et le bokashi 2X ont des valeurs significativement similaires. Le bokashi 2X et la prairie partagent la même tendance à savoir que les valeurs de cette dernière sont significativement inférieures à celle de BIOL.

Le bokashi 4X a, encore une fois, les valeurs les plus importantes de potassium. Il y a ensuite, et dans l'ordre décroissant le BREF, le bokashi 2X et la prairie qui possèdent le même contenu en potassium.

Le bokashi 4X et le BREF obtiennent des valeurs supérieures de contenu en magnésium par rapport à la parcelle témoin (prairie) qui a des valeurs similaires au bokashi 2X. BIOL a le contenu le plus faible en magnésium.

La parcelle en bokashi 4X obtient une nouvelle fois le contenu en calcium maximal. Le BREF vient en seconde position. La prairie et le bokashi 2X partagent des valeurs significativement similaires et BIOL vient en dernière position.

La tendance générale montre que le bokashi 4X et le BREF présentent toujours des valeurs supérieures en contenu d'éléments biodisponibles par rapport à la parcelle témoin. La prairie, le bokashi 2X et BIOL ont des valeurs parfois similaires, inférieures ou supérieures.

#### 3.2.5 Analyse de l'azote total

Le test de Levene donne une p-valeur supérieure à  $\alpha = 0.05$  (voir annexe 7.9). L'analyse de la variance est donc réalisable et montre des différences significatives entre les moyennes d'azote total des parcelles (p-valeur < 0.05 : Voir annexe 7.10). Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 17.

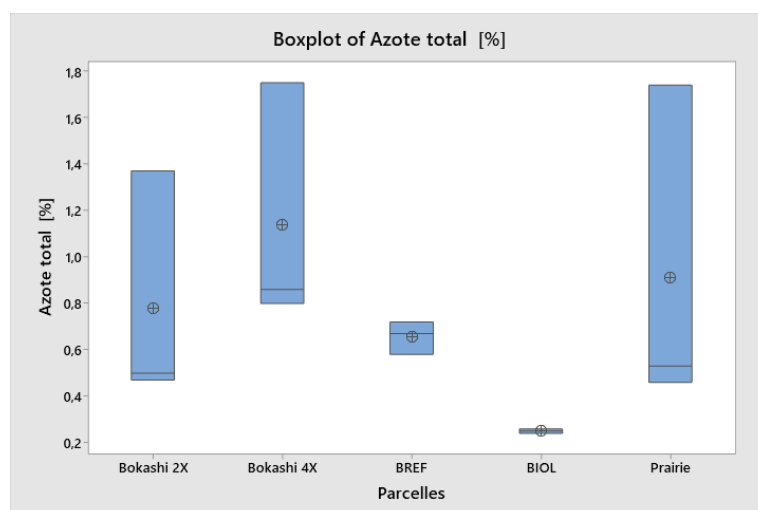


Figure 17 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des contenus en azote total des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 8).

Tableau 8 : Structuration des moyennes de contenu en azote total des parcelles étudiées.

Parcelles	N	Moyennes [%]	Regroupements	
<b>Bokashi 4X</b>	3	1,137	A	
<b>Prairie</b>	3	0,910	A	B
<b>Bokashi 2X</b>	3	0,780	A	B
<b>BREF</b>	3	0,6567	A	B
<b>BIOL</b>	3	0,25000		B

L'azote est présent en plus grande quantité dans le bokashi 4X. Ensuite les quatre autres parcelles sont significativement non-différentes, à savoir que BIOL présente des valeurs d'azote total légèrement inférieures par rapport au bokashi 2X, à la prairie et au BREF.

### 3.2.6 Analyse du rapport C/N

Le test de Levene révèle une p-valeur supérieur à  $\alpha = 0.05$  (annexe 11). L'analyse de la variance peut donc être réalisée mais ne présente aucune différence significative entre les parcelles étudiées car la p-valeur est supérieure à  $\alpha = 0.05$  (tableau 9). Les rapports C/N des parcelles étudiées sont donc significativement similaires.

Tableau 9 : Résultat de l'analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des rapports C/N des parcelles étudiées.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<b>Parcelles</b>	4	25,33	6,333	0,92	0,488
<b>Error</b>	10	68,67	6,867		
<b>Total</b>	14	94,00			

## 3.3 Résultats des variables utiles à l'évaluation de la qualité biologique des sols

### 3.3.1 Analyse du carbone organique

Le test de Levene assure l'égalité des variances entre les parcelles (p-valeur= 0.430 : Voir annexe 12). L'analyse de la variance à un facteur explicatif est donc applicable et montre des différences



significatives entre les valeurs moyennes de carbone organique total. Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 18.

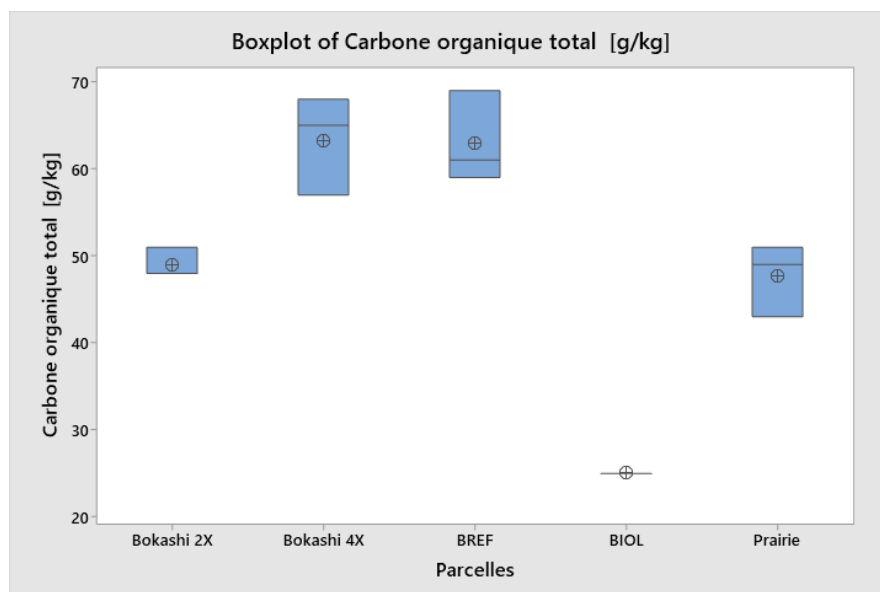


Figure 18 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des contenus en carbone organique total (COT) des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 10).

Tableau 10 : Structuration des moyennes de contenu en carbone organique total des parcelles étudiées.

Parcelles	N	Moyennes [g/kg]	Regroupements	
<b>Bokashi 4X</b>	3	63,33	A	
<b>BREF</b>	3	63,00	A	
<b>Bokashi 2X</b>	3	49,00		B
<b>Prairie</b>	3	47,67		B
<b>BIOL</b>	3	25,00		C

Le BREF et le bokashi 4X ont les valeurs les plus importantes de carbone organique. Le bokashi 2X et la prairie viennent en seconde position. BIOL présente les valeurs les plus faibles de carbone organique.

### 3.3.2 Analyse du carbone eau froide/chaude

Les tests de Levene ont révélé l'égalité des variances du carbone extrait à l'eau chaude et extrait à l'eau froide (p-valeur respectivement égale à 0.700 et 0.793 : voir annexe 7.17). L'analyse de la variance révèle des différences significatives entre les valeurs moyennes de carbone extrait à l'eau froide et extrait à l'eau chaude. Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 19.

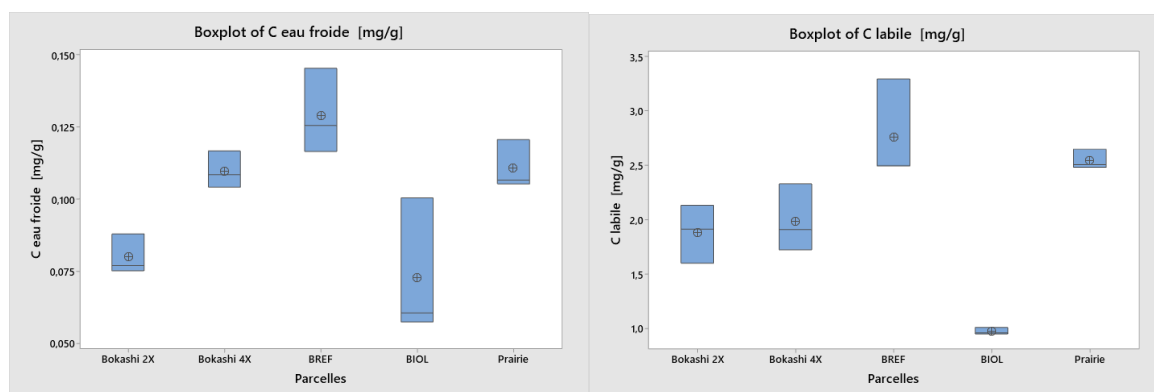


Figure 19 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des contenus en  $C_{\text{eau chaude}}$  (carbone extrait à l'eau chaude) et  $C_{\text{eau froide}}$  (carbone extrait à l'eau froide) des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 11).

Tableau 11 : Structuration des moyennes de contenu en carbone extrait à l'eau froide et en carbone extrait à l'eau chaude des parcelles étudiées.

C eau froide				C eau chaude			
Parcelles	N	Moyennes [mg/g]	Regroupements	Parcelles	N	Moyennes [mg/g]	Regroupements
<b>BREF</b>	3	0,12896	A	<b>BREF</b>	3	2,759	A
<b>Prairie</b>	3	0,11074	A	<b>Prairie</b>	3	2,5442	A
<b>Bokashi</b>	3	0,10972	A	<b>Bokashi</b>	3	1,988	B
<b>4X</b>				<b>4X</b>			
<b>Bokashi</b>	3	0,08006	B	<b>Bokashi</b>	3	1,882	B
<b>2X</b>				<b>2X</b>			
<b>BIOL</b>	3	0,0729	B	<b>BIOL</b>	3	0,9774	C

Les valeurs des moyennes de carbone extrait à l'eau chaude sont les plus importantes pour le BREF et la prairie. Les deux parcelles en bokashi présentent les secondes valeurs les plus importantes et BIOL obtient les valeurs les plus faibles.

Les valeurs de carbone extrait à l'eau froide ne suivent pas la même tendance que l'extrait à l'eau chaude car le BREF, le bokashi et la prairie ont des valeurs significativement similaires. Le bokashi 2X et BIOL ont aussi des valeurs similaires de carbone labile mais inférieures aux précédentes.

### 3.3.3 Analyse de la minéralisation de l'azote

La p-valeur du test de Levene s'élève à 0.648 (voir annexe 7.18). L'égalité des variances est donc vérifiée. L'Anova ne révèle aucune différence de minéralisation de l'azote entre les parcelles (p-valeur = 0.487 > 0.05  $\rightarrow H_0$  = Les moyennes de minéralisation des parcelles sont significativement similaires) (tableau 12).

Tableau 12 : Tableau d'analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) pour la minéralisation nette de l'azote

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	1,533	0,3832	0,93	0,487
Error	10	4,139	0,4139		
Total	14	5,672			

### 3.3.4 Analyse du rapport entre l'azote extrait à l'eau chaude/froide

Le test de Levene prouve l'égalité des variances des rapports d'azote extrait à l'eau chaude/froide ( $p$ -valeur  $> \alpha = 0.05$  : voir Annexe 7.20). L'ANOVA révèle des différences significatives de rapport d'azote extrait à l'eau chaude/ froide. Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 20.

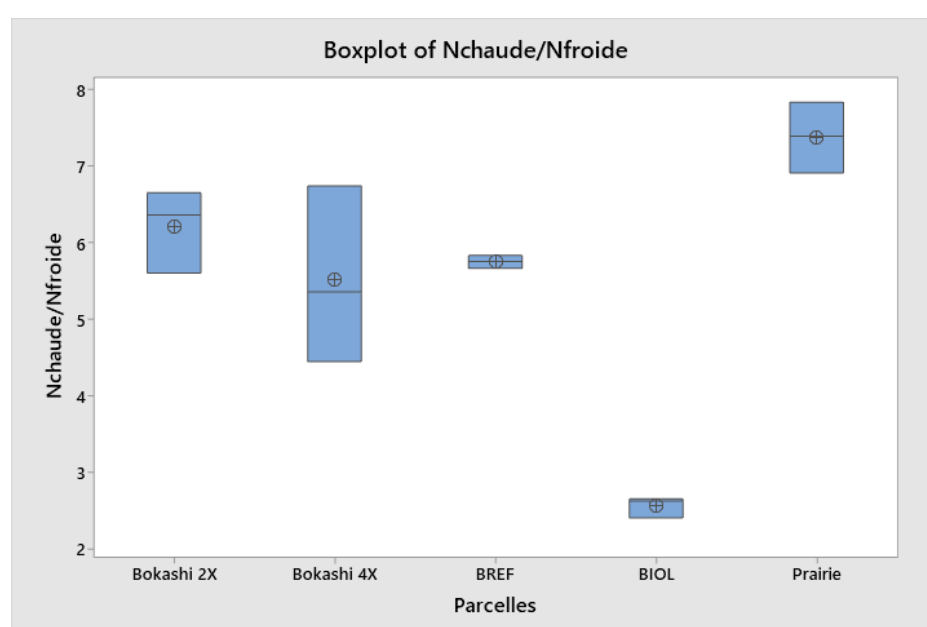


Figure 20 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des rapports entre  $N_{chaude}/N_{froide}$  des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 13).

Tableau 13 : Structuration des moyennes de rapport  $N_{chaude}/N_{froide}$  des parcelles étudiées.

Parcelles	N	Moyennes [ $\bar{y}$ ]	Regroupements
Prairie	3	7,378	A
Bokashi 2X	3	6,208	
BREF	3	5,7533	B
Bokashi 4X	3	5,518	
BIOL	3	2,5689	C

La prairie a les valeurs les plus importantes de rapport  $N_{chaude} / N_{froide}$ . Ensuite le bokashi 2X, le BREF et le bokashi 4X ont des valeurs significativement similaires. BIOL obtient les valeurs les plus faibles pour cet indicateur.

### 3.3.5 Analyse du carbone et de l'azote microbien

Les égalités des variances sont vérifiées avec une p-valeur de 0.458 et de 0.775 respectivement pour le carbone et l'azote microbien (Voir Annexe 7.21). L'ANOVA montre des différences significatives entre les parcelles pour ces deux variables (voir annexe 7.22). Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 21.

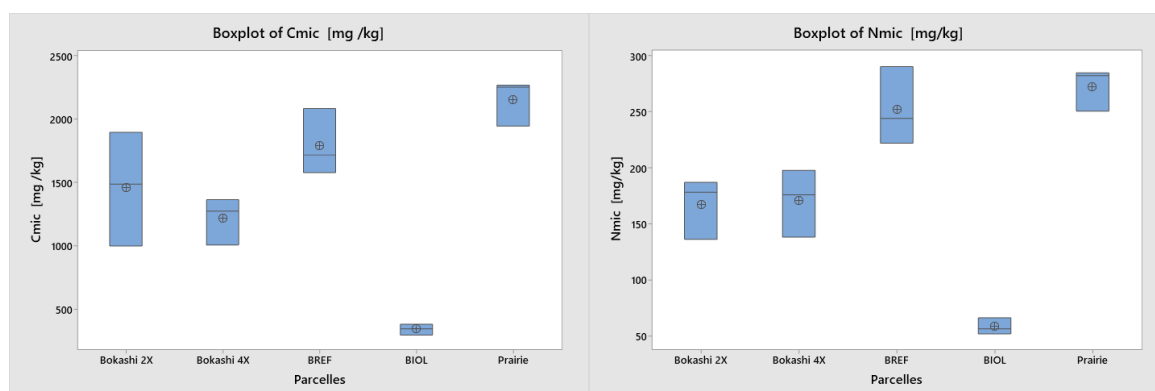


Figure 21 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des contenus en carbone microbien ( $C_{mic}$ ) et en azote microbien ( $N_{mic}$ ) des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 14).

Tableau 14 : Structuration des moyennes de carbone microbien ( $C_{mic}$ ) et d'azote microbien ( $N_{mic}$ ) des parcelles étudiées.

$C_{mic}$				$N_{mic}$			
Parcelles	N	Moyennes [mg/kg]	Regroupements	Parcelles	N	Moyennes [mg/kg]	Regroupements
Prairie	3	2156	A	Prairie	3	272,3	A
BREF	3	1794	A B	BREF	3	251,9	A
Bokashi 2X	3	1462	B C	Bokashi 4X	3	170,7	B
Bokashi 4X	3	1217	C	Bokashi 2X	3	167,3	B
BIOL	3	343,8	D	BIOL	3	58,49	C

La quantité maximale de carbone microbien est retrouvée dans le terrain en prairie permanente et n'est pas statistiquement différente du BREF qui partage elle-même des valeurs similaires au bokashi 2X. Les parcelles bokashi 2X et bokashi 4X ont aussi des valeurs similaires. Il est donc possible de dire que les quatre terrains ci-mentionnés forment un bloc distinct de BIOL qui a les valeurs les plus faibles. A savoir que la prairie est significativement différente du bokashi 2X et 4X et que le bokashi 2X et le BREF sont similaires avec respectivement un contenu plus faible et plus élevé en carbone microbien.

En ce qui concerne l'azote microbien, la prairie et le BREF sont en tête et sont suivis par les deux parcelles en bokashi. Le terrain de BIOL présente le plus bas contenu en azote microbien.

### 3.3.6 Rapport $C_{mic} / N_{mic}$

Le test de Levene appuie l'égalité des variances des rapports  $C_{mic} / N_{mic}$  (p-valeur = 0.124 >  $\alpha = 0.05$  : voir annexe 7.20). L'analyse de la variance est donc réalisée et présente des différences significatives entre les valeurs de l'indicateur étudié dans ce point (voir annexe 7.22). Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 22.

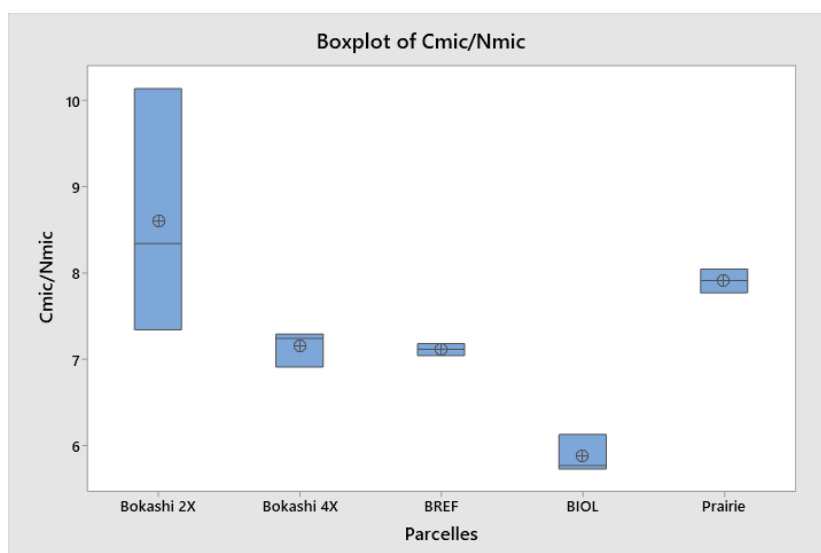


Figure 22 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des rapports entre le carbone microbien et l'azote microbien ( $C_{mic}/N_{mic}$ ) des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 15).

Tableau 15 : Structuration des moyennes de rapport entre le carbone et l'azote microbien ( $C_{mic}/N_{mic}$ ) des parcelles étudiées.

Parcelles	N	Moyennes [I]	Regroupements
<b>Bokashi 2X</b>	3	8,609	A
<b>Prairie</b>	3	7,9128	A B
<b>Bokashi 4X</b>	3	7,151	B
<b>BREF</b>	3	7,1176	B
<b>BIOL</b>	3	5,880	C

Le bokashi 2X a des valeurs significativement similaires à la prairie qui a, elle-même des valeurs similaires au bokashi 4X et au BREF. La prairie représente donc une valeur intermédiaire entre le premier et le second groupe. BIOL se détache avec les valeurs les plus faibles de rapport  $C_{mic}/N_{mic}$ .

### 3.3.7 Analyse de la respiration potentielle

Le test de Levene vérifie l'égalité des variances de l'indicateur (p-valeur = 0.633 ; voir annexe 7.24) et l'analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelle) montre des différences significatives entre les valeurs de respirations potentielles (voir annexe 7.25). Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 23.

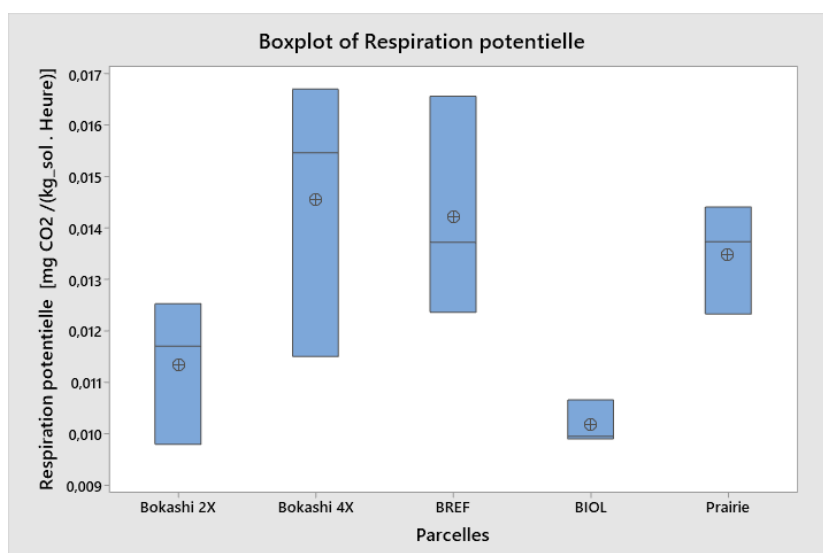


Figure 23 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des valeurs de respiration potentielle des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 16).

Tableau 16 : Structuration des moyennes des valeurs de respiration potentielle des parcelles étudiées.

Parcelles	N	Moyennes [mg co2 /(kg <sub>sol</sub> . Heure)]	Regroupements		
<b>Bokashi 4X</b>	3	0,01456	A		
<b>BREF</b>	3	0,01422	A	B	
<b>Prairie</b>	3	0,013498	A	B	
<b>Bokashi 2X</b>	3	0,011352	B		C
<b>BIOL</b>	3	0,010181			C

BIOL obtient les valeurs de respiration potentielle les plus faibles et similaire à bokashi 2X tandis que le bokashi 4X obtient les plus élevées. Les parcelles en prairie, bokashi 2X et BREF forment un bloc central significativement similaire avec une tendance supérieure pour la prairie et le BREF et une tendance inférieure pour le bokashi 2X.

### 3.3.8 Analyse du quotient métabolique

Le test de Levene approuve l'égalité des variances (p-valeur = 0.436 ; voir annexe 7.26). L'analyse de la variance révèle des différences significatives entre les parcelles (p-valeur <  $\alpha$  = 0.05 ; voir annexe 7.27). Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 24.

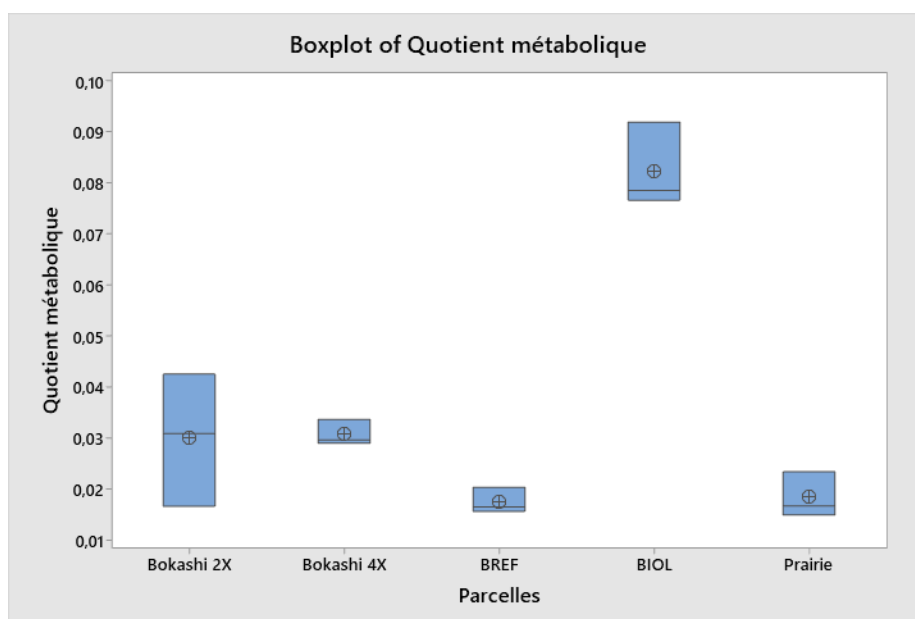


Figure 24 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des valeurs de quotient métabolique des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 17).

Tableau 17 : Structuration des moyennes de quotient métabolique des parcelles étudiées.

Parcelles	N	Moyennes [mgCO <sub>2</sub> /( mgC <sub>mic</sub> · h)]	Regroupements
<b>BIOL</b>	3	0,08239	A
<b>Bokashi 4X</b>	3	0,03086	B
<b>Bokashi 2X</b>	3	0,03012	B
<b>Prairie</b>	3	0,01846	B
<b>BREF</b>	3	0,01761	B

L'analyse statistique sépare les parcelles en deux groupes avec BIOL qui obtient les valeurs les plus élevées et les parcelles de la ferme CONS obtiennent les valeurs les plus faibles de quotient métabolique.

### 3.3.9 Analyse du quotient microbien

L'égalité des variances est vérifiée ( $p\text{-valeur} = 0.262 > \alpha = 0.05$  ; voir annexe 7.28). L'analyse de la variance montre des différences significatives entre les moyennes de quotient microbien (voir annexe 7.29). Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 25.

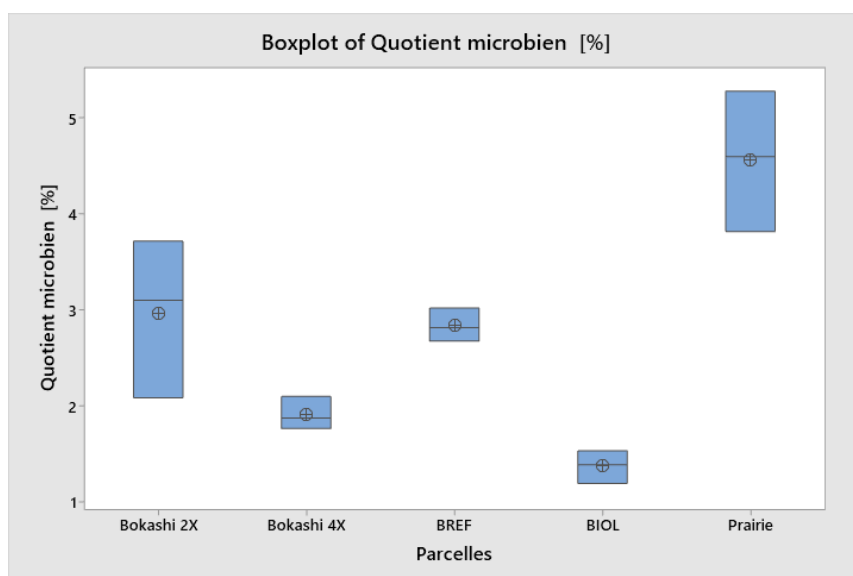


Figure 25 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des valeurs de quotient microbien des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 18).

Tableau 18 : Structuration des moyennes de quotient microbien des parcelles étudiées.

Parcelles	N	Moyennes [%]	Regroupements			
Prairie	3	4,563	A	B	C	D
Bokashi 2X	3	2,969				
BREF	3	2,8385	B	C	D	
Bokashi 4X	3	1,9163				
BIOL	3	1,3752	D			

BIOL présente les valeurs les plus faibles de quotient microbien et similaires au bokashi 4X qui a aussi des valeurs significativement égales au BREF. Ce dernier a des valeurs équivalentes au bokashi 2X, à savoir que le bokashi 2X est significativement différent du bokashi 4X. Il en va de même pour le BREF et BIOL. La prairie obtient les valeurs les plus élevées de quotient microbien.

### 3.3.10 Analyse de l'indice global de qualité biologique des sols

Les scores ( $Sind_i$ ) sont calculés selon la technique proposée dans le matériel et méthode (voir annexe 7.3.1). L'égalité des variances est vérifiée ( $p$ -valeur = 0.832 ; voir annexe 7.32). L'analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) peut donc être réalisée et révèle des différences significatives d'IGB entre les échantillons (voir annexe 33). Les moyennes, médianes, quartiles, minimum et maximum sont représentés via les boîtes de Turkey (boxplot) dans la figure 26.



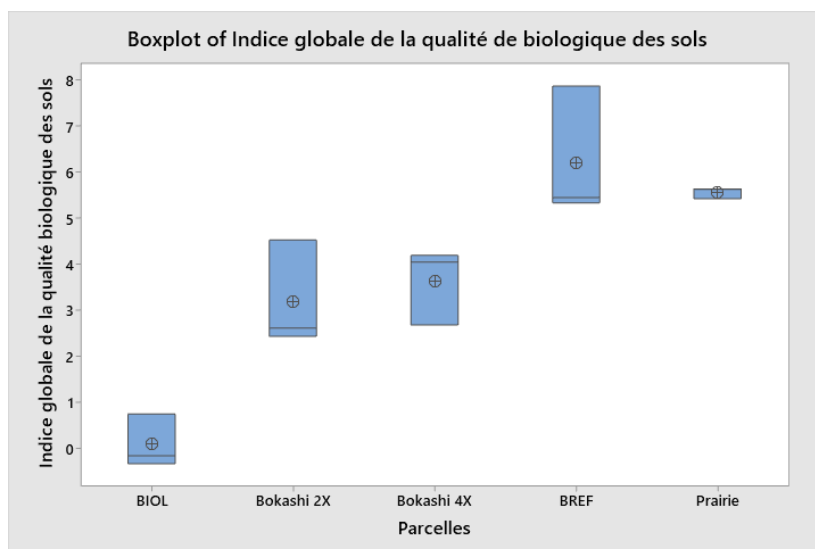


Figure 26 : Représentation des boîtes de Turkey révélant les moyennes (croix inscrite dans un cercle), médianes, quartiles, minimum et maximum des valeurs d'indice global de la qualité biologique des parcelles étudiées.

La structuration des moyennes selon la méthode de Fisher est représentée dans le tableau ci-après (tableau 19).

Tableau 19 : Structuration des moyennes d'indice global de la qualité biologique (IGB) des parcelles étudiées.

Parcelles	N	Moyennes [ $\bar{I}$ ]	Regroupement
<b>BREF</b>	3	6,218	A
<b>Prairie</b>	3	5,5639	A
<b>Bokashi 4X</b>	3	3,642	B
<b>Bokashi 2X</b>	3	3,197	B
<b>BIOL</b>	3	0,091	C

La structuration des moyennes des IGB constitue trois groupes distincts. A savoir et par ordre décroissant : le BREF et la prairie ; bokashi 2X et bokashi 4X ; BIOL.

## 4 Discussion

### 4.1 Contextualisation des résultats

Dans leur article, Genot et al. (2009) font état de la fertilité des sols de Wallonie et fournissent des cartes caractérisant des paramètres physico-chimiques intervenant dans le développement et la santé des grandes cultures. Les données seront en partie comparées aux valeurs trouvées dans ce document malgré les différences de techniques et de cultures utilisées sur les terres étudiées. Le but étant alors de réaliser une comparaison avec ce qui peut être rencontré en Wallonie.

Vincent et al. (2019) fournissent un document dans le cadre d'étude CARBIOSOL faisant état de la santé de la microbiologie des sols de Wallonie. Il s'avère que les zones échantillonnées ne correspondent pas exactement au milieu d'étude (figure 27). En effet, Wellin et Paliseul se situe à environ 30 km à l'ouest des points d'échantillonnages les plus proches de la zone agricole « Ardenne ». Il est important de noter que le projet CARBIOSOL se penche principalement sur les systèmes de grandes cultures biologiques, conventionnelles et de conservations. Cependant, les informations tirées de cet article sont comparées aux valeurs trouvées dans ce travail dans le but d'évaluer la qualité biologique des systèmes étudiés par rapport à ce qui peut être rencontré en Wallonie.

Ce document constitue une base pour l'évaluation de la qualité physico-chimique et biologique des sols sous maraîchage pour la première fois.

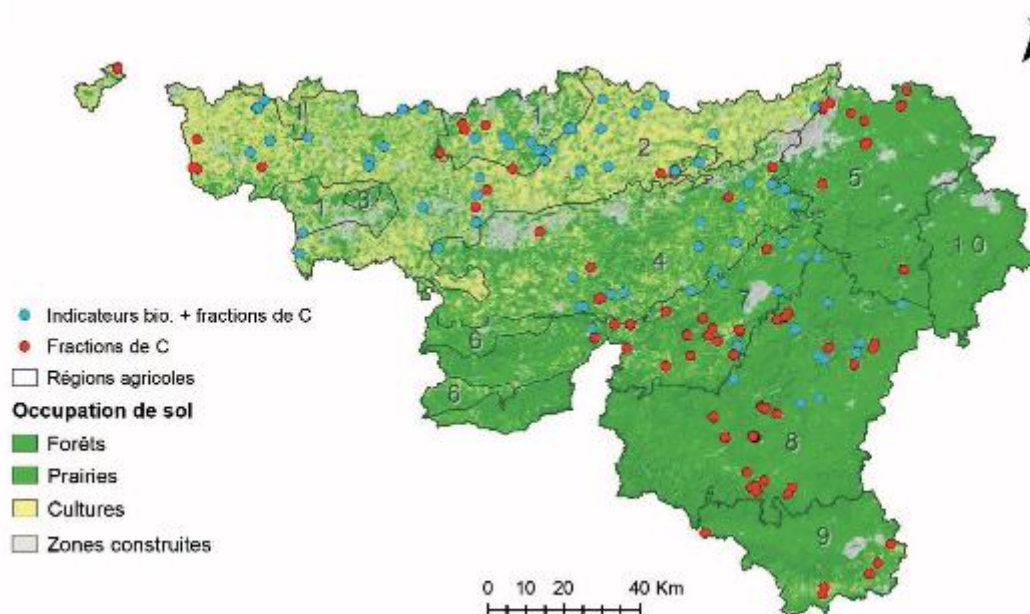


Figure 27 : Sites ayant servi à l'établissement de gammes de valeurs tenant compte de la variabilité spatiale et saisonnière des paramètres biologiques. Régions agricoles: 1-Sablo-limoneuse, 2-Limoneuse, 3-Campine Hennuyère, 4-Condruz, 5-Herbagère Liège, 6-Herbagère Fagnes, 7-Famenne, 8-Ardenne, 9-Jurassique, et 10-Haute Ardenne (Vincent et al., 2019)

### 4.2 Caractérisation des milieux selon les paramètres physico-chimiques

#### 4.2.1 Contexte géo-pédologique

Les fractions granulométriques sont, pour la plupart différentes des unes et des autres et cela s'explique aisément par des différences de situations topographiques. La parcelle BIOL a été échantillonnée sur les abords d'une crête de colline pour correspondre aux informations issues de la carte des sols de Wallonie. Par un phénomène naturel de redistribution des particules plus légères (argile) dans le bas de la topographie, les fractions granulométriques plus lourdes (sables) se retrouvent en plus grande quantité. Ceci explique les pourcentages de limons les plus élevés, le pourcentage de sable ayant des valeurs intermédiaires et le faible contenu en argile sur la parcelle BIOL.

En ce qui concerne les parcelles de la ferme CONS, la prairie se situe en bas de pente, le bokashi 2X et le BREF sont approximativement en milieu de pente et le bokashi 4X est à l'altitude la plus élevée. La prairie obtient donc le pourcentage de sable le plus faible et le plus haut contenu en argile. A contrario, le bokashi 4X obtient le plus haut taux de sable et un contenu plus faible en argile. Le bokashi 2X et le BREF ont des contenus plus élevés en argile que le bokashi 4X de par leurs positions dans la topographie. La même explication est applicable pour les valeurs de sable de ces deux parcelles.

Malgré les différences significatives de granulométrie entre les terres étudiées, les contextes géopédologique sont considérés comme similaires car ces différences seraient donc le résultat de la position des parcelles dans la topographie. Une comparaison stricto sensu des communautés de microorganismes n'est donc pas envisageable.

Quelques faits concernant l'influence de la texture sur certains paramètres sont quand même à relever et sont décrits ci-après.

La texture des sols est corrélée à la dynamique à long terme du carbone. La décomposition de la matière organique à court terme serait par contre, peu influencée par la granulométrie. En effet, le contrôle à court terme dépendrait plus fortement de la taille et du statut nutritionnel de la biomasse microbienne (Scott et al., 1996).

Selon Najmadeen H. et al. (2010), la texture influencerait les émissions de dioxyde de carbone. En effet, les sols ayant des textures fines (argile) plus importantes montrent des niveaux d'émission supérieurs aux sols sableux. Cependant, Singh et al. (2018) montrent que les minéraux argileux avec des propriétés différentes semblent présenter pouvoirs variables de protection du carbone organique, permettant donc une séquestration de ce dernier dans les sols et limiter les flux de dioxyde de carbone vers l'atmosphère.

La figure 28 montre la relation présente entre la capacité d'échange cationique et le contenu en argile des sols. Il apparaîtrait donc que le contenu en argile expliquerait 42.2% de la variabilité de la CEC. Cette valeur est non-négligeable mais reste néanmoins assez faible. Ceci est appuyé par l'article rédigé par Parfitt et al. (1995) qui expriment le fait que les minéraux argileux influencent positivement la capacité d'échange cationique (CEC). En effet, la vermiculite, la kaolinite, les micas possèdent une CEC propre à leur nature, ce qui a tendance à légèrement augmenter celle du sol.

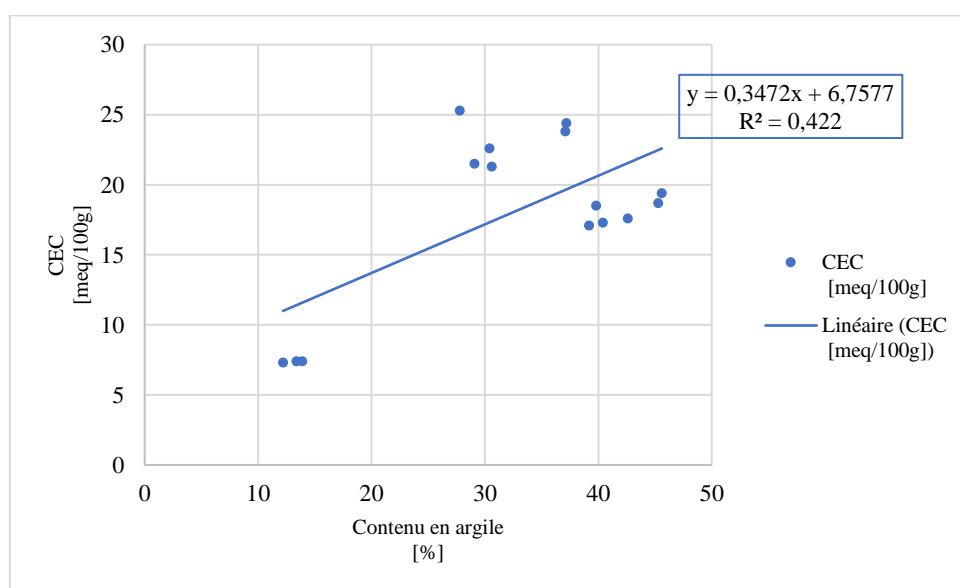


Figure 28 : Mise en relation de la capacité d'échange cationique (CEC) en fonction du contenu en argile

La figure 29 révèle une tendance nette séparant le nuage de point en deux groupes distincts : 1) < 20% d'argile et 2) >20% d'argile. Ces groupes correspondent au système BIOL (< 20% d'argile) et CONS (>20% d'argile) qui possèdent des contenus en matières organiques très différents ( $COT_{cons} > COT_{biol}$ ). Or, les variations de CEC seraient principalement le résultat du contenu en groupes carboxylés présents dans la matière organique (Parfitt et al., 1995). Ce TFE appuie cette hypothèse car le contenu en carbone organique expliquerait 96% de la variabilité de la CEC (figure 29) alors que le contenu en argile n'en expliquerait seulement que 42 (figure 28).

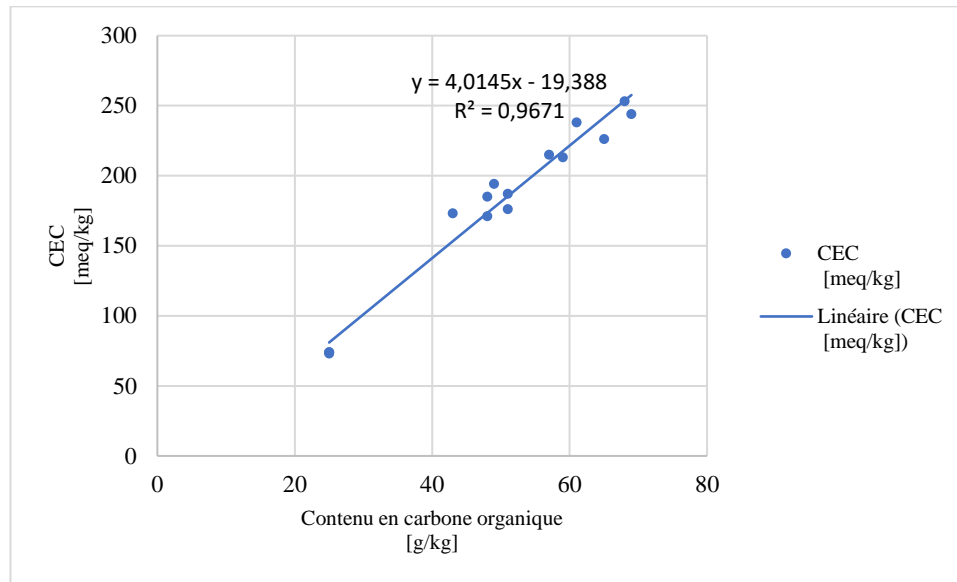


Figure 29 : Mise en relation de la CEC en fonction du contenu en carbone organique

Il semble acceptable d'assumer le fait que les apports en matières organiques ( $\approx$  assimilables aux pratiques culturales) influencent plus fortement la capacité d'échange cationique que les différences de granulométrie. Cela se marque dans les résultats par une CEC plus importante pour le BREF et le bokashi 4X qui ont subi des apports de matières organiques très importants (rameaux de bois pour le premier et bokashi ainsi que biochar pour le second). De plus, l'utilisation de biochar ajouté au bokashi a naturellement tendance à augmenter la CEC dans les sols plutôt acides (Chintala et al., 2014).

En ce qui concerne le contenu en éléments bio-disponibles, la texture influence faiblement ou pas la disponibilité des nutriments au vu des valeurs de coefficient  $r^2$  obtenu pour les différentes régressions linéaires concernant ces variables (figure 30 et 31). Les valeurs de contenu en Ca sont référencés sur l'axe secondaire pour une question de visibilité des résultats.

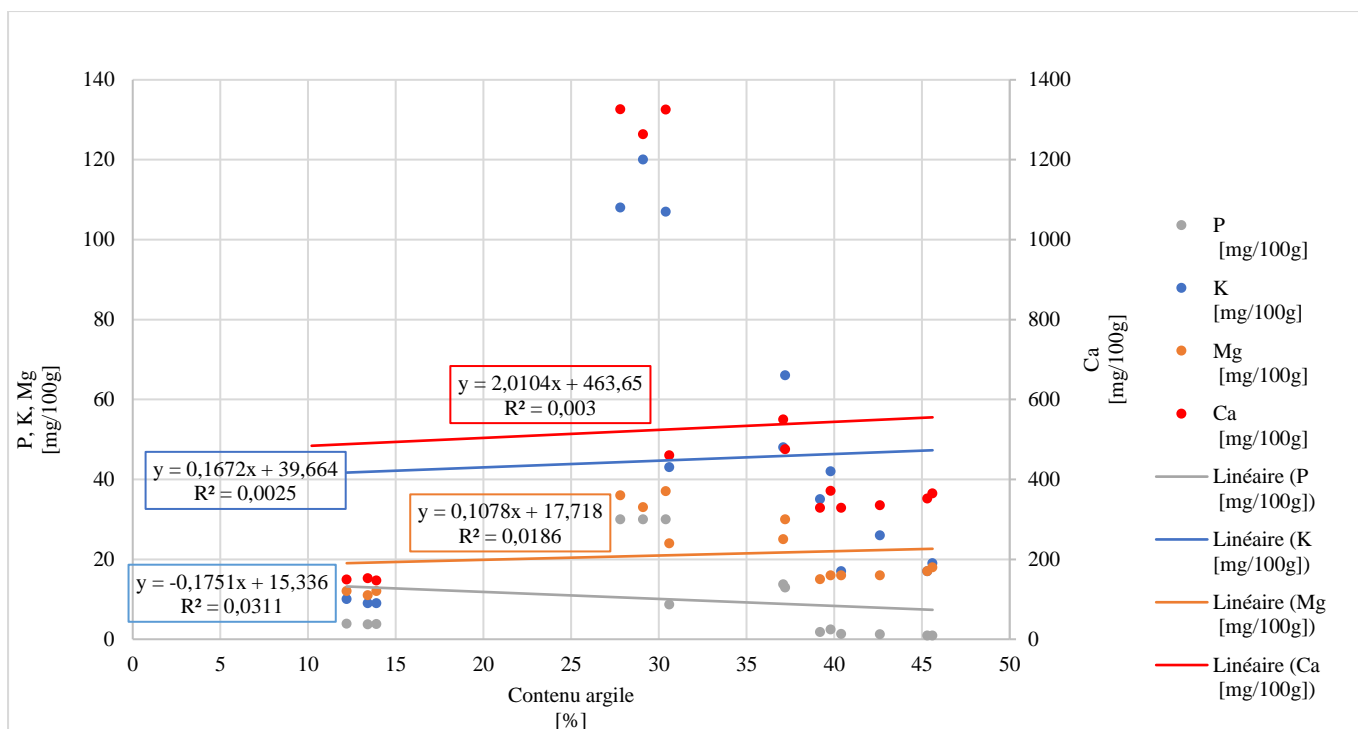


Figure 30 : Mise en relation du contenu en éléments biodisponibles avec le contenu en argile des sols

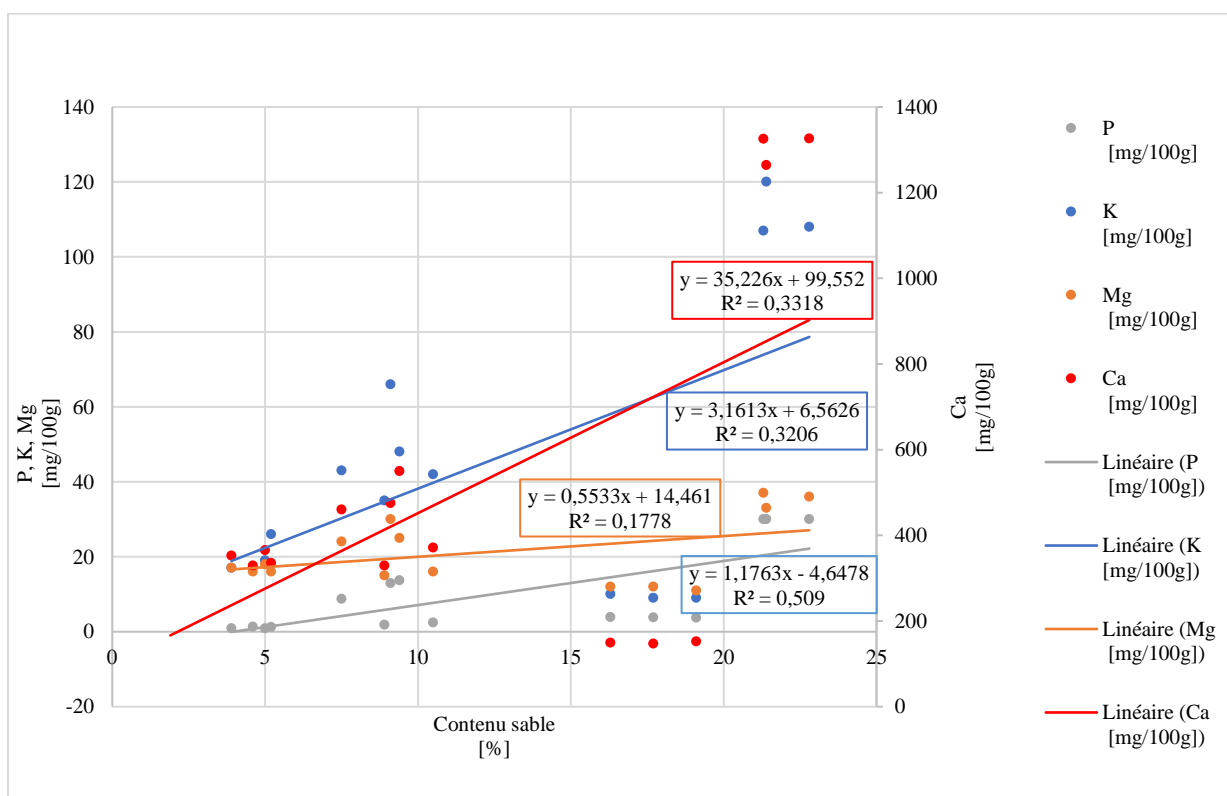


Figure 31 : Mise en relation du contenu en éléments biodisponibles avec le contenu en sable des sols

L'augmentation de la fraction sableuse semble légèrement tirer les valeurs de contenu en K et Mg vers le haut (figure 31). Cela pourrait s'expliquer par la composition en minéraux des sables (feldspath et plagioclase contiennent K et Mg). Cependant, une tendance similaire devrait être observée sous BIOL. Or le contenu en éléments biodisponibles de cette dernière est plus faible par rapport à CONS qui a généralement une fraction sableuse plus faible. Il est à noter que le bokashi 4X présente le plus grand

contenu en sable et en éléments biodisponibles. Sur base de ceci, aucune conclusion nette ne peut être élaborée. Malgré cela, il semblerait que la texture ne soit pas la variable explicative majeure du contenu en éléments biodisponibles. La comparaison de ces derniers est donc possible.

Les résultats montrent une disponibilité plus importante des nutriments pour CONS par rapport à BIOL (voir annexe 7.29). De plus, les teneurs en phosphore et potassium de ce dernier sont inférieures aux valeurs seuils fournies par Genot et al. (2009) respectivement égales à 4.6 mg/100g et 15.6mg/100g. Le magnésium présent dans ce même système, par contre, est supérieur au seuil de carence égal à 9.8mg/100g. La ferme CONS obtient systématiquement des biodisponibilités en nutriments supérieures aux valeurs seuils excepté pour le contenu en phosphore du bokashi 2X.

La comparaison des deux parcelles en bokashi pourrait montrer des concentrations similaires en éléments biodisponibles étant donné que les techniques appliquées sont identiques. Cependant, il semblerait que l'application répétée de bokashi en association avec du biochar permettrait d'augmenter la biodisponibilité des nutriments car les résultats sont systématiquement supérieurs pour le bokashi 4X. Le comportement du biochar dans les sols reste encore compliqué à comprendre actuellement. Néanmoins, il apparaît que l'application de ce procédé augmenterait le contenu en éléments biodisponibles pour les sols acides ( $\text{pH} < 6.5$ ). Le biochar n'aurait pas ou peu d'influence sur les sols ayant un pH compris entre 6.5 et 7.5 (Glaser & Lehr, 2019; Dai et al., 2020). Les sols sableux répondraient mieux à cette technique par rapport aux sols argileux qui présentent un léger effet positif sur la production primaire des plantes (Dai et al., 2020). Les sols limoneux ne répondent que très peu à l'utilisation du biochar. Les meilleures conditions d'application de ce dernier sont réunies lorsque le sol est acide, possède une CEC ainsi qu'un rapport C/N faible et une teneur en azote total importante (Dai et al., 2020).

Dans ce travail, le pH du bokashi 4X est qualifié de légèrement alcalin (voir annexe 7.29). Cette terre ne respecte pas les conditions optimales de pH pour l'utilisation du biochar. Cependant Dai et al. (2020) montrent que cette technique a tendance à alcaliniser les sols (+ 8.78%). Il est donc aisé de penser que le bokashi 4X présentait, initialement, des conditions optimales avec un haut apport d'azote via le bokashi, un rapport C/N inférieur à 20 et une CEC faible mais que suite aux applications répétées de biochar, le pH du sol est devenu plus alcalin et la CEC s'en est trouvée augmentée. De plus, le pH et le rapport C/N du bokashi sont très faibles et pourraient donc contrer l'alcalinisation des sols.

Les valeurs importantes d'azote total observées pour le bokashi 4X seraient le résultat d'effets combinés du haut apport d'azote via le bokashi (rapport C/N ~10) et du pouvoir régulateur du cycle de l'azote du biochar relevé par Dai et al. (2020). Encore une fois, l'application répétée de cette technique permettrait potentiellement d'augmenter le contenu en azote total des sols au vu de la légère évolution observée entre les deux parcelles sous bokashi (voir annexe 7.29). Le BREF possède un niveau d'azote total important et significativement similaire au bokashi. Cela paraît surprenant étant donné que le BREF est uniquement constitué de rameaux (rapport C/N très élevé). Cependant, Lemieux (1996) explique que : « les mécanismes en cause étaient d'origine forestière et principalement liés à une fixation d'azote sous forme non symbiotique par un ensemble de bactéries de la rhizosphère ». Ceci aurait donc tendance à maintenir le contenu en azote total malgré une légère immobilisation durant la première année de la mise en place du BREF (Lemieux, 1996). BIOL obtient les valeurs les plus faibles d'azote total et cela pourrait s'expliquer par une intensification de la rentabilité du système mis en place et cela malgré un apport de fertilisants organiques (N:P:K respectivement 10:3:3).

Les valeurs assez extraordinaires de contenu en calcium du Bokashi 4X ne peuvent être expliquées par la présence accrue d'argile qui offre une surface chargée négativement et permettant l'adsorption des cations. En effet, la régression linéaire de ces deux variables révèle un facteur  $r^2 = 0.003$  (figure 32) qui appuie l'absence de corrélation entre les variables traitées.

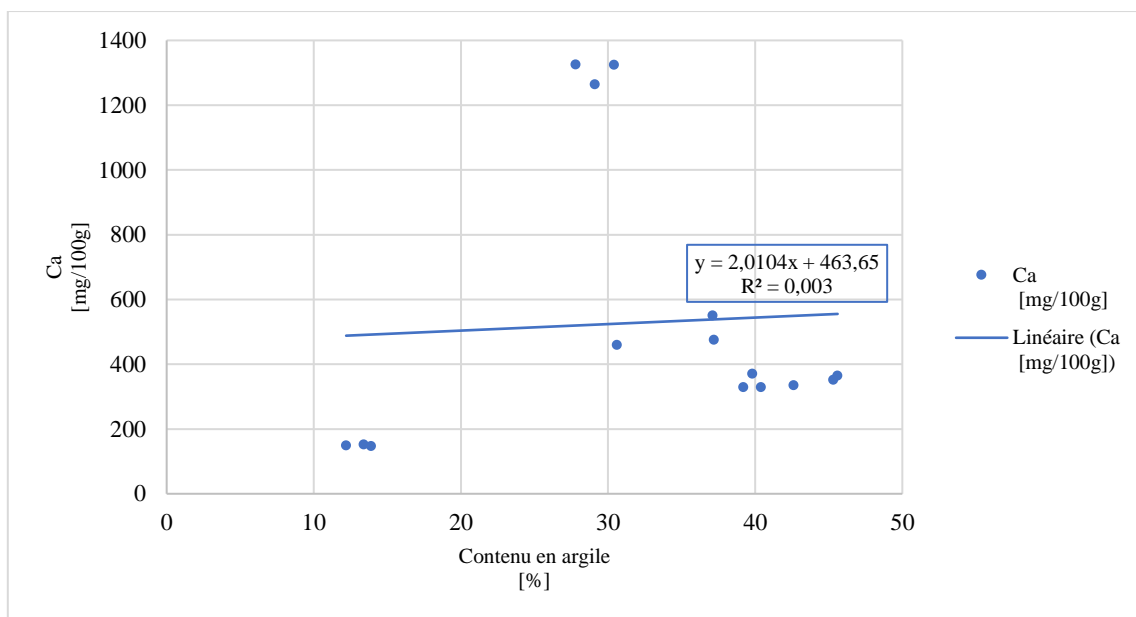


Figure 32 : Mise en relation du contenu en calcium des sols en fonction du contenu en argile.

Les hypothèses semblant être les plus cohérentes seraient que le biochar présent dans les sols soumis au bokashi offrirait une CEC plus importante et disponible pour les ions  $\text{Ca}^{++}$  (Chintala et al., 2014) et que le biochar appliqué joue le rôle de source de calcium de par sa composition propre qui peut varier selon les types de biochars utilisés (Prasad et al., 2020). Altland & Locke (2013) ont même démontré que le biochar pouvait jouer le rôle de source de potassium et de phosphate dans certains cas.

#### 4.2.2 Le statut acido-basique des terres étudiées

Genot et al. (2009) explique que : « le statut acido-basique est déterminé par le pH du sol. Il représente une expression synthétique des conditions physicochimiques qui président en partie à la structuration du sol, à l'activité microbienne et à la disponibilité des éléments ». Il permet donc d'avoir une vision globale du fonctionnement biogéochimique des sols.

La figure 14 (voir partie 3.2.2) montre que les pH rencontrés dans les terres étudiées présentent des valeurs comprises entre 6.6 et 7.6. Ceci signifie que les terres offrent des conditions optimales pour la disponibilité des nutriments qui sont nécessaires au développement des plantes comme nous le montre la figure 33. La prairie obtient des valeurs légèrement plus faibles que celles de la ferme CONS mais cela correspond à ce que Genot et al. (2009) présentent dans leur document. Les terres BIOL sont, quant à elles, légèrement plus acides que la prairie. Il semblerait que les pratiques BIOL tendraient vers une légère acidification des sols tout en restant dans des gammes de valeurs tout à fait acceptables pour les cultures et ceci, malgré le chaulage annuelle appliqué aux terres durant l'hiver.



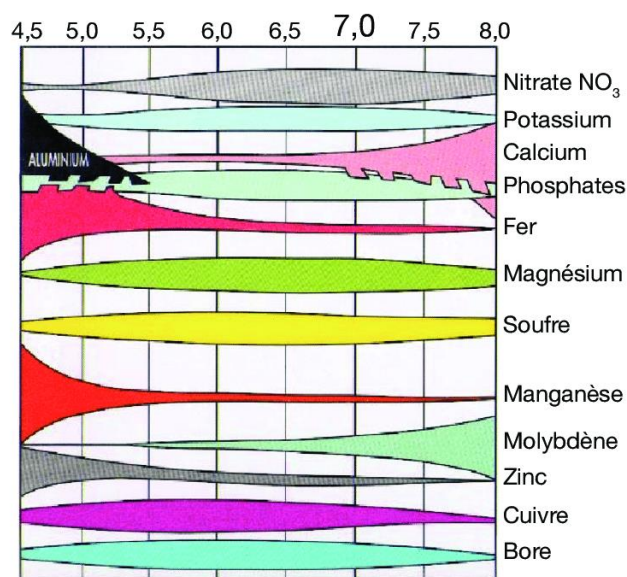


Figure 33 : Disponibilité des nutriments pour les plantes selon les valeurs de  $pH_{eau}$  (issu de Mérelle (1998) et lu dans (Genot et al., 2009)).

Les pH du bokashi 2X et 4X sont étonnamment élevés. En effet, l'application de matières organiques ayant un pH avoisinant les 3.5 devrait théoriquement diminuer celui du sol. Comme cité précédemment, le biochar possède un pouvoir chaulant via l'apport de sels basiques ( $KOH$ ,  $MgOH_2$ ,  $CaOH_2$ ) qui permettrait potentiellement de limiter la chute drastique du pH.

Les valeurs de pH KCl sont, quant à elles, moins optimales. En effet, le Bokashi 2X et BIOL obtiennent des valeurs inférieures au seuil de 6.5 (respectivement 5.9 et 5.3) défini par (Genot et al., 2009). BIOL étant significativement inférieur au Bokashi 2X, le maraîchage biologique appliqué par la ferme Gailly-Jourdan (BIOL) mènerait donc à une acidification plus importante des terres en comparaison avec l'application de bokashi comme dans la ferme CONS. De plus, le bokashi 4X et le BREF montre des niveaux de pH\_KCl supérieurs (respectivement 7.1 et 6.7) à la valeur seuil (6.5). CONS fournirait donc des valeurs optimales de pH\_KCl à l'exception du bokashi 2X. Des applications répétées de bokashi en association au biochar permettraient donc d'obtenir des conditions de pH\_KCl plus favorables au développement des cultures.

Le pH\_KCl de BIOL correspond à ce qui est retrouvé dans la région d'étude (Genot et al., 2009). CONS présente des valeurs légèrement plus importantes que celles retrouvées dans l'article précédemment cité. La ferme CONS montre un pH moins important que les cultures environnantes.

Les ions potassium utilisés dans l'analyse de pH\_KCl induisent un relargage des ions acidifiants hydrogène et aluminium dans la solution analysée. En comparaison avec le  $pH_{eau}$  (caractérise la solution du sol), cela permet de jauger le niveau d'acidification d'un sol. BIOL obtient donc un niveau d'acidification de ses sols plus important que le témoin (prairie) tandis que CONS observe la tendance inverse.

### 4.3 Caractérisation des milieux selon les paramètres biologiques

La biomasse microbienne est influencée par certains paramètres dont la présence de matières organiques et donc le contenu en carbone organique total dans les sols (Schnürer et al., 1985). BIOL obtient des valeurs faibles de carbone organique total (25 g/kg ~ 2.5%) tandis que CONS obtient des valeurs très élevées (49 g/kg ~ 4.9% ; 63.3 g/kg ~ 6.3 % ; 63 g/kg ~ 6.3%). La prairie obtient des valeurs qualifiées d'élevées (47.7 g/kg ~ 4.8%) (figure 34). Il semblerait donc que les pratiques culturales de la ferme CONS induisent une augmentation du contenu en carbone organique. Ceci s'explique aisément par



l'apport accru de matière organique dans cette exploitation. Dans le cas de BIOL, l'export plus intensif de végétaux ainsi qu'un apport plus faible de matières organiques résultent en une faible concentration de COT.

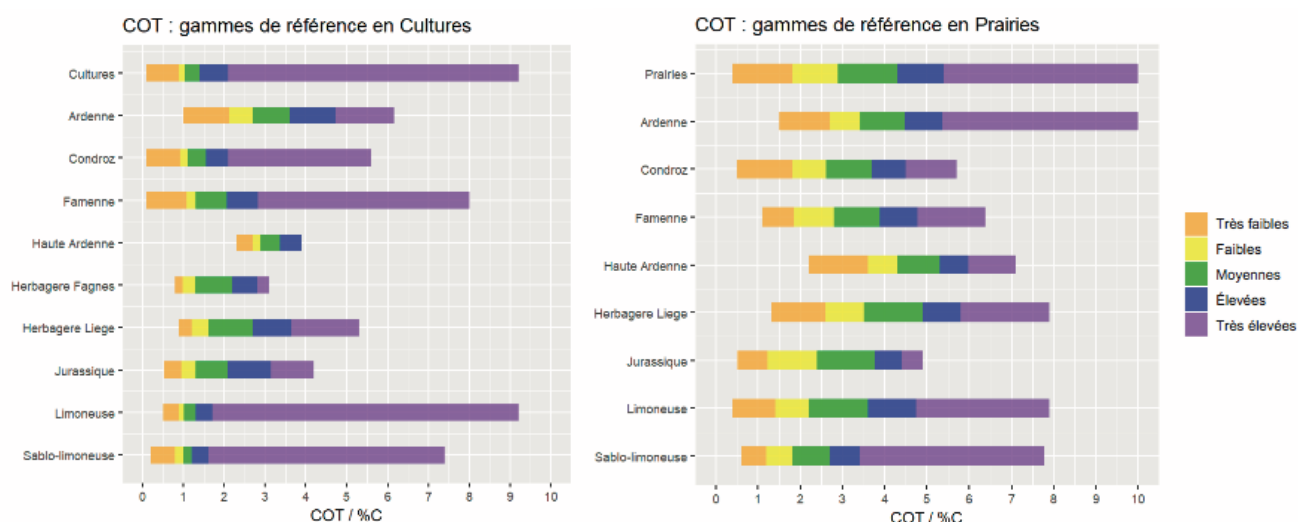


Figure 34 : « Gammes de valeurs des teneurs en COT des sols (%C) sous cultures (en haut) et prairies (en bas) en Wallonie. Les gammes sont produites à partir de la base de données centralisée de REQUASUD (période 2004-2014 ; licence n° A06/2017). Les couleurs montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (orange), 'faibles' (jaune), 'moyennes' (vert), 'élevées' (bleu) et 'très élevées' (violet) » (Vincent et al., 2019).

Le contenu en carbone disponible pour les microorganismes (carbone extrait à l'eau froide) de BIOL (73mg/kg) est qualifié de moyen mais supérieur à la moyenne rencontrée dans les systèmes biologiques (figure 35). CONS obtient des valeurs élevées (bokashi 2X et bokashi 4X) à très élevées (BREF). À savoir que les valeurs du bokashi 2X appartiennent au premier quartil, le bokashi 4X appartient au troisième quartil et le BREF est au-delà de toutes les valeurs recensées dans l'article de Vincent et al. (2019). CONS semble donc fournir plus de carbone pour les microorganismes du sol que la ferme en maraîchage biologique (BIOL).

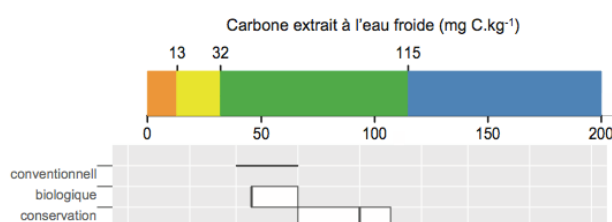


Figure 35 : « Gammes de valeurs calculées du carbone extrait à l'eau froide (mg C.kg<sup>-1</sup>) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quartile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation » (Vincent et al., 2019)

Sparling et al., (1998) montre que l'extraction du carbone à l'eau chaude constitue une approximation de la biomasse microbienne et cette approximation semble être confirmée dans ce travail au vu du coefficient  $r^2 = 0.80$  obtenu (figure 36).

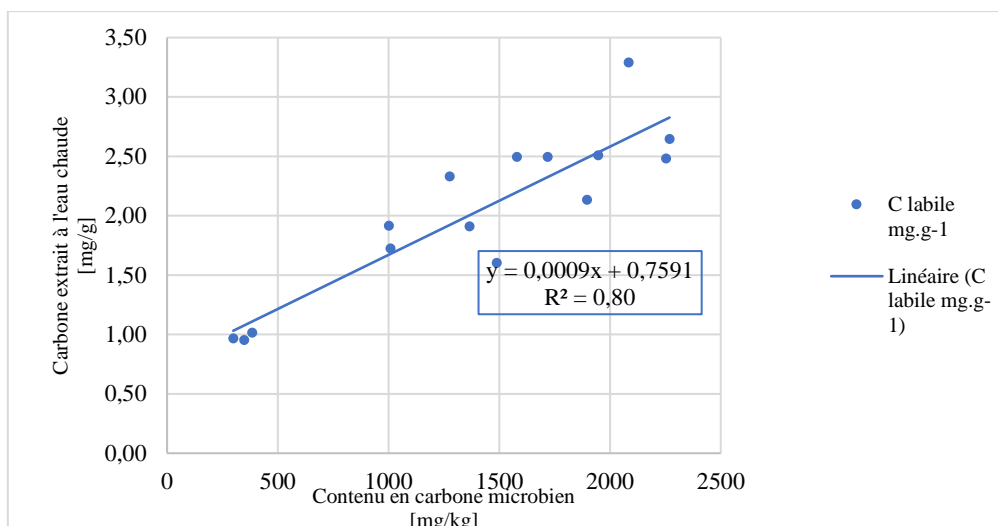


Figure 36 : Mise en relation du contenu en carbone labile (extrait à l'eau chaude) et le carbone microbien

L'analyse du carbone labile montre que BIOL obtient des valeurs élevées (1mg/g) et se classe au-delà des mesures réalisées dans les fermes biologiques de l'étude de Vincent et al. (2019). CONS, quant à lui, obtient des valeurs de carbone labile largement au-delà de ce qui est trouvé dans les terres en conservation (figure 37). CONS présenterait donc une biomasse microbienne largement supérieure à la parcelle BIOL. Comme cité précédemment, cela s'explique par le fait que le maintien d'une couverture végétale accrue diminue la température des sols et augmente le contenu en eau, l'agrégation et le contenu en carbone des sols. Cela fournit donc des conditions favorables au développement des micro-organismes (Balota et al., 2004).

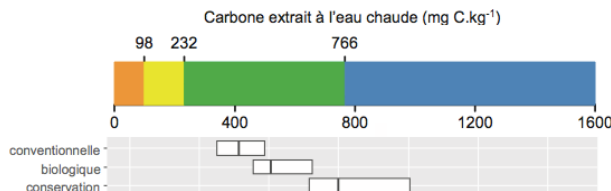


Figure 37 : « Gammes de valeurs calculées du carbone extrait à l'eau chaude (mg C.kg-1) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation. » (Vincent et al., 2019)

Les valeurs de biomasse microbienne carbonée ( $C_{mic}$ ) suivent une tendance similaire comme le proposait Sparling et al. (1998) excepté pour BIOL qui obtient des teneurs moyennes (343.8mg/kg). CONS, quant à lui, permet de développer la biomasse microbienne carbonée (bokashi 2X, bokashi 4X, BREF contenant respectivement 1462.2, 1217.1, 1794.2 mg de  $C_{mic}$  par kg de sol) bien au-delà de ce qui est rencontré dans les fermes appliquant des techniques de conservation en grandes cultures (figure 38). L'hypothèse fournie par les valeurs de carbone labile qualifiant la biomasse microbienne est confirmée par cet indicateur.

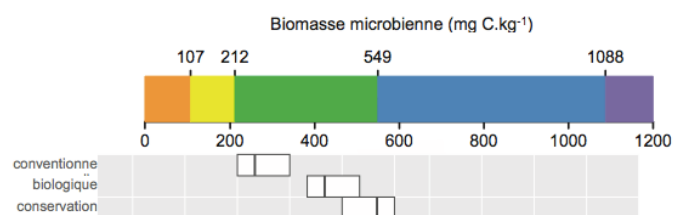


Figure 38 : « Gammes de valeurs calculées de la biomasse microbienne (mg C.kg<sup>-1</sup>) dans les sols en culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert), 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation » (Vincent et al., 2019).

Sur base du  $C_{mic}$  et des valeurs de  $N_{mic}$ , le rapport  $C_{mic}/N_{mic}$  est calculé et caractérise la composition relative en population bactérienne et fongique à savoir que cette dernière : «[...] joue un rôle important dans la formation de macro-agrégats et est la matière organique labile qui sert de principale source de carbone et de nutriments libérés après la culture. » (Gupta & Germida, 1988). Vincent et al. (2019) caractérisent les ratios C/N bactériens et fongiques évoluant respectivement de 3 à 6 et de 5 à 15. Ces valeurs étant issues de l'article rédigé par McGill et al. (1981)<sup>6</sup>. Les pratiques de CONS auraient tendance à légèrement augmenter le  $C_{mic}/N_{mic}$  via une communauté fongique relativement plus importante ( $C_{mic}/N_{mic}$  bokashi 2X ; bokashi 4X ; BREF respectivement égal à 8.6 ; 7.2 ; 7.1).

La parcelle BIOL a un rapport  $C_{mic}/N_{mic}$  caractérisé de moyen et appartenant au premier quartil des valeurs rencontrées dans l'étude de Vincent et al. (2019). Les valeurs de rapport  $C_{mic}/N_{mic}$  de la ferme CONS sont qualifiés de moyens et sont similaires à ceux rencontré dans les systèmes conventionnels wallons (Vincent et al., 2019) (figure 39).

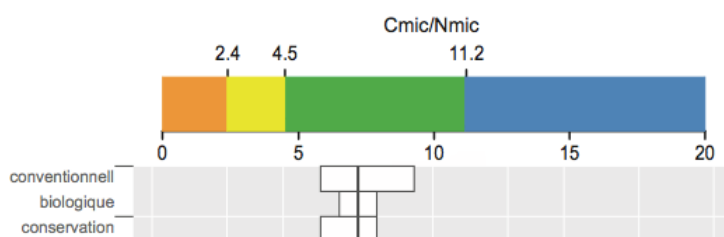


Figure 39 : « Gammes de valeurs calculées du rapport  $C_{mic}/N_{mic}$  dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation » (Vincent et al., 2019).

Le quotient microbien fait le lien entre le contenu en carbone organique total et la biomasse microbienne des sols et fournit des informations sur la disponibilité en substrat carboné pour les micro-organismes (Vincent et al., 2019). La disponibilité du substrat carboné de la parcelle BIOL est qualifiée de faible ( $Q_{mic} = 1.38$ ) (figure 40) tandis que celle des parcelles CONS est moyenne ( $Q_{mic}$  bokashi 2X ; bokashi 4X ; BREF respectivement égal à 2.97 ; 1.92 ; 2.84). Il apparaîtrait donc que les pratiques CONS induiraient une augmentation de la disponibilité du substrat carboné.

<sup>6</sup> McGill, W.B., Hunt, H.W., Woodmansee, R.G., Reuss, J.O., 1981. Phoenix, a model of the dynamics of carbon and nitrogen in grassland soils, Ecological Bulletins (Sweden). Swedish Natural Science Research Council.

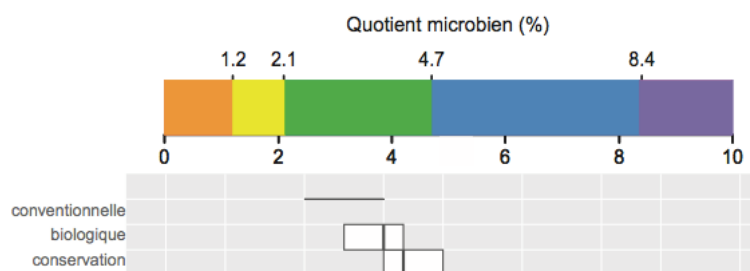


Figure 40 : « Gammes de valeurs calculées du quotient microbien (%) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert), 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation. » (Vincent et al., 2019).

Le contenu en azote sous différentes formes est un autre des facteurs influençant la biomasse microbienne car il se définit comme étant un : « élément constitutif des organismes vivants, assimilé par les végétaux essentiellement sous forme de nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) ou d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) à partir de la solution du sol » (Genot et al., 2009). De ce fait, l'étude de l'azote extrait à l'eau froide ( $\text{N}_{\text{froid}}$ ) et à l'eau chaude ( $\text{N}_{\text{chaud}}$ ) représente des mesures de cet élément dans les fractions actives du sol (Vincent et al., 2019). Les valeurs de  $\text{N}_{\text{froid}}$  sont caractérisées de moyennes dans les deux systèmes agricoles étudiés malgré la présence de différences significatives. Par contre, l'azote extrait à l'eau chaude permet de discriminer les pratiques étudiées. BIOL obtient des valeurs qualifiées de moyennes (79.9mg/kg) tandis que celles de CONS sont qualifiées d'élevées ( $\text{N}_{\text{chaud}}$  bokashi 2X ; bokashi 4X ; BREF respectivement égales à 142.4 ; 153.5 ; 220.6) (figure 41). Il semblerait donc que ce dernier permette une libération et une disponibilité plus importante de l'azote pour les organismes par rapport à la ferme BIOL.

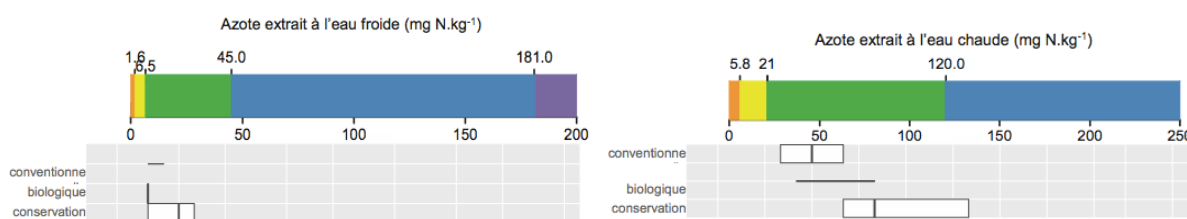


Figure 41 : « Gammes de valeurs calculées de l'azote extrait à l'eau froide et à l'eau chaude dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation » (Vincent et al., 2019).

Les valeurs de minéralisation nette de l'azote ne présentent pas de différences significatives entre les systèmes étudiés dans ce travail (voir annexe 7.29). Cependant, le projet d'étude CARBIOSOL qualifie la minéralisation nette de la parcelle BIOL de moyenne ( $1.3 \text{ mg.kg}^{-1}_{\text{sol sec}} .\text{J}^{-1}$ ) tandis que celle de la ferme CONS est qualifiée d'élevée (Vincent et al., 2019) et respectivement égale à 1.9 ; 1.5 ;  $2.1 \text{ mg.kg}^{-1}_{\text{sol sec}} .\text{J}^{-1}$  pour le bokashi 2X ; Bokashi 4X ; BREF (figure 42). Une fois encore, CONS semble fournir des conditions plus favorables à la qualité biologique des sols par rapport au BIOL qui vis-à-vis de ce paramètre, développe un milieu moins bénéfique pour la minéralisation de l'azote qui est un élément essentiel au développement des organismes. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les cultures induisent une augmentation des micro-agrégats qui pourraient affecter la porosité des sols et donc diminuer l'apport d'oxygène nécessaire pour les mécanismes de nitrification (voir partie 1.4 et 1.6.2).

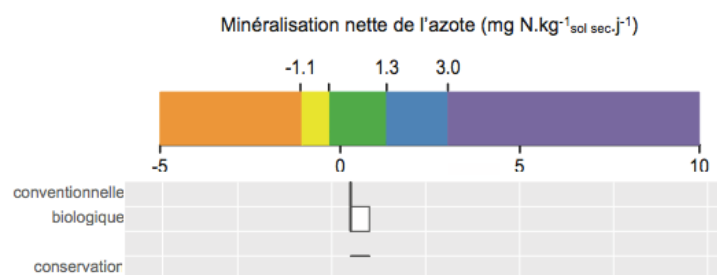


Figure 42 : « Gammes de valeurs calculées de la minéralisation nette de l'azote ( $\text{mg N.kg}^{-1}_{\text{sol sec. j}^{-1}}$ ) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert), 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quartile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation. » (Vincent et al., 2019).

La respiration potentielle montre des corrélations variables avec les paramètres étudiés dans ce TFE (COT,  $C_{\text{eau\_chaude}}$ ,  $C_{\text{eau_froide}}$ ,  $N_{\text{eau\_chaude}}$ ,  $N_{\text{tot}}$ ,  $C_{\text{mic}}$ ,  $N_{\text{mic}}$ ) (Vincent et al., 2019) (figure 43). Elle permet donc d'étudier le sol d'un point de vue plus global. En effet, les émissions de  $\text{CO}_2$  sont influencées par de nombreux paramètres tels que le taux de saturation en eau des pores (% WFP) (Linn & Doran, 1984) et le contenu en carbone organique total et par extension la matière organique (Linn & Doran, 1984; Schnürer et al., 1985).

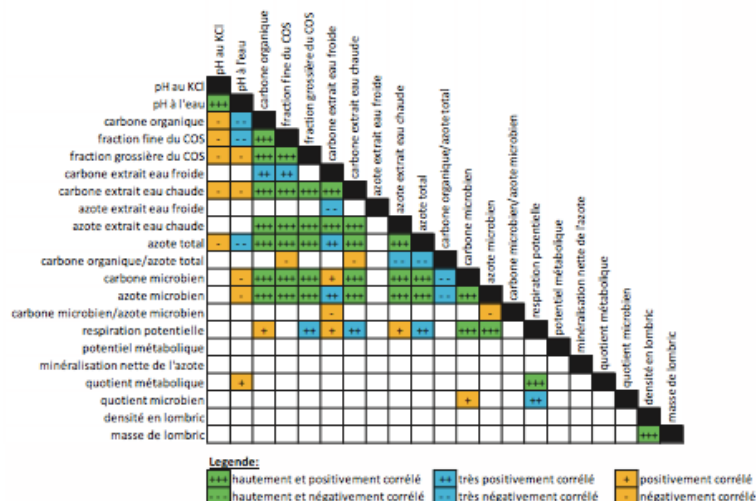


Figure 43 : « Corrélogramme des indicateurs mesurés dans le RSS CARBIOSOL dans des sols cultivés dont l'échantillonnage a eu lieu en 2013, 2014 (carbioso1), 2015 (carbioso2), 2016 (carbioso3) et 2017 (carbioso4).  $n_{\text{minimal}}=120$  et  $n_{\text{maximal}}=366$ . Jaune -  $p<0,05$  ; Bleu -  $p<0,01$  ; Vert -  $p<0,001$  ; Blanc -  $p>0,05$ . Test rho de Spearman. » (Vincent et al., 2019).

Les valeurs concernant la respiration potentielle et donc le quotient métabolique obtenu dans ce travail ne peuvent pas être comparées avec l'étude de Vincent et al. (2019) car la méthode appliquée diffère. De plus le séchage à l'air libre prolongé a pu engendrer une destruction presque totale des populations de micro-organismes résultant donc en une respiration potentielle qualifiée de très faible (Vincent et al., 2019). Cependant, les différences significatives révèlent que CONS minéralise plus de matière organique. Sur base de la définition de ce paramètre, cela pourrait s'expliquer par une plus grande disponibilité de substrat, par une plus grande quantité de micro-organismes présents dans les sols ou encore par une activité microbienne accrue. Dans le cas présent, CONS présente les deux premières caractéristiques précédemment citées. En effet, les contenus en carbone organique total et en biomasse microbienne de ce système sont largement et significativement supérieurs à BIOL. Les valeurs de quotients métaboliques plus importantes de BIOL appuient ces faits car des valeurs élevées de ce

paramètre révèlent un stress physiologique pour les micro-organismes traduisant une demande accrue en énergie pour maintenir leur activité (Anderson & Domsch, 1985). De plus, les quotients microbiens de la ferme en maraîchage de conservation (CONS) révèlent une plus grande disponibilité du substrat carboné. La combinaison de ces éléments pourrait constituer une hypothèse expliquant la minéralisation plus importante observée dans la ferme CONS. L'évolution des émissions de dioxyde de carbone est représentée dans le graphique suivant (figure 44).

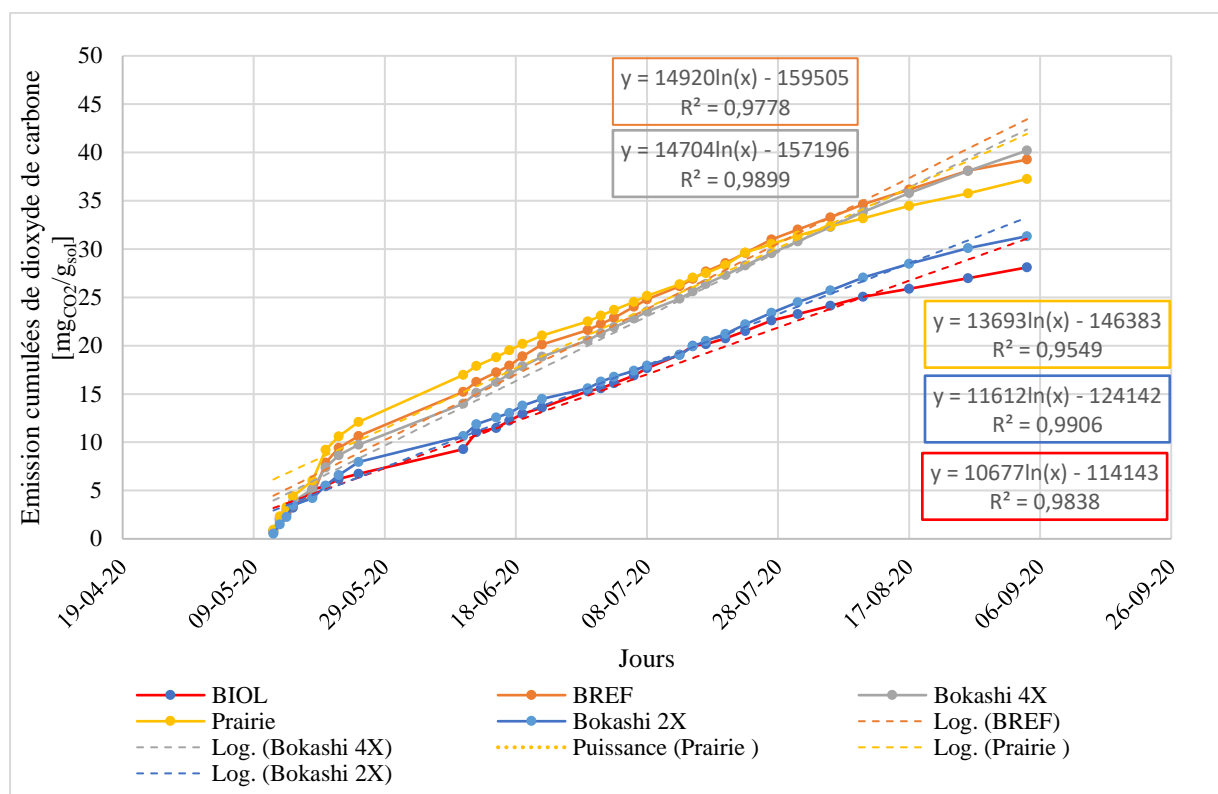


Figure 44 : Evolution des émissions de dioxyde de carbone par échantillon durant la période d'incubation

Le calcul des courbes de tendance révèle un comportement logarithmique dans les émissions de CO<sub>2</sub> au vu des coefficients  $r^2$  très élevés. Ceci est cohérent avec la notion de flush microbien présent au début de la période d'incubation provoqué par le passage au tamis des échantillons. En effet, le tamisage induit une mise en contact plus importante de la biomasse microbienne à l'air et à l'ensemble des éléments présents dans les sols. Cela a pour effet de stimuler la minéralisation du carbone (Gupta & Germida, 1988). L'analyse du flush d'émission pourrait potentiellement appuyer l'hypothèse décrite précédemment et expliquant que, sur base du rapport  $C_{mic}/N_{mic}$ , les pratiques CONS avaient tendance à augmenter ce ratio via une communauté fongique légèrement plus importante. En effet, Adu & Oades, (1978) démontrent que la minéralisation du carbone en début d'incubation était principalement le résultat de l'activité métabolique fongique. Durant les 25 premiers jours d'expérimentation, la minéralisation du système CONS est supérieure à celle de BIOL. Il se pourrait donc que les communautés fongiques soient plus importantes dans les sols sous CONS. L'impact positif des travaux mécaniques sur la minéralisation du carbone (Balota et al., 2004) n'est pas observée dans la parcelle BIOL au vu de la faible respiration potentielle calculée. La présence de maïs dans les cultures sous BREF a pu avoir un effet positif sur les valeurs de cet indicateur (Balota et al., 2004).

Les valeurs légèrement plus importantes d'émission de CO<sub>2</sub> de CONS peuvent être le résultat d'un contenu plus important en COT (Vincent et al., 2019). A l'inverse, BIOL contient significativement moins de COT et une respiration potentielle légèrement plus faible est observée. Cet indicateur ne permet pas de déterminer si les hautes valeurs d'émission de dioxyde de carbone sont le résultat d'une grande disponibilité du substrat ou de l'activité des micro-organismes plus importante. La normalisation



des valeurs de respiration potentielle par les valeurs de contenu en carbone organique total (COT) élimine la source de variation venant de cet indicateur et constitue le potentiel de minéralisation (figure 45).

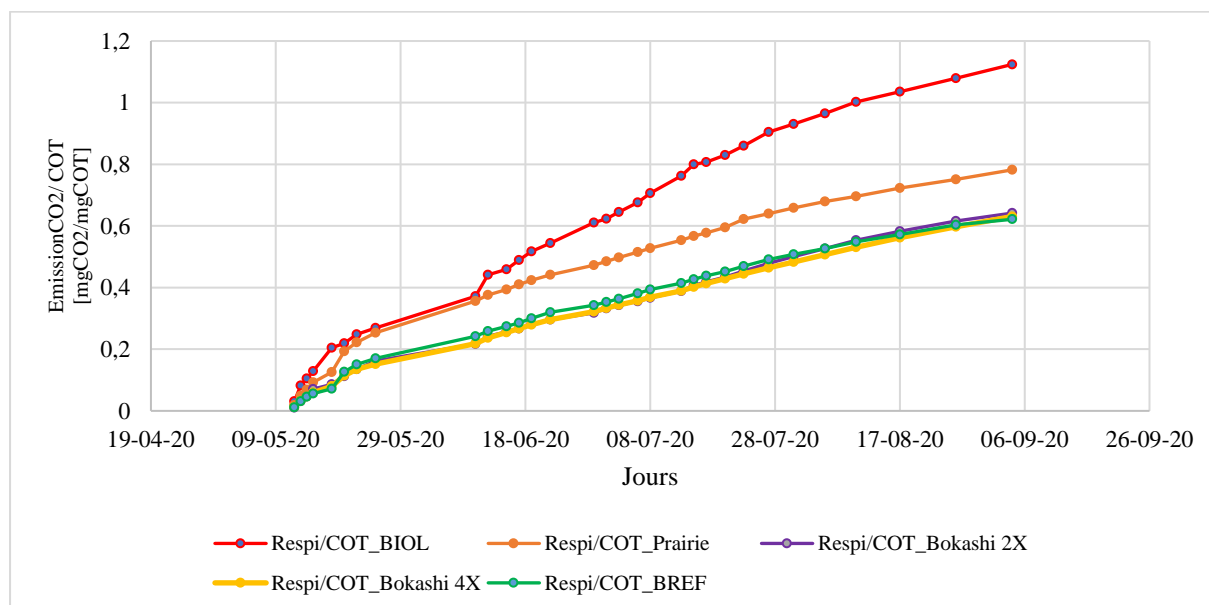


Figure 45 : Emissions cumulées de dioxyde de carbone par unité de carbone organique total (COT).

La normalisation effectuée révèle une minéralisation plus importante du carbone par unité de carbone organique dans les pratiques BIOL malgré des valeurs largement inférieures de  $C_{mic}$ . Cela appuie l'hypothèse de légers stress dans les populations de microorganismes de BIOL fournie par les valeurs de quotient métabolique plus élevées. La minéralisation du carbone par unité de COT des pratiques CONS est inférieure à celle de la prairie. Dans le cas présent, les valeurs d'émissions de dioxyde de carbone par unité de COT pourraient potentiellement confirmer l'impact positif des travaux mécaniques sur la minéralisation du carbone (Balota et al., 2004).

D'un point de vue environnemental, la ferme CONS émet moins de dioxyde de carbone par unité de COT par rapport à la ferme BIOL. Les pratiques culturales de cette dernière auraient donc un impact légèrement plus important sur le réchauffement climatique. Le système CONS, quant à lui, semblerait contenir du COT plus difficilement minéralisable et aurait donc un impact légèrement moins important sur les émissions de dioxyde de carbone.

L'analyse de l'IGB permet de conclure le chapitre biologique car il correspond à la synthèse des indicateurs biologiques. Les pratique CONS obtiennent des valeurs significativement supérieures à celles de l'exploitation BIOL. La qualité biologique des sols CONS peut donc être considérée comme globalement supérieure à celle des sols sous BIOL. Le BREF obtient une qualité biologique des sols similaire à la prairie qui constitue un milieu n'ayant reçu que peu de perturbations physico-chimiques. Le bokashi 2X et 4X ont une qualité inférieure à la prairie mais supérieure à BIOL.

#### 4.4 Mise en évidence des interactions entre les variables physico-chimiques et biologiques

Gupta & Germida (1988) démontrent la présence d'une corrélation entre la biomasse microbienne présente dans les sols et le contenu en nutriments minéralisés. Cela permet de faire le lien entre les propriétés physico-chimiques et biologiques. Cependant, aucune relation mathématique significative n'a été trouvée entre les différents paramètres étudiés ( $N_{tot}$  et  $N_{mic}$  ;  $N_{tot}$  et  $N_{min}$  ; COT et  $C_{mic}$  ; éléments biodisponibles et  $C_{mic}$  ,  $N_{mic}$  ; pH et  $C_{mic}$  ,  $N_{mic}$  ; C/N et  $C_{mic}/N_{mic}$  ). Malgré cela, il reste cohérent de considérer que l'amélioration des conditions environnementales des micro-organismes est en partie le

résultat des conditions physico-chimiques du milieu. Ce qui a pour effet d'augmenter le contenu en micro-organismes des sols qui, à terme, développe un milieu physico-chimique favorable pour les cultures. Il s'agirait donc là d'une boucle rétroactive positive engendrée par un apport massif de matières végétales compostées et par l'absence de labour étant donné que ce sont les principaux paramètres changeants entre les deux systèmes étudiés. L'étude d'un plus grand nombre d'exploitations utilisant ces techniques dans le même cadre que ce travail permettrait d'affirmer ou non cette hypothèse. Il s'agirait d'une étude à tendance qualitative sans information directe sur les mécanismes mis en place.



## 5 Conclusion

Le set de 17 paramètres physico-chimiques et biologiques étudiés a permis de caractériser, en partie, les techniques culturales employées par le système en maraîchage de conservation étudié (CONS) et le système en maraîchage biologique (BIOL). Il apparaît que les pratiques CONS amélioreraient la qualité physico-chimique des sols par rapport à la parcelle témoin (prairie). Néanmoins, les deux applications de matières organiques semblent être insuffisantes dans le cas du bokashi en association au biochar. Il serait intéressant d'étudier un cas mettant en œuvre trois applications de cette technique. Cela permettrait de potentiellement découvrir un pH légèrement plus faible au bokashi 4X et une biodisponibilité plus importante des nutriments par rapport au bokashi 2X dans le but de trouver un nombre optimal d'applications. Il semble important d'éviter un apport supplémentaire de bokashi en association avec le biochar dans la parcelle bokashi 4X car le pH est à la limite supérieure de disponibilité des nutriments. Il pourrait donc y avoir un effet négatif sur les cultures en cas d'apport supplémentaire. Le maraîchage biologique (BIOL) aurait un effet plutôt neutre à tendance négative sur les propriétés physico-chimiques des sols (5/9 propriétés sont inférieures à la parcelle témoin) par rapport à la prairie.

L'analyse des résultats montrent que le CONS est qualifié comme ayant une meilleure qualité biologique des sols par rapport à la ferme BIOL (maraîchage biologique). En effet, il y a une plus grande quantité et disponibilité du substrat ( $COT$ ,  $C_{labile}$ ,  $C_{eau\_froide}$ ,  $N_{eau\_chaude}$ ), une quantité et une activité microbienne plus importantes ( $C_{mic}$ ,  $N_{mic}$ , quotient métabolique) donnant donc lieu à une minéralisation plus importante de la biomasse présente dans les sols (respiration potentielle). Le potentiel de minéralisation du carbone de la ferme CONS est légèrement inférieur à celle de l'exploitation BIOL. Cette dernière aurait donc tendance à avoir un effet plus négatif sur les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. De plus l'indice global de la qualité biologique des sols démontre que les pratiques CONS sont significativement supérieures à celle de BIOL.

Le dataset obtenu dans cette étude n'a pas permis de mettre en évidence des relations mathématiques significatives entre les caractéristiques physico-chimiques et biologiques. Cependant, il semble cohérent de relier l'amélioration des conditions physico-chimiques et donc des conditions de vie des micro-organismes à l'augmentation du contenu en biomasse microbienne dans la ferme agroécologique (CONS). Il semblerait que les différences apparaissant entre les deux systèmes agronomiques soient le résultat de l'apport majeur de matières organiques et l'absence de perturbation physique (travail mécanique) et chimique car ce sont les principaux paramètres différenciant ces exploitations mais une étude approfondie du sujet est nécessaire. Il pourrait être intéressant d'étendre la recherche sur un plus grand nombre de fermes CONS et de fermes BIOL ayant des pratiques culturales similaires à celles étudiées dans ce travail bien que cela soit peu répandu actuellement. Cela permettrait d'avoir un pouvoir statistique plus important et donc une meilleure représentativité des pratiques culturales étudiées.

Ce travail est focalisé sur la qualité des sols mais il serait nécessaire d'approfondir le sujet en étudiant la production maraîchère des différentes pratiques culturales étudiées dans ce travail car le sujet des rendements des CONS semble être soumis à la controverse (Barbié, 2007). La qualité nutritionnelle des légumes produits sur les terres est un indicateur qui permettrait d'étudier les interactions entre les sols et les plantes. Une expérimentation sur le long-terme (minimum trois à six années), sur un même terrain présentant un faible relief et mettant en place les différentes techniques étudiées dans ce travail permettrait l'évaluation de ces hypothèses, supprimant alors de multiples sources de biais environnementaux et anthropiques (fractions granulométriques, espèces mises en culture).

## 6 Bibliographie

- Adu J.K. & Oades J.M., 1978. Utilization of organic materials in soil aggregates by bacteria and fungi. *Soil Biol. Biochem.* **10**(2), 117–122.
- Altland J.E. & Locke J.C., 2013. Effect of biochar type on macronutrient retention and release from soilless substrate. *HortScience* **48**(11), 1397–1402.
- Alvarez G., Chaussod R., Cluzeau D., Godden B., Metzger L., Nicolardot B., Parat J. & Salducci X., 2002. Activités biologiques et fertilité des sols Intérêts et limites des méthodes analytiques disponibles, Horizon.
- Anderson T.H. & Domsch K.H., 1985. Determination of ecophysiological maintenance carbon requirements of soil microorganisms in a dormant state. *Biol. Fertil. Soils* **1**(2), 81–89.
- Andrews S.S., Karlen D.L. & Mitchell J.P., 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agric. Ecosyst. Environ.* **90**, 25–45.
- Balota E.L., Filho A.C., Andrade D.S. & Dick R.P., 2004. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. *Soil Tillage Res.* **77**(2), 137–145.
- Barbié O., 2007. Permaculture et agriculture soutenable, 1–15.
- Barthès B.G., Manlay R.J. & Porte O., 2010. Etude de l'apport de bois raméal sur la plante et le sol: une revue des résultats expérimentaux. *Cah. Agric.* **19**, 255–261.
- Brain R. & Thomas B., 2013. Permaculture, 1–6.
- Brookes P.C., Landman A., Pruden G. & Jenkinson D.S., 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem.* **17**(6), 837–842.
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., Deyn G. De, Goede R. De, Flesskens L., Geissen V., Kuiper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., Willem J., Groenigen V. & Brussaard L., 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biol. Biochem.* **120**(January), 105–125.
- Canfield D.E., Glazer A.N. & Falkowski P.G., 2010. The evolution and future of earth's nitrogen cycle. *Science* (80-. ). **330**(6001), 192–196.
- Carter M.R., Gregorich E.G., Anderson D.W., Doran J.W., Janzen H.H. & Pierce F.J., 1997. Chapter 1 Concepts of soil quality and their significance. *Dev. Soil Sci.* **25**, 1–19.
- Chaney K. & Swift R.S., 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *J. Soil Sci.* **35**, 223–230.
- Chintala R., Mollinedo J., Schumacher T.E., Malo D.D. & Julson J.L., 2014. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Arch. Agron. Soil Sci.* **60**(3), 393–404.
- Christel D.M., 2017. The use of bokashi as a soil fertility amendment in organic spinach cultivation.
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Pernin C., Mateille T., Philippot L., Bellido A., Rougé L., Arrouays D., Bispo A. & Pérès G., 2012. Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *Eur. J. Soil Biol.* **49**, 63–72.
- Colinet G., Laroche J., Toussaint B., Goffaux M.-J., Martinez M. & Oger R., 2003. Base de données sols de Requasud, 1–36.
- Crémer S. & Lambert R., 2013. L'échantillonnage des sols en agriculture, Fourages Mieux asbl, 1–6.

- Critter S.A.M., Freitas S.S. & Airoidi C., 2004. Comparison of microbial activity in some Brazilian soils by microcalorimetric and respirometric methods. *Thermochim. Acta* **410**(1–2), 35–46.
- Dai Y., Zheng H., Jiang Z. & Xing B., 2020. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis. *Sci. Total Environ.* **713**, 1–11.
- Degrune F., Boeraeve F., Dufrêne M., Cornélis J.-T., Frey B. & Hartmann M., 2019. The Pedological Context Modulates the Response of Soil Microbial Communities to Agroecological Management. *Front. Ecol. Evol.* **7**(261), 0–16.
- Degrune F., Theodorakopoulos N., Colinet G., Hiel M.P., Bodson B., Taminiau B., Daube G., Vandenbol M. & Hartmann M., 2017. Temporal dynamics of soil microbial communities below the seedbed under two contrasting tillage regimes. *Front. Microbiol.* **8**(1127).
- Degrune F., Theodorakopoulos N., Dufrêne M., Colinet G., Bodson B., Hiel M.P., Taminiau B., Nezer C., Daube G. & Vandenbol M., 2016. No favorable effect of reduced tillage on microbial community diversity in a silty loam soil (Belgium). *Agric. Ecosyst. Environ.* **224**, 12–21.
- Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P. & Ranjard L., 2011. Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influenced by soil characteristics and management. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **20**(4), 641–652.
- Dick R.P., 1992. A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agric. Ecosyst. Environ.* **40**(1–4), 25–36.
- Doran J.W. & Parkin T.B., 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **35**, 3–21.
- Doran J.W. & Parkin T.B., 1996. Quantitative Indicators of Soil Quality : A Minimum Data Set. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**, 25–37.
- Duru M., Therond O., Martin G., Martin-Clouaire R., Magne M.A., Justes E., Journet E.P., Aubertot J.N., Savary S., Bergez J.E. & Sarthou J.P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agron. Sustain. Dev.* **35**(4), 1259–1281.
- Elliott E.T., 1986. Aggregate Structure and Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Native and Cultivated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **50**, 627–633.
- Elliott E.T., Horton K., Moore J.C., Coleman D.C. & Cole C. V., 1984. Mineralization dynamics in fallow dryland wheat plots, Colorado. *Plant Soil* **76**(1–3), 149–155.
- Fraser D.G., Doran J.W., Sahs W.W. & Lesoing G.W., 1988. Soil Microbial Populations and Activities under Conventional and Organic Management. *J. Environ. Qual.* **17**(4), 585–590.
- Gao S., Hoffman-Krull K., Bidwell A.L. & DeLuca T.H., 2016. Locally produced wood biochar increases nutrient retention and availability in agricultural soils of the San Juan Islands, USA. *Agric. Ecosyst. Environ.* **233**, 43–54.
- Genot V., Colinet G., Brahy V. & Bock L., 2009. L'état de la fertilité des terre agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4- sol1 de "L'Etat de l'environnement wallon 2006-2007"). *Base [En ligne]* **13**(1), 121–138.
- Glaser B. & Lehr V.I., 2019. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Sci. Rep.* **9**(1), 1–9.
- Gomez E., Garland J., Conti M., Xu H.L., Wang R., Mridha M.A.U. & Umemura U., 2004. Phytophthora resistance of tomato plants grown with EM Bokashi. *Appl. Soil Ecol.* **26**(1941), 21–30.
- Granatstein D.M., Bezdicsek D.F., Cochran V.L., Elliott L.E. & Hammel J., 1987. Long-term tillage and rotation effects on soil microbial biomass, carbon and nitrogen. *Biol. Fertil. Soils* **5**(3), 265–270.

- Gupta V.V.S.R. & Germida J.J., 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol. Biochem.* **20**(6), 777–786.
- Holland E.A. & Coleman D.C., 1987. Litter placement effects on microbial and organic matter dynamics in an agroecosystem. *Ecology* **68**(2), 425–433.
- Joergensen R.G., 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the kEC value. *Soil Biol. Biochem.* **28**(1), 25–31.
- Karlen D.L. & Stott D.E., 1994. A Framework for Evaluating Physical and Chemical Indicators of Soil Quality Douglas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (35), 53–72.
- Kibblewhite M.G., Ritz K. & Swift M.J., 2008. Soil health in agricultural systems. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **363**(1492), 685–701.
- Kremer R.J. & Li J., 2003. Developing weed-suppressive soils through improved soil quality management. *Soil Tillage Res.* **72**(2), 193–202.
- Krüger I., Chartin C., Van Wesemael B., Malchair S. & Carnol M., 2017. Integrating biological indicators in a soil monitoring network (SMN) to improve soil quality diagnosis – a case study in Southern Belgium (Wallonia). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **21**(3), 219–230.
- Lemieux G., 1996. Cet univers caché qui nous nourrit: le sol vivant. Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Laval, 1–54.
- Linn D.M. & Doran J.W., 1984. Effect of Water-Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Nontilled Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **48**(6), 1267–1272.
- Lupwayi N.Z., Clayton G.W., O'Donovan J.T., Harker K.N., Turkington T.K. & Rice W.A., 2004. Soil microbiological properties during decomposition of crop residues under conventional and zero tillage. *Can. J. Soil Sci.* **84**(4), 411–419.
- Marschner P., Kandeler E. & Marschner B., 2003. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment. *Soil Biol. Biochem.* **35**(3), 453–461.
- Mosier A., Schimel D., Valentine D., Bronson K. & Parton W., 1991. Methan and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature* **350**(March), 330–332.
- Najmadeen H. H., Mohammad A. O. & Mohamed-amin H. H., 2010. Effect of soil texture on chemical compositions, microbial population and carbon mineralisation in soil. *Egypt. J. Exp. Biol.* **6**(1), 59–64.
- Nicolardot B., Bouziri L., Bastian F. & Ranjard L., 2007. A microcosm experiment to evaluate the influence of location and quality of plant residues on residue decomposition and genetic structure of soil microbial communities. *Soil Biol. Biochem.* **39**(7), 1631–1644.
- Nortcliff S., 2002. Standardisation of soil quality attributes. *Agric. Ecosyst. Environ.* **88**, 161–168.
- Pankhurst C.E., Doube B.M. & Gupta V.V.S., 1997. Biological indicators of soil health : synthesis. In: Pankhurst, C.E., Doube, B.M., Gupta, V.V.S. eds. *Biological Indicators of Soil Health*. CAB international, Wallingford, 419–435.
- Parfitt R.L., Giltrap D.J. & Whitton J.S., 1995. Contribution of organic matter and clay minerals to the cation exchange capacity of soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **26**(9–10), 1343–1355.
- Prasad M., Chrysargyris A., McDaniel N., Kavanagh A., Gruda N.S. & Tzortzakis N., 2020. Plant nutrient availability and pH of biochars and their fractions, with the possible use as a component in a growing media. *Agronomy* **10**(1), 1–17.

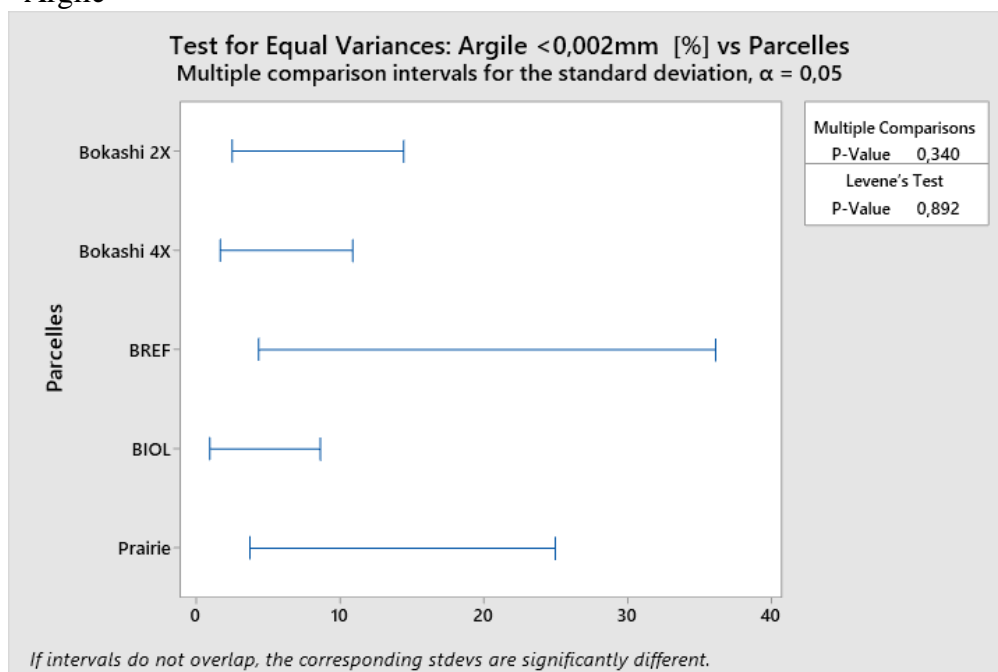
- Pulleman M., Creamer R., Hamer U., Helder J., Pelosi C., Pérès G. & Rutgers M., 2012. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services-an overview of European approaches. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* **4**(5), 529–538.
- Rodella A.A. & Saboya L. V., 1999. Calibration for conductimetric determination of carbon dioxide. *Soil Biol. Biochem.* **31**(14), 2059–2060.
- Sanders D.W., 1992. International activities in assessing and monitoring soil degradation. *Am. J. Altern. Agric.* **7**(June), 17–24.
- Schnürer J., Clarholm M., Boström S. & Rosswall T., 1986. Effects of moisture on soil microorganisms and nematodes: A field experiment. *Microb. Ecol.* **12**(2), 217–230.
- Schnürer J., Clarholm M. & Rosswall T., 1985. Microbial biomass and activity in an agricultural soil with different organic matter contents. *Soil Biol. Biochem.* **17**(5), 611–618.
- Scott N.A., Cole C.V., Elliott E.T. & Huffman S.A., 1996. Soil Textural Control on Decomposition and Soil Organic Matter Dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **60**(4), 1102–1109.
- Shen S.M., Pruden G. & Jenkinson D.S., 1984. Mineralization and immobilization of nitrogen in fumigated soil and the measurement of microbial biomass nitrogen. *Soil Biol. Biochem.* **16**(5), 437–444.
- Singh M., Sarkar B., Sarkar S., Churchman J., Bolan N., Mandal S., Menon M., Purakayastha T.J. & Beerling D.J., 2018. *Stabilization of Soil Organic Carbon as Influenced by Clay Mineralogy*, Advances in Agronomy, Elsevier Inc., 33–84.
- Sparling G., Vojvodić-Vuković M. & Schipper L.A., 1998. Hot-water, soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: The relationship with microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* **30**(10–11), 1469–1472.
- Tóth G., Stolbovoy V. & Montanarella L., 2007. Soil quality and sustainability evaluation - An integrated approach to support soil-related policies of the European Union, Methods for assessment of soil degradation. CRC Press, Boca Raton, Luxembourg, 17–31.
- Van Der Plas F., Manning P., Soliveres S., Allan E., Scherer-Lorenzen M., Verheyen K., Wirth C., Zavala M.A., Ampoorter E., Baeten L., Barbaro L., Bauhus J., Benavides R., Benneter A., Bonal D., Bouriaud O., Brulheide H., Bussotti F., Carnol M., Castagneyrol B., Charbonnier Y., Coomes D.A., Coppi A., Bestias C.C., Dawud S.M., De Wandeler H., Domisch T., Finér L., Gessler A., Granier A., Grossiord C., Guyot V., Hättenschwiler S., Jactel H., Jaroszewicz B., Joly F.X., Jucker T., Koricheva J., Milligan H., Mueller S., Muys B., Nguyen D., Pollastrini M., Ratcliffe S., Raulund-Rasmussen K., Selvi F., Stenlid J., Valladares F., Vesterdal L., Zielinski D. & Fischer M., 2016. Biotic homogenization can decrease landscape-scale forest multifunctionality (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (2016) 113 (3557–3562) DOI: 10.1073/pnas.1517903113). *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **113**(18), E2549.
- Van Veen J.A. & Paul E.A., 1981. Organic carbon dynamics in grassland soils. *Can. J. Soil Sci.* **61**, 1–476.
- Vance E.D., Brookes P.C. & Jenkinson D.S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial C. *Soil Biol. Biochem.* **19**(6), 703–707.
- Veteto J.R. & Lockyer J., 2008. Environmental Anthropology Engaging PERmaculture: Moving theory and practice toward sustainability. *Cult. Agric.* **30**(1&2), 47–58.
- Vincent Q., Chartin C., Krüger I., van Wesemael B. & Carnol M., 2019. La qualité biologique et le carbone organique des sols agricoles en Wallonie La qualité biologique et le carbone organique des sols agricoles en Wallonie, 72.
- Voroney R.P., 1983. Decomposition of crop residues.

- West T.O. & Marland G., 2002. Net carbon flux from agricultural ecosystems: Methodology for full carbon cycle analyses. *Environ. Pollut.* **116**(3), 439–444.
- Yamada K. & Xu H., 2012. Aprovechamiento potencial del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en xochimilco para fitorremediación de metales. *Agrociencia* **46**(6), 609–620.
- Zwart K.B. & Brussaard L., 1989. Soil fauna and cereal crops, 139–168.

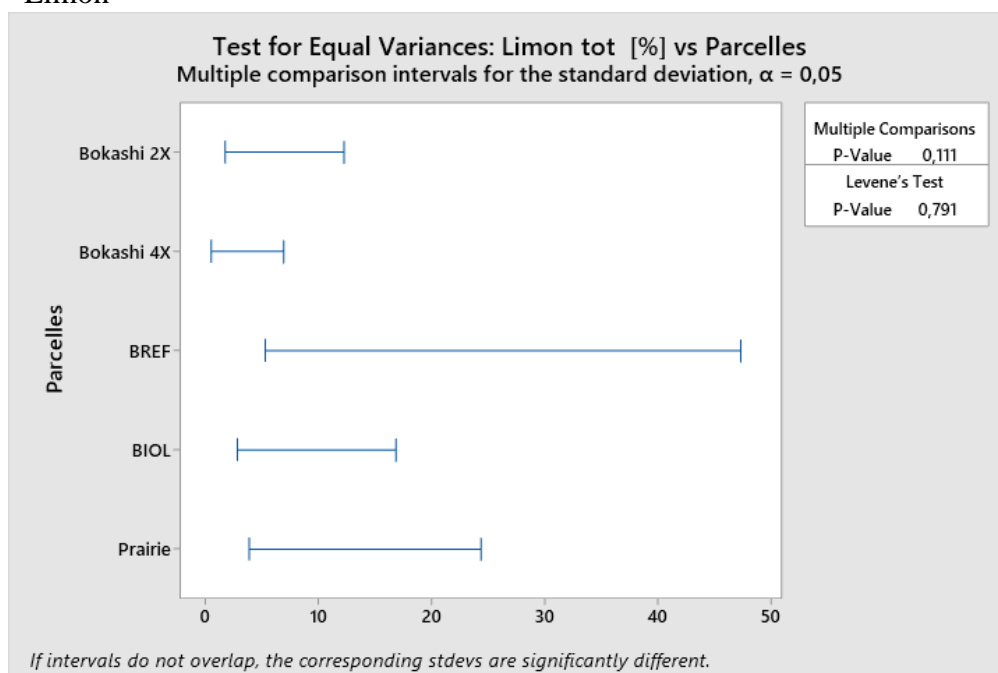
## 7 Annexes

### 7.1 Vérification des égalités des variances des fractions granulométriques

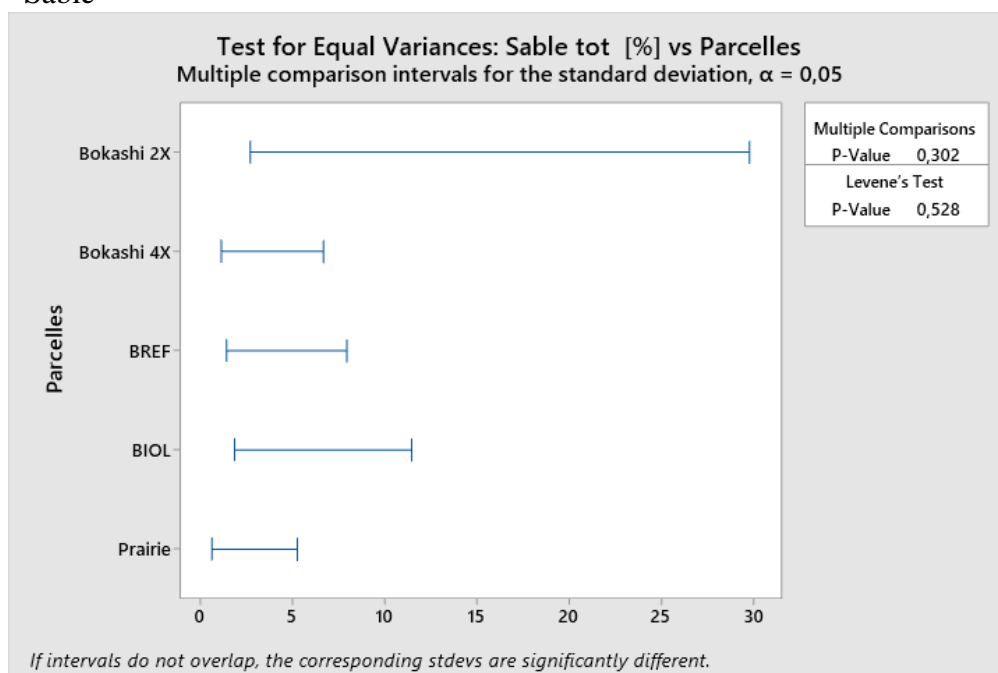
#### 7.1.1 Argile



#### 7.1.2 Limon



### 7.1.3 Sable



## 7.2 Analyses des variances à un facteur explicatif (parcelles) des fractions granulométriques

### 7.2.1 Argile

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	1748,12	437,031	76,48	0,000
Error	10	57,15	5,715		
Total	14	1805,27			

### 7.2.2 Limon

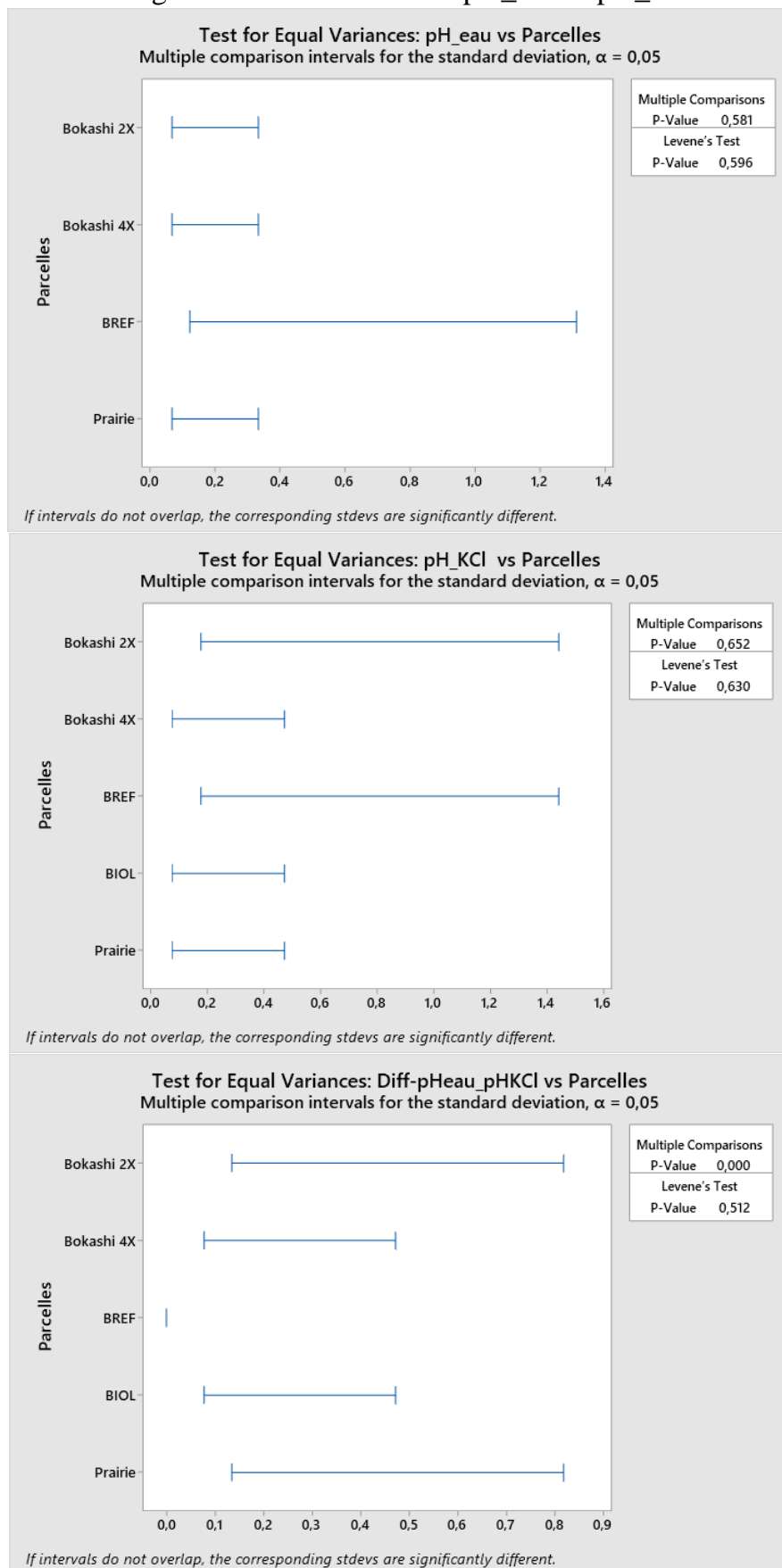
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	776,61	194,152	25,24	0,000
Error	10	76,93	7,693		
Total	14	853,54			

### 7.2.3 Sable

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	632,47	158,118	69,31	0,000
Error	10	22,81	2,281		
Total	14	655,28			



### 7.3 Vérification des égalités des variances des pH\_eau et pH\_KCl



## 7.4 Analyses de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des pH\_eau et pH\_KCl

### 7.4.1 pH\_eau

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	2,11067	0,527667	79,15	0,000
Error	10	0,06667	0,006667		
Total	14	2,17733			

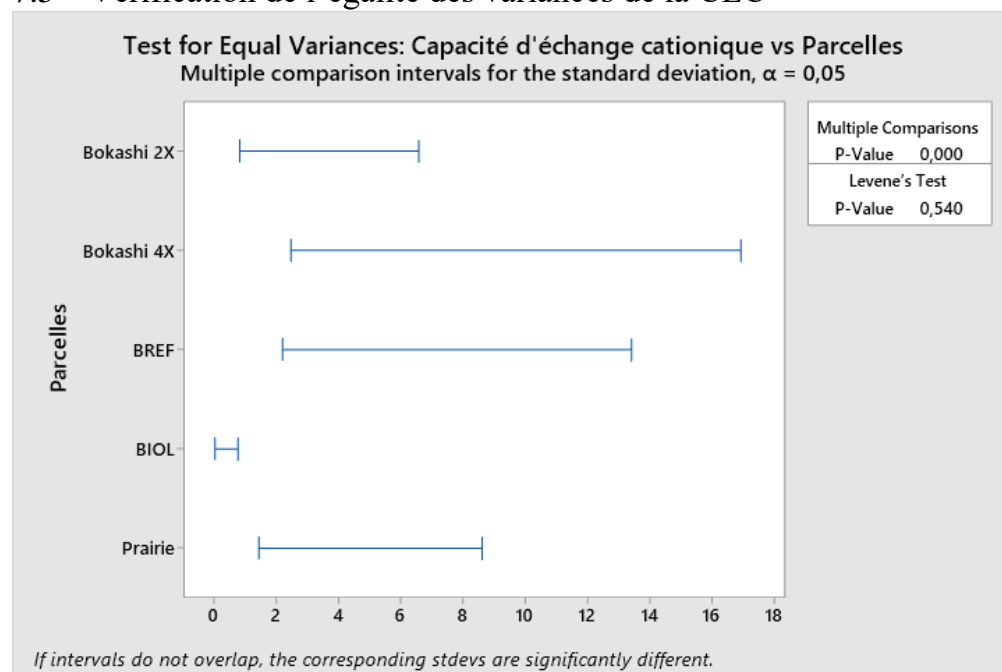
### 7.4.2 pH\_KCl

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	6,4640	1,61600	142,59	0,000
Error	10	0,1133	0,01133		
Total	14	6,5773			

### 7.4.3 Différences pH\_eau et pH\_KCl

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	1,20267	0,300667	56,37	0,000
Error	10	0,05333	0,005333		
Total	14	1,25600			

## 7.5 Vérification de l'égalité des variances de la CEC

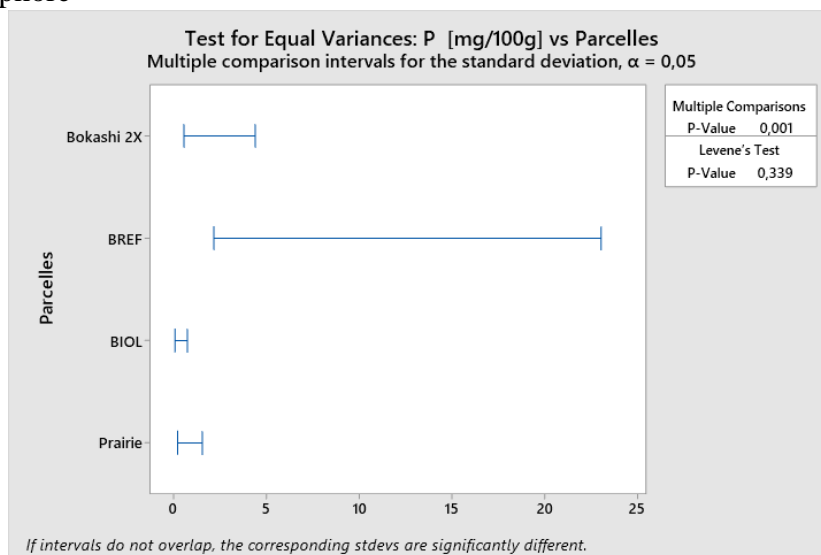


## 7.6 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) de la CEC

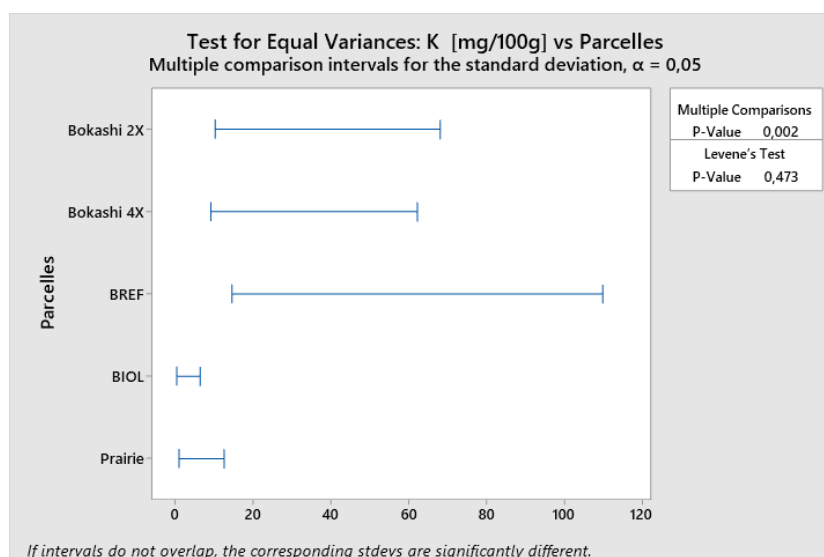
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	499,20	124,799	76,31	0,000
Error	10	16,35	1,635		
Total	14	515,55			

## 7.7 Vérification de l'égalité des variances des éléments biodisponibles

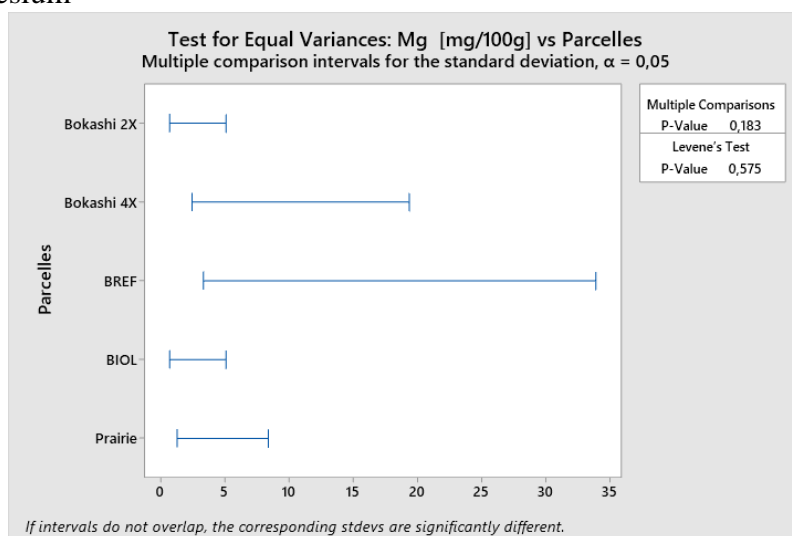
### 7.7.1 Phosphore



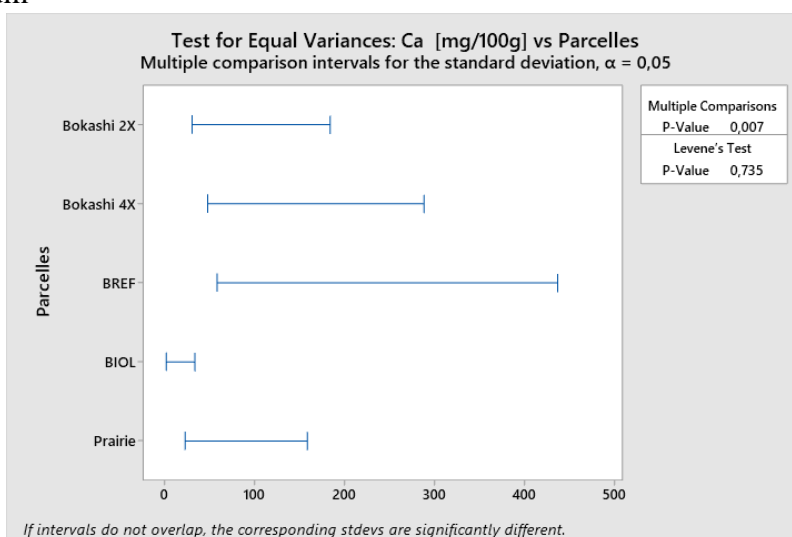
### 7.7.2 Potassium



### 7.7.3 Magnésium



### 7.7.4 Calcium



## 7.8 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des éléments biodisponibles

### 7.8.1 Phosphore

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	1766,07	441,518	289,08	0,000
Error	10	15,27	1,527		
Total	14	1781,34			

### 7.8.2 Potassium

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	19893,6	4973,40	93,96	0,000
Error	10	529,3	52,93		
Total	14	20422,9			

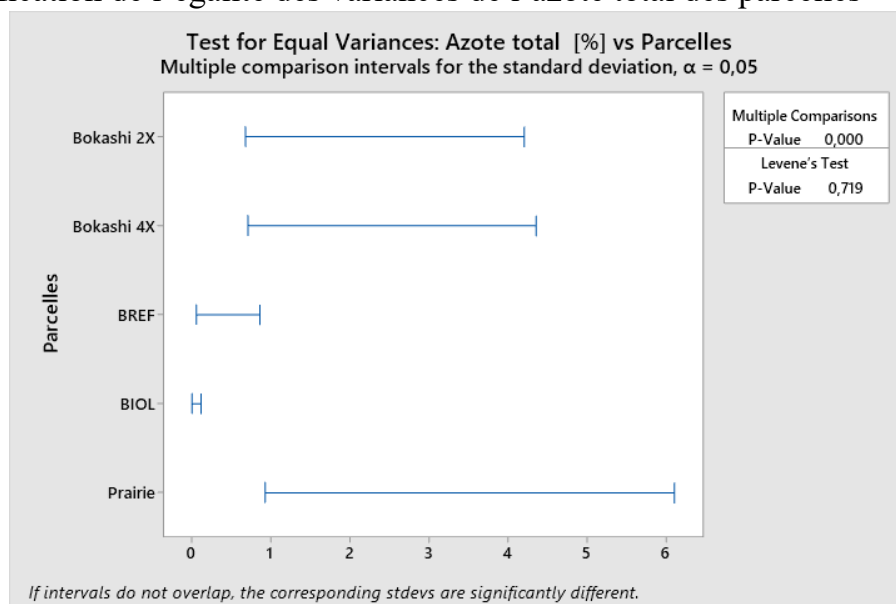
### 7.8.3 Magnésium

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	1095,73	273,933	83,86	0,000
Error	10	32,67	3,267		
Total	14	1128,40			

### 7.8.4 Calcium

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	2441562	610391	687,27	0,000
Error	10	8881	888		
Total	14	2450444			

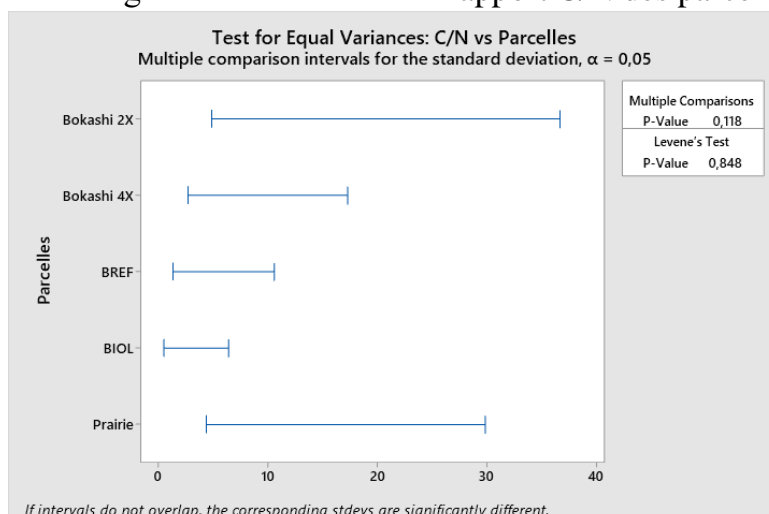
## 7.9 Vérification de l'égalité des variances de l'azote total des parcelles



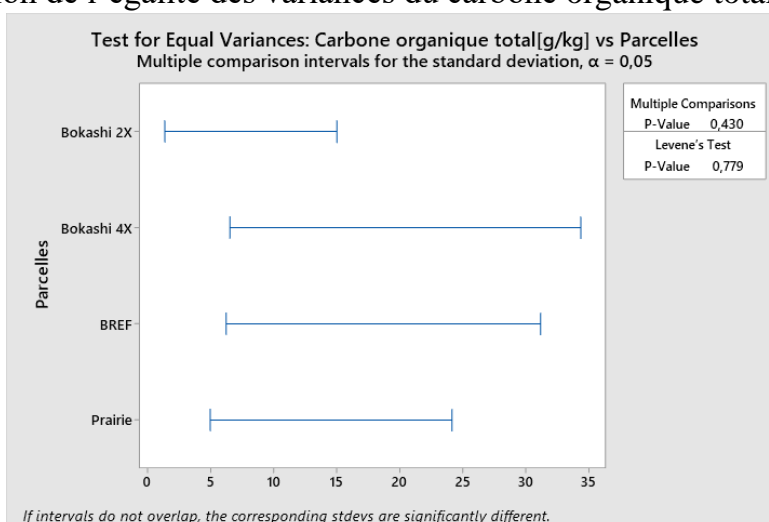
## 7.10 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) de l'azote total des parcelles

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	1,304	0,3260	1,53	0,267
Error	10	2,135	0,2135		
Total	14	3,439			

### 7.11 Vérification de l'égalité des variances du rapport C/N des parcelles



### 7.12 Vérification de l'égalité des variances du carbone organique total des parcelles



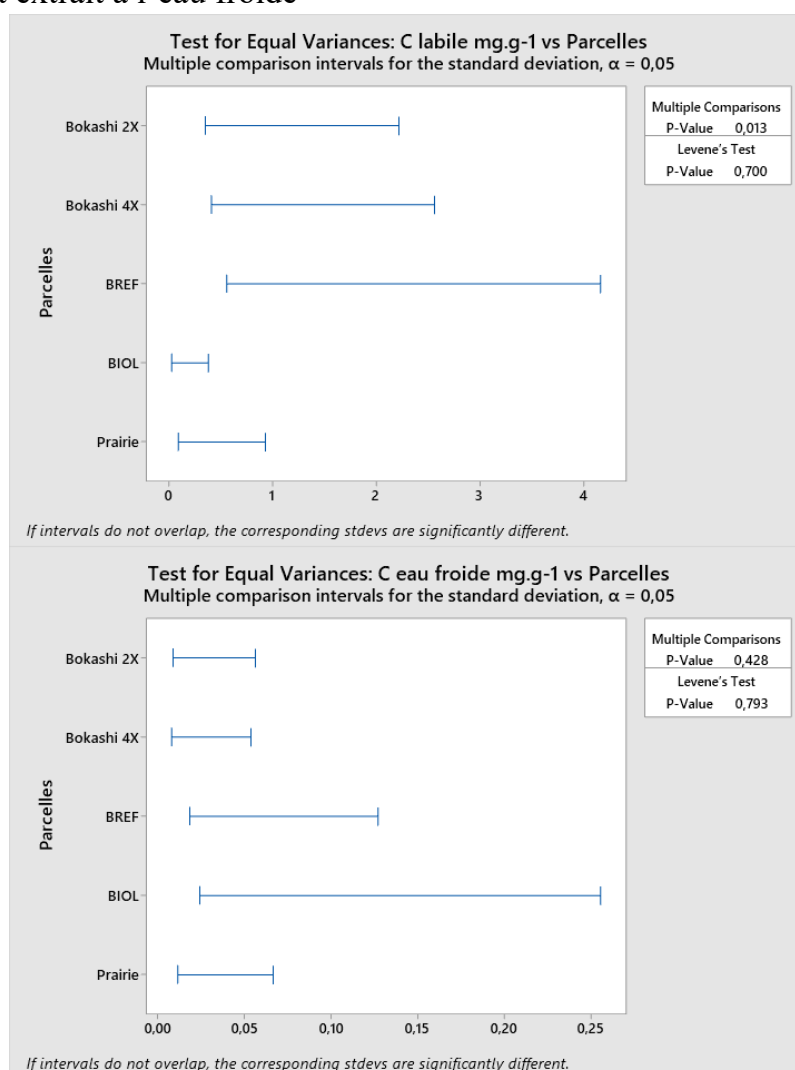
### 7.13 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) du carbone total des sol

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	38,542	9,6355	22,69	0,000
Error	10	4,247	0,4247		
Total	14	42,789			

### 7.14 Analyse de la variance à un facteur explicatif du carbone organique des parcelles

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	2932,3	733,07	45,44	0,000
Error	10	161,3	16,13		
Total	14	3093,6			

## 7.15 Vérification de l'égalité des variances du carbone extrait à l'eau chaude (carbone labile) et extrait à l'eau froide



## 7.16 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) du carbone extrait à l'eau chaude et extrait à l'eau froide

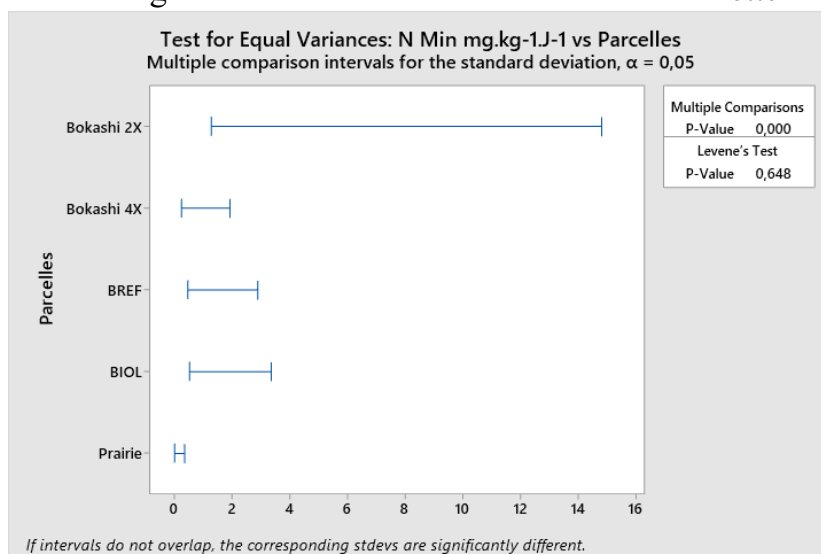
### 7.16.1 Carbone extrait à l'eau chaude

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	39174	9793,6	20,21	0,000
Error	10	4845	484,5		
Total	14	44019			

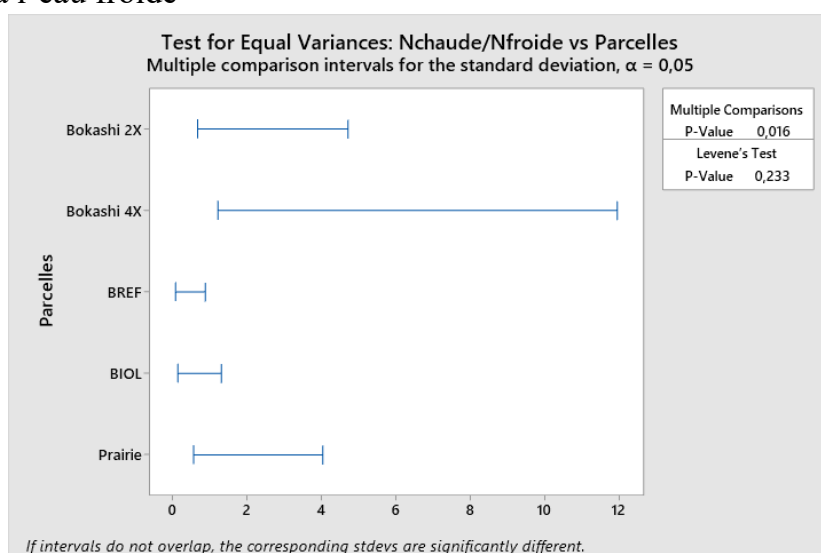
### 7.16.2 Carbone extrait à l'eau froide

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	379,8	94,94	8,31	0,003
Error	10	114,3	11,43		
Total	14	494,0			

### 7.17 Vérification de l'égalité des variances de la minéralisation nette de l'azote



### 7.18 Vérification de l'égalité des variances des rapports azote extrait à l'eau chaude/ extrait à l'eau froide

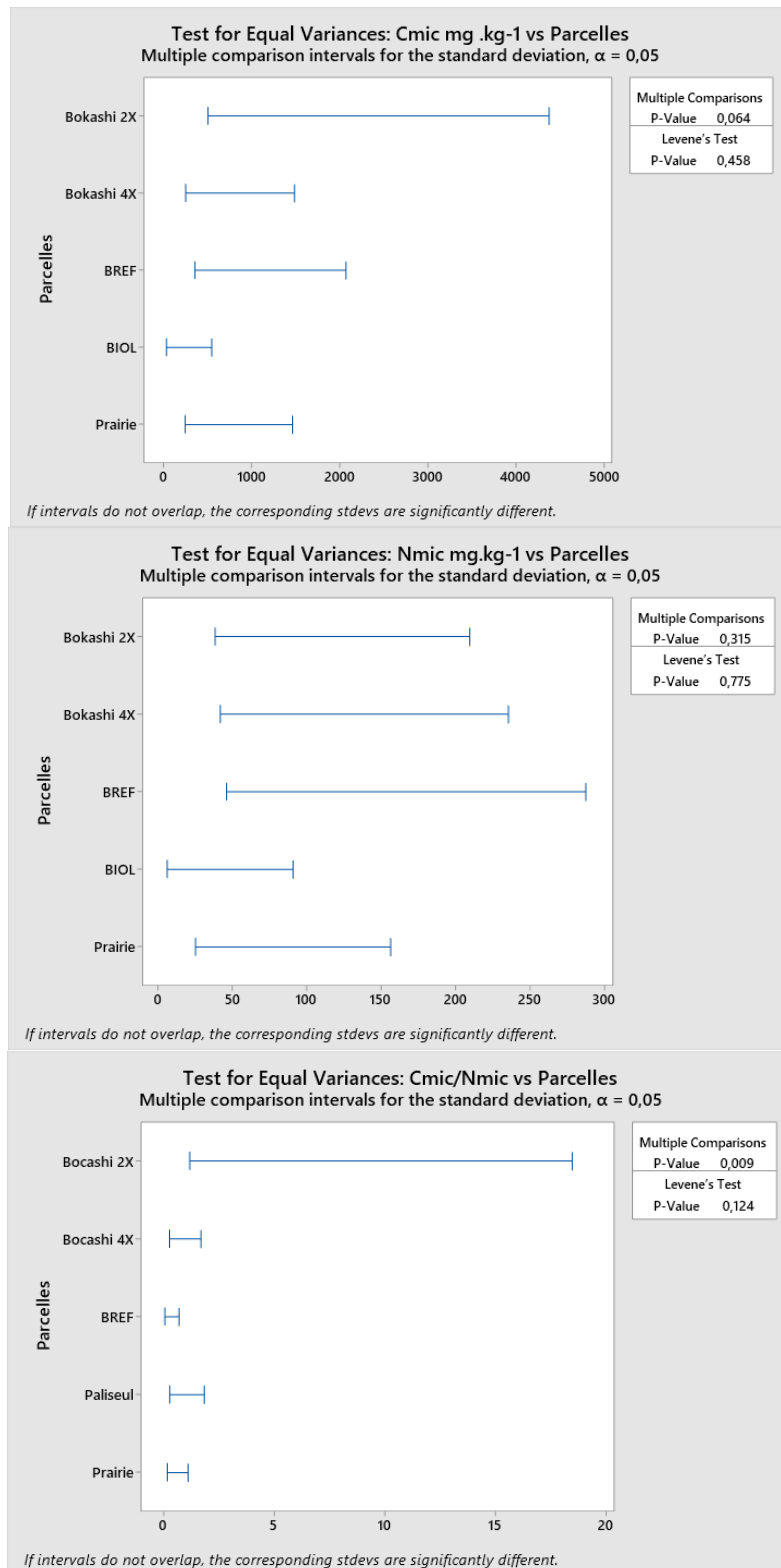


### 7.19 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des rapports d'azote extrait à l'eau chaude/froide

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	38,050	9,5125	25,58	0,000
Error	10	3,719	0,3719		
Total	14	41,769			



## 7.20 Vérification de l'égalité des variances du carbone et de l'azote microbien ainsi que du rapport $C_{mic}/N_{mic}$



## 7.21 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) de l'azote et le carbone microbien

### 7.21.1 Carbone microbien

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<b>Parcelles</b>	4	5638722	1409680	20,83	0,000
<b>Error</b>	10	676682	67668		
<b>Total</b>	14	6315404			

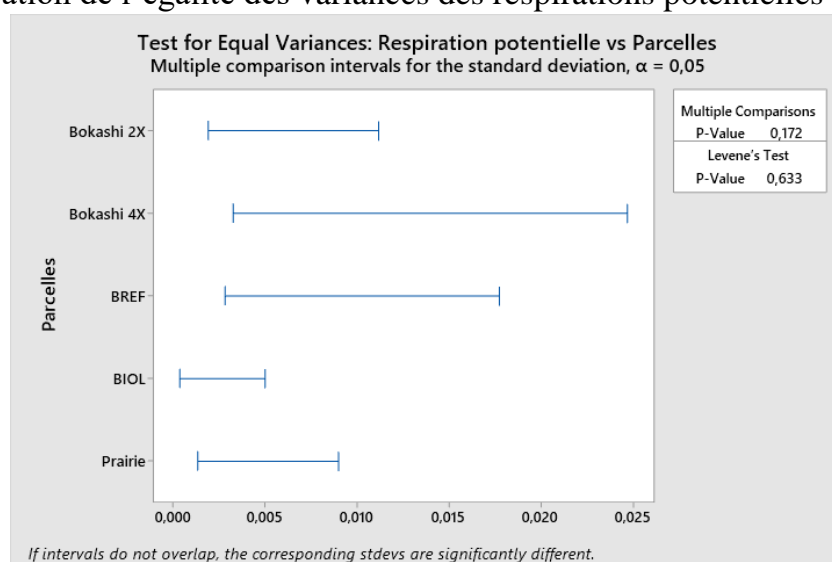
### 7.21.2 Azote microbien

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<b>Parcelles</b>	4	85854	21463,6	32,88	0,000
<b>Error</b>	10	6528	652,8		
<b>Total</b>	14	92382			

## 7.22 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) du rapport $C_{mic}/N_{mic}$

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<b>Parcelles</b>	4	12,462	3,1156	7,34	0,005
<b>Error</b>	10	4,245	0,4245		
<b>Total</b>	14	16,708			

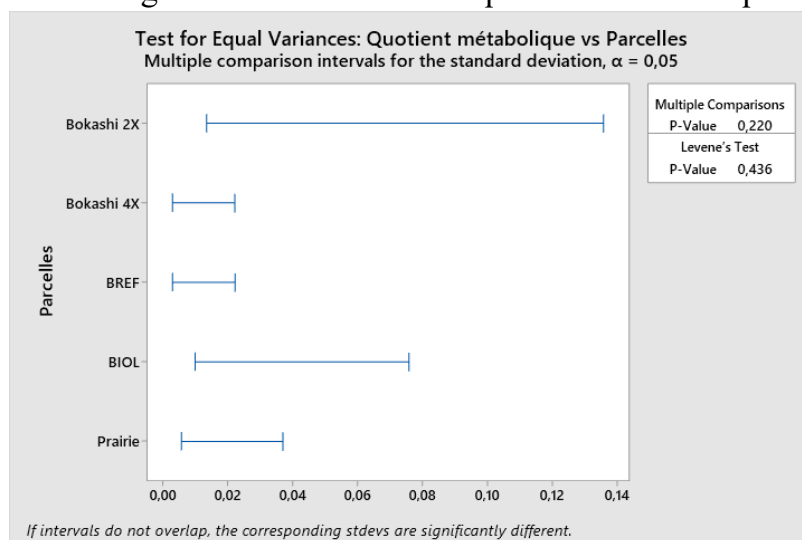
## 7.23 Vérification de l'égalité des variances des respirations potentielles



## 7.24 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des respirations potentielles

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<b>Parcelles</b>	4	0,000044	0,000011	3,59	0,046
<b>Error</b>	10	0,000030	0,000003		
<b>Total</b>	14	0,000074			

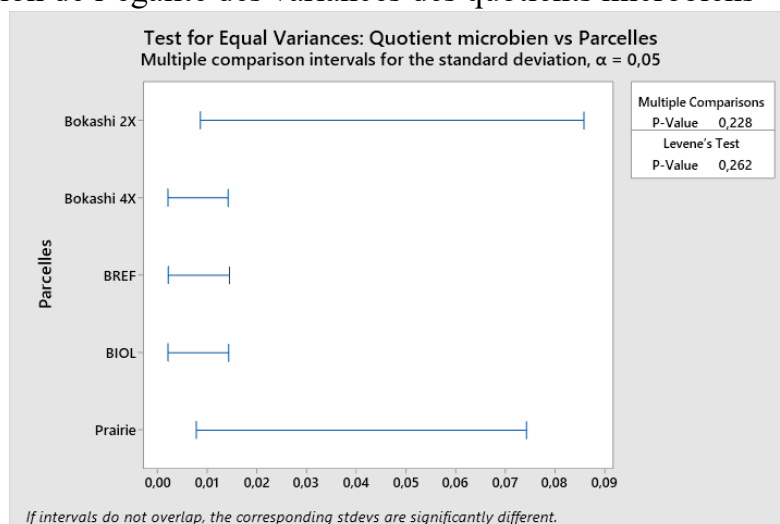
## 7.25 Vérification de l'égalité des variances des quotients métaboliques



## 7.26 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) des quotients métaboliques

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	0,008577	0,002144	39,68	0,000
Error	10	0,000540	0,000054		
Total	14	0,009118			

## 7.27 Vérification de l'égalité des variances des quotients microbiens



## 7.28 Analyse de la variance à un facteur explicatif du quotient microbien

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	0,001778	0,000445	17,08	0,000
Error	10	0,000260	0,000026		
Total	14	0,002038			

## 7.29 Résumé des structururations des moyennes pour les différentes variables étudiées

Cette rubrique reprend l'ensemble des structururations des moyennes des variables étudiées dans ce travail et résumées dans le tableau récapitulatif ci-après.

	BIOL	Prairie	CONS		
			Bokashi 2X	Bokashi 4X	BREF
Phosphore [mg/100g]	3.8 <sup>C</sup>	1.0 <sup>D</sup>	1.8 <sup>C-D</sup>	30 <sup>A</sup>	11.8 <sup>B</sup>
Potassium [mg/100g]	9.3 <sup>D</sup>	17.7 <sup>D</sup>	34.3 <sup>C</sup>	111.7 <sup>A</sup>	52.3 <sup>B</sup>
Magnésium [mg/100g]	11.7 <sup>D</sup>	17.0 <sup>D</sup>	15.7 <sup>C-D</sup>	35.3 <sup>A</sup>	26.3 <sup>B</sup>
Calcium [mg/100g]	149.3 <sup>D</sup>	348.7 <sup>C</sup>	345.0 <sup>C</sup>	1305.0 <sup>A</sup>	495.0 <sup>B</sup>
pH_eau	6.6 <sup>E</sup>	6.9 <sup>D</sup>	7.0 <sup>C</sup>	7.6 <sup>A</sup>	7.4 <sup>B</sup>
pH_KCl	5.3 <sup>D</sup>	5.8 <sup>C</sup>	5.9 <sup>C</sup>	7.1 <sup>A</sup>	6.7 <sup>B</sup>
Carbone organique total (COT) [g/kg]	25 <sup>C</sup>	47.7 <sup>B</sup>	49.0 <sup>B</sup>	63.3 <sup>A</sup>	63.0 <sup>A</sup>
Azote total [%]	0.3 <sup>B</sup>	0.9 <sup>A-B</sup>	0.8 <sup>A-B</sup>	1.1 <sup>A</sup>	0.7 <sup>A-B</sup>
C/N	9.7 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	7.7 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	9.3 <sup>A</sup>
Capacité d'échange cationique [meq/100g]	7.4 <sup>C</sup>	18.5 <sup>B</sup>	17.7 <sup>B</sup>	23.1 <sup>A</sup>	23.2 <sup>A</sup>
Indice de battance calculé	1.4 <sup>A</sup>	0.5 <sup>B</sup>	0.5 <sup>B-C</sup>	0.3 <sup>D</sup>	0.4 <sup>C-D</sup>
Argile <0,002mm [%]	13.2 <sup>D</sup>	43.8 <sup>A</sup>	40.5 <sup>A</sup>	29.1 <sup>C</sup>	35.0 <sup>B</sup>
Limon 0,002-0,05 mm [%]	69.1 <sup>A</sup>	51.8 <sup>B-C</sup>	51.3 <sup>B-C</sup>	49.1 <sup>C</sup>	56.4 <sup>B</sup>
Sable 0,05-2 mm [%]	17.7 <sup>B</sup>	4.5 <sup>D</sup>	8.2 <sup>C</sup>	21.8 <sup>A</sup>	8.7 <sup>C</sup>
C <sub>mic</sub> [mg.kg <sup>-1</sup> ]	343.8 <sup>D</sup>	2155.9 <sup>A</sup>	1462.2 <sup>B-C</sup>	1217.1 <sup>C</sup>	1794.2 <sup>A-B</sup>
N <sub>mic</sub> [mg.kg <sup>-1</sup> ]	58.5 <sup>C</sup>	272.3 <sup>A</sup>	167.3 <sup>B</sup>	170.7 <sup>B</sup>	251.9 <sup>A</sup>
N <sub>min_net</sub> [mg.kg <sup>-1</sup> .sol sec <sup>-1</sup> .J <sup>-1</sup> ]	1.3 <sup>A</sup>	1.3 <sup>A</sup>	1.9 <sup>A</sup>	1.5 <sup>A</sup>	2.1 <sup>A</sup>
C eau froide [mg.g <sup>-1</sup> ]	0.073 <sup>B</sup>	0.111 <sup>A</sup>	0.080 <sup>B</sup>	0.110 <sup>A</sup>	0.129 <sup>A</sup>
C labile [mg. g <sup>-1</sup> ]	1.0 <sup>C</sup>	2.5 <sup>A</sup>	1.9 <sup>B</sup>	1.5 <sup>B</sup>	2.1 <sup>A</sup>
N <sub>tot</sub> eau froide [µg.g <sup>-1</sup> ]	31.1 <sup>B</sup>	28.7 <sup>B-C</sup>	22.8 <sup>C</sup>	28.2 <sup>B-C</sup>	38.3 <sup>A</sup>
N <sub>tot</sub> eau chaude [µg.g <sup>-1</sup> ]	79.9 <sup>C</sup>	211.2 <sup>A</sup>	142.4 <sup>B</sup>	153.5 <sup>B</sup>	220.6 <sup>A</sup>
C <sub>mic</sub> /N <sub>mic</sub> [ <sup>-</sup> ]	5.9 <sup>C</sup>	7.9 <sup>A-B</sup>	8.6 <sup>A</sup>	7.2 <sup>B</sup>	7.1 <sup>B</sup>
N <sub>chaude</sub> /N <sub>froide</sub> [ <sup>-</sup> ]	2.6 <sup>C</sup>	7.4 <sup>A</sup>	6.2 <sup>B</sup>	5.5 <sup>B</sup>	5.8 <sup>B</sup>
Respiration potentielle [mg C-CO <sub>2</sub> . kg <sub>sol</sub> sec <sup>-1</sup> . h <sup>-1</sup> ]	0.010 <sup>C</sup>	0.014 <sup>A-B</sup>	0.015 <sup>A</sup>	0.013 <sup>A-B</sup>	0.011 <sup>B-C</sup>
Quotient métabolique [mg C-CO <sub>2</sub> . mgC <sub>mic</sub> <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> ]	0.082 <sup>A</sup>	0.018 <sup>B</sup>	0.030 <sup>B</sup>	0.031 <sup>B</sup>	0.018 <sup>B</sup>

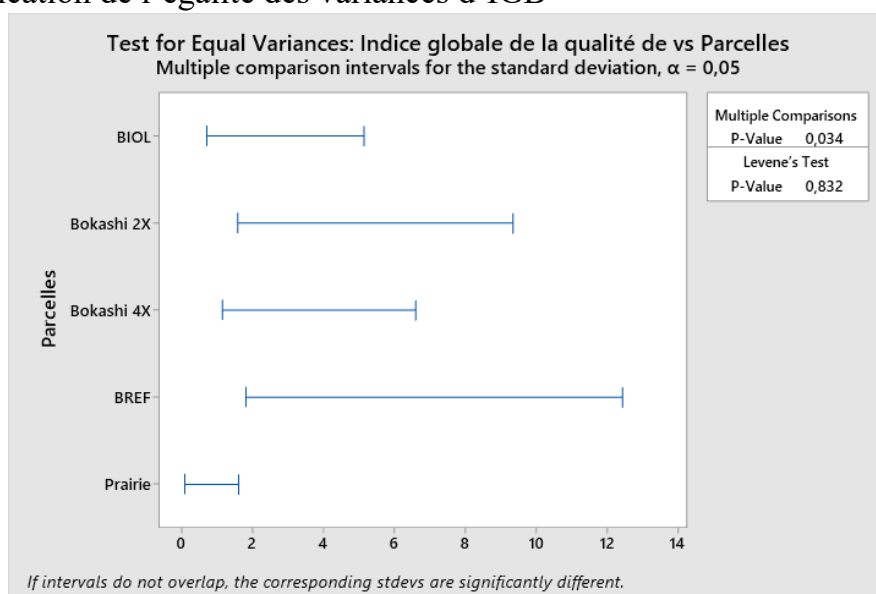
<b>Quotient microbien</b> [%]	<b>1.38<sup>B</sup></b>	<b>4.56<sup>A</sup></b>	2.97 <sup>B</sup>	1.92 <sup>C-D</sup>	2.84 <sup>B-C</sup>
----------------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------	---------------------	---------------------

Valeurs maximales (vert) ; valeurs minimales (rouge)

### 7.30 Valeur des S(Ind<sub>i</sub>) par échantillon

	S(C <sub>mic</sub> )	S(N <sub>mic</sub> )	S(N Min)	S(C eau froide)	S(Ceau_chaude)	S(N <sub>tot</sub> eau froide)	s(N <sub>tot</sub> eau chaude)	S(Respiration potentielle)	S(Quotient métabolique)	S(Quotient microbien)	Indice globale de la qualité des sols
Parcelles											
BIOL A	0,04	0,06	0,23	0,49	0,03	0,46	0,04	0,13	-0,80	0,08	0,75
BIOL B	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,50	0,01	0,02	-1,00	0,00	-0,15
BIOL C	0,02	0,02	0,00	0,04	0,00	0,35	0,00	0,02	-0,83	0,05	-0,33
Prairie A	1,00	0,97	0,18	0,54	0,72	0,31	0,79	0,37	-0,24	1,00	5,63
Prairie B	0,99	0,98	0,17	0,56	0,65	0,37	0,71	0,57	-0,19	0,83	5,64
Prairie C	0,84	0,83	0,19	0,72	0,67	0,32	0,73	0,67	-0,18	0,64	5,42
Bokashi 2X A	0,81	0,57	1,00	0,35	0,50	0,19	0,51	0,00	-0,01	0,62	4,53
Bokashi 2X B	0,60	0,53	0,10	0,20	0,28	0,00	0,23	0,28	-0,07	0,47	2,62
Bokashi 2X C	0,36	0,35	0,10	0,22	0,41	0,05	0,35	0,40	-0,02	0,22	2,44
Bokashi 4X A	0,36	0,36	0,16	0,67	0,33	0,14	0,29	0,25	-0,02	0,14	2,68
Bokashi 4X B	0,50	0,52	0,21	0,58	0,59	0,26	0,58	1,00	-0,21	0,17	4,19
Bokashi 4X C	0,54	0,61	0,33	0,53	0,41	0,54	0,40	0,82	-0,36	0,22	4,05
BREF A	0,72	0,81	0,39	0,77	0,66	0,64	0,70	0,37	0,00	0,40	5,45
BREF B	0,65	0,71	0,43	0,67	0,66	0,61	0,69	0,57	-0,02	0,36	5,33
BREF C	0,91	1,00	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	-0,11	0,45	7,87

### 7.31 Vérification de l'égalité des variances d'IGB



### 7.32 Analyse de la variance à un facteur explicatif (parcelles) de l'IGB

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Parcelles	4	69,271	17,3178	19,46	0,000
Error	10	8,898	0,8898		
Total	14	78,169			

