
Influence des systèmes agricoles sur la stabilité structurale des sols et investigation des techniques permettant de la quantifier. Cas du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.) en région limoneuse

Auteur : Tojerow, Maya

Promoteur(s) : Degré, Aurore

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/15273>

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.

**INFLUENCE DES SYSTÈMES AGRICOLES SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE
DES SOLS ET INVESTIGATION DES TECHNIQUES PERMETTANT DE LA
QUANTIFIER**

**CAS DU FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM* L.) EN RÉGION
LIMONEUSE**

MAYA TOJEROW

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

PROMOTRICE : Pr AURORE DEGRÉ

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

Le présent document n'engage que son auteur.

**INFLUENCE DES SYSTÈMES AGRICOLES SUR LA STABILITÉ
STRUCTURALE DES SOLS ET INVESTIGATION DES TECHNIQUES
PERMETTANT DE LA QUANTIFIER**

**CAS DU FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM* L.) EN
RÉGION LIMONEUSE**

MAYA TOJEROW

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR: PR AURORE DEGRÉ

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie ma promotrice, Pr Aurore Degré, pour le suivi, les pistes de recherches, les relectures de dernière minute et les nombreux et judicieux conseils. Mais aussi et surtout, je la remercie de m'avoir fait confiance et proposé ce sujet qui m'a ouvert les portes d'un nouveau monde, les sols, leur complexité et leurs nombreux enjeux.

Je remercie également le CRA-W, toutes les personnes que j'y ai rencontré et qui m'ont permis de travailler sur l'essai SYCI. Un tout grand merci à Frédéric Vanwindekens de m'avoir intégrée aux Compagnons du Slake, il s'agit là d'une grande fierté pour moi. Plus sérieusement, merci à toi, Frédéric, pour ton suivi des slake tests, ton appui sur *R* et ton aide face à certains résultats surprenants (je n'exclus toujours pas la piste de l'OVNI). Un tout grand merci également à toi Brieuc Hardy. Merci de m'avoir accompagnée sur le terrain pour mes débuts, de m'avoir appris à murmurer à l'oreille des sols et encore merci pour les nombreuses discussions enrichissantes que nous avons pu avoir. Merci également à Bruno Huyghebaert, Morgan Abras et Dirk Verhulst.

Merci à l'équipe du Topo, tout particulièrement à Stéphane Becquevort pour son appui logistique et sa confiance. A Rémy, Cédric et Romy pour leur chaleureux accueil au sein de leur famille STEtoise...on ne s'y sent pas si mal finalement. À Noé, pour son aide précieuse sur *R*.

Enfin, merci à Pr Yves Brostaux et Sébastien Franceschini (Unité SIMa, GxABT) pour leur appui en statistique.

A partir de maintenant, cela va peut-être commencer à vous sembler long. Cependant, ces années de bonheur, je les dois à beaucoup de personnes.

A toutes ces personnes formidables que j'ai rencontrées entre ces quatre murs de briques rouges avec qui on a ri, pleuré, cuisiné, dansé...et beaucoup étudié comme le veut la tradition. C'est une chance de vous avoir rencontré Anna, Lucie, Thibaut, Alex, Gaspard, Baptiste, Charlotte, Clara, Tom, Arthur, Sam, Hugo et j'en passe.

Merci également à Chloé, Eugénie, Alexia et Roman. Les épreuves ont été nombreuses et c'est à vos côtés que j'ai appris la persévérance et la résilience.

Merci à tous mes professeurs de secondaire, ceux de l'Option Français-Histoire pour nous avoir encouragé à ouvrir de nouvelles portes et quelques autres qui n'ont pas été suffisamment convaincants que pour nous en fermer.

Merci à ma famille. Ma maman qui, *de base*, supporte mes tics langagiers depuis bien trop longtemps maintenant, promis maman, cela ne s'arrangera pas *du coup*. Mon papa, toujours présent ainsi que son humour inqualifiable.

Enfin, merci à toi Thomas. Merci pour ton soutien quotidien. C'est une réelle réjouissance de « me mettre chemin » avec toi.

Résumé

L'un des facteurs clé permettant au sol de remplir ses fonctions (environnementale, économique et sociale) est la structure du sol. Promouvoir la stabilité structurale du sol permet donc de limiter les risques d'érosion, de battance ou encore de pertes de rendement (Bronick et Lal, 2004).

C'est pourquoi ce travail s'est attaché à quantifier et comparer la structure de sols agricoles (Essai Grandes cultures SYCI - CRA-W) sous différents systèmes culturaux, *Conventionnel*, en conservation du sol (*Sol*) et à application limitée de produits phytosanitaires (*Zéro phyto*), ainsi que son évolution dans le temps via la mise en place de deux campagnes de prélèvement d'échantillons (début mars et mi-avril).

Pour ce faire, des techniques plus classiques (infiltrométrie, rétention de l'eau, pénétrométrie, calcul de densité apparente et méthode Le Bissonnais et de calcul de masses de sol équivalentes) à plus innovantes (QuantiSlakeTest, microtomographie et microporosimétrie) ont été associées afin de déterminer les propriétés hydrodynamiques des sols concernés et leur structure *per se*. L'objectif sous-jacent étant d'identifier les avantages et inconvénients de ces techniques ainsi que leur éventuelle complémentarité.

A l'issue de ce travail, quelques facteurs de stabilité structurale semblent sortir du lot tels que la densité apparente, le précédent cultural et sa gestion ainsi que le développement racinaire. Cette étude met également en exergue la sensibilité des résultats aux conditions environnementales et expérimentales, ce qui a parfois empêché de déterminer les aptitudes des différentes techniques utilisées à caractériser la structure du sol et sa stabilité structurale. Enfin, ce travail met en lumière les difficultés rencontrées dans la caractérisation d'une propriété aussi multifactorielle et interdépendante aux autres propriétés du sol et conditions externes que celle qui est la structure du sol et ne se détourne pas, ainsi, de sa fonction exploratoire.

Mots clés : Structure du sol; Systèmes agricoles; Stabilité structurale; Propriétés hydrodynamiques.

Summary

One of the key factors enabling the soil to fulfill its functions (environmental, economic and social) is the soil structure. Promoting soil structural stability can therefore limit the risks of erosion, soil compaction and yield losses (Bronick and Lal, 2004).

This is why this work focused on quantifying and comparing the structure of agricultural soils (SYCI field trial - CRA-W) under different cropping systems, conventional (*Conventional*), soil conservation (*SoI*) and limited application of phytosanitary products (*Zero Phyto*), as well as its evolution over time via the implementation of two sampling campaigns (early March and mid-April).

To do this, both more traditional techniques (infiltrometry, water retention, penetrometry, calculation of bulk density and the Le Bissonnais method and calculation of equivalent soil mass) and more innovative techniques (QuantiSlakeTest, microtomography and microporosimetry) were used to determine the hydrodynamic properties of the soils concerned and their structure per se. The underlying objective was to identify the advantages and disadvantages of these techniques and their possible complementarity.

At the end of this work, some factors of structural stability seem to stand out, such as bulk density, previous crop and its management, and root development. This study also highlights the sensitivity of the results to environmental and experimental conditions, which sometimes prevented the determination of the aptitudes of the different techniques used to characterize soil structure and structural stability. Finally, this work highlights the difficulties encountered in characterizing a property as multifactorial and interdependent on other soil properties and external conditions as soil structure and thus does not detract from its exploratory function.

Keywords : Soil structure; Agricultural systems; Structural stability; Hydrodynamic properties.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| État de l'art | 1 |
| Qu'est-ce que la structure et la stabilité structurale du sol ? | 2 |
| Quels sont les principaux facteurs influant sur la structure du sol ? | 3 |
| Comment mesurer la structure du sol et sa stabilité ? | 5 |
| Quels sont les objectifs de ce travail ? | 6 |
| Matériels et méthodes | 6 |
| Essai SYCI | 6 |
| Topologie et caractéristiques connues du sol | 8 |
| Echantillonnage | 9 |
| Texture du sol, analyses chimiques et stocks de carbone organique | 10 |
| Densité apparente | 12 |
| Résistance à la pénétration (Pénétromètre de poche) | 12 |
| Stabilité structurale du sol (QuantiSlake test et méthode Le Bissonnais) | 12 |
| Première campagne de prélèvement | 12 |
| Seconde campagne de prélèvement | 13 |
| QuantiSlake test | 13 |
| Prélèvement des échantillons et expérience | 13 |
| Génération des courbes et indicateurs | 14 |
| Méthode Le Bissonnais | 15 |
| Courbe de conductivité hydraulique (Infiltromètre minidisc) | 15 |
| Prélèvement et analyse des échantillons | 15 |
| Traitement des données | 16 |
| Courbe de rétention et distribution de la taille de pore (Appareil de Richard) | 17 |
| Prélèvement et analyse des échantillons | 17 |
| Traitement des données | 17 |
| Distribution de la taille de pore (Porosimètre à intrusion de mercure) | 19 |
| Prélèvement et analyse des échantillons | 19 |
| Traitement des données | 19 |
| Distribution de la taille de pores (Microtomographe à rayons X) | 19 |
| Prélèvement et scan des échantillons | 19 |
| Traitement des images et analyse des données | 20 |
| Traitement statistique | 21 |
| Résultats et discussion | 22 |
| Stock de carbone organique (CO) dans le sol, teneur en argiles et ratio CO:argiles | 22 |
| Densité apparente (ρ_{Ech} , ρ_{ESM} , ρ_{pF}) | 24 |
| ρ_{Ech} | 24 |
| ρ_{ESM} | 24 |
| ρ_{pF} | 24 |
| Résistance à la pénétration (RSP0 et RSP5) | 25 |
| A la surface (RSP0) | 26 |
| A 5 cm de profondeur (RSP5) | 26 |

| | |
|--|-----------|
| Stabilité structurale du sol (Slake test et méthode Le Bissonnais) | 27 |
| Tmax | 27 |
| Wmax-Wt0 et Wend | 28 |
| P30, P60, P300 et P600 | 31 |
| AUC | 33 |
| Le Bissonnais | 34 |
| Courbe de conductivité hydraulique (Infiltromètre minidisc) | 35 |
| Courbe de rétention (points ajustés de la courbe) et distribution de la taille de pore (Appareil de Richard) | 36 |
| $\theta(0)$ et $\theta(1)$ | 36 |
| A $\theta(1,6)$ | 37 |
| De $\theta(1,85)$ à $\theta(2,48)$ | 37 |
| A $\theta(2,85)$ et $\theta(3)$ | 37 |
| A $\theta(3,7)$ et $\theta(4,18)$ | 38 |
| Distribution de la taille de pore (Microporosimètre à intrusion de mercure) | 40 |
| Freq(0,15), Freq(0,0375), Freq(0,0015), Freq(0,0003), Freq(0,0001) | 40 |
| Freq(0,02145), Freq(0,015) | 40 |
| Freq(0,005) | 40 |
| Freq(0,00215) | 41 |
| Distribution de la taille de pore (Microtomographe à rayons x) | 42 |
| Freq(1,5), Freq(0,02145) | 43 |
| Freq(0,15), Freq(0,0375), Freq(0,015) | 43 |
| Synthèse des résultats de l'analyse statistique | 44 |
| Comparaison qualitative des méthodes de détermination de la DTP | 48 |
| Discussion globale | 48 |
| Conclusion | 50 |
| Contribution personnelle | 51 |
| Abréviations et symboles | 52 |
| Bibliographie | 54 |
| Annexes | 57 |

Table des figures

| | |
|---|----|
| <i>Figure 1</i> : Facteurs impactant la structure du sol et facteurs impactés par celle-ci. | 5 |
| <i>Figure 2</i> : Couche de données Relief de Wallonie - Modèle Numérique des Pentes 2013 - 2014 classifié et Cartes numériques des sols en Wallonie - Série pour la zone de l'essai (WalOnMap). | 9 |
| <i>Figure 3</i> : Plan de l'échantillonnage des parcelles de l'essai grandes cultures SYCI. | 10 |
| <i>Figure 4</i> : Sonde de prélèvement des sols (CRA-W). | 11 |
| <i>Figure 5</i> : Dispositif du QuantiSlake test. | 14 |
| <i>Figure 6</i> : Dispositif d'infiltrométrie avec l'infiltromètre minidisc. | 16 |
| <i>Figure 7</i> : Dispositif de l'Appareil de Richard (a) et intérieur de l'appareil avec les échantillons (b). | 17 |
| <i>Figure 8</i> : Microtomographe à rayons X (a) et échantillon placé dans le microtomographe (b). | 20 |
| <i>Figure 9</i> : Boxplots de la masse de CO sur l'horizon 0 - 7,4 cm (a), teneur en argiles (b) du ratio CO:argiles (c) en fonction des trois systèmes. | 22 |
| <i>Figure 10</i> : Boxplot de l'évolution du stock de CO avec la profondeur. | 23 |
| <i>Figure 11</i> : Boxplots de ρ_{Ech} pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a), au sein de chacune des deux campagnes (b) et comparaison avec ρ_{ESM} (première campagne) et ρ_{pF} (seconde campagne) (c). | 24 |
| <i>Figure 12</i> : Figure X : Boxplots de la résistance à la pénétration à la surface (0) et à 5 cm de profondeur (5) indistinctement des deux campagnes (a) et au sein de chacune des deux campagnes (b). | 25 |
| <i>Figure 13</i> : Boxplots de l'indicateur T_{max} généré par les slake tests pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et au sein de chacune des deux campagnes (b). | 26 |
| <i>Figure 14</i> : Boxplots des indicateurs $W_{max}-W_{10}$ et W_{end} des slake tests pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et au sein de chacune des deux campagnes (b). | 28 |
| <i>Figure 15</i> : Photos des parcelles le 21 avril en Sol (a1), conventionnel (b1) et zéro phyto (c1), des fosses et des parcelles le 28 juillet en sol (a2 et a3), en conventionnel (b2 et b3) et en zéro phyto (c2 et c3). | 30 |
| <i>Figure 16</i> : Boxplots des indicateurs P_{30} , P_{60} , P_{300} et P_{600} des slake tests pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et au sein de chacune des deux campagnes (b). | 31 |
| <i>Figure 17</i> : Boxplots de l'indicateur AUC pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et au sein de chacune des deux campagnes (b). | 33 |
| <i>Figure 18</i> : Boxplots de MWD (a) et MA (b) pour la zone 0 - 9 cm pour les trois traitements. Traitement 1 : humectation rapide ; Traitement 2 : humectation lente ; Traitement 3 : désagrégation mécanique d'agrégats mouillés. | 34 |
| <i>Figure 19</i> : Courbes de conductivité hydraulique et leurs courbes moyennes avec écarts-type pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (b) et au sein de chacune des deux campagnes (c). | 35 |
| <i>Figure 20</i> : Courbes de rétention ajustées selon le modèle de Van Genuchten (a) et leurs courbes moyennes avec écarts-type pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (b) et au sein de chacune des deux campagnes (c). | 36 |
| <i>Figure 21</i> : Distribution de la taille des pores et courbes moyennes avec écarts-type pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et pour chacune des deux campagnes (b). | 39 |

| | |
|---|----|
| <i>Figure 22</i> : Distribution de la taille des pores et courbes moyennes avec écarts-type pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et pour chacune des deux campagnes (b). | 40 |
| <i>Figure 23</i> : Images reconstruites de coupes horizontales (2,72x2,72 cm) des échantillons provenant des parcelles 37 (<i>Sol</i>), 17 (<i>Conventionnel</i>) et 47 (<i>Zéro phyto</i>) de gauche à droite, respectivement, pour la première (a1), (b1), (c1) et pour la seconde campagne (a2), (b2), (c2). | 42 |
| <i>Figure 24</i> : Distribution de la taille des pores de la première campagne (a) de la seconde campagne (b). | 43 |
| <i>Figure 25</i> : Gammes de pores couvertes par les différentes méthodes de détermination de la DTP. | 48 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| <i>Tableau 1</i> : Classe des pores définies selon leur classe de diamètre et leurs fonctions. | 2 |
| <i>Tableau 2</i> : Subdivisions des fractions granulométriques en classes de diamètres équivalents. Origine de ces fractions et méthodes de détermination de la distribution granulométrique. | 3 |
| <i>Tableau 3</i> : Densité apparente ρ [g cm ⁻³] de différents types de sols. | 4 |
| <i>Tableau 4</i> : Pratiques culturales opérées sur les parcelles de froment d'hiver des systèmes <i>Conventionnel</i> , <i>Sol</i> et <i>Zéro phyto</i> et leur rendement moyen (corrige à une humidité de 15%). | 7 |
| <i>Tableau 5</i> : Texture propre à chaque parcelle. | 11 |
| <i>Tableau 6</i> : Indicateurs des courbes issues des QST | 15 |
| <i>Tableau 7</i> : Pressions appliquées exprimées en hectopascal [hPa], en picofarad [pF] et rayons [mm] correspondant obtenus selon la loi de Jurin. | 18 |
| <i>Tableau 8</i> : Teneurs moyennes de CO [%] entre 0 - 7,4 cm et 0 - 27,8 cm. | 23 |
| <i>Tableau 9</i> : Moyennes de N_{tot} , pH_{eau} et pH_{KCl} selon les systèmes. | 31 |
| <i>Tableau 10</i> : Synthèse des résultats issus de l'analyse statistique pour l'analyse chimique, la densité appar ente (ρ_{Ech} , ρ_{ESM} et ρ_{pF}), la résistance à la pénétration (RSP_0 et RSP_5), les indicateurs du slake test (T_{max} , $W_{max}-W_{t0}$, W_{end} , P_{30} , P_{60} , P_{300} , P_{600} et AUC), la méthode Le Bissonnais (MWD1, 2 et 3, MA1, 2 et 3) et les courbes de conductivité et de rétention. C1 + C2 : résultat pour le facteur campagne ; S(C1+C2) : résultat pour le facteur système les deux campagnes confondues ; S(C1) : résultat pour le facteur système au sein de la première campagne ; S(C2) : résultat pour le facteur système au sein de la seconde campagne ; SNK : résultat du test de Student, Newman et Keuls. | 45 |
| <i>Tableau 11</i> : Synthèse des résultats issus de l'analyse statistique des distributions de la taille de pore issues de la courbe de rétention, de la microporosimétrie à mercure et de la microtomographie à rayon X (respectivement DTP_{pF} , DTP_{Hg} , DTP_{Tomo}). C1 + C2 : résultat pour le facteur campagne ; S(C1+C2) : résultat pour le facteur système les deux campagnes confondues ; S(C1) : résultat pour le facteur système au sein de la première campagne ; S(C2) : résultat pour le facteur système au sein de la seconde campagne ; SNK : résultat du test de Student, Newman et Keuls. | 47 |

État de l'art

Le sol se trouve à la croisée de l'atmosphère, de la géosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère ce qui lui impose de remplir des fonctions environnementale, économique et sociale fixées au nombre de six par Blum (2005). Ainsi, bien qu'étant une ressource finie et non renouvelable (Lal et al., 2018), reposent sur le sol les rôles (1) de production de biomasse (food, feed, fibres et bioénergies), (2) de filtre, de tampon et de siège de transformations biochimiques, (3) de réservoir génétique et d'habitat biologique, (4) de base aux infrastructures humaines, (5) de source de matières premières et (6) d'héritage géogénique et culturel. A l'heure actuelle, ces fonctions sont menacées et de nombreux défis sont à relever tels que l'amélioration de la qualité de l'environnement, de l'eau et des sols, l'amélioration de leur productivité, la réduction de leur érodibilité, l'augmentation de la séquestration du carbone et la diversité biologique (Logsdon et al., 2013 ; Lal et al., 2018).

L'intensification de la gestion des terres représente l'une de ces menaces pour les sols. En effet, ce phénomène conduit à l'instauration de compromis et de compétition entre les six fonctions écosystémiques précédemment citées (Schiefer et al., 2016).

Depuis la Révolution verte, l'accent a surtout été mis sur la performance des terres agricoles à produire. Or, pour assurer une production et une gestion des terres durables, la notion de résilience des sols doit être confrontée à la notion de performance. La résilience d'un sol est sa «capacité à retourner à un (nouvel) équilibre après une perturbation » (Schiefer et al., 2016) et se traduit par de hauts taux de récupération, une forte élasticité, une faible malléabilité ainsi qu'un caractère hystérétique conféré par ses propriétés intrinsèques (profondeur, texture,...) (Schiefer et al., 2016).

Ainsi, en Belgique, 92% des 3790 km² des terres arables analysées (soit 47% des terres arables du pays en 2016) présentent une grande résilience, ce qui en fait le pays européen le plus propice au développement d'une agriculture à la fois performante et durable (Schiefer et al., 2016). Pourtant, 29% des superficies agricoles wallonnes présentent un taux supérieur au seuil d'érosion non soutenable de 5 t ha⁻¹ an⁻¹ malgré une récente tendance à la diminution. Le phénomène d'érosion hydrique se manifeste plus fortement en région de grande culture, soit en régions limoneuse et sablo-limoneuse ainsi que dans le Condroz. Cela s'explique principalement par la présence de cultures sarclées et une teneur en matière organique souvent inférieure à la valeur seuil de 20 gC kg⁻¹ de carbone organique total (COT). Seuil en-deçà duquel il y a un risque accru d'instabilité structurale. Or, 90 % de la superficie wallonne cultivée présente une teneur inférieure à 13,3 kgC kg⁻¹ de COT (L'État de l'environnement wallon, 2019).

L'un des facteurs clé permettant au sol de remplir ses fonctions est la structure du sol. Promouvoir la stabilité structurale du sol permet donc de limiter les risques d'érosion, de battance ou encore de pertes de rendement (Bronick & Lal, 2004).

Cet état de l'art s'attache, premièrement, à définir ce que sont la structure du sol et la stabilité structurale. Ensuite, leurs liens avec d'autres propriétés du sol et facteurs extérieurs (environnementaux et anthropiques) sont énumérés. Par après, les méthodes de

caractérisation de la structure d'un sol et de sa stabilité sont énoncées. Enfin, les objectifs de ce travail sont livrés.

a) Qu'est-ce que la structure et la stabilité structurale du sol ?

La structure est une propriété dynamique du sol (Logsdon et al., 2013) qui découle de « l'arrangement et interconnexion des agrégats et des pores » (Logsdon et al., 2013).

Un agrégat est un arrangement de particules unies par des forces électrostatiques tandis qu'un pore est l'espace lacunaire intra- ou interagrégat (Musy & Soutter, 1991). L'agrégat et le pore sont ainsi les deux faces d'une même pièce qu'est la structure.

Le tableau 1 reprend les différentes classes de porosités déterminées par classes de diamètres ainsi que la description et fonction de pores selon des intra classes de diamètres de pores (FAO, 2003 ; Fukumasu, 2022).

Tableau 1 : Classes des pores définies selon leur classe de diamètre et leurs fonctions.

| Classe des pores | Microporosité | | Mésoporosité | | Macroporosité | | |
|--|--|---|--------------------------|------------------------------------|---|------------------------------------|--|
| Classe de \varnothing des pores (μm) | < 10 | | 10 < \varnothing < 100 | | > 100 | | |
| Intra-classe de \varnothing de pores (μm) | < 0,2 | 0,2 < \varnothing < 10 | 10 < \varnothing < 50 | > 50 | 100 < \varnothing < 300 | 50 < \varnothing < 3.500 | 2.000 < \varnothing < 50.000 |
| Description des pores | Résiduels | De stockage | | De transmission | D'enracinement | Galeries de vers de terre | Autres activités de la faune et canaux |
| Fonction des pores | stockage hydrique inaccessible à la plante | stockage hydrique disponible pour la plante | | flux hydrique et gazeux (drainage) | pénétration racinaire et flux hydrique et gazeux (drainage) | flux hydrique et gazeux (drainage) | flux hydrique préférentiel et flux gazeux (drainage) |

Telle que définie par Algayer & Darboux (2012), la stabilité structurale du sol « correspond à la capacité d'un sol à conserver sa structure lorsqu'il est soumis à différentes contraintes » et donc, comme le précise Logsdon et al. (2013) il s'agit de « son aptitude à retenir ses arrangements de particules et espaces poreux » face à des forces externes. Dans le contexte de l'agriculture, celles-ci peuvent être le travail et la compaction du sol, la croissance des cultures ou encore l'irrigation.

b) Quels sont les principaux facteurs influant sur la structure du sol ?

Premièrement, la **texture du sol** (ou fraction minérale du sol).

Elle se définit comme une « propriété - intrinsèque - du sol qui traduit de manière globale la composition granulométrique de la terre fine » (argile, limon et sable) (Gobat et al., 2010).

Le tableau 2 reprend les différentes classes granulométriques, leur origine et les méthodes de détermination de la distribution granulométrique (Fukumasu, 2022; Gobat et al., 2010; Hartge & Horn, 2016).

Tableau 2 : Subdivisions des fractions granulométriques en classes de diamètres équivalents. Origines de ces fractions et méthodes de détermination de la distribution granulométrique.

| | Terre fine (< 2 mm) | | | Eléments grossiers (> 2 mm) | | |
|-------------------|---|-------------------------------|----------------|------------------------------|-------|-------|
| Classe de taille | argile | limon | sable | gravier | pavés | blocs |
| Ø équivalent (µm) | < 2,0 | 2,0 < Ø < 50 | 50 < Ø < 2.000 | > 2.000 | | |
| Méthode | sédimentation par centrifugation gravitationnelle | | | | | |
| | | sédimentation par décantation | | | | |
| | | | | tamisage | | |

Deuxièmement, la **matière organique du sol** (ou fraction organique du sol).

Elle provient soit de l'activité biologique de la pédofaune et flore (Musy & Soutter, 1991) soit de l'apport de fumier, engrais ou amendements organiques, des résidus de cultures et des racines. La teneur en matière organique du sol est souvent établie sur base de la teneur en carbone organique du sol (Fukumasu, 2022). Ensuite, l'association texture-matière organique permet de générer, grâce à leurs charges ioniques, les forces électrostatiques mentionnées précédemment.

Troisièmement, les **forces mécaniques et hydrauliques** s'exerçant dans le sol.

Elles découlent principalement des conditions météorologiques et régissent les cycles de contractions-gonflements (ou dessiccation-humectation) et de gels-dégels (impliquant les facteurs d'humidité du sol et de vitesse de (dé-)congélation (Hartge & Horn, 2016 ; Musy & Soutter, 1991). Cet aspect ne sera pas plus amplement discuté dans ce travail.

Quatrièmement, les **facteurs biologiques**.

Ils jouent un rôle à la fois de protection de la structure du sol face aux perturbations externes et de structuration en tant que telle (Musy & Soutter, 1991). En effet, l'interaction des phénomènes de contractions-gonflements du sol, des liens organo-minéraux et de l'activité microbienne est à l'origine de la formation des agrégats (Lal, 2018).

Cinquièmement, **l'occupation des terres et les changements de leur utilisation, couverture et gestion.**

Il s'agit de facteurs anthropiques ayant pris place il y a déjà plusieurs millénaires en Europe. Au-delà de leur influence sur la structure des sols, c'est un ensemble de processus physico-biologiques des écosystèmes, impactés de telle sorte que l'époque géologique dans laquelle s'inscrit ce travail pourrait correspondre un jour à l'Anthropocène (Vanwalleghem, 2017).

La structure ainsi définie induit différentes propriétés du sol qui conditionnent son fonctionnement interne, notamment en matière d'hydrodynamique. Les propriétés reprises ici sont la densité apparente et les courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique du sol.

La densité apparente.

Il s'agit de la masse volumique d'un échantillon de sol séché et dont la structure a été conservée. La densité apparente permet d'établir la fraction de solide contenue dans le volume de sol considéré (Hartge & Horn, 2016) et donc, inversement, d'en déduire sa porosité totale (Fukumasu, 2022). Cependant, elle ne permet pas d'établir la répartition de cette masse de solide au sein du volume (Hartge & Horn, 2016). Le tableau 3 reprend des ordres de grandeur de la densité apparente de différents types de sol (Hartge & Horn, 2018 ; Musy & Soutter, 1991).

Tableau 3 : Densité apparente ρ [g cm⁻³] de différents types de sols.

| Type de sol | ρ |
|---------------|--------------------|
| Sols sableux | 1,4 < ρ < 1,7 |
| Sols limoneux | 1,3 < ρ < 1,6 |
| Sols argileux | 1,0 < ρ < 1,5 |
| Sols tourbeux | 0,3 < ρ < 1,0 |

La courbe de rétention en eau du sol.

Elle est la relation qui relie le potentiel matriciel (ψ_m) à la teneur en eau (θ) du sol (Hartge & Horn, 2016). Elle permet d'illustrer la relation entre structure du sol et teneur en eau du fait que la teneur en eau en fonction du potentiel matriciel permet de rendre compte du diamètre équivalent de pores remplis par l'eau (Logsdon et al., 2013).

La courbe de conductivité hydraulique du sol.

Il s'agit de la relation entre la conductivité hydraulique (K) et le potentiel matriciel. Elle est obtenue à partir des taux d'infiltration de l'eau dans le sol et rend compte des flux hydriques à travers la porosité du sol (Kodešová et al., 2009).

La figure 1 reprend, de manière non exhaustive, les facteurs ayant une portée sur la structure du sol (Hartge & Horn, 2016 ; Logsdon et al., 2013). Les facteurs placés entre parenthèses ne seront pas davantage détaillés dans ce travail.

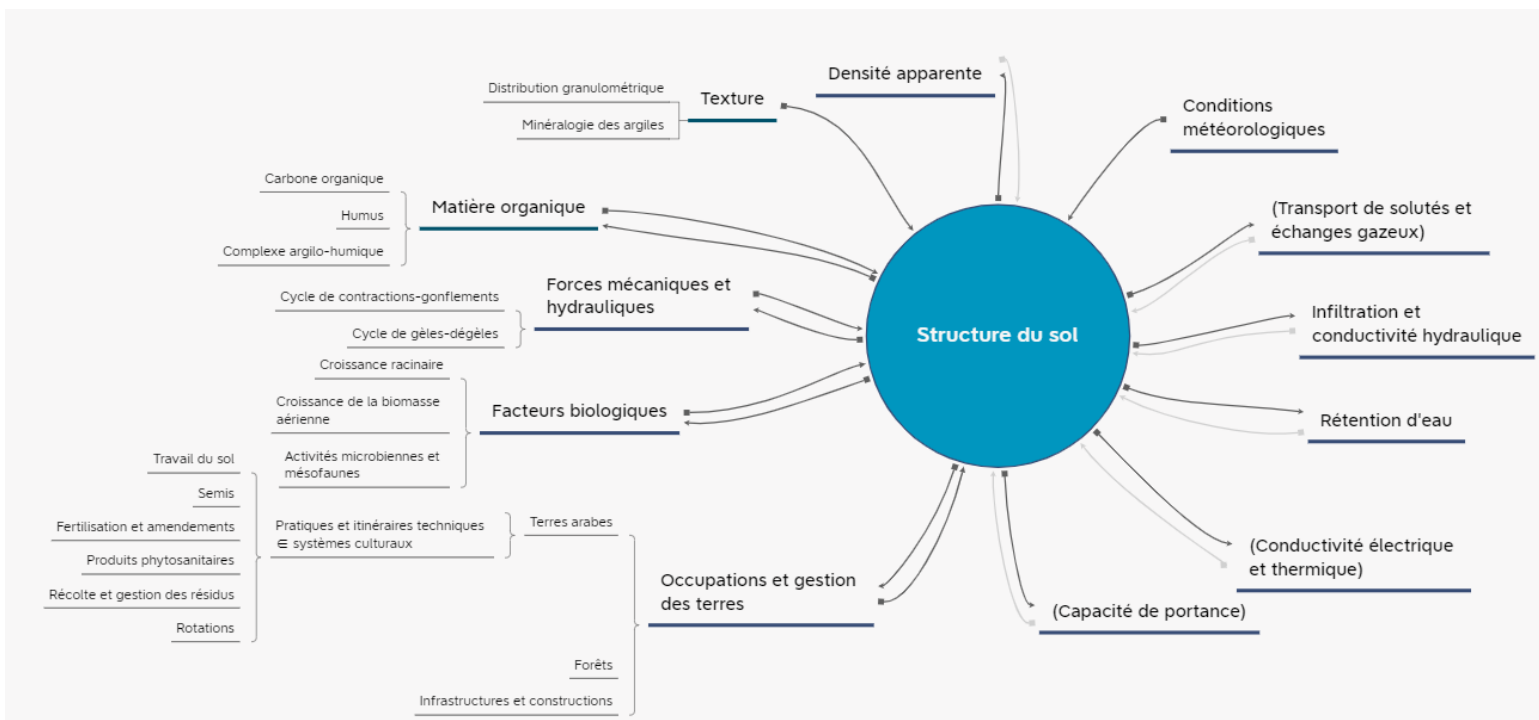


Figure 1 : Facteurs impactant la structure du sol et facteurs impactés par celle-ci.

Finalement, les facteurs influençant la structure du sol sont souvent à leur tour influencés par cette dernière et interconnectés du fait qu'ils agissent au sein de cycles divers et complexes.

c) Comment mesurer la structure du sol et sa stabilité ?

La caractérisation de la structure du sol peut être déduite soit directement des propriétés structurales du sol (stabilité des agrégats et architecture des pores) soit indirectement en évaluant les propriétés hydrauliques (courbes de rétention et de conductivité hydraulique), les propriétés physiques (texture et densité apparente) et les propriétés mécaniques (résistance ou cohérence du sol et limites d'Atterberg). Ainsi, certains des facteurs précédemment cités, de par leur lien avec la structure du sol, permettent, à travers leur évaluation, de la quantifier.

Son caractère dynamique peut-être observé en comparant les systèmes agricoles entre eux et l'évolution de la structure dans le temps.

Les méthodes de quantification peuvent évaluer la structure *in situ* ou en laboratoire sur des échantillons prélevés de sol (dont la structure a été conservée ou non). Elles peuvent également être destructives ou non destructives.

Néanmoins, la mesure directe de la structure du sol et l'évaluation de sa stabilité sont malaisées et nécessitent souvent d'allier plusieurs méthodes. De plus, de par son caractère dynamique, certains des effets observés ne sont parfois que transitoires. Enfin, il n'est pas

toujours évident de relier les résultats obtenus en laboratoire au comportement réel du champ en raison notamment de la variabilité spatiale des propriétés et de la difficulté d'un échantillonnage représentatif (Logsdon et al., 2013).

d) Quels sont les objectifs de ce travail ?

Actuellement, il est connu que les taux d'érosion diffèrent selon les pratiques agricoles et ce, pour une même utilisation des terres (Vanwalleghem et al., 2017). Cela sous-entend donc la génération de structures et stabilités structurales différentes selon ces pratiques.

La structure des sols et ses propriétés est souvent étudiée pour différentes modalités de travail du sol, d'intercultures, de cultures de couverture ou encore de fertilisation (Masson, 2021; Nasir Ahmad et al., 2020). Or, un itinéraire technique est un ensemble bien plus large de pratiques agricoles (semis, désherbage, application de produits phytosanitaires, récolte,...) dont l'action se répercute de manière variable sur les sols tout au long de la saison culturale. Il caractérise un système de culture et s'adapte à une zone géopédoclimatique donnée. De plus, la lutte contre l'érosion des sols ne peut être dissociée des autres enjeux de la production agricole rappelés précédemment.

Au sein de ce travail, l'érosion des terres agricoles est abordée comme conséquence de problèmes d'instabilité structurale. L'objectif de ce travail n'est donc pas tant de quantifier et évaluer cette érosion mais plutôt de quantifier et comparer la structure de sols agricoles sous différents systèmes culturaux (conventionnel, en conservation du sol et à application limitée de produits phytosanitaires) ainsi que son évolution dans le temps via la mise en place de deux campagnes de prélèvement d'échantillons (début mars et mi-avril).

Pour ce faire, des techniques plus classiques (infiltrométrie, rétention de l'eau, pénétrométrie, calcul de densité apparente et méthode Le Bissonnais et de calcul de masses de sol équivalentes) à plus innovantes (QuantiSlake test, microtomographie et microporosimétrie) ont été associées afin de déterminer les propriétés hydrodynamiques des sols concernés et leur structure *per se*. Un objectif sous-jacent étant de comparer ces techniques et d'analyser leur cohérence.

Matériels et méthodes

1. Essai SYCI

L'essai SYCI (SYstèmes de Culture Innovants) est une des plateformes multidisciplinaires mises en place au sein de l'Expérimentation Systèmes de Cultures par le *Centre wallon de Recherches agronomiques* (CRA-W) dont l'objectif est de se placer à l'échelle des systèmes afin d'en évaluer leur faisabilité technique, leurs capacités à atteindre les objectifs fixés, leurs contributions au développement durable et leurs impacts sur l'agroécosystème (CRA-W, 2021). Cet essai confronte trois systèmes, le système *Sol* (conservation du capital sol), le système *Zéro phyto* (réduction des intrants) et le système *GES* (diminution des émissions de gaz à effet de serre), au système *Conventionnel*. Il se situe à Gembloux, entre la Rue du Bordia et le Chemin du Liroux et s'étend sur approximativement quinze hectares. L'année 2022 représente la troisième année de mise en œuvre de l'essai. A chaque

système correspond une rotation de six ans qui lui est propre. L'objectif commun à tous les systèmes est de parvenir à maximiser leur rentabilité (la marge brute).

Dans le cadre de ce travail, il a été décidé de se concentrer sur seulement trois des quatre systèmes (*Conventionnel*, *Sol* et *Zéro phyto*). Au sein de ces systèmes, les prélèvements ont eu lieu sur les parcelles de froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.), culture commune à tous les systèmes. Ensuite, une pratique agricole a été ciblée, le désherbage, du fait de la diversité des modalités qu'offrent les différents systèmes, à savoir, un désherbage chimique en *Conventionnel*, une absence de désherbage en *Sol* et un désherbage mécanique en *Zéro phyto* en sortie d'hiver. L'itinéraire technique du froment d'hiver pour chacun des systèmes a été détaillé au sein du tableau 4 (CRA-W).

En fin de compte, une impasse a été faite sur le désherbage mécanique en *Zéro phyto* du fait de l'absence de levée des adventices durant la période propice de passage pour le froment d'hiver. Par conséquent, il a plutôt été question de comparer l'évolution des systèmes à pas de temps court (un mois et demi).

Tableau 4 : Pratiques culturales opérées sur les parcelles de froment d'hiver des systèmes *Conventionnel*, *Sol* et *Zéro phyto* et leur rendement moyen (corrige à une humidité de 15%).

| Système | <i>Conventionnel</i> | <i>Sol</i> | <i>Zéro phyto</i> |
|--------------------------------|---|--|--|
| Précédent | Pomme de terre | Betterave (épandage des feuilles après récolte) | Prairie temporaire |
| Mi-octobre | Décompactage et nivelage (\downarrow 15 - 20 cm) + Semis (130 kg ha ⁻¹) | / | / |
| Début novembre | / | / | Labour (\downarrow 25 cm) + Semis (175 kg ha ⁻¹) |
| Début décembre | / | Semis direct (235 kg ha ⁻¹) | / |
| Mi-mars, mi-avril et mi-mai | Fumure N (+ S à la 1ère fraction) Total = 300 UN | Apport de nitrate (+ mi-février) Total = 300 UN | Fumure N Total = 270 UN |
| Début avril | Désherbage chimique | Désherbage chimique | Désherbage mécanique |
| Mi-avril | Régulateur de croissance | / | / |

| | | | |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Mai, juin | 2 Fongicides | Fongicide | / |
| Fin juillet | Récolte + enfouissement | Récolte + enfouissement | Récolte + ramassage pailles |
| Rendement moyen (t/ha) | 10,73 | 7,72 | 7,16 |

2. Topologie et caractéristiques connues du sol

La couche de données *Relief de la Wallonie – Modèle Numérique des Pentas 2013-2014 classifié* et *La Carte numérique des sols de Wallonie - Série* (2015) (WalOnMap, n.d.) rassemblées à la figure 2 fournissent respectivement une classification des valeurs des pentes en pourcentage des sols et un aperçu des différents profils pédologiques des sols de l'essai SYCI.

La présence de pentes pouvant aller jusqu'à 10 % est observable, notamment dans le sud de la parcelle. La considération de la topologie peut avoir son importance dans le cadre de ce travail car sa variation pourrait engendrer l'accumulation de sédiments en bas de pente.

Ensuite, le type de sol est renseigné comme étant limoneux à drainage favorable. Néanmoins, le développement de profil ainsi que la nature de la charge en éléments grossiers varie selon la localisation. Ainsi, aba1 et aba(b)1 signifient un horizon B textural enfoui entre 80 et 125 cm de profondeur avec (b) signifiant qu'il est tacheté, abB expose une absence de développement de profil et traduit un signe d'érosion. Enfin, le p de abp renseigne sur l'absence de développement de profil (Bah et al., 2007).

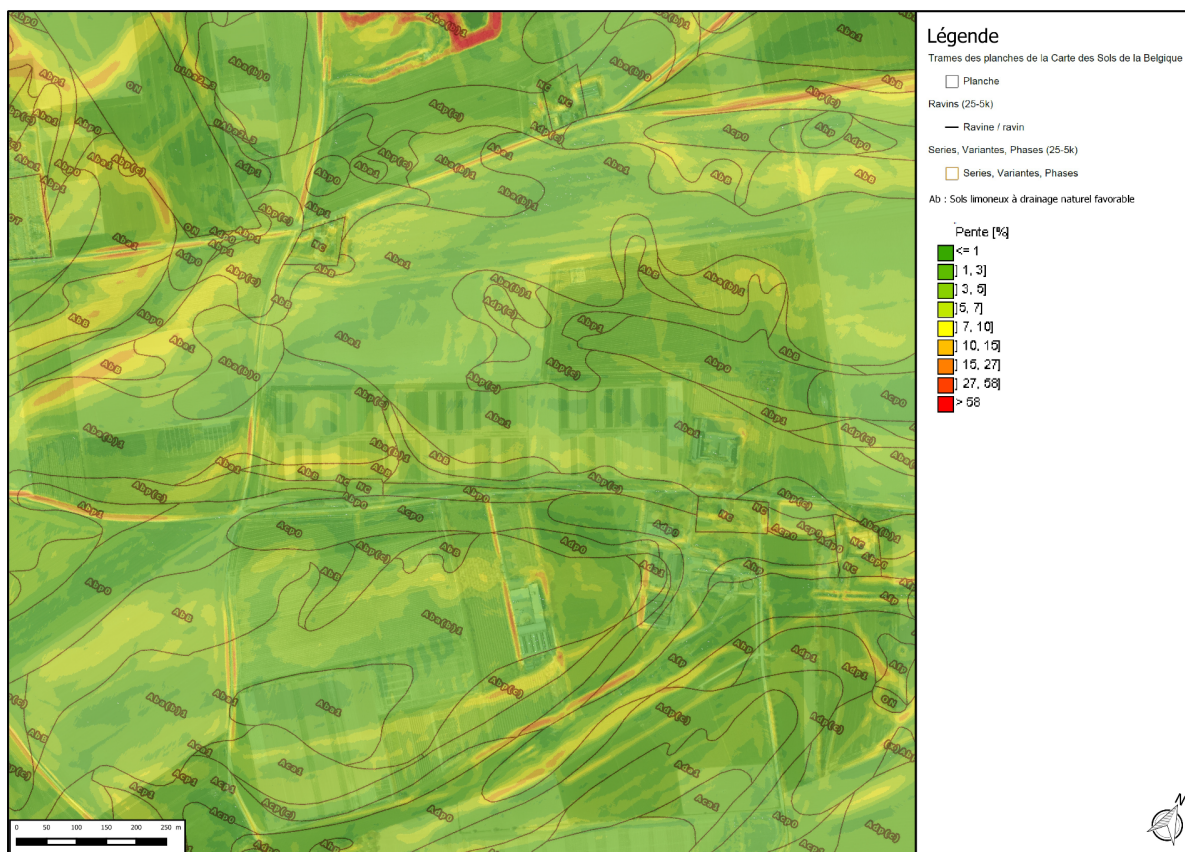


Figure 2 : Couche de données *Relief de la Wallonie – Modèle Numérique des Pentés 2013-2014 classifié* et *Carte numérique des sols de Wallonie - Série* pour la zone de l'essai - (WalOnMap).

3. *Echantillonnage*

Le prélèvement d'échantillons a été réalisé sur les différentes parcelles, en six zones (et trois profondeurs en chacune des six zones) distinctes pour la caractérisation chimique du sol, en trois zones (A,B,C) pour la microporosité et pour la détermination de la stabilité structurale par slake test et par la méthode Le Bissonnais, en deux zones (A,B) pour l'infiltrométrie et la rétention d'eau et enfin, en une zone (B) pour la macroporosité et la densité apparente (déterminée par microtomographie) et en une zone (A) pour la résistance à la pénétration. Les prélèvements autres que dédiés aux analyses chimiques ont été prélevés sur les dix premiers centimètres. Les zones de prélèvement se concentrent autour d'un point relevé au GPS et couvrent une superficie d'environ 9 m² autour de ce point. Les parcelles mesurent 60 m de long et 15 m de large. Une bande de trois mètres de large au centre de la parcelle est réservée à la mesure des rendements. De plus, l'extrémité des parcelles a été exclue afin d'éviter les effets de bord ainsi que les endroits de passage de roues et d'éviter le biais potentiel des résultats dus à ces facteurs de variabilité. C'est pourquoi, les points d'échantillonnage ont été définis directement sur la parcelle. De plus, étant donné que la répétition s'opère au niveau des blocs (aléatoires), il s'agit dès lors de pseudo-échantillonnage au sein de la parcelle. La figure 3 montre le plan d'échantillonnage.

Enfin, deux campagnes d'échantillonnage ont été mises en place, sauf pour la caractérisation chimique pour laquelle les échantillons n'ont été prélevés qu'à la première campagne. La première campagne de prélèvement a eu lieu fin février-début mars (28/02-03/03) en sortie d'hiver avant tout désherbage. La seconde s'est déroulée mi-avril (15/04-25/04), après désherbage.

L'annexe 1 reprend un bulletin météorologique des mois de février, mars et avril.



Figure 3 : Plan d'échantillonnage des parcelles de l'essai grandes cultures SYCI.

4. *Texture du sol, analyses chimiques et stocks de carbone organique*

Le prélèvement d'échantillons de sol a été réalisé le 28 février 2022 sur les parcelles de froment déterminées précédemment, avant la campagne de désherbage de sortie d'hiver. Les échantillons de sol ont été prélevés à l'aide d'une sonde usinée à l'Unité de Génie Rural (UCLouvain) (Figure 4) sur trois profondeurs, à savoir, 0-9 cm, 9-15 cm et 15-30 cm. Six prélèvements ont été opérés par parcelle et pour chaque profondeur. Pour chaque parcelle, les trois profondeurs provenant des six prélèvements ont été séparées de sorte à obtenir trois échantillons étiquetés, emballés sous pochette plastique par parcelle. Au total, 162 prélèvements ont été opérés pour obtenir, au final, 27 échantillons à analyser. Ensuite, les échantillons ont été ramenés au CRA-W afin de peser leur poids frais. Après la pesée, les barquettes ont été mises à l'étuve à 40°C pendant 48 heures. Pour le conditionnement, le contenant de chaque barquette a été broyé et passé dans un tamis de 2 mm. Les particules dont la taille était inférieure à 2 mm ont été conservées et placées dans des contenants en plastique hermétiques.

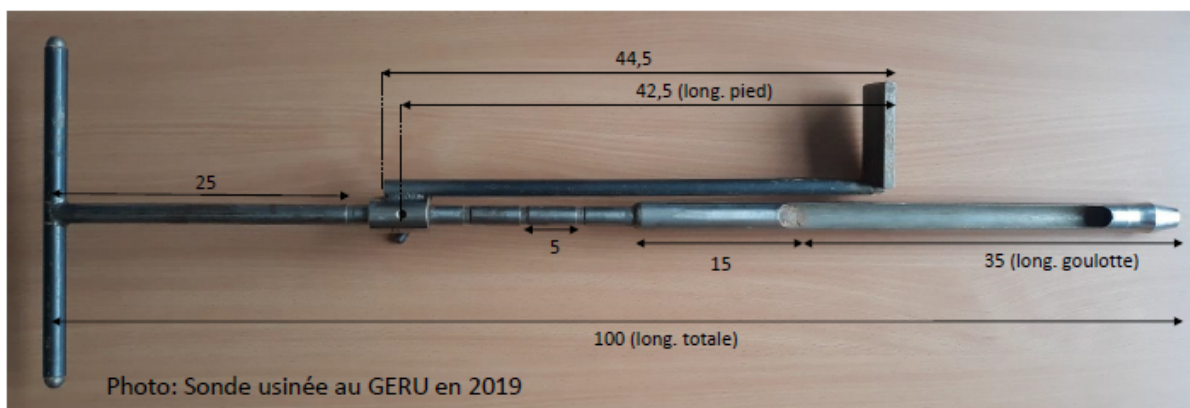


Figure 4 : Sonde de prélèvement des sols¹ (CRA-W).

Une fois les échantillons conditionnés, ceux-ci ont été envoyés aux laboratoires de l'ASBL Réseau Qualité Sud (REQUASUD) afin d'obtenir la texture du sol sur les neuf premiers centimètres de sol (tableau 5) ainsi que la teneur de certains éléments (carbone organique, azote total, P,...) et des valeurs de pH pour les trois profondeurs échantillonnées (voir annexe 2).

Tableau 5 : Texture propre à chaque parcelle.

| Bloc | Système | Parcelle | Argile (%) | Limon (%) | Sable (%) |
|------|------------|----------|------------|-----------|-----------|
| 1 | Sol | 5 | 21,495 | 74,149 | 4,357 |
| 1 | Conv | 17 | 18,326 | 77,024 | 4,649 |
| 1 | Zéro phyto | 22 | 19,266 | 76,220 | 4,513 |
| 2 | Conv | 27 | 20,390 | 74,932 | 4,678 |
| 2 | Sol | 37 | 20,084 | 75,364 | 4,551 |
| 2 | Zéro phyto | 47 | 19,402 | 76,226 | 4,373 |
| 3 | Zéro phyto | 54 | 21,376 | 74,092 | 4,532 |
| 3 | conv | 56 | 21,007 | 74,491 | 4,501 |
| 3 | sol | 64 | 16,589 | 78,537 | 4,875 |

Concernant l'estimation des stocks de carbone dans le sol, la méthode des masses de sol équivalentes a été employée. L'objectif de cette méthode est de quantifier les stocks de carbone pour différentes profondeurs ou de manière cumulée en tenant compte des densités apparentes propres à chaque parcelle (Wendt & Hauser, 2013).

Enfin, le ratio carbone organique sur argile (CO:argiles) a pu être calculé.

¹ Les mesures de la sonde sont données en centimètres.

5. Densité apparente

Les prélèvements d'échantillons de sol ont été réalisés les 3 mars et 20 avril 2022 pour, respectivement, la première et la seconde campagne. Ceci, selon la méthode de prélèvement en structure conservée (Losseau, 2013), à l'aide de kopeckys ($\varnothing = 5$ cm, $h = 5$ cm). Au total, 18 échantillons ont été prélevés. Ils ont été refermés à l'aide de capuchons en plastique et mis au réfrigérateur à 4°C en attente de l'analyse.

Afin d'obtenir les densités apparentes des sols étudiés, les échantillons ont été mis à l'étuve à 105°C avec leur anneau. En sortie de l'étuve, les échantillons ont été pesés avec leur anneau. Une fois les échantillons démoulés, les anneaux ont également été pesés ce qui a permis d'en déduire la masse propre à l'échantillon. La masse obtenue a été ramenée au volume des échantillons (connu grâce au kopecky ayant servi pour le prélèvement). On obtient donc les densités apparentes des échantillons (ρ_{Ech}).

L'analyse a eu lieu au laboratoire de *Physique et Mécanique des sols (Axe Échanges Eau-Sol-Plantes)*.

La densité apparente a également pu être obtenue sur base des prélèvements destinés à l'estimation du stock de carbone organique dans le sol (ρ_{ESM}). Ceci grâce à la pesée des échantillons et aux dimensions connues de la sonde de prélèvement. Ces mesures se restreignent toutefois à la première campagne.

Enfin, à l'issue de la détermination des courbes de rétention, la densité apparente a pu également être calculée (ρ_{PF}). Cela n'a pu être réalisé qu'à la seconde campagne car les échantillons de la première campagne ont montré un mauvais calibrage.

6. Résistance à la pénétration (Pénétrromètre de poche)

Les prélèvements d'échantillons de sol ont été réalisés les 3 mars et 16 avril 2022 pour, respectivement, la première et la seconde campagne. Ceci, selon la méthode de prélèvement en structure conservée (Losseau, 2013), à l'aide de kopeckys ($\varnothing = 5$ cm, $h = 5$ cm). Au total, 18 échantillons ont été prélevés. Ils ont, ensuite, été conservés hermétiquement au réfrigérateur à 4°C en attente de l'analyse.

En laboratoire, un pénétrromètre de poche (*Sols Mesures*, gamme de 0 à 4,5 kg f cm²) a été utilisé afin d'évaluer la résistance à la compression des échantillons. Pour ce faire, une fois le curseur mis à zéro, l'extrémité du pénétrromètre a été appliquée à la surface de l'échantillon et la mesure indiquée par le curseur, une fois le repère atteint, a été reportée (*Sols mesures*, n.d.). Les faces supérieures et inférieures des échantillons ont été soumises à l'analyse à raison de cinq points par face.

7. Stabilité structurale du sol (QuantiSlake test et méthode Le Bissonnais)

7.1. Première campagne de prélèvement

Le prélèvement d'échantillons de sol destinés au *QuantiSlake test* (QST) a été réalisé le 1er mars 2022 selon la méthode de prélèvement en structure conservée (Losseau, 2013) à l'aide de kopeckys ($\varnothing = 5,1$ cm, $h = 5$ cm). Au total, 54 prélèvements ont été réalisés. Ils ont

été emballés par deux (provenant du même point de la même parcelle) dans une pochette plastique. Une fois, au CRA-W, ceux-ci ont été démoulés et disposés, toujours par deux, dans des barquettes en aluminium et mis à sécher.

Parallèlement, des échantillons de sols ont été prélevés afin d'en tester la stabilité structurale par la méthode Le Bissonnais. Ainsi, approximativement 1 kg de sol appartenant à la couche 0-10 cm a été prélevé, émiétté en agrégats de 5 mm et ensaché dans les trois zones. Le contenu des sachets a ensuite été transvasé dans des barquettes en aluminium. Enfin, elles ont été entreposées pour le séchage.

7.2. Seconde campagne de prélèvement

La deuxième phase de prélèvement, concernant uniquement la prise d'échantillons destinés au QST, a eu lieu le mardi 19 avril. Comme pour la première campagne, 54 prélèvements ont été réalisés et conditionnés identiquement pour le séchage. Néanmoins, la surface des points de prélèvement a été retirée à hauteur de 3-4 cm car la croûte de battance l'avait rendue fortement friable et donc impossible à conserver lors du prélèvement.

7.3. QuantiSlake test

7.3.1. Prélèvement des échantillons et expérience

Un mois après le séchage des échantillons, l'expérience a été mise en place. Le dispositif (figure 5) se compose de deux balances. L'une se trouvant au-dessus (Kern KB ; max 1200kg ; d= 0,01g) et à laquelle a été suspendue le panier. L'autre (Kern 572 ; max = 4200kg ; d =0,01g) en dessous et supportant le bécher (V=2000 mL) rempli d'eau distillée à hauteur de 1800mL.

Pour débiter l'analyse, le programme *Slaker* a été lancé sur l'ordinateur afin d'enregistrer l'évolution des poids mesurés aux deux balances au cours du temps. Ensuite, le panier (suspendu à la balance du dessus) a été plongé dans le berlin d'eau distillée qui lui-même a été placé sur la balance du dessous. Les deux balances ont alors été tarées. Après avoir taré les deux balances, le berlin a été retiré de la balance du bas. Une fois que les informations de l'échantillon ont été introduites dans le programme, celui-ci a été lancé. A l'apparition du graphique sur l'écran, le berlin a été replacé sur la balance et le panier contenant l'échantillon y a été immergé.



Figure 5 : Dispositif du QuantiSlake test.

Une fois que les courbes ont revêtu une pente stabilisée (approximativement après 1000 secondes d'analyse), le test a été arrêté.

L'expérience a eu lieu au laboratoire de l'Unité Sols, Eaux et Productions intégrées du CRA-W (Bâtiment Arthur Petermann, Gembloux).

7.3.2. Génération des courbes et indicateurs

Une fois les expériences achevées, les courbes d'évolution des masses relatives (valeurs comprises entre 0 et 1 [-]) de l'échantillon au cours du temps [s] ont été générées. Le temps 0 (T_0) a été attribué à la première valeur enregistrée de la masse de l'échantillon après immersion (W_{T_0}). Le tableau 6 reprend les différents indicateurs calculés sur base de cette courbe.

Tableau 6 : Indicateurs des courbes issues des QST.

| Indicateurs | Signification |
|------------------------------------|---|
| W_{max} | Masse relative maximale atteinte de l'échantillon avant désagrégation [-] |
| T_{max} | Temps auquel W_{max} est atteint [s] |
| $W_{max}-W_{T_0}$ | Augmentation de la masse relative de l'échantillon entre T_0 et T_{max} [s] |
| W_{end} | Masse relative de l'échantillon en fin d'expérience [-] |
| $P_{30}, P_{60}, P_{300}, P_{600}$ | Pentes de la courbe à différents pas de temps (30, 60, 300 et 600 secondes) |
| AUC | Aire sous la courbe [s] |

7.4. Méthode Le Bissonnais

L'analyse des échantillons a été réalisée par le laboratoire de l'*Unité Sols, Eaux et Productions intégrées* du CRA-W (Bâtiment Arthur Petermann, Gembloux).

L'objectif de la méthode est de mesurer la stabilité des agrégats du sol soumis à l'action de l'eau. Pour ce faire, trois traitements ont été appliqués aux échantillons : humidification rapide par immersion dans l'eau, humidification lente par capillarité et désagrégation mécanique par secouage dans de l'éthanol (Le Bissonnais, 1996).

A l'issue des trois traitements, la distribution de la taille des agrégats résiduels a été déduite pour chacun d'eux. Le pourcentage de macroagrégats (MA) a alors été obtenu (> 2 mm).

Enfin, le diamètre moyen pondéré (MWD [mm]) a alors été calculé selon la formule suivante :

$$MWD = \Sigma(\varnothing \text{ moyen entre deux tamis } [\% \text{ des particules retenues sur le tamis}]) / 100$$

(Le Bissonnais, 1996).

8. Courbe de conductivité hydraulique (Infiltromètre minidisc)

8.1. Prélèvement et analyse des échantillons

Les prélèvements d'échantillons de sol ont été réalisés les 3 mars et 16 avril 2022 pour, respectivement, la première et la seconde campagne. Ceci, selon la méthode de prélèvement en structure conservée (Losseau, 2013), à l'aide de kopeckys ($\varnothing = 5$ cm, $h = 5$ cm). Au total, 36 échantillons ont été prélevés. Ils ont, ensuite, été conservés hermétiquement au réfrigérateur à 4°C en attente de l'analyse.

Lors de l'analyse des échantillons, ceux-ci ont été arasés sur leur partie haute, sur laquelle du sable a été disposé afin de garantir un meilleur contact entre l'infiltromètre minidisc

(Decagon) et la surface de l'échantillon. La figure 6 montre le dispositif reprenant l'infiltromètre, l'échantillon et le tube collectant l'eau à la sortie de l'échantillon. Trois taux de succion ont été opérés, dans l'ordre, - 4, - 2 et - 0,5 cm. Pour chacun de ces taux, le volume d'eau initial a d'abord été enregistré. Ensuite, l'évolution du volume par pas de 30 secondes a été reportée.



Figure 6 : Dispositif d'infiltrométrie avec l'infiltromètre minidisc.

L'analyse a eu lieu au laboratoire de *Physique et Mécanique des sols (Axe Échanges Eau-Sol-Plantes)*.

8.2. Traitement des données

Pour le traitement des données, le programme de modélisation *Hydrus-1D (PC-Progress)* permettant d'analyser les flux hydriques (et de solutés) à travers divers matériaux a été employé. L'utilisation de la méthode inverse a permis d'estimer entre autres paramètres hydrauliques des sols, la conductivité à saturation K_{sat} [cm s^{-1}] sur base du modèle de *Van Genuchten-Mualem* (Schaap & Leij, 2000).

Étant donné la tendance du K_{sat} à se montrer très sensible aux flux préférentiels (De Pue et al., 2019), l'ensemble de la courbe de conductivité hydraulique a été considérée.

Dès lors, la courbe de conductivité hydraulique $K(h)$ a été obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$K(h) = K_s \frac{\{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m/2}}$$

(Guarracino, 2007).

9. Courbe de rétention et distribution de la taille de pore (Appareil de Richard)

9.1. Prélèvement et analyse des échantillons

Les prélèvements d'échantillons de sol ont été réalisés les 3 et 15 mars 2022 pour, respectivement, la première et seconde campagne. Ceci, à l'aide d'anneaux à pF ($\varnothing=7,7\text{cm}$, $h=2,15\text{ cm}$) selon la méthode de prélèvement en structure conservée (Losseau, 2013). Au total, 36 échantillons ont été prélevés. Ils ont, ensuite, été conservés hermétiquement dans un réfrigérateur à 4°C en attente de l'analyse.

48 heures avant le démarrage de la mesure, les anneaux ont été retravaillés, une étamine maintenue avec un élastique a été placée sur le dessous de l'échantillon (côté non biseauté de l'anneau) finalement disposé dans un couvercle en plastique et mis à saturation dans de l'eau distillée. Des plaques de céramique, basse ou haute pression en fonction de l'étape, ont également été mises à saturation dans de l'eau distillée durant 48 heures.

Le jour de la mesure, les échantillons, débarrassés de leur couvercle en plastique, ont été placés sur les plaques en céramique (deux plaques de sept et une plaque de quatre). Ensuite, les plaques ont été placées dans l'appareil de Richard et les échantillons ont été soumis à des pressions croissantes, 10, 40, 70, 100, 300, 700, et 1.000 hPa pour les basses pressions et 5.000 et 15.000 pour les hautes pressions (figure 7). Après chaque période de mise à l'équilibre, les échantillons ont été pesés avant de passer à la pression supérieure. Les plaques de céramique ont été réhumidifiées avec de l'eau distillée après chaque pesée.

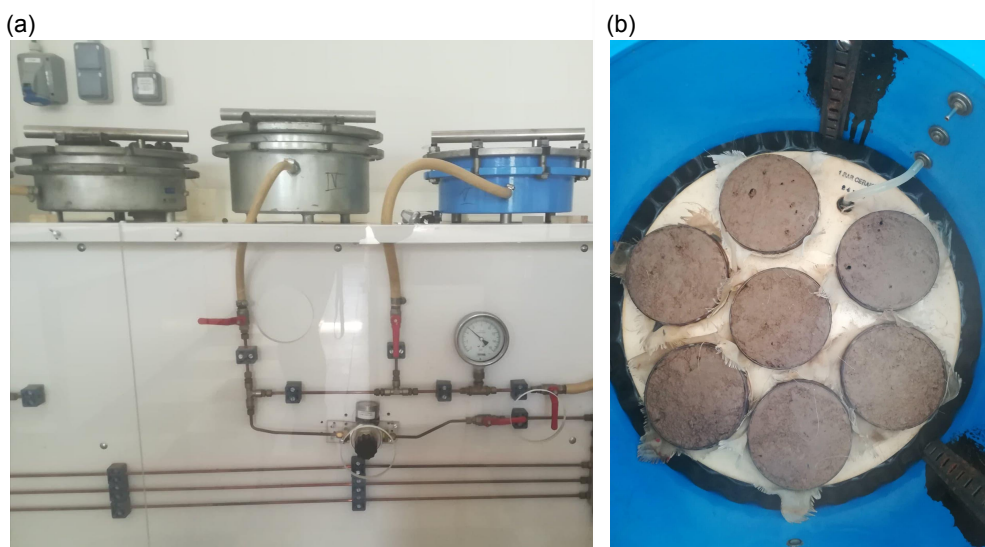


Figure 7 : Dispositif de l'appareil de Richard (a) et intérieur de l'appareil avec les échantillons (b).

L'analyse a eu lieu au laboratoire de *Physique et Mécanique des sols (Axe Échanges Eau-Sol-Plantes)*.

9.2. Traitement des données

Une fois les courbes de rétention obtenues, les teneurs en eau pondérales relatives aux paliers de pression ont été rentrées dans le programme *RETC (PC-Progress)* permettant de

prédire et analyser les fonctions de conductivité et de rétention d'eau pour des sols insaturés. Le modèle de *Van Genuchten* a été sélectionné, ce qui a permis d'obtenir les paramètres composant l'équation du même nom,

$$Se = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1+(\alpha h)^n]^m} \Rightarrow \theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1+(\alpha h)^n]^m}$$

Il s'agit de l'équation du degré de saturation Se permettant d'obtenir l'équation de la teneur en eau pondérale à une certaine pression $\theta(h)$. Sont repris au sein des ces équations la hauteur de pression h [cm], les teneurs en eau pondérales résiduelles et à saturation θ_r et θ_s [cm³cm⁻³], un paramètre d'entrée d'air α [cm⁻¹] et deux paramètres de forme n [-] et m [-]. Où,

$$m = 1 - \frac{1}{n}.$$

(Vereecken et al., 2010 ; Startsev & McNabb, 2001)

Dès lors, les courbes de rétention ajustées selon le modèle de Van Genuchten ont été obtenues.

Ensuite, la mesure quantitative des variations de la courbe de la rétention en eau des sols est obtenue en dérivant $\theta(h)$ comme suit,

$$\frac{d\theta}{dh} = - \frac{\theta_s - \theta_r}{[1+(\alpha h)^n]^m} \left\{ \frac{m}{[1+(\alpha h)^n]} \right\} (\alpha h)^{\frac{n}{h}}$$

(Vereecken et al., 2010)

De là, la *loi de Jurin* permet de relier chaque pression h au plus grand rayon effectif de pore contenant de l'eau r ,

$$r = \frac{2\sigma \cos(\gamma)}{\rho g h} \Rightarrow h = \frac{2\sigma \cos(\gamma)}{\rho g r}$$

où σ est la tension superficielle de l'eau [N cm⁻¹] et γ est l'angle de contact entre la paroi du pore et l'eau [°], ρ est la masse volumique de l'eau [g cm⁻³] et g est l'intensité de la pesanteur [N kg⁻¹]. Le tableau 7 reprend les pressions associées à leur rayon correspondant.

Tableau 7 : Pressions appliquées exprimées en hectopascal [hPa], en picofarad [pF] et rayons [mm] correspondant obtenus selon la *loi de Jurin*.

| Pression (hPa) | Pression (pF) | Rayon (mm) |
|----------------|---------------|------------|
| 0 | 0 | 1,5 |
| 10 | 1,00 | 0,15 |
| 40 | 1,60 | 0,0375 |
| 70 | 1,85 | 0,02145 |
| 100 | 2,00 | 0,015 |

| | | |
|--------|------|---------|
| 300 | 2,48 | 0,005 |
| 700 | 2,85 | 0,00215 |
| 1.000 | 3,00 | 0,0015 |
| 5.000 | 3,70 | 0,0003 |
| 15.000 | 4,18 | 0,0001 |

Ainsi, $\frac{d\theta}{dh}$ en fonction du rayon a été obtenu, il s'agit de la distribution de la taille des pores (Nimmo, 2013).

10. Distribution de la taille de pore (Porosimètre à intrusion de mercure)

10.1. Prélèvement et analyse des échantillons

Les prélèvements d'échantillons ont été réalisés les 3 mars et 20 avril 2022 pour, respectivement, la première et la seconde campagne. Ceci a été réalisé en prélevant des mottes de terres aux différentes zones, disposées ensuite à l'intérieur de sacs de congélation refermés d'un élastique. Au total, 9 échantillons ont été prélevés et placés au réfrigérateur à 4°C en attente de l'analyse.

Au préalable de l'analyse, les mottes de terre ont été fragmentées en morceaux de plus petite taille (maximum $\varnothing=9$ cm, L=2 cm ou $\varnothing=0,9$ cm, L=7 cm) (CARPOR ULiège, n.d.), disposés dans des barquettes en aluminium et mises à l'étuve à 100°C durant 48 heures (Naiken, 2016).

L'analyse des échantillons a été réalisée à l'aide du porosimètre à mercure *AutoPore IV (Micromeritics)* et a eu lieu au laboratoire de *Physique et Mécanique des sols (Axe Échanges Eau-Sol-Plantes)*.

10.2. Traitement des données

A l'issue de l'analyse, les valeurs d'intrusion du mercure dans l'échantillon au fur et à mesure de la hausse de pression sont fournies et les valeurs d'intrusion différentielle logarithmiques en fonction du rayon de pore ont été conservées pour en déduire la distribution de la taille de pore.

11. Distribution de la taille de pores (Microtomographe à rayons X)

11.1. Prélèvement et scan des échantillons

Les prélèvements d'échantillons ont été réalisés les 2 mars et 16 avril 2022 pour, respectivement, la première et la seconde campagne. Ceci, selon la méthode de prélèvement en structure conservée (Losseau, 2013), à l'aide d'anneaux en Ertalon ($\varnothing = 3$ cm, h = 5 cm). Au total, 18 échantillons ont été prélevés puis conservés au réfrigérateur à 4°C en attente d'analyse.

Ensuite, huit jours avant l'analyse, des plaques de céramique basse pression ont été mises à saturation dans l'eau distillée. 48 heures plus tard, les échantillons ont été pesés maintenus à l'aide d'une étamine saturée d'eau distillée et ensuite placés, durant 5 jours, dans un appareil de Richard à 1.000 hPa afin de vider l'eau des macropores et d'une partie des mésopores. Les échantillons ont à nouveau été pesés en sortie de l'appareil.

L'analyse des échantillons a été réalisée à la plateforme *CARPOR (Laboratory of Chemical Engineering - ULiège)*. L'appareil de microscopie 3D à rayons X *SkyScan1172 (Bruker)*, a été utilisé (figure 8). Ainsi, une fois l'échantillon placé dans l'appareil, un préfix lui a été attribué et la zone d'analyse au sein de l'échantillon a été définie. De plus, la résolution a été fixée à 27,282 microns ce qui permet de visualiser jusque dans la mésoporosité (10-100 microns). Le programme d'acquisition qui a été utilisé est le *SkyScan1172*.

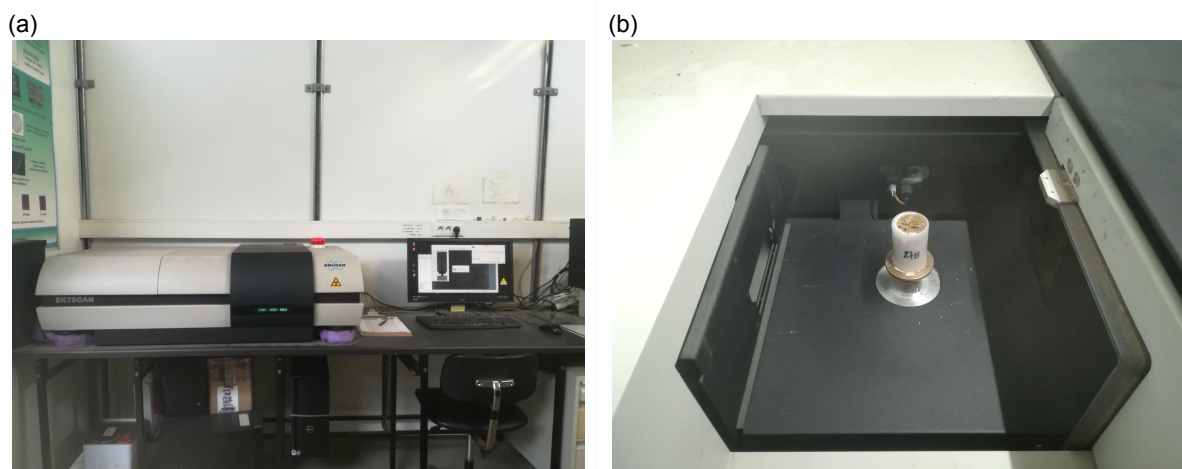


Figure 8 : Microtomographe à rayons X (a) et échantillon placé dans le microtomographe (b).

11.2. Traitement des images et analyse des données

La reconstruction des images acquises a été réalisée à l'aide du programme *NRecon 1.7.3.1*.

L'ensemble des caractéristiques de l'appareil utilisé ainsi que les paramètres sélectionnés pour l'analyse et pour la reconstruction sont repris dans l'annexe 3.

Ensuite, les images reconstruites ont été chargées sur le logiciel *ImageJ (FIJI)*. Dans un premier temps, un filtre médian de 2 pixels de rayon (Beckers et al., 2014, Smet et al., 2018) leur a été appliqué afin d'en réduire le bruit. Pour la segmentation, la méthode de seuillage d'Otsu a été choisie. Enfin, via la fonction *PoreSpaceAnalyzer* du plugin *SoiIJ* (Doube et al., 2010 ; Koestel, 2018), le volume (en voxel) de chaque pore de l'échantillon a été obtenu. Celui-ci a été converti en millimètre et le rayon en a été déduit ainsi que la fréquence de pore.

12. Traitement statistique

Le traitement des données a été réalisé via des analyses de la variance (*ANOVA*) sur le logiciel *SAS*, à l'aide de la procédure *GLM* (type III) qui permet de traiter des bases de données de tailles variables. En outre, l'option *UNPACK* a été utilisée afin de vérifier les conditions d'application (d'indépendance, d'homogénéité des variances et de normalité) a posteriori sur les résidus lorsque, notamment, le nombre d'observations n'est pas suffisant par population (une population = système * bloc).

Dans un premier temps, une *ANOVA* à 4 facteurs² partiellement hiérarchisée mixte a été réalisée pour comparer les campagnes ainsi que les systèmes indistinctement des deux campagnes.

Ensuite, une *ANOVA* à 2 facteurs³ croisée mixte a été réalisée afin de comparer les systèmes au sein des deux campagnes.

Dans les cas où les conditions d'application n'ont pas été remplies, une transformation logarithmique des variables a été réalisée pour les *ANOVA* 4. Concernant les *ANOVA* 2, le faible nombre d'observations par population ne permet pas de rentrer dans les conditions d'application.

La p-valeur a été fixée à 0,05, valeur au-delà de laquelle l'hypothèse nulle d'égalité des moyennes est acceptée.

A l'inverse, elle est rejetée lorsque la p-valeur est inférieure à 0,5. Les différences entre les moyennes sont alors qualifiées de significatives si la p-valeur est comprise entre 0,05 et 0,01 (*), hautement significatives lorsqu'elle est comprise entre 0,001 et 0,01 (**), et très hautement significatives quand elle est inférieure à 0,001 (***).

Lorsque l'hypothèse nulle est rejetée, un calcul de l'intervalle de confiance autour de la différence significative entre les deux campagnes a été effectué tandis qu'un test de Student, Newman et Keuls (SNK) a été appliqué afin de déterminer les similarités ou différences entre les systèmes sur base de leur moyenne.

² Facteurs fixes : campagne, système ; Facteurs aléatoires : bloc, parcelle (hiérarchisée à bloc).

³ Facteur fixe : système ; Facteur aléatoire : bloc.

Résultats et discussion

1. Stock de carbone organique (CO) dans le sol, teneur en argiles et ratio CO:argiles

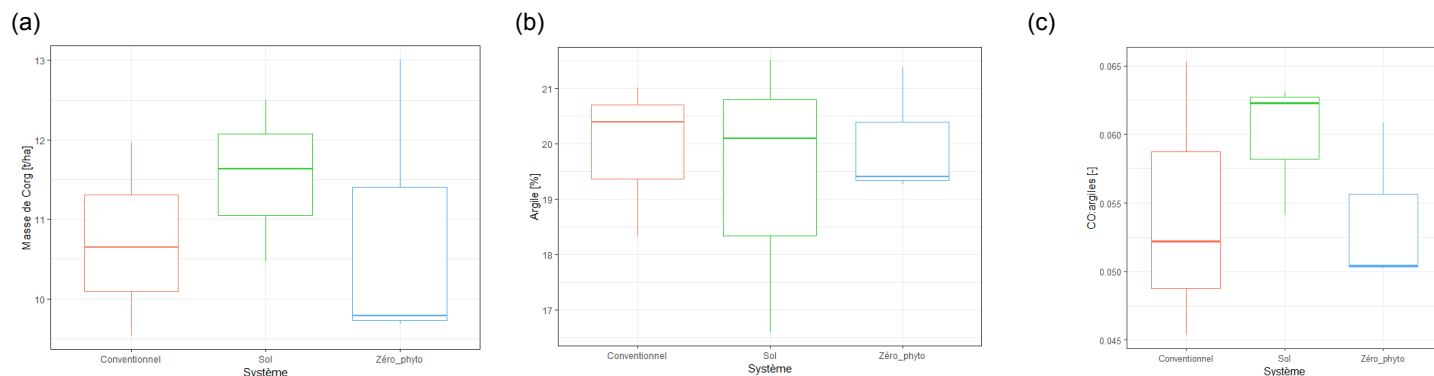


Figure 9 : Boxplots de la masse de CO sur l'horizon 0 - 7,4 cm (a), teneur en argiles (b) du ratio CO:argiles (c) en fonction des trois systèmes.

Il n'y a pas de différence significative entre les systèmes que ce soit pour la masse de carbone organique (CO), la teneur en argiles ou le ratio CO:argiles sur l'horizon 0 - 7,4 cm.

Toutefois, des différences existent entre les systèmes comme l'illustre la figure 9. En effet, le système *Sol* présente une teneur en CO plus importante en surface ce qui peut s'expliquer par le fait que les feuilles du précédent betterave n'ont pas été enfouies après récolte. A l'inverse, le précédent prairie du système *Zéro phyto* a été labouré, enfouissant et répartissant la matière organique sur tout le profil, raison pour laquelle ce système montre un stock de CO moins important en surface. Pour vérifier cela, la figure 10 montre les stocks de carbone cumulés en fonction de la profondeur. Enfin, concernant le système *Conventionnel*, le labour et le décompactage sur les vingt premiers centimètres après le précédent pomme de terre a pu mener à un taux accru de minéralisation de la matière organique du sol, raison pour laquelle, il accuse de plus faibles teneurs de CO sur l'ensemble de la profondeur échantillonnée.

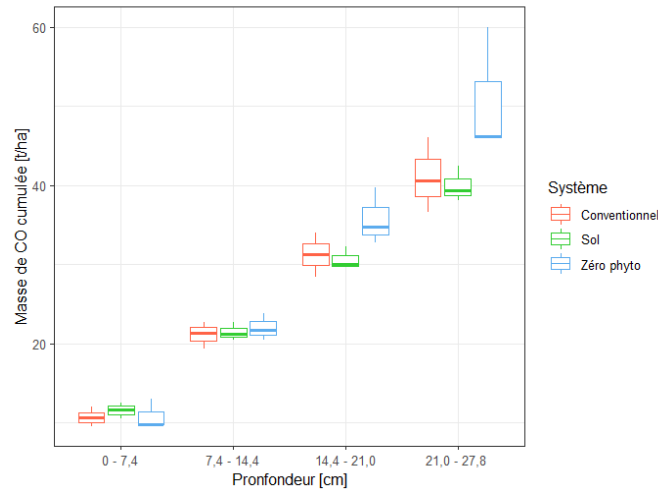


Figure 10 : Boxplot de l'évolution du stock de CO avec la profondeur.

Les différences observées entre les ratios CO:argiles semblent directement découler de la différence de stock de CO entre les systèmes. En effet, le pourcentage d'argiles varie faiblement entre les systèmes ce qui s'explique par la proximité des parcelles entre elles.

Ensuite, le tableau 8 reprend les teneurs moyennes en CO sur différentes profondeurs. Le précédent prairie du système *Zéro phyto* semble encore fortement impacter les résultats. De plus, ce tableau illustre le fait que les trois systèmes présentent des teneurs en CO inférieures au seuil de 2% en deçà duquel les sols ont une stabilité moindre et deviennent vulnérables à l'érosion (Shi et al., 2020).

Tableau 8 : Teneurs moyennes de CO [%] entre 0 - 7,4 cm et 0 - 27,8 cm.

| Système | Teneur moyenne en CO entre 0 - 7,4cm | Teneur moyenne en CO entre 0 - 27,8 cm |
|----------------------|--------------------------------------|--|
| <i>Conventionnel</i> | 1,07 | 1,03 |
| <i>Sol</i> | 1,15 | 1,00 |
| <i>Zéro phyto</i> | 1,08 | 1,27 |

Enfin, en prêtant attention aux différents seuils de ratio CO:argile fixés par Johannes et al. (2017), il s'avère, pour tous les systèmes, que les ratio CO:argile sont inférieurs à 1/13 ce qui traduit une mauvaise stabilité structurale.

2. Densité apparente (Q_{Ech} , Q_{ESM} , Q_{pF})

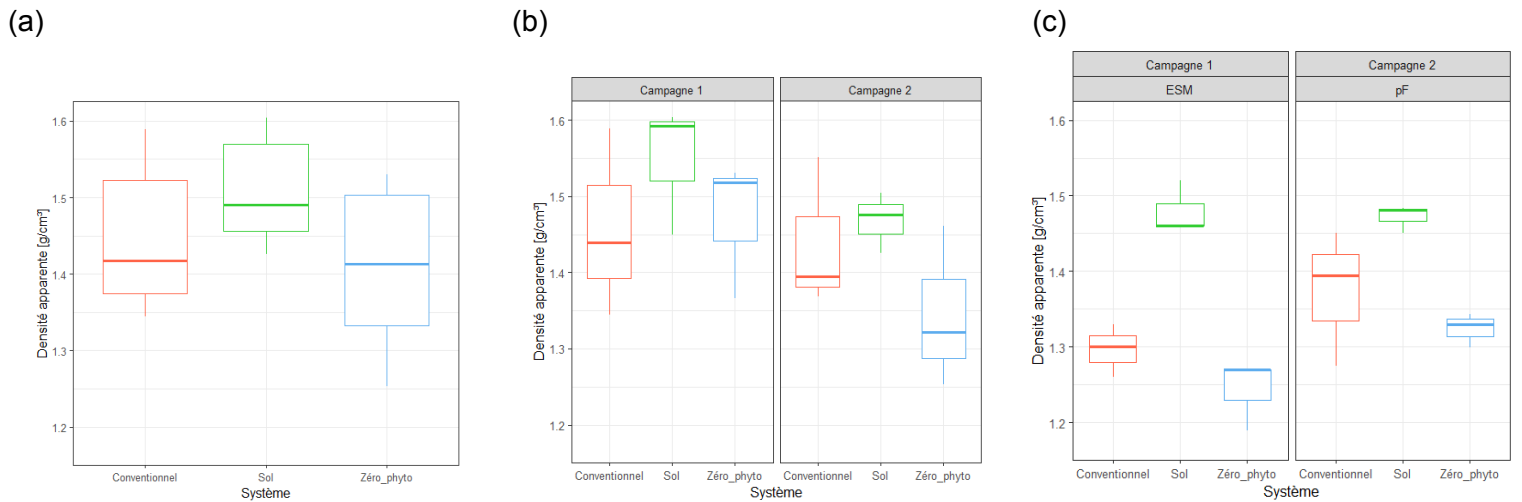


Figure 11 : Boxplots de ρ_{Ech} pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a), au sein de chacune des deux campagnes (b) et comparaison avec ρ_{ESM} (première campagne) et ρ_{pF} (seconde campagne) (c).

2.1. Q_{Ech}

Les résultats ne sont pas significativement différents que ce soit entre les deux campagnes, entre les trois systèmes ou entre les trois systèmes au sein de chaque campagne.

2.2. Q_{ESM}

Les résultats sont significativement différents entre les systèmes de la première campagne (***).

Le test SNK montre que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de leurs moyennes similaires et diffèrent du système *Sol*.

2.3. Q_{pF}

Les résultats sont significativement différents entre les systèmes de la seconde campagne (*).

Le test SNK montre que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de leurs moyennes similaires et diffèrent du système *Sol*.

Qu'importe la campagne, le système *Sol* s'avère toujours être le plus dense du fait de l'absence de labour ce qui rejoint l'étude de Li et al. (2020) selon laquelle l'absence du travail du sol augmente sa densité apparente et la rend supérieure de 3,7% à celle du labour, du moins lorsque la durée des expériences est inférieure à douze ans.

Néanmoins, on aurait pu s'attendre à une densité apparente moindre du fait de la teneur en CO supérieure en surface (Logsdon et al., 2013) qu'affiche le système *Sol*. Dès lors, il aurait été intéressant de connaître la manière dont ce CO est réparti sur la couche 0 - 7,4 cm.

Ensuite, dans trois des quatre techniques de détermination de la densité apparente, le système *Zéro phyto* montre de moindres densités apparentes au deux campagnes ce qui pourrait s'expliquer de par le précédent prairie ayant généré une porosité totale plus importante.

Enfin, concernant les différentes méthodes utilisées, les ρ_{Ech} et ρ_{ESM} affichent des résultats forts différents. Il n'est pas possible de départager les techniques avec les informations à disposition. Toutefois, la variabilité des données semble moindre pour ρ_{ESM} . Cela peut être lié au fait que cette dernière a été calculée à partir de prélèvements réalisés en six zones de chaque parcelle contre deux zones pour ρ_{Ech} . Cette différence de résultats peut aussi s'expliquer par la différence de taille des différents échantillons prélevés.

En effet, si la densité apparente peut être calculée au départ de différents types d'échantillonnages, destinés à différentes mesures plus élaborées (courbe de rétention en eau, conductivité hydraulique, ...) la taille des échantillons concernés varie car elle est adaptée à la mesure en question. Le fait que les résultats, en termes de densité apparente, présentent des différences importantes suggère que la taille des échantillons influence le résultat. Il peut s'agir d'un problème de représentativité (REV) lié au volume total échantillonné ou d'un problème de dimension (hauteur) qui affecte les résultats.

3. Résistance à la pénétration (RSP_0 et RSP_5)

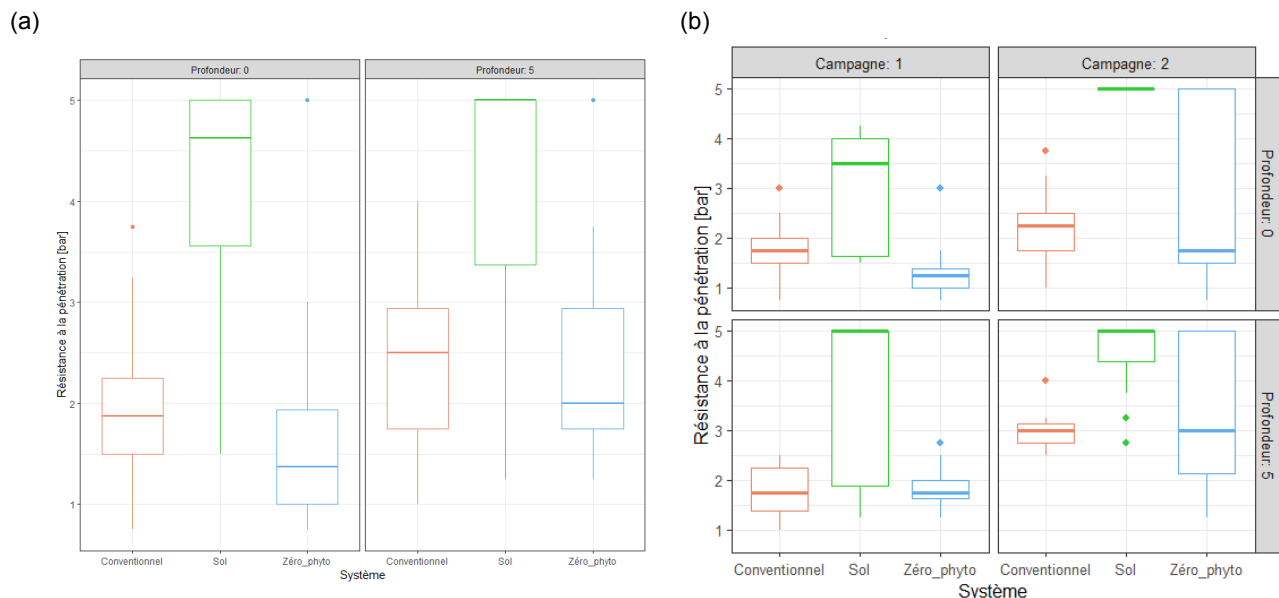


Figure 12 : Boxplots de la résistance à la pénétration à la surface (0) et à 5 cm de profondeur (5) indistinctement des deux campagnes (a) et au sein de chacune des deux campagnes (b).

3.1. A la surface (RSP₀)

Les résultats sont significativement différents entre les deux campagnes (*, confirmé par le calcul de l'intervalle de confiance) ainsi qu'entre les systèmes (*).

Le test SNK montre que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de leurs moyennes similaires et diffèrent du système *Sol*.

Néanmoins, au sein de chacune des deux campagnes, les systèmes ne sont pas significativement différents.

3.2. A 5 cm de profondeur (RSP₅)

Les résultats ne sont pas significativement différents entre les deux campagnes mais bien entre les systèmes (*).

Le test SNK montre que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de leurs moyennes similaires et diffèrent du système *Sol*.

Néanmoins, au sein de chacune des deux campagnes, les systèmes ne sont pas significativement différents.

A nouveau, le système *Sol* présente des valeurs plus élevées, ici, concernant la résistance à la pénétration. Cela rejoint les résultats de l'étude de Li et al. (2020) selon lesquels la résistance à la pénétration en surface augmente de 27,8 % en cas d'absence du travail du sol comparé au *Conventionnel*.

Néanmoins, l'utilisation du pénétromètre de poche ne donne que des résultats indicatifs notamment de par le fait que la gamme de pression pouvant être appliquée ne va pas au-delà de 4,5 bar. Cela s'est montré être insuffisant pour le système *Sol*.

4. Stabilité structurale du sol (Slake test et méthode Le Bissonnais)

4.1. T_{max}

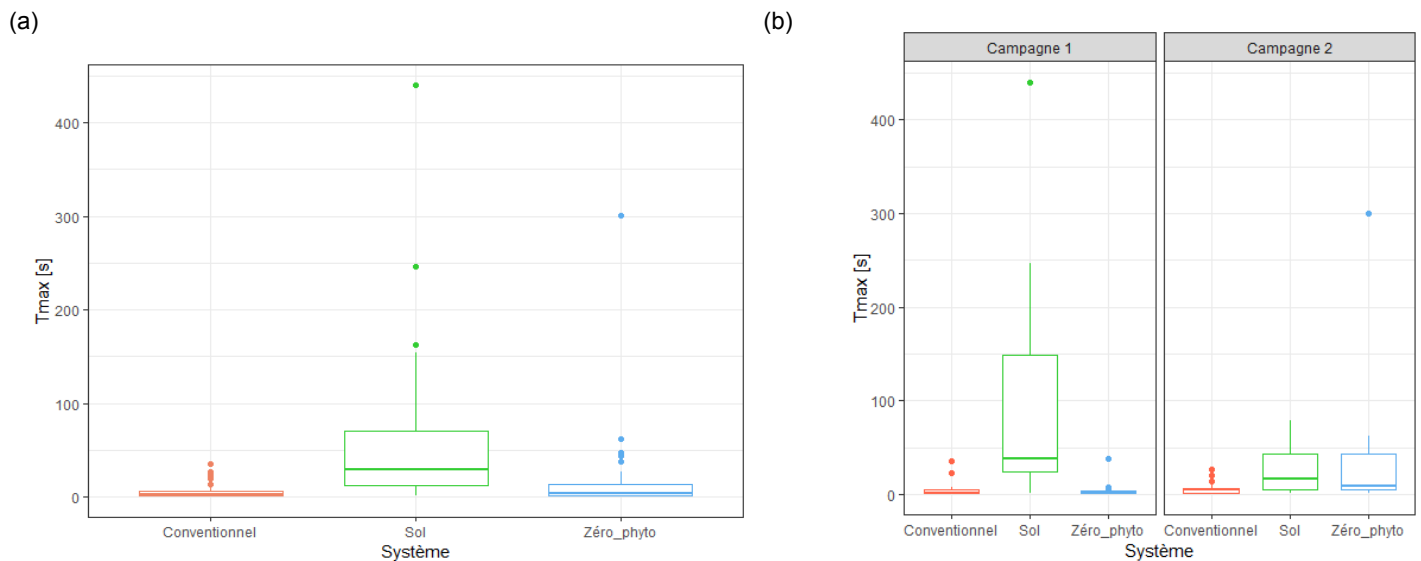


Figure 13 : Boxplots de l'indicateur T_{max} généré par les slake tests pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et au sein de chacune des deux campagnes (b).

Les résultats ne sont pas significativement différents entre les deux campagnes ni entre les trois systèmes à l'échelle des deux campagnes.

Toutefois, au sein de la première campagne, il existe une différence significative entre les trois systèmes (***).

Le test SNK montre que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de moyennes similaires et différent du système *Sol*.

Concernant la seconde campagne, les résultats ne sont pas significativement différents entre les systèmes.

Pour rappel, T_{max} correspond au temps nécessaire pour atteindre T_{max} , le poids maximal pesé par la balance. D'après la figure 13, les échantillons du système *Sol* de la première campagne prennent donc, en moyenne, plus de temps que les autres systèmes pour atteindre leur poids maximal ce qui pourrait vouloir dire que les pores mettent plus de temps à se remplir d'eau et donc le phénomène de *slaking* et la désagrégation qui s'accompagnent d'une diminution du poids enregistré par la balance sont retardés par rapport aux autres systèmes.

Quatre hypothèses permettent d'expliquer ce phénomène.

La première est le nombre de pores présents dans chaque échantillon. Le système *Sol* pourrait être pourvu d'un nombre plus important de pores que les autres systèmes.

La deuxième est la proportion de macropores et micropores présents dans chaque échantillon. Le système *Sol* pourrait contenir une plus grande fraction de micropores reliés entre eux par des canaux plus longs et tortueux. Ces deux premières hypothèses peuvent être infirmées de par une valeur de la densité apparente plus importante comparé aux systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto*.

La troisième hypothèse est la meilleure agrégation des microagrégats et particules primaires en macroagrégats grâce aux agents organiques liants issus de la teneur en CO plus importante en surface du système *Sol* (Shi et al., 2020).

La dernière est la légère hydrophobicité des agrégats pouvant être également octroyée par une teneur en CO plus conséquente (Logsdon et al., 2013).

A la seconde campagne, l'allègement naturel des sols du système *Sol* grâce notamment au développement racinaire, d'autant plus épais du fait de son développement dans un sol plus compact, a permis d'accroître sa macroporosité. En effet, selon l'étude de Correa et al. (2019), le diamètre des racines a tendance à augmenter dans des sols compactés (phénomène de plasticité adaptative). Par conséquent, T_{max} du système *Sol* diminue et s'aligne sur les T_{max} des systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto*.

4.2. $W_{max}-W_{t0}$ et W_{end}

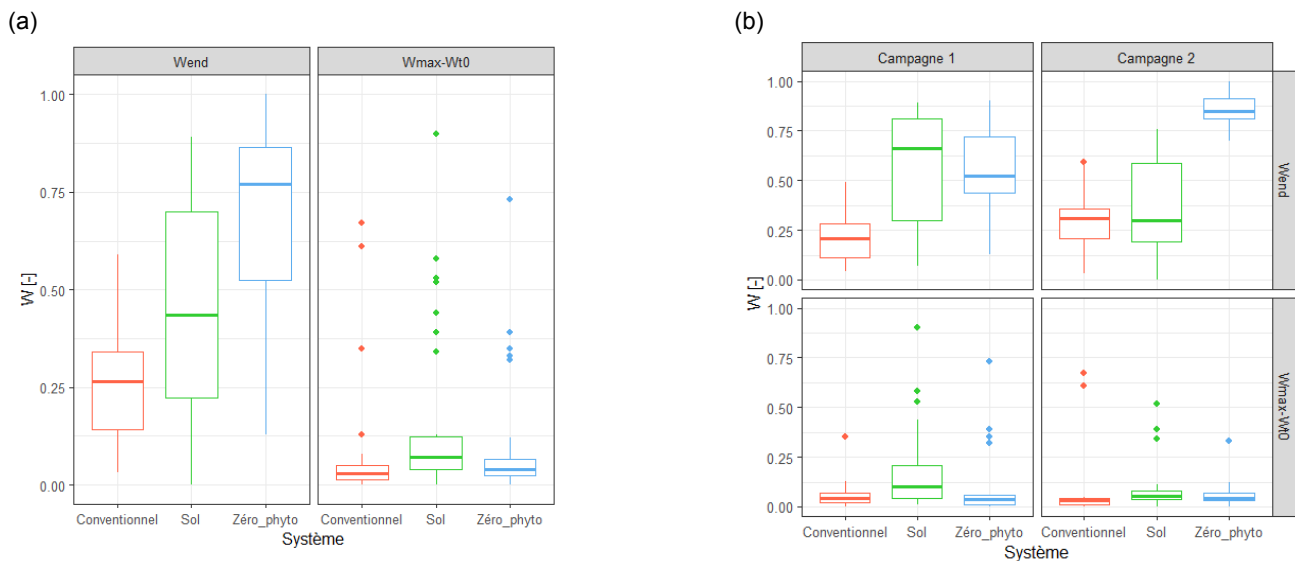


Figure 14 : Boxplots des indicateurs $W_{max}-W_{t0}$ et W_{end} des slake tests pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et au sein de chacune des deux campagnes (b).

Pour $W_{max}-W_{t0}$, les résultats ne sont pas significativement différents que ce soit entre les deux campagnes, entre les trois systèmes et entre les trois systèmes au sein de chaque campagne.

Pour W_{end} , les résultats ne sont pas significativement différents entre les deux campagnes mais bien entre les trois systèmes à l'échelle des deux campagnes (*)

Le test SNK montre que les systèmes *Sol*, *Conventionnel* et *Zéro phyto* possèdent des moyennes significativement différentes les unes des autres.

Ensuite, au sein de la première campagne, il existe une différence significative entre les trois systèmes (*).

En réalisant le test SNK, on observe que les systèmes *Sol* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de moyennes similaires et différent du système *Conventionnel*.

En ce qui concerne la seconde campagne, il existe une différence significative au niveau des systèmes (**).

En réalisant le test SNK, on observe que les systèmes *Sol* et *Conventionnel* se regroupent du fait de moyennes similaires et différent du système *Zéro phyto*.

Pour W_{end} , en confondant les deux campagnes, on constate que les trois systèmes sont distincts les uns des autres avec le système *Conventionnel* qui montre les masses les plus faibles en fin de test, le système *Zéro phyto* les masses les plus hautes et le système *Sol* comme intermédiaire. Cela témoigne d'une stabilité structurale moindre du système *Conventionnel*.

Lorsqu'on observe l'évolution entre les deux campagnes, on voit que le système *Sol* présente un poids final plus important à la première campagne qui est réduit de plus de 40 % à la seconde campagne. Le système *Zéro phyto* voit, quant à lui, son W_{end} augmenter de plus de 40 %, ce qui va à l'encontre des résultats obtenus pour la densité apparente et les taux de CO. Cela laisse à penser qu'il pourrait y avoir un autre facteur d'agrégation. Enfin, le système *Conventionnel* augmente légèrement à la seconde campagne.

Il y a deux hypothèses permettant d'expliquer ce phénomène.

La première hypothèse concerne la densité de semis. En effet, les densités de semis des systèmes *Conventionnel*, *Sol* et *Zéro Phyto* sont respectivement de 130, 235 et 175 kg ha⁻¹. Le système *Sol* a donc la plus grande densité de semis. Cependant, il y a eu beaucoup de pertes comme en témoigne la figure 15a1. Ensuite, la culture a été semée plus densément en *Zéro phyto* qu'en *Conventionnel* pour anticiper les dégâts occasionnés aux cultures par le désherbage mécanique qui n'a finalement pas eu lieu.

La densité de plants plus importante probablement engendrée en *Zéro phyto* a pu conduire à un développement accru du système racinaire et de la production de glomaline, glycoprotéine produite par les mycorhizes à arbuscules présente dans la rhizosphère. Ces protéines semblent être corrélées à une stabilité accrue des agrégats confrontés à l'eau (Rillig, 2004).

Afin de corroborer le lien avec le développement racinaire, des fosses d'environ 25 cm de profondeur ont été réalisées sur les parcelles le 28 juillet (Figure 15).

Sur base de cette figure, à la date du 21 avril, le système *Sol* montre une densité de plants bien moindre comparé aux deux autres systèmes laissant le sol à nu sur plusieurs tronçons des lignes de semis et sur les interlignes. Cette densité de plants moindre s'observe toujours le 28 juillet (a3 contre b3 et c3).

Ensuite, la fosse du système *Sol* (a2) montre une ligne nette à 20 cm sur le mètre en dessous de laquelle la terre semble plus humide. Cela est moins évident à distinguer sur les deux autres photos (b2 et c2). Enfin, il semblerait qu'il n'y ait pas réellement de différenciation nette des sols en fonction des systèmes. Cela tient certainement de l'âge encore peu avancé de l'essai.

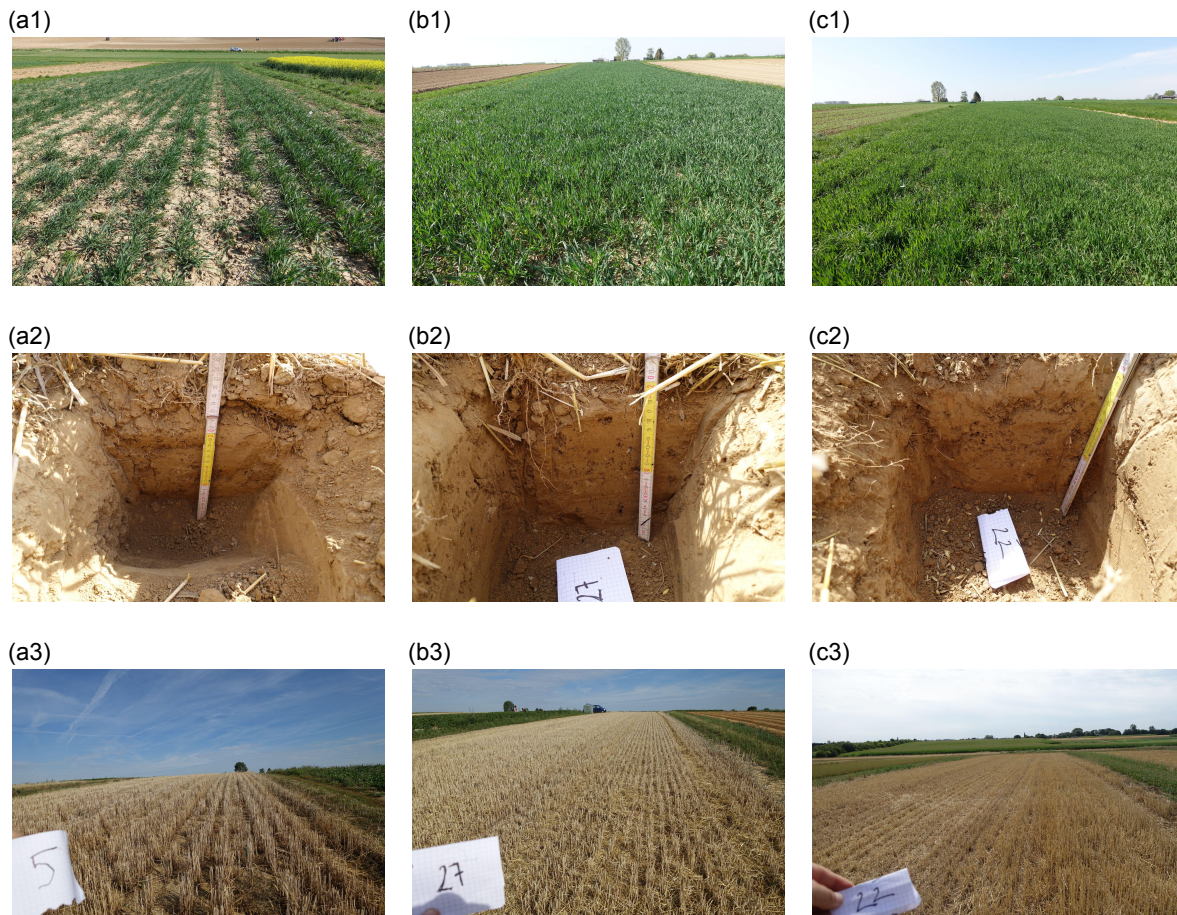


Figure 15 : Photos des parcelles le 21 avril en *Sol* (a1), conventionnel (b1) et zéro phyto (c1), des fosses et des parcelles le 28 juillet en *Sol* (a2 et a3), en conventionnel (b2 et b3) et en zéro phyto (c2 et c3).

La seconde hypothèse concerne la fertilisation azotée. En effet, les systèmes *Conventionnel* et *Sol* ont reçu 300 unités d'azote réparties en, respectivement, trois et quatre doses tandis que le système *Zéro phyto* n'en a reçu que 270 réparties en trois doses. Il ne s'agit pas là d'une grande différence cependant, l'étude de Are et al. (2018), met en avant l'existence d'une corrélation négative entre le pourcentage d'azote total et la stabilité des agrégats dans l'eau. Cela provient du fait qu'une augmentation des teneurs en engrais azotés entraîne une diminution du pH_{KCl} du sol.

Grâce aux analyses chimiques effectuées, l'hypothèse a pu être éprouvée. Avant toute chose, la différence de N_{tot} et des pH_{eau} et pH_{KCl} entre les systèmes n'est pas significative. Le tableau 9, reprend les moyennes de N_{tot} et des pH_{eau} et pH_{KCl} en fonction des systèmes. Le N_{tot} du système *Zéro phyto* ne diffère que d'un millième d'unité avec le système *Conventionnel* ce qui les départage difficilement. Concernant les valeurs de pH, le système

Zéro phyto montre des pH inférieurs aux deux autres systèmes ce qui achève de rejeter l'hypothèse précédemment émise.

Tableau 9 : Moyennes de N_{tot} [%], pH_{eau} et pH_{KCl} selon les systèmes.

| Système | N_{total} | pH_{eau} | pH_{KCl} |
|----------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| <i>Conventionnel</i> | 0,105 | 7,79 | 6,82 |
| <i>Sol</i> | 0,111 | 7,88 | 7,08 |
| <i>Zéro phyto</i> | 0,104 | 7,76 | 6,69 |

4.3. P_{30} , P_{60} , P_{300} et P_{600}

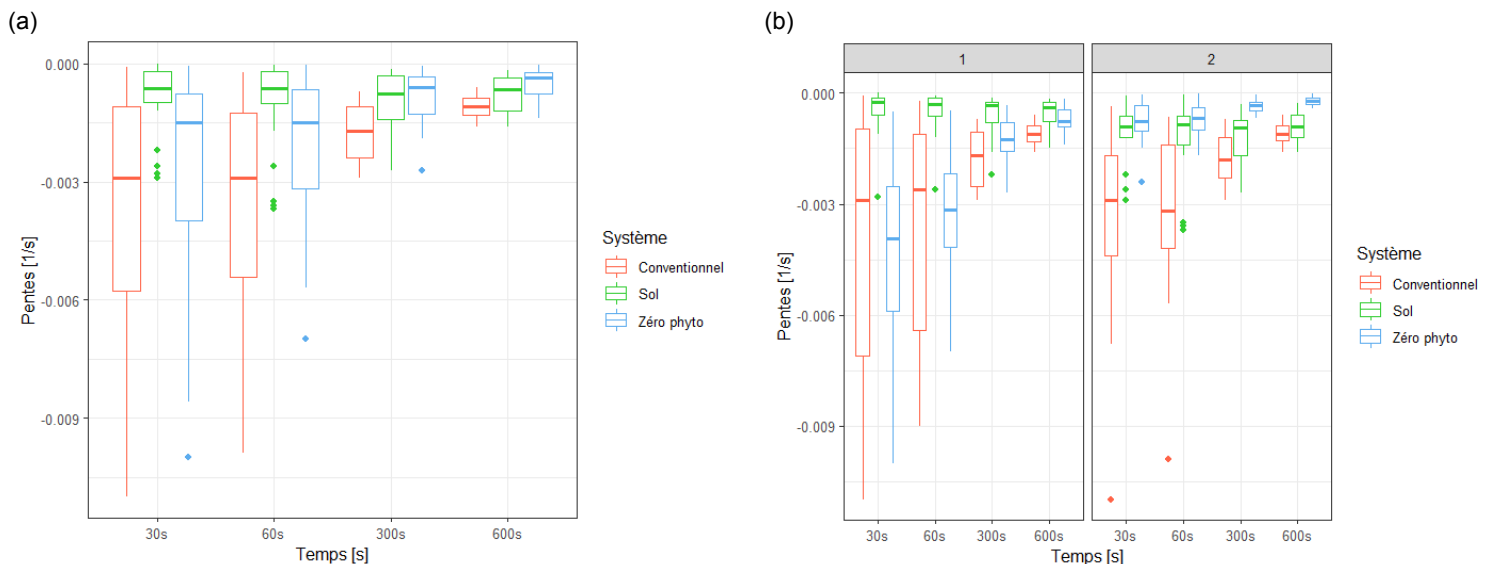


Figure 16 : Boxplots des indicateurs P_{30} , P_{60} , P_{300} et P_{600} des slake tests pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et au sein de chacune des deux campagnes (b).

Pour P_{30} , P_{60} et P_{300} , les résultats ne sont pas significativement différents entre les deux campagnes ni significativement différents entre les trois systèmes à l'échelle des deux campagnes.

Il en va de même entre les trois systèmes au sein de la première campagne.

Néanmoins, concernant la seconde campagne, il existe une différence significative entre les systèmes (* pour les P_{30} et P_{60} et ** pour la P_{300})

Le test SNK montre que les systèmes *Sol* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de moyennes similaires et diffèrent du système *Conventionnel*.

Pour P_{600} , les résultats ne sont pas significativement différents entre les deux campagnes mais bien entre les trois systèmes à l'échelle des deux campagnes (*)

En réalisant le test SNK, on observe que les systèmes *Sol*, *Conventionnel* et *Zéro phyto* possèdent des moyennes significativement différentes les unes des autres.

Il en va de même entre les systèmes de la première campagne (*).

Le test SNK montre que les systèmes *Sol* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de moyennes similaires et diffèrent du système *Conventionnel*.

Concernant la seconde campagne, il existe également une différence significative au niveau des systèmes (**).

En réalisant le test SNK, on observe que les systèmes *Sol* et *Conv* se regroupent du fait de moyennes similaires et diffèrent du système *Zéro phyto*.

Lors de la seconde campagne, le système *Zéro phyto* supplante le système *Sol* en arborant des pentes dont les valeurs restent très faibles tout au long de l'expérience. A l'inverse, les pentes du système *Conventionnel* sont importantes au début (- 0,0003 s⁻¹, bien qu'il y ait beaucoup de variabilité) et décroissent fortement au fil de l'expérience ce qui rejoint le fait d'avoir obtenu de faibles W_{end} . D'ailleurs, l'étude de Vanwindekens et al. (2020) vient appuyer ces observations en démontrant le fait que l'effet du labour tel que réalisé dans les systèmes conventionnels mène à un plus haut taux de désagrégation du sol. Au contraire, le système *Sol* montre des pentes entre 30 et 300 secondes similaires au système *Zéro phyto*, alors que son W_{end} est similaire au système *Conventionnel*. Bien que *Sol* et *Conventionnel* adoptent des pentes similaires à 600 secondes, cela ne semble pas suffisant pour expliquer une telle désagrégation des échantillons en *Sol*.

4.4. AUC

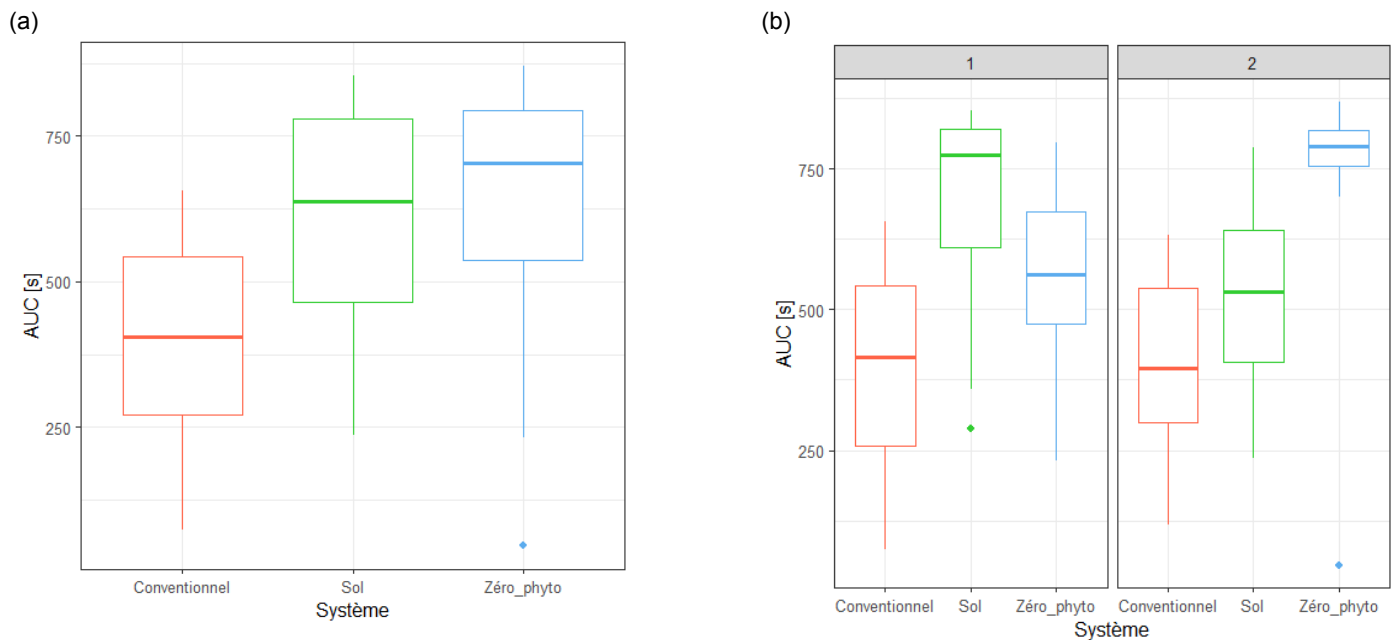


Figure 17 : Boxplots de l'indicateur AUC pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et au sein de chacune des deux campagnes (b).

Les résultats ne sont pas significativement différents entre les deux campagnes ni significativement différents entre les trois systèmes à l'échelle des deux campagnes.

Il en va de même entre les systèmes de la première campagne.

Concernant la seconde campagne, il existe une différence significative entre les systèmes (*).

Le test de Newman et Keuls montre que les systèmes *Sol* et *Conventionnel* se regroupent du fait de moyennes similaires et différent du système *Zéro phyto*.

Les résultats obtenus pour la AUC sont en adéquation avec les résultats obtenus pour W_{end} et P_{600} .

A l'avenir, il serait intéressant de s'attacher à relier plus finement les phénomènes observés tout au long de la courbe et la porosité réelle des échantillons.

4.5. Le Bissonnais

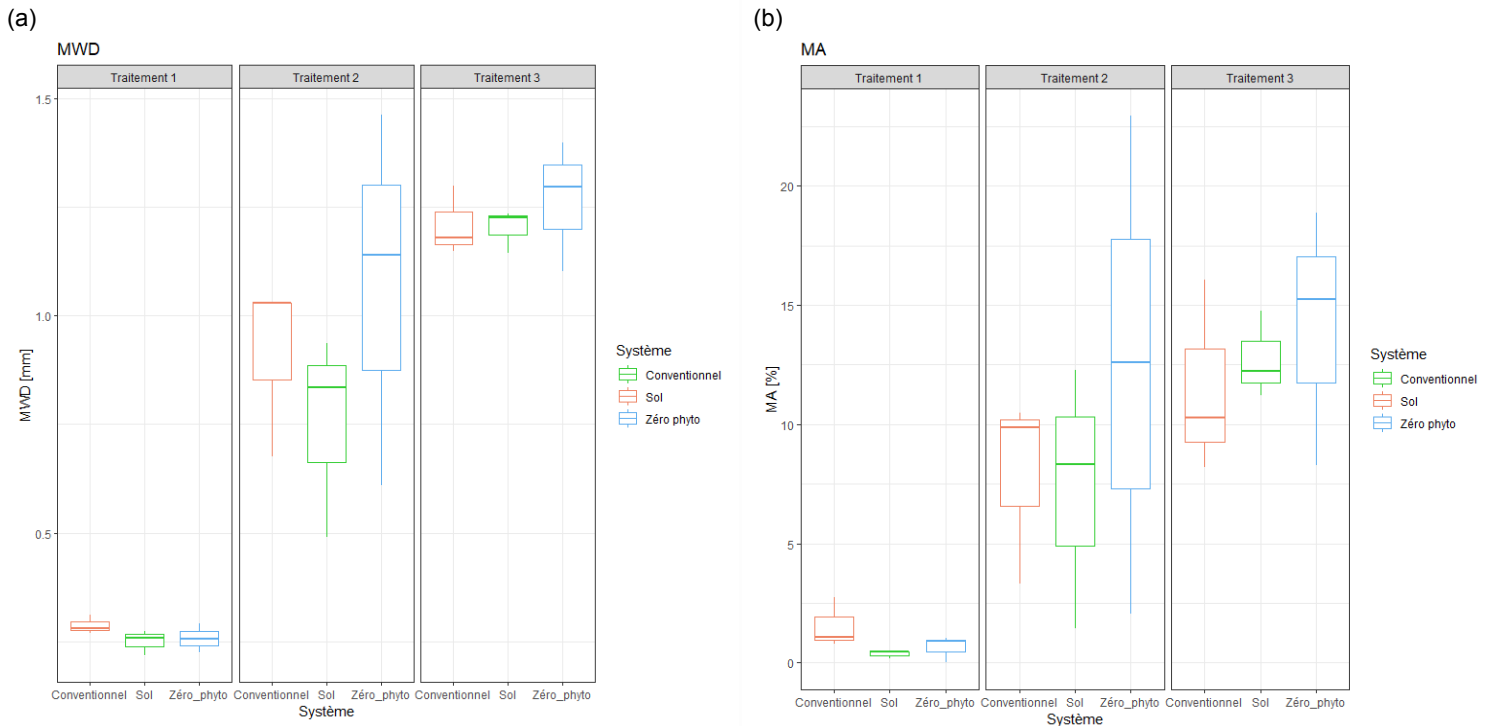


Figure 18 : Boxplots de MWD (a) et MA (b) pour la zone 0 - 9 cm pour les trois traitements. Traitement 1 : humectation rapide ; Traitement 2 : humectation lente ; Traitement 3 : désagrégation mécanique d'agrégats mouillés.

Les résultats ne sont pas significativement différents entre les systèmes que ce soit pour MWD ou MA.

Bien qu'aucune différence significative n'a été observée, la MWD ainsi que le MA présentent des valeurs plus importantes en *Zéro phyto* pour les traitements 2 et 3. Cela signifie que les agrégats de ce système possèdent une plus grande stabilité face à des pluies modérées et une meilleure cohésion une fois mouillés. Cela rejoint, ce qui a été observé plutôt à la seconde campagne pour les indicateurs W_{end} , P_{30} à P_{600} et AUC. On pourrait émettre l'hypothèse que cette stabilité structurale a été accentuée à la seconde campagne en *Zéro phyto* ou du moins, que les effets ne s'en sont fait ressentir qu'à partir de ce moment-là. Cependant, cela reste bien trop hypothétique.

A l'inverse, le système sol présente des valeurs de MWD et de MA au traitement 2 inférieures aux deux autres systèmes. Or, selon l'étude de Shi et al. (2020), les MWD et MA auraient plutôt tendance à afficher des valeurs, respectivement, 50 et 36% supérieures en système non labouré comparé aux systèmes labourés.

Il aurait été intéressant d'évaluer la stabilité structurale par la méthode Le Bissonnais et de déterminer les stocks de carbone à la seconde campagne. D'une part, pour rendre compte de l'évolution de la stabilité structurale des parcelles et d'autre part, pour leur confronter les indicateurs issus des courbes du QST obtenues à la seconde campagne.

5. Courbe de conductivité hydraulique (Infiltromètre minidisc)

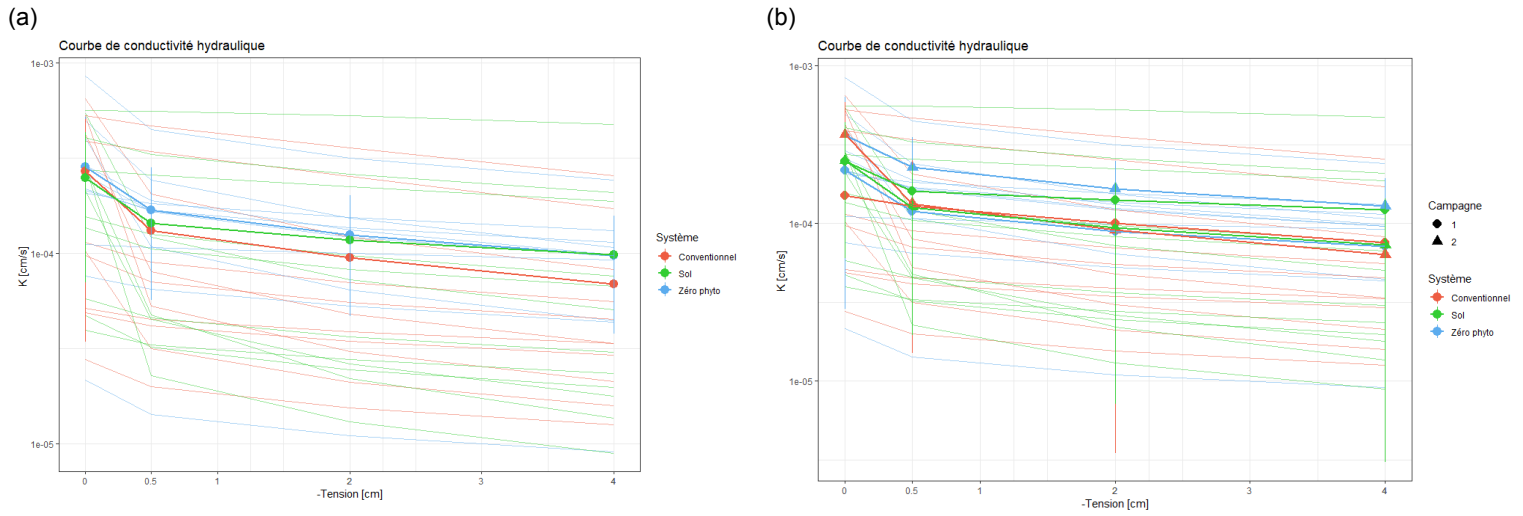


Figure 19 : Courbes de conductivité hydraulique et leurs courbes moyennes avec écarts-type pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (b) et au sein de chacune des deux campagnes (c).

Tout au long de la courbe, les résultats ne sont pas significativement différents que ce soit entre les deux campagnes, entre les trois systèmes et entre les trois systèmes au sein de chaque campagne.

L'absence de différence significative du K_{sat} entre les systèmes rejoint l'étude de Li et al. (2020) pour des expériences dont la durée est inférieure à trois ans. Néanmoins, bien que souvent considérée comme une propriété hydraulique majeure pour évaluer les flux d'eau dans les sols, le K_{sat} s'avère être hautement dépendant des conditions météorologiques et expérimentales ce qui la rend très variable à l'échelle des parcelles comme on peut le voir à la figure 19.

6. Courbe de rétention (points ajustés de la courbe) et distribution de la taille de pore (Appareil de Richard)

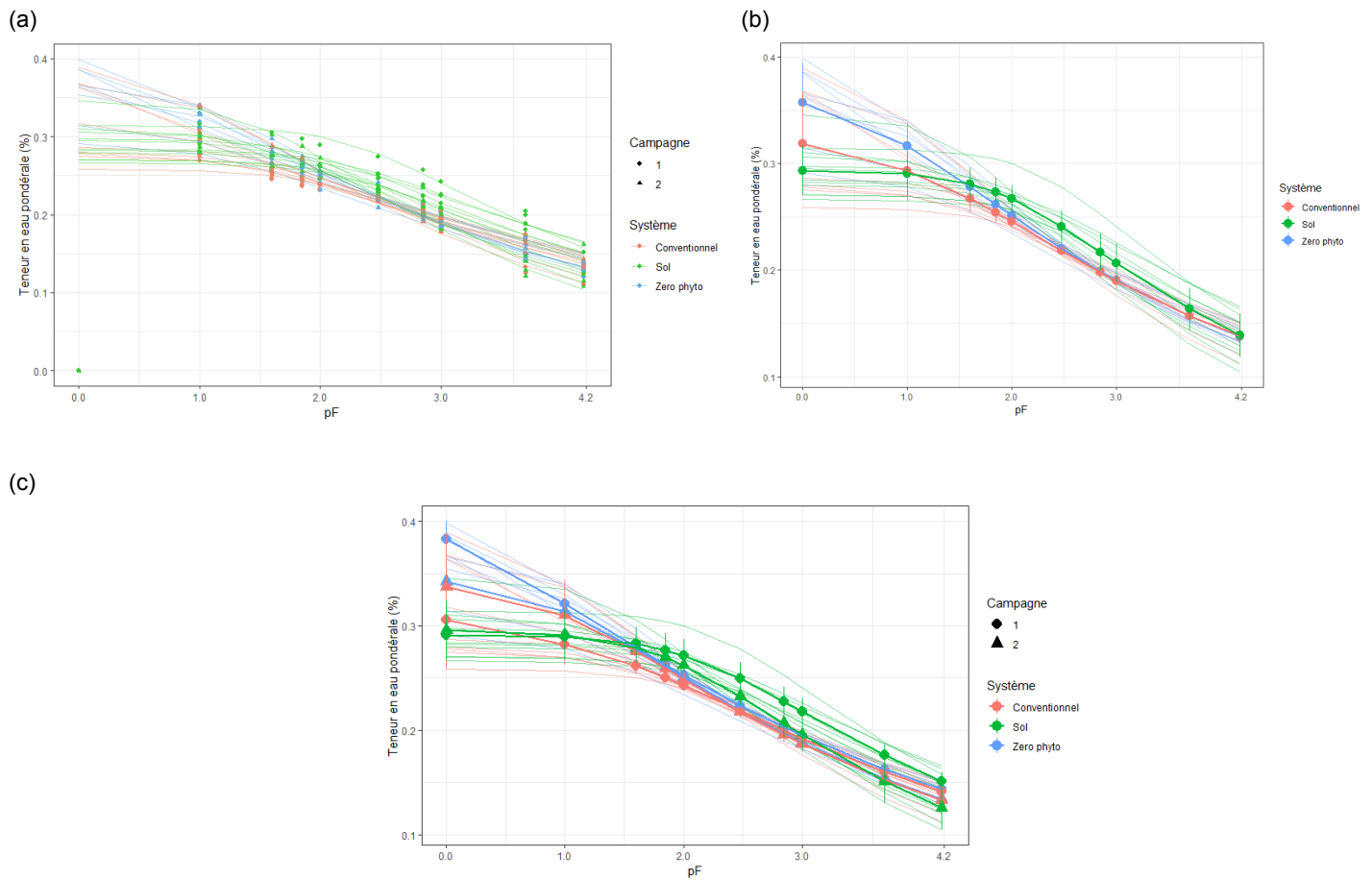


Figure 20 : Courbes de rétention ajustées selon le modèle de Van Genuchten (a) et leurs courbes moyennes avec écarts-type pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (b) et au sein de chacune des deux campagnes (c).

6.1. $\theta(0)$ et $\theta(1)$

Les résultats sont significativement différents (*) entre les deux campagnes (confirmé par le calcul de l'intervalle de confiance) et entre les trois systèmes à l'échelle des deux campagnes confondues (** pour $\theta(0)$ et * pour $\theta(1)$)

Le test SNK révèle que les systèmes *Conventionnel* et *Sol* se regroupent du fait de moyennes similaires et diffèrent du système *Zéro phyto*.

Ensuite, au sein de chacune des deux campagnes, les trois systèmes ne sont pas significativement différents.

6.2. A $\theta(1,6)$

Les résultats sont significativement différents (**) entre les deux campagnes (confirmé par le calcul de l'intervalle de confiance) ainsi qu'entre les trois systèmes (***) à l'échelle des deux campagnes.

Le test SNK montre que les systèmes *Sol*, *Conventionnel* et *Zéro phyto* possèdent des moyennes significativement différentes les unes des autres.

Ensuite, au sein de la première campagne, il existe une différence significative (*) entre les trois systèmes cependant démentie par le SNK.

Concernant la seconde campagne, il existe également une différence significative (*) entre les systèmes.

Le test SNK montre que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de moyennes similaires et différent du système *Sol*.

6.3. De $\theta(1,85)$ à $\theta(2,48)$

Les résultats sont significativement différents (**) entre les deux campagnes (confirmé par le calcul de l'intervalle de confiance) et entre les trois systèmes (***) à l'échelle des deux campagnes confondues.

Les tests SNK montrent que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de moyennes similaires et différent du système *Sol*.

Ensuite, au sein de la première campagne, il existe une différence significative (*) au niveau des systèmes.

Pour $\theta(1,8)$, le test SNK montre que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* forment un premier groupe et les systèmes *Zéro phyto* et *Sol* un second.

Pour $\theta(2)$ et $\theta(2,5)$, les tests SNK montrent que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de moyennes similaires et différent du système *Sol*.

Il en va de même pour la seconde campagne (***) pour $\theta(1,8)$ et $\theta(2)$ et ** pour $\theta(2,5)$.

Les tests SNK montrent que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de moyennes similaires et différent du système *Sol*.

6.4. A $\theta(2,85)$ et $\theta(3)$

Les résultats sont significativement différents (**) entre les deux campagnes (confirmé par le calcul de l'intervalle de confiance) et entre les trois systèmes (***) pour $\theta(2,8)$ et ** pour $\theta(3)$ à l'échelle des deux campagnes confondues.

Les tests SNK montrent que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de moyennes similaires et différent du système *Sol*.

Ensuite, au sein de la première campagne, il existe une différence significative (*) entre les trois systèmes.

Les tests SNK montrent que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de moyennes similaires et différent du système *Sol*.

Concernant la seconde campagne, il n'y a pas de différence significative entre les systèmes.

6.5. A $\theta(3,7)$ et $\theta(4,18)$

Les résultats sont significativement différents (*) entre les deux campagnes (confirmé par le calcul de l'intervalle de confiance) mais pas entre les trois systèmes.

Au sein des deux campagnes, les systèmes ne sont pas significativement différents.

Tout au long de la courbe, la différence entre les deux campagnes est significative. A saturation et à pF de 1, le système *Zéro phyto* voit sa teneur en eau diminuer entre les deux campagnes ce qui pourrait traduire un tassement du sol dans le temps. A l'inverse, le système *Conventionnel* voit ses teneurs en eau à saturation et à pF de 1 augmenter entre les deux campagnes ce qui pourrait être dû au développement racinaire. Quant au système *Sol*, celui-ci est stable au début de la courbe. Ensuite, de la capacité au champ au point de flétrissement, sa teneur en eau diminue entre les deux campagnes. Ainsi, la gamme de potentiel bénéfique à l'approvisionnement de la plante en eau semble avoir eu tendance à se réduire. Ce qui pourrait être imputé au développement de la macroporosité découlant du développement racinaire.

De manière générale au sein des deux campagnes, le *Zéro phyto* montre une teneur en eau plus importante que les autres systèmes au tout début de la courbe (pF de 0 et 1). Cela pourrait s'expliquer par le précédent prairie qui induirait une porosité plus importante. Le système *Sol* quant à lui se démarque de par des teneurs en eau supérieures à la capacité au champ, ce qui témoigne d'une présence certainement prépondérante de micropores. Enfin, le système conventionnel présente des valeurs intermédiaires aux deux précédents systèmes aux pF de 0 et 1. Ces résultats et hypothèses semblent être confirmés par les densités apparentes obtenues. Ensuite, il présente les teneurs les plus basses entre les pF 1 et 2 et finit par se confondre avec le système *Zéro phyto*. Tous les systèmes se rejoignent au point de flétrissement ce qui peut être imputé à la texture (Wiecheteck et al., 2020) peu variable entre les parcelles du fait de leur proximité.

Il aurait peut-être été plus judicieux de comparer les réserves utiles ou les porosités de drainage à la place de comparer point par point les teneurs en eau ajustées selon le modèle de Van Genuchten. Ou encore, de considérer ses autres paramètres ajustés.

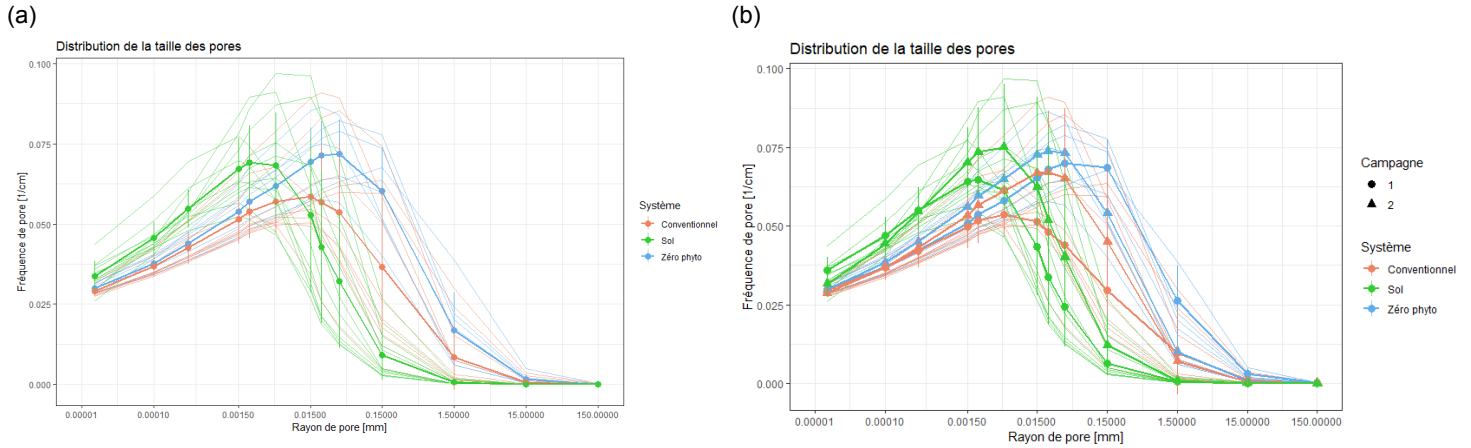


Figure 21 : Distribution de la taille des pores et courbes moyennes avec écarts-type pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et pour chacune des deux campagnes (b).

Les campagnes diffèrent significativement au niveau de la mésoporosité à la microporosité. Tous les systèmes voient leur microporosité augmentée sauf le système *Sol* au tout début de la courbe.

A l'échelle des deux campagnes, le système *Sol* présente la plus grande microporosité, le système *Zéro phyto* la plus grande macroporosité tandis que le système *Conventionnel* présente la plus faible microporosité et une macroporosité intermédiaire. Cela est à nouveau à mettre en lien avec les densités apparentes obtenues pour chacun des trois systèmes. Le système *sol* se spécialise donc plutôt dans le stockage hydrique qui va pouvoir approvisionner les plantes tandis que le système *Zéro phyto* et, dans une moindre mesure, le système *Conventionnel*, ont plus tendance à favoriser les flux hydriques (préférentiels) et gazeux ainsi que le développement racinaire.

7. Distribution de la taille de pore (Microporosimètre à intrusion de mercure)

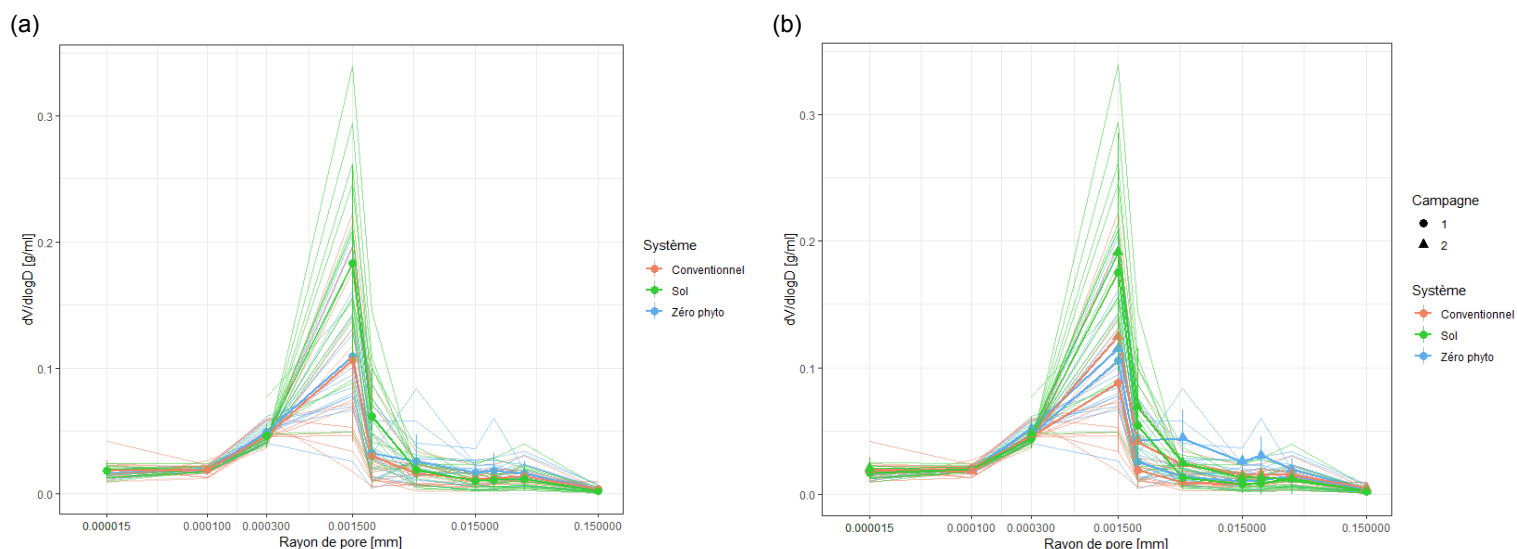


Figure 22 : Distribution de la taille des pores et courbes moyennes avec écarts-type pour les trois systèmes indistinctement des deux campagnes (a) et pour chacune des deux campagnes (b).

7.1. $Freq(0,15)$, $Freq(0,0375)$, $Freq(0,0015)$, $Freq(0,0003)$, $Freq(0,0001)$

Les résultats ne sont pas significativement différents que ce soit entre les deux campagnes, entre les trois systèmes ou entre les trois systèmes au sein de chaque campagne.

7.2. $Freq(0,02145)$, $Freq(0,015)$

Les résultats ne sont pas significativement différents que ce soit entre les deux campagnes, entre les trois systèmes et entre les trois systèmes au sein de chaque campagne.

Il en va de même au sein de la première campagne.

Néanmoins, concernant la seconde campagne, il y a une différence significative entre les systèmes (* pour $DTP(0,02145)$ et ** pour $DTP(0,015)$).

Les tests SNK montrent que les systèmes *Conventionnel* et *Sol* se regroupent du fait de moyennes similaires et diffèrent du système *Zéro phyto*.

7.3. $Freq(0,005)$

Les résultats sont significativement différents entre les deux campagnes (*, confirmé par le calcul de l'intervalle de confiance) mais ne le sont pas entre les trois systèmes.

Il en va de même au sein de la première campagne.

Néanmoins, concernant la seconde campagne, il y a une différence significative entre les systèmes (*).

Les tests SNK montrent que les systèmes *Conventionnel* et *Sol* se regroupent du fait de moyennes similaires et diffèrent du système *Zéro phyto*.

7.4. Freq(0,00215)

Les résultats sont significativement différents entre les deux campagnes (*, confirmé par le calcul de l'intervalle de confiance) mais ne le sont pas entre les trois systèmes.

Ensuite, au sein de la première campagne, il y a une différence significative entre les trois systèmes (***).

Les tests SNK montrent que les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* se regroupent du fait de moyennes similaires et diffèrent du système *Sol*.

Concernant la seconde campagne, il n'y a pas de différence significative entre les systèmes.

Le système *Zéro phyto* montre une plus grande mésoporosité et début de microporosité que les autres systèmes, de manière significative à la seconde campagne. Tandis que le système *Sol* montre une plus grande microporosité au niveau de la capacité au champ à la première campagne.

Les campagnes ne diffèrent entre elles qu'au tout début de la microporosité (Freq(0,005) et Freq(0,00215)). En effet, cette gamme de pores augmente à la seconde campagne, il y a également plus de variabilité dans les résultats obtenus. Cependant, les systèmes ne sont pas significativement différents lorsque les deux campagnes sont confondues.

Au sein de la première campagne, le système *Sol* se montre significativement différent des deux autres systèmes au niveau du début de la microporosité (Freq(0,00215)). Ce qui rejoint la tendance selon laquelle le système *Sol* possède plutôt des pores de stockage.

Au sein de la seconde campagne, le système *Zéro phyto* a développé une plus grande mésoporosité comparé aux deux autres systèmes. Il se spécialise donc davantage dans le stockage et la transmission des flux hydriques.

8. Distribution de la taille de pore (Microtomographe à rayons x)

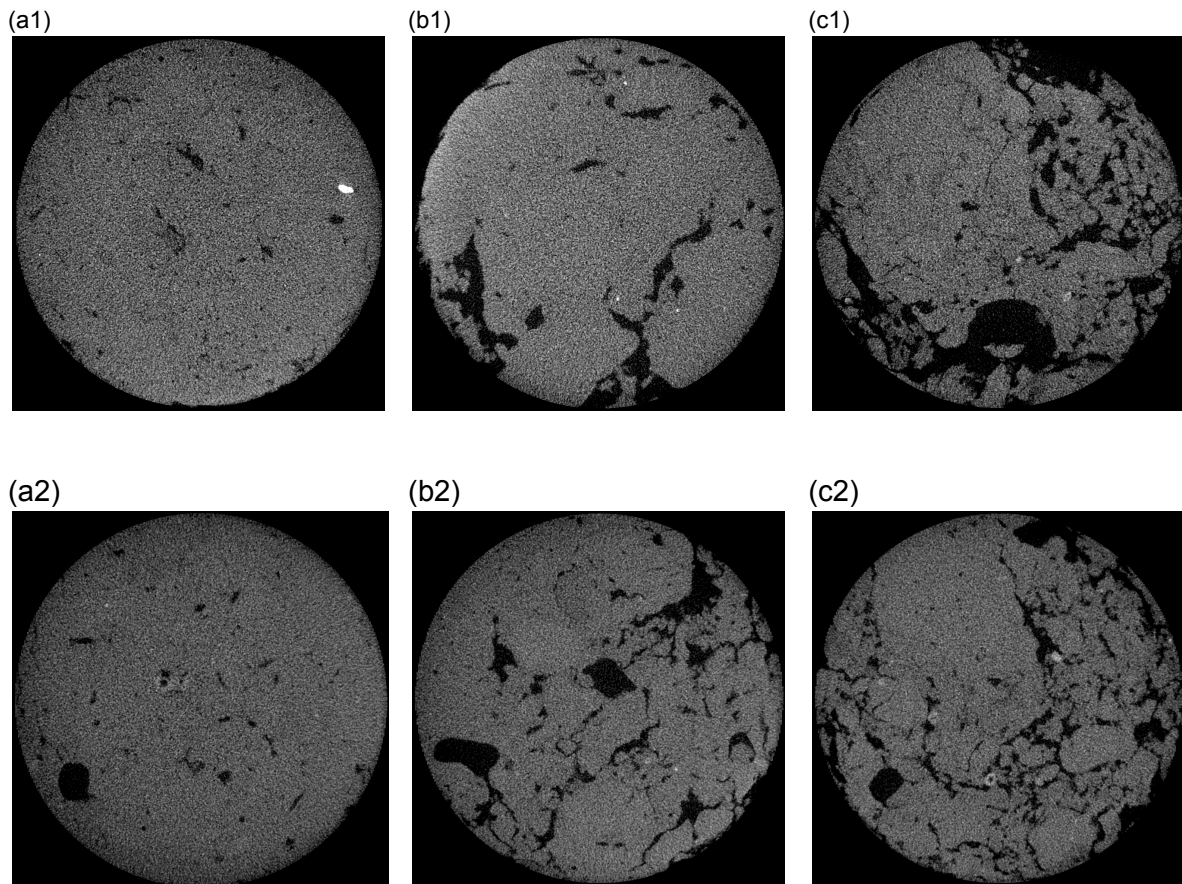


Figure 23 : Images reconstruites de coupes horizontales (2,72x2,72 cm) des échantillons provenant des parcelles 37 (*Sol*), 17 (*Conventiannel*) et 47 (*Zéro phyto*) de gauche à droite, respectivement, pour la première (a1), (b1), (c1) et pour la seconde campagne (a2), (b2), (c2).

Visuellement, le système *Sol* se distingue des deux autres systèmes. Les pores sont de plus petites tailles. Ils présentent également moins de canaux ou fissures, ce qui laisse à penser que son niveau d'agrégation est plus important. Cela fait également écho aux densités apparentes plus importantes attribuées au système *Sol*.

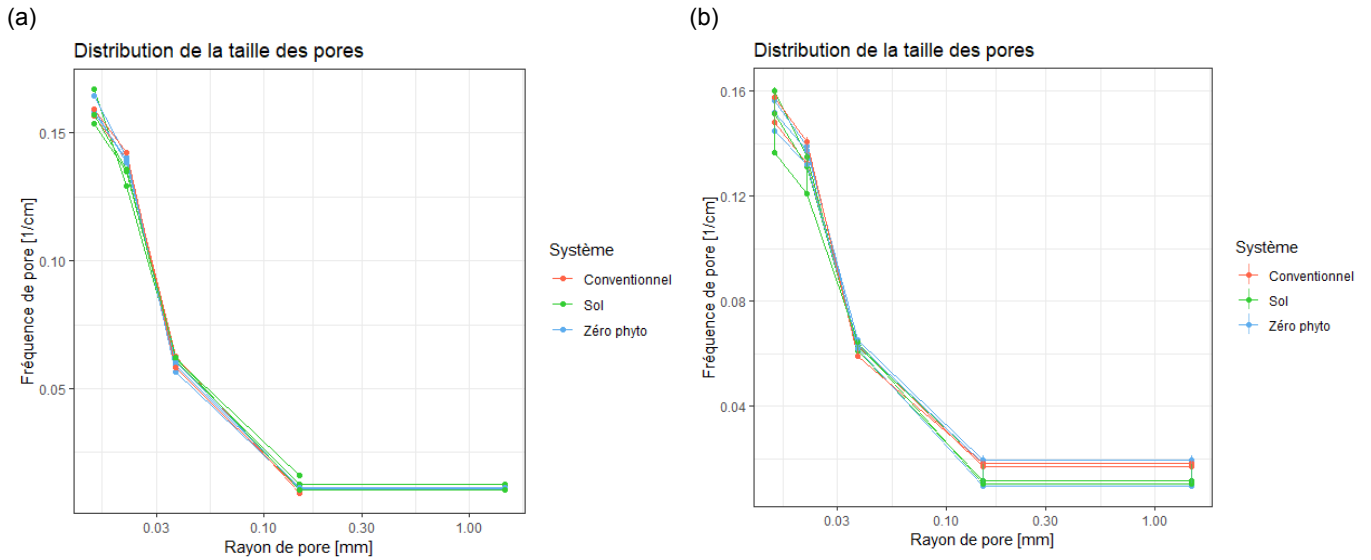


Figure 24 : Distribution de la taille des pores de la première campagne (a) de la seconde campagne (b).

8.1. *Freq(1,5), Freq(0,02145)*

Les résultats ne sont pas significativement différents que ce soit entre les deux campagnes, entre les trois systèmes ou entre les trois systèmes au sein de chaque campagne.

8.2. *Freq(0,15), Freq(0,0375), Freq(0,015)*

Les résultats sont significativement différents entre les deux campagnes (respectivement *, * et **, confirmé par le calcul de l'intervalle de confiance) mais ne le sont pas entre les trois systèmes.

Au sein des deux campagnes, les systèmes ne sont pas significativement différents.

Il n'est pas aisé de déterminer quelles sont les différences entre les deux campagnes, on voit néanmoins que de l'une à l'autre les courbes des systèmes *Conventiionnels* et *Zéro phyto* semblent s'inverser les rôles.

Ensuite, aucune différence n'est observée entre les deux systèmes.

La présence systématique de pores ayant un rayon de 14 mm à tous les échantillons pose question quant à la manière dont le plugin *SoilJ* calcule la DTP.

Déterminer la fréquence de pores à davantage de points aurait peut-être permis d'avoir une vision plus fine de l'évolution de la macroporosité et des différences entre systèmes. De plus, opérer des coupes verticales aurait pu permettre d'observer davantage les différences de porosité entre les systèmes.

De plus, un retravail plus fin des images, notamment manuellement, afin d'en améliorer la qualité aurait pu contribuer à une précision accrue des résultats.

Enfin, un seul échantillon a été prélevé sur chaque parcelle contrairement à la courbe de rétention pour laquelle il y avait deux échantillons par parcelle et à la microporosité pour laquelle il y en a eu trois.

9. Synthèse des résultats de l'analyse statistique

Les tableaux 10 et 11 synthétisent les résultats de l'analyse statistique. Le premier tableau reprend les variables issues de l'analyse chimique, des tests de résistances à la pénétration, des tests de stabilité structurale et des courbes de conductivité et rétention. Quant au second tableau, il confronte les méthodes selon leurs résultats de distribution de la taille de pores.

Les résultats statistiques sont à prendre avec précaution lorsqu'il est question de variables pour lesquelles il n'y a qu'une observation par population (CO, agile, CO:argile, ρ_{Ech} , MWD, MA, Fréq_{to}). En effet, le test ne permet pas alors de distinguer des différences significatives sur un nombre d'observations aussi restreint.

Tableau 10 : Synthèse des résultats issus de l'analyse statistique pour l'analyse chimique, la densité apparente (ρ_{Ech} , ρ_{ESM} et ρ_{pF}), la résistance à la pénétration (RSP_0 et RSP_5), les indicateurs du slake test (T_{max} , $W_{max}-W_{t0}$, W_{end} , P_{30} , P_{60} , P_{300} , P_{600} et AUC), la méthode Le Bissonnais (MWD1, 2 et 3, MA1, 2 et 3) et les courbes de conductivité et de rétention.

C1 + C2 : résultat pour le facteur campagne ; S(C1+C2) : résultat pour le facteur système les deux campagnes confondues ; S(C1) : résultat pour le facteur système au sein de la première campagne ; S(C2) : résultat pour le facteur système au sein de la seconde campagne ; SNK : résultat du test de Student, Newman et Keuls.

| Variable | C1+C2 | S(C1+C2) | SNK | S(C1) | SNK | S(C2) | SNK |
|--------------------------|-------|----------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|--------------------------|
| CO, argile, CO:argile | | | | ns | ns | | |
| ρ_{Ech} | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| ρ_{ESM} | | | | *** | sol > (conv, zéro phyto) | | |
| ρ_{pF} | | | | | | * | sol > (conv, zéro phyto) |
| RSP_0 | * | * | sol > (conv, zéro phyto) | ns | ns | ns | ns |
| RSP_5 | ns | * | sol > (conv, zéro phyto) | ns | ns | ns | ns |
| T_{max} | ns | ns | ns | *** | sol > (conv, zéro phyto) | ns | ns |
| $W_{max}-W_{t0}$ | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| W_{end} | ns | * | zéro phyto > sol > conv | * | (sol, zéro phyto) > conv | ** | zéro phyto > (conv, sol) |
| P30, P60 | ns | ns | ns | ns | ns | * | (zéro phyto,sol)>conv |
| P300 | ns | ns | ns | ns | ns | ** | (zéro phyto,sol)>conv |
| P600 | ns | * | zéro phyto > sol > conv | * | (sol, zéro phyto) > conv | ** | zéro phyto>(sol,conv) |
| AUC | ns | ns | ns | ns | ns | * | zéro phyto>(sol,conv) |

| | | | | | | | |
|-----------------------------------|----|-----|--------------------------|----|--|-----|--------------------------|
| MWD1,MWD2,MWD3 | | | | ns | ns | | |
| MA1,MA2,MA3 | | | | ns | ns | | |
| K_{sat} , K(0,5), K(2), K(4) | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| $\theta(0)$ | * | ** | zéro phyto > (conv,sol) | ns | ns | ns | ns |
| $\theta(1)$ | * | * | zéro phyto > (conv, sol) | ns | ns | ns | ns |
| $\theta(1,6)$ | ** | *** | sol > zéro phyto > conv | ns | ns | * | sol > (conv, zéro phyto) |
| $\theta(1,85)$ | ** | *** | sol > zéro phyto > conv | * | (sol, zéro phyto) > (zéro phyto, conv) | *** | sol > (zéro phyto, conv) |
| $\theta(2)$ | ** | *** | sol > zéro phyto > conv | * | sol > zéro phyto > conv | *** | sol > (zéro phyto, conv) |
| $\theta(2,48)$ | ** | *** | sol > zéro phyto > conv | * | sol > zéro phyto > conv | ** | sol > (zéro phyto, conv) |
| $\theta(2,85)$ | ** | *** | sol > zéro phyto > conv | * | sol > zéro phyto > conv | ns | ns |
| $\theta(3)$ | ** | ** | sol > zéro phyto > conv | * | sol > zéro phyto > conv | ns | ns |
| $\theta(3,7)$, $\theta(4,18)$ | * | ns | ns | ns | ns | ns | ns |

Tableau 11 : Synthèse des résultats issus de l'analyse statistique des distributions de la taille de pore issues de la courbe de rétention, de la microporosimétrie à mercure et de la microtomographie à rayons X (respectivement DTP_{pF}, DTP_{Hg}, DTP_{Tom}).

C1 + C2 : résultat pour le facteur campagne ; S(C1+C2) : résultat pour le facteur système les deux campagnes confondues ; S(C1) : résultat pour le facteur système au sein de la première campagne ; S(C2) : résultat pour le facteur système au sein de la seconde campagne ; SNK : résultat du test de Student, Newman et Keuls.

| Rayon de pore [mm] | C1+C2 | | | S(C1+C2) | | | S(C1) | | | S(C2) | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|
| | Freq _{pF} | Freq _{Hg} | Freq _{Tom} | Freq _{pF} | Freq _{Hg} | Freq _{Tom} | Freq _{pF} | Freq _{Hg} | Freq _{Tom} | Freq _{pF} | Freq _{Hg} | Freq _{Tom} |
| 1,5 | ns | | ns | (zéro phyto, conv)>sol | | ns | ns | | ns | zéro phyto >conv>sol | | ns |
| 0,15 | ns | ns | * | (zéro phyto, conv)>sol | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,0375 | ns | ns | * | (zéro phyto, conv)>sol | ns | ns | zéro phyto>conv> sol | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,02145 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | zéro phyto> (conv, sol) | ns |
| 0,015 | * | ns | ** | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | zéro phyto> (conv, sol) | ns |
| 0,005 | * | * | | ns | ns | | ns | ns | | ns | zéro phyto> (conv, sol) | |
| 0,00215 | * | * | | sol>(zéro phyto, conv) | ns | | ns | sol>(zéro phyto, conv) | | ns | ns | |
| 0,0015 | * | ns | | sol>(zéro phyto, conv) | ns | | ns | ns | | ns | ns | |
| 0,0003 | * | ns | | sol>(zéro phyto, conv) | ns | | ns | ns | | sol>(zéro phyto, conv) | ns | |
| 0,0001 | * | ns | | sol>(zéro phyto, conv) | ns | | ns | ns | | sol>(zéro phyto, conv) | ns | |

10. Comparaison qualitative des méthodes de détermination de la DTP

Comme l'illustre la figure 25, la DTP issue des courbes de rétention (DTP_{pF}) permet une vision globale de la porosité sur les gammes de micro, méso et macroporosité. La DTP obtenue sur base des courbes d'intrusion de mercure (DTP_{Hg}) octroie une vision plus fine de la microporosité et de la mésoporosité et permet notamment d'obtenir une DTP allant plus loin dans la microporosité. Enfin, la DTP obtenue sur base d'images reconstruites en 3D (DTP_{tomo}) offre une DTP plus précise au niveau de la macroporosité bien que visuellement, la comparaison des systèmes soit plus dure à interpréter nécessitant un retravail des courbes.

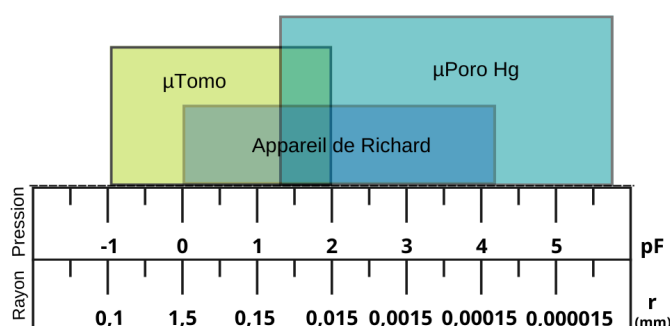


Figure 25 : Gammes de pores couvertes par les différentes méthodes de détermination de la DTP.

De plus, les DTP_{pF} et DTP_{Hg} semblent se rejoindre, sur base des graphes, contrairement à la DTP_{tomo} . Cela s'explique probablement par le fait que la tomographie permet de prendre en compte la totalité des pores (à partir d'un certain seuil de pixel) de l'échantillon tandis que les deux autres techniques ne comptabilisent que les pores connectés aux surfaces de l'échantillon. Cela mène donc à une sous estimation des pores comptabilisés.

En outre, la tomographie permet de rendre compte de l'architecture de la porosité visible contrairement aux autres techniques qui présentent un artefact lié à la connexion entre les pores.

Enfin, la génération davantage de variables à même de caractériser et quantifier la porosité telles que le diamètre critique, la percolation, la connectivité des pores ou encore la tortuosité aurait permis de mieux comprendre l'agencement de l'espace lacunaire propre à chaque système. Il en va de même pour la caractérisation de l'agrégation des sols des différents systèmes.

11. Discussion globale

Il y a un grand nombre de facteurs, autres que ceux étudiés au sein de ce travail, pouvant affecter les résultats obtenus mais dont l'impact est difficilement quantifiable. Notamment, la taille des échantillons prélevés, le choix des zones de prélèvements (affectées par des compactations localisées et les effets de bord) et les méthodes de prélèvements ont démontré leur influence sur les résultats. Il est dès lors pertinent de se questionner quant à la

représentativité des échantillons du sol dont ils sont issus. De manière plus générale, l'étude de la physique des sols et le choix des modèles permettant de prédire ses propriétés n'est pas rendue aisée par la diversité de conceptions (au moins aussi nombreuses que le nombre de pores qu'il y a au sein des sols terrestres) de l'architecture de l'espace lacunaire des sols dans ce domaine. Cela induit des résultats difficilement comparables d'un modèle à l'autre. Le défi actuel semble donc de définir un modèle tangible et universel afin d'une part, de mieux appréhender la réalité de terrain sur base de prélèvements et, d'autre part, de permettre de comparer les résultats issus de différentes études (Hunt et al., 2013).

Au-delà de l'échantillonnage et du modèle adopté, le contexte dans lequel s'inscrit les prélèvements a toute son importance. Dans ce cas-ci, l'essai semble trop jeune que pour offrir une différenciation des sols entre les systèmes. Néanmoins, cela permet de rendre compte de l'évolution de ces systèmes dans le temps dans le cas de la mise en place d'un suivi régulier des propriétés hydrauliques et de la stabilité structurale des sols de l'essai. En effet, cela pourrait être d'un grand intérêt d'étudier le temps que va mettre cette différenciation et ses modalités selon les systèmes.

De plus, la rotation culturale et plus précisément, le précédent semble également fortement impacter les résultats et ce de nombreux mois après la récolte et/ou destruction de celui-ci. Dans le cadre de ce travail, le précédent à la culture du froment d'hiver a différé selon le système (pomme de terre pour le système *Conventionnel*, betterave pour le système *Sol* et prairie temporaire pour le système *Zéro phyto*). Par conséquent, le précédent en lui-même ainsi que la transition entre le précédent et la culture d'intérêt semblent avoir impacté différemment les résultats et ce sur le long terme (à l'échelle de la saison culturale).

Au niveau des analyses statistiques, les résultats se sont montrés fortement variables et non significatifs. Cela traduit très vraisemblablement la réalité de terrain. Cependant, augmenter le nombre de prélèvements par parcelle pour certaines mesures permettrait d'accroître la précision et stabilité des résultats et, dès lors, d'obtenir une analyse de la variance plus rigoureuse et à même de traduire l'absence ou la présence de différences significatives entre les systèmes en fonction des campagnes. Continuer le suivi des parcelles dans le temps permettrait également d'atteindre cette fin bien que des facteurs de variabilité additionnels seraient alors à prendre en compte.

De plus, la variabilité des parcelles n'a pas été quantifiée. A l'avenir, il serait peut-être intéressant de la caractériser.

Ensuite, l'adaptation du choix du descripteur statistique à son contexte à toute son importance. Au sein de ce travail, le recours à la médiane aurait pu s'avérer plus judicieux dès lors qu'il s'agit d'un paramètre robuste aux valeurs extrêmes contrairement à la moyenne.

Enfin, ce travail manque cruellement d'une analyse en composantes principales qui aurait permis de regrouper les variables et de trancher sur leurs liens avec les différents facteurs considérés.

Pour clôturer cette discussion, il est bon de relier les idéaux concernant la réalisation d'une expérience à ses contraintes (temporelle, matérielle, financière,...). Les conditions idéales pour mener à *bien* une expérience repose souvent sur l'absence de contraintes. Or, nous évoluons dans un monde qui se définit par ses contraintes et limites. Dès lors, il ne tient qu'à nous de se montrer tolérant envers soi-même, son travail, autrui et envers la physique des

sols contrainte, elle aussi, selon multiples formes. L'ambition ne restera qu'inactée si elle ne rencontre jamais la réalité.

Conclusion

Au sein de ce travail, trois systèmes cultureux (*Conventionnel*, *Sol* et *Zéro phyto*) ont été comparés. Ces systèmes, les rotations et itinéraires techniques qui les caractérisent, ont été pensés pour répondre aux enjeux actuels à savoir, principalement, la conservation du capital *sol* et la réduction des intrants (CRA-W, 2021). La diminution des émissions de gaz à effet de serre n'étant pas abordée dans ce travail. En outre, la contribution de ces systèmes au développement durable est également questionnée.

Pour répondre à ces nombreux défis, l'objectif que s'est fixé ce travail est l'évaluation de ces systèmes du point de vue de leur structure et de leur évolution à court terme. En effet, il a été démontré plus tôt dans ce travail la place centrale qu'occupe la structure du sol pour la promotion de la résilience et de la performance des sols.

Pour ce faire, des techniques plus classiques (infiltrométrie, rétention de l'eau, pénétrométrie, calcul de densité apparente et méthode Le Bissonnais et de calcul de masses de sol équivalentes) à plus innovantes (QuantiSlake test, microtomographie et microporosimétrie) ont été associées afin de déterminer les propriétés hydrodynamiques des sols concernés et leur structure *per se*. Un objectif sous-jacent étant de comparer ces techniques et d'analyser leur cohérence.

A l'issue de ce travail, la densité apparente, le précédent cultural et sa gestion ainsi que le développement racinaire semblent être des facteurs prépondérants de stabilité structurale ayant à son tour un impact important sur la rétention en eau des sols. Ainsi, le système *Sol* se démarque de par sa spécialisation dans le stockage hydrique (microporosité prépondérante) qui va pouvoir approvisionner les plantes tandis que le système *Zéro phyto* et, dans une moindre mesure, le système *Conventionnel*, auront plutôt tendance à favoriser les flux hydriques (préférentiels) et gazeux ainsi que le développement racinaire. De plus, avec le temps, le système *Zéro phyto* a eu tendance à développer une plus grande mésoporosité comparé aux deux autres systèmes. Il s'est donc progressivement spécialisé dans le stockage et la transmission des flux hydriques. Ainsi, si l'on considère une année plus sèche comme cette année 2022, les modalités du système *Sol* semblent être à privilégier (rétention et microporosité). Alors que, les systèmes *Conventionnel* et *Zéro phyto* semblent être plus adéquats (K_{sat} et macroporosité) face à une année humide comme celle de 2021. Il s'agit donc là également d'un enjeu de taille auquel doit faire face l'agriculture qui dépend de la zone géopédoclimatique dans laquelle elle s'inscrit et qui à l'heure actuelle doit également se confronter aux aléas engendrés par les changements climatiques.

En ce qui concerne maintenant les différentes techniques utilisées, la variabilité des résultats ne permet pas toujours de déterminer leur aptitude à caractériser la structure du sol et sa stabilité structurale ce qui peut être imputé d'une part au nombre insuffisant d'observations par population pour certaines mesures et à la sensibilité des certains paramètres aux conditions environnementales et expérimentales. Concernant la DTP, les DTP_{Hg} et DTP_{tomo} permettent d'agrandir la gamme pores étudiées par la DTP_{pF} . Néanmoins, la DTP_{tomo} obtenue au sein de ce travail nécessite d'être retravaillée afin d'établir sa réelle contribution.

En conclusion, ce travail, de par ses résultats, est venu, tantôt appuyer un bon nombre d'études abordant les facteurs de stabilité structurale, tantôt se placer en contradiction avec ce qui est usuellement observé dans la littérature. De nouvelles observations (issues notamment de la considération d'un système moins étudié qu'est le système *Zéro phyto*), parfois surprenantes, ont également mené à de nouveaux questionnements et force ce genre d'études à tenter de mieux intégrer l'aspect multifactoriel et interconnecté/dépendant propres aux propriétés des sols.

Contribution personnelle

L'étudiante a mis en œuvre et participé à toutes les étapes de réalisation de son travail de fin d'étude. De la mise en place du plan d'échantillonnage au traitement des données, obtention des résultats et rédaction en passant par les étapes de prélèvement des échantillons et des analyses en laboratoire.

Elle a ainsi appris à :

- Réaliser un plan d'échantillonnage à l'aide du logiciel *QG/S* sur lequel des compétences de base ont pu être développées.
- Prélever des échantillons de sol de tailles variées selon la méthode de prélèvement en structure conservée. Pour ce faire, il a été question de consulter les responsables de l'essai et de suivre le calendrier des actions effectuées sur l'essai. De plus, il a fallu également se coordonner avec autrui afin de se partager le matériel mis à disposition et de se répartir certaines tâches.
- Réaliser diverses analyses de manière autonome en laboratoire. S'informer et se plier aux règles de base à respecter et propres à chaque laboratoire (*CRA-W*, *CARPOR*, *Physique et Mécanique des Sols*). Décider du matériel de laboratoire le plus adéquat en vue de répondre à ses objectifs. S'imposer des horaires élargis (petit matin, soirée et weekend) afin de respecter son calendrier et les temps impartis.
Et à nouveau, se coordonner avec les autres utilisateurs des lieux pour le confort de tous.
- Réaliser divers traitements de données sur base de recherches bibliographiques avec les logiciels adéquats (*Hydrus-1D*, *RETC*, *SkyScan1172*, *NRecon*, *Image J*). Se référer à des personnes à des spécialistes afin d'éviter des pertes de temps conséquentes.
- Obtenir des résultats et leur mise en graphique. Cela a nécessité l'initiation aux commandes de base du langage de programmation *R* sur *RStudio*. Procéder aux analyses statistiques (*AV2* et *AV4*) des résultats sur *SAS*.
- Interpréter ses résultats sur base des observations de terrain et de la bibliographie. En discuter avec des professionnels et s'orienter selon ces discussions.
- Rédiger un écrit scientifique, communiquer sur ses recherches et résultats de manière claire et structurée. Identifier les forces et faiblesses de son travail.

De manière plus générale, ce travail de fin d'étude lui a surtout appris à s'imposer un rythme régulier et rigoureux de travail, accepter de se faire aider, évoluer en autonomie dans différents environnements, apprendre à s'attacher à l'essentiel et éviter de se disperser, ne pas vendre la peau de l'ours avant de l'avoir tuée et, enfin, identifier ses forces et faiblesses.

Néanmoins, il est à noter que les courbes et indicateurs du QuantiSlake test ont été obtenues par Frédéric Vanwindenkens, Stéphane Becquevort a réalisé toutes les manipulations sur le porosimètre à intrusion de mercure et Alexandre Léonard a procédé à l'analyse des derniers échantillons avec le microtomographe à rayons X.

Et enfin, ce travail a conforté l'idée préalable selon laquelle la pluridisciplinarité est indispensable dans tout domaine complexe.

Abréviations et symboles

| Abréviation | Symbole |
|--|---|
| AUC : Aire sous la courbe [s] | ρ : Densité apparente [g cm^{-3}] |
| CO : Carbone organique | ρ_{Ech} : Densité apparente obtenue par méthode directe [g cm^{-3}] |
| COT : Carbone organique total | ρ_{ESM} : Densité apparente calculée à partir des sondes de prélèvements [g cm^{-3}] |
| DTP : Distribution de la taille de pore | ρ_{pF} : Densité apparente calculée à partir des courbes de rétention [g cm^{-3}] |
| DTP _{Hg} : DTP issue du porosimètre à mercure | \varnothing : Diamètre |
| DTP _{pF} : DTP issue de la courbe de rétention | θ : Teneur en eau pondérale [%] |
| DTP _{Tomog} : DTP issue du microtomographe à rayons X | $\theta(\text{pF})$: Courbe de rétention |
| ESM : Procédure des masses de sol équivalentes | |
| Freq(r) : Fréquence de pore selon le rayon (DTP) | |
| Freq _{Hg} : Freq(r) issue du porosimètre à mercure | |
| Freq _{pF} : Freq(r) issue de la courbe de rétention | |

Freq_{Tom} : Freq(r) issue du microtomographe à rayons X

K : Conductivité hydraulique insaturée [cm s⁻¹]

K(h) : Courbe de conductivité hydraulique

Ksat : Conductivité hydraulique à saturation [cm s⁻¹]

MA : Pourcentage de macroagrégats [%]

MO : Matière organique

MWD : Diamètre moyen pondéré [mm]

P₃₀, P₆₀, P₃₀₀, P₆₀₀ : Pentes de la courbe à différents pas de temps (30, 60, 300 et 600 secondes)

RSP : Résistance du sol à la pénétration [bar]

RSP₀ : Résistance à la pénétration en surface (0 cm de profondeur)

RSP₅ : Résistance à la pénétration à 5 cm de profondeur

SOC : Carbone organique du sol

[SOC] : Teneur en carbone organique du sol

SOM : Matière organique du sol

T_{max} : Temps auquel W_{max} est atteint [s]

Test SNK : Test de Student, Newman et Keuls

V : Volume

W_{end} : Masse de l'échantillon en fin d'expérience [-]

W_{max}-W_{t0} : Augmentation de la masse de l'échantillon entre T₀ et T_{max} [s]

Bibliographie

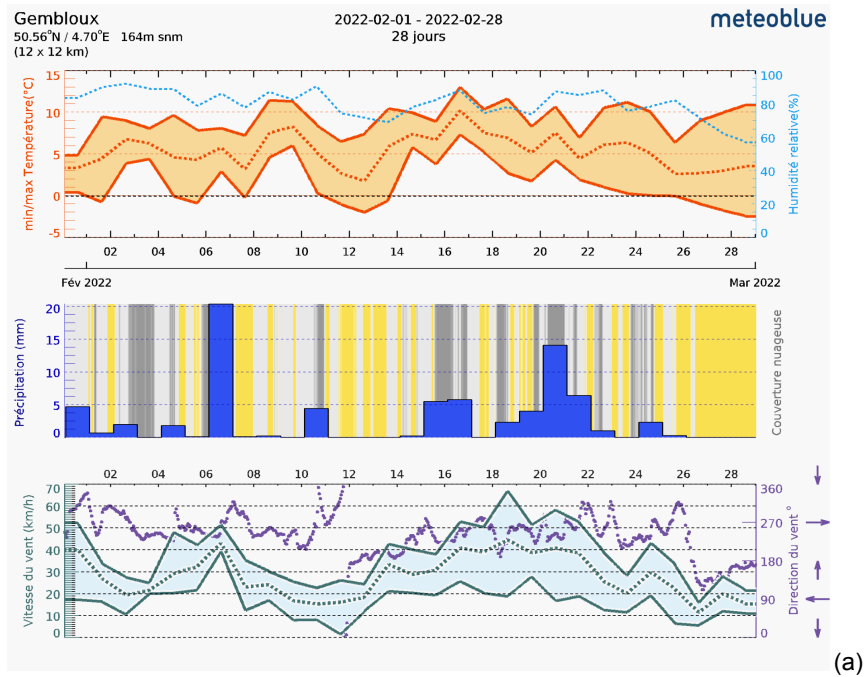
- Bah, B. B., Legrain, X., Engels, P., Colinet, G., & Bock, L. (2007). *Légende de la Carte Numérique des Sols de Wallonie - version 2*. (2ème éd. revue et corrigée). Gembloux, Belgium: Unité de Science du Sol - GxABT - ULg.
- Bai, Z., Caspari, T., Gonzalez, M.R., Batjes, N.H., Mäder, P., Bünemann, E.K., de Goede, R., Brussaard, L., Xu, M., Ferreira, C.S.S., Reintam, E., Fan, H., Mihelič, R., Glavan, M., Tóth, Z., 2018. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265, 1–7.
- Barral, M.T., Buján, E., Devesa, R., Iglesias, M.L., Velasco-Molina, M., 2007. Comparison of the structural stability of pasture and cultivated soils. *Science of The Total Environment, Spanish Research on Soil Damage* 378, 174–178.
- Baveye, P.C., Baveye, J., Gowdy, J., 2016. Soil “Ecosystem” Services and Natural Capital: Critical Appraisal of Research on Uncertain Ground. *Frontiers in Environmental Science* 4.
- Beckers, E., Plougonven, E., Roisin, C., Hapca, S., Léonard, A., Degré, A., 2014. X-ray microtomography: A porosity-based thresholding method to improve soil pore network characterization? *Geoderma* 219–220, 145-154.
- Blum, W.E.H., 2005. Functions of Soil for Society and the Environment. *Rev Environ Sci Biotechnol* 4, 75–79.
- Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3–22.
- Correa, J., Postma, J.A., Watt, M., Wojciechowski, T., 2019. Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Journal of Experimental Botany* 70, 6019–6034.
- De Pue, J., Rezaei, M., Van Meirvenne, M., Cornelis, W.M., 2019. The relevance of measuring saturated hydraulic conductivity: Sensitivity analysis and functional evaluation. *Journal of Hydrology* 576, 628–638.
- Doube, M., Kłosowski, M.M., Arganda-Carreras, I., Cordelières, F.P., Dougherty, R.P., Jackson, J.S., Schmid, B., Hutchinson, J.R., Shefelbine, S.J., 2010. BoneJ: Free and extensible bone image analysis in ImageJ. *Bone* 47, 1076–1079.
- Fukumasu, J., Jarvis, N., Koestel, J., Kätterer, T., Larsbo, M., 2022. Relations between soil organic carbon content and the pore size distribution for an arable topsoil with large variations in soil properties. *European Journal of Soil Science* 73, e13212.
- Gobat, J.-M., Aragno, M., Matthey, W., 2010. *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols*. PPUR Presses polytechniques.
- Hunt, A.G., Ewing, R.P., Horton, R., 2013. What’s Wrong with Soil Physics? *Soil Science Society of America Journal* 77, 1877–1887.

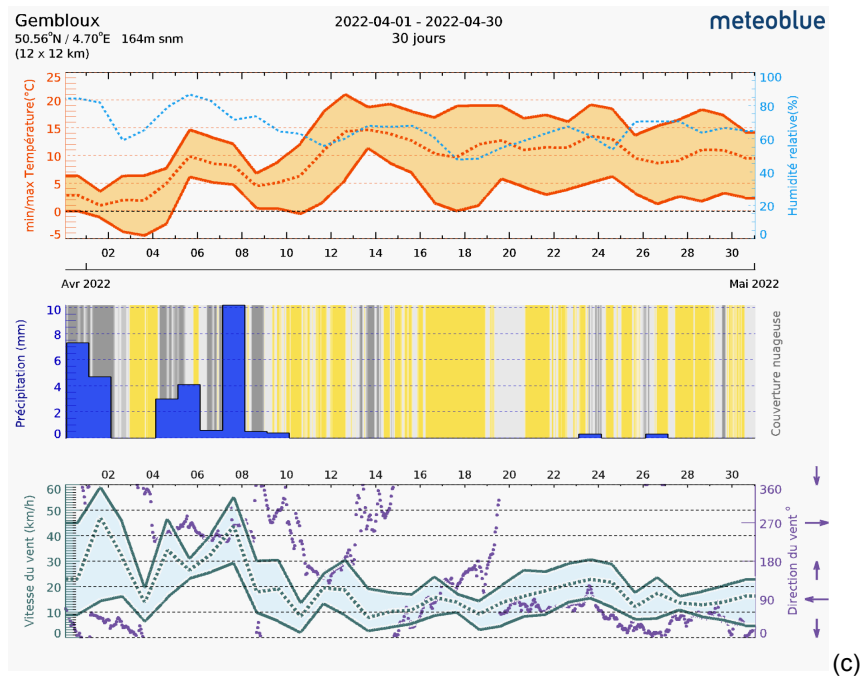
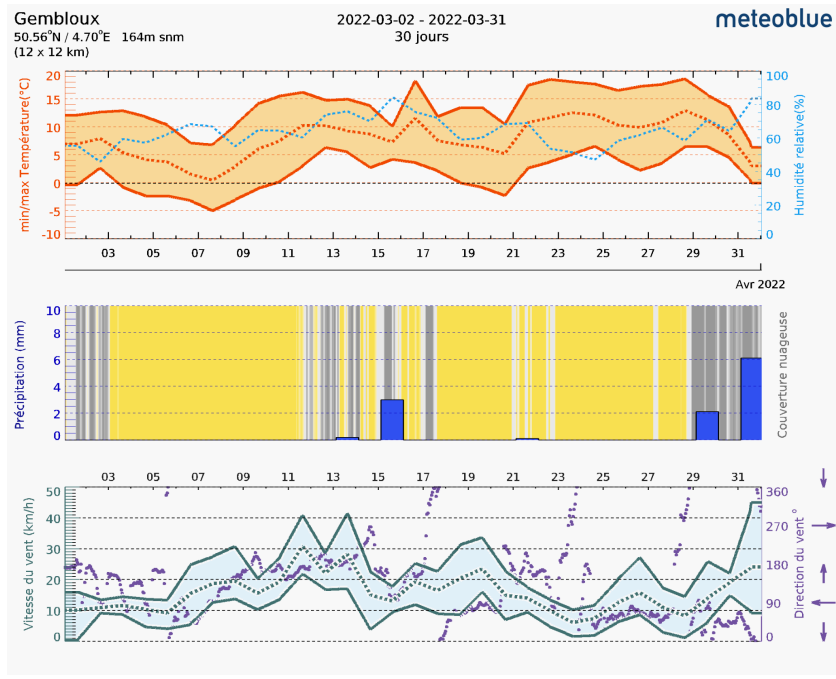
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weiskopf, P., Baveye, P.C., Boivin, P., 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302, 14–21.
- Kodešová, R., Vignozzi, N., Rohošková, M., Hájková, T., Kočárek, M., Pagliai, M., Kozák, J., Šimůnek, J., 2009. Impact of varying soil structure on transport processes in different diagnostic horizons of three soil types. *Journal of Contaminant Hydrology, Preferential Flow* 104, 107–125.
- Koestel, J., 2018. SoilJ: An ImageJ Plugin for the Semiautomatic Processing of Three-Dimensional X-ray Images of Soils. *Vadose Zone Journal* 17, 170062.
- Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47, 425–437.
- Logsdon, S. D. et al. (2013) Quantifying and modeling soil structure dynamics. Sally D. Logsdon et al. (eds.). Madison: Soil Science Society of America.
- Archive météo Gembloux [WWW Document], n.d. . meteoblue. URL https://www.meteoblue.com/fr/meteo/historyclimate/weatherarchive/gembloux_belgique_2797713 (accessed 8.9.22).
- Mini-Disk Infiltrometer Manual by Decagon Devices - Issuu [WWW Document], n.d. URL <https://issuu.com/decaweb/docs/infiltrometermanual> (accessed 2.22.22a).
- Musy, A. & Soutter, M. (1991) *Physique du sol*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Nasir Ahmad, N.S.B., Mustafa, F.B., Muhammad Yusoff, S. Y., Didams, G., 2020. A systematic review of soil erosion control practices on the agricultural land in Asia. *International Soil and Water Conservation Research* 8, 103–115.
- Nimmo, J.R., 2013. Porosity and Pore Size Distribution. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier, p. B9780124095489053000.
- Propriétés physiques | Portail d'information sur les sols | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture [WWW Document], n.d. URL <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/proprietes-du-sol/proprietes-physiques/fr/> (accessed 2.10.22).
- Schaap, M.G., Leij, F.J., 2000. Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. *Soil Science Society of America Journal* 64, 843–851.
- Schiefer, J., Lair, G.J., Blum, W.E.H., 2016. Potential and limits of land and soil for sustainable intensification of European agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 230, 283–293.
- Shi, P., Castaldi, F., van Wesemael, B., Van Oost, K., 2020. Vis-NIR spectroscopic assessment of soil aggregate stability and aggregate size distribution in the Belgian Loam Belt. *Geoderma* 357, 113958.

- Smet, S., Beckers, E., Plougonven, E., Léonard, A., Degré, A., 2018. Can The Pore Scale Geometry Explain Soil Sample Scale Hydrodynamic Properties? *Frontiers in Environmental Science* 6.
- Startsev, A. d., McNabb, D. h., 2001. Skidder Traffic Effects on Water Retention, Pore-Size Distribution, and van Genuchten Parameters of Boreal Forest Soils. *Soil Science Society of America Journal* 65, 224–231.
- Vanwalleghem, T., Gómez, J.A., Infante Amate, J., González de Molina, M., Vanderlinden, K., Guzmán, G., Laguna, A., Giráldez, J.V., 2017. Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. *Anthropocene* 17, 13–29.
- Vanwindekens, F., Hardy, B., Roisin, C., Delporte, F., 2020. A quantitative approach of the slake test for assessing soil structural stability (No. EGU2020-9399). Presented at the EGU2020, Copernicus Meetings.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., Genuchten, M.Th. van, 2010a. Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten–Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. *Vadose Zone Journal* 9, 795–820. All rights reserved. No part of this periodical may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.
- WalOnMap [WWW Document], n.d. URL <http://geoportail.wallonie.be/walonmap> (accessed 5.14.22).
- Wendt, J.W., Hauser, S., 2013. An equivalent soil mass procedure for monitoring soil organic carbon in multiple soil layers. *European Journal of Soil Science* 64, 58–65.
- Wiecheteck, L.H., Giarola, N.F.B., de Lima, R.P., Tormena, C.A., Torres, L.C., de Paula, A.L., 2020. Comparing the classical permanent wilting point concept of soil (–15,000 hPa) to biological wilting of wheat and barley plants under contrasting soil textures. *Agricultural Water Management* 230, 105965.

Annexes

Annexe 1 : Bulletin météorologique des mois de février (a), mars (b) et avril (c) (Meteoblue, n.d.).





Annexe 2 : Analyses chimiques des parcelles d'intérêt (seule la première profondeur prélevée a été reprise, à savoir 0 - 9 cm).

| Parcelle | P | K | Mg | Na | Ca | CO | Humus | N _{total} | C/N | pH _{eau} |
|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|-------|--------------------|-------|-------------------|
| | mg 100g ⁻¹ | mg 100g ⁻¹ | mg 100g ⁻¹ | mg 100g ⁻¹ | mg 100g ⁻¹ | g kg ⁻¹ | % | % | | |
| 5 | 7,912 | 25,268 | 9,931 | 1,268 | 334,985 | 11,340 | 2,268 | 0,114 | 9,965 | 8,070 |

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|-------|---------|--------|-------|-------|--------|-------|
| 17 | 10,764 | 16,271 | 7,373 | 1,044 | 275,901 | 11,860 | 2,372 | 0,114 | 10,375 | 7,890 |
| 22 | 9,360 | 12,999 | 7,390 | 2,038 | 263,112 | 9,710 | 1,942 | 0,097 | 10,051 | 7,980 |
| 27 | 11,246 | 22,041 | 9,136 | 1,120 | 295,683 | 10,660 | 2,131 | 0,101 | 10,506 | 8,08 |
| 37 | 10,596 | 27,128 | 8,967 | 1,708 | 325,097 | 12,170 | 2,433 | 0,116 | 10,505 | 8,140 |
| 47 | 9,161 | 13,265 | 8,973 | 0,868 | 251,563 | 9,820 | 1,964 | 0,102 | 9,643 | 7,890 |
| 54 | 7,870 | 19,508 | 12,211 | 1,415 | 216,880 | 12,850 | 2,570 | 0,114 | 11,272 | 7,410 |
| 56 | 7,450 | 21,022 | 13,866 | 2,014 | 204,585 | 9,560 | 1,912 | 0,101 | 9,480 | 7,390 |
| 64 | 9,051 | 25,681 | 9,435 | 1,511 | 178,384 | 10,400 | 2,080 | 0,102 | 10,235 | 7,430 |

Annexe X : Paramètres du microtomographe à rayons X (*BRUKER SkyScan 1772*) et de la reconstruction des images avec *NRecon*.

```

[System]
Scanner=Skyscan1172
Hardware version=G
Software=Version 1. 5 (build 29)
Source Type=Hamamatsu 100/250
Camera=SHT 11Mp camera
Camera Pixel Size (um)= 8.99
CameraXYRatio=0.9939
Incl.in lifting (um/mm)=-2.8000
[Acquisition]
Filename Prefix=31B_
Number of Files= 722
Source Voltage (kV)= 100
Source Current (uA)= 100
Number of Rows= 666
Number of Columns= 1000
Image crop origin X= 0
Image crop origin Y=0
Camera binning=4x4
Camera position=far
Image Rotation=-0.0140
Gantry direction=CC
Number of connected scans= 3
Number of lines to be reconstructed= 560
Image Pixel Size (um)= 27.27
Object to Source (mm)=259.900
Camera to Source (mm)=342.912
Vertical Object Position (mm)=6.513
Optical Axis (line)= 257
Filter=Al+Cu
Image Format=TIFF
Depth (bits)=16
Screen LUT=0
Exposure (ms)= 1500
Rotation Step (deg)=0.500

```


Frame Averaging=OFF (4)
Random Movement=OFF (5)
Use 360 Rotation=YES
Geometrical Correction=ON
Camera Offset=OFF
Median Filtering=ON
Flat Field Correction=ON
Rotation Direction=CC
Scanning Trajectory=ROUND
Type Of Motion=STEP AND SHOOT
Scan duration=00:55:05
[Reconstruction]
Reconstruction Program=NRecon
Program Version=Version: 1.7.3.1
Reconstruction engine=GPUReconServer
Engine version=Version: 1.7.3
Postalignment Applied=1
Connected Reconstruction (parts)=3
Sub-scan post alignment [0]=-5.500000
Sub-scan post alignment [1]=-5.500000
Sub-scan post alignment [2]=-4.500000
Sub-scan scan length [0]=558
Sub-scan scan length [1]=557
Sub-scan scan length [2]=560
Used extra rotation per scan(deg)= 0.000 0.000 0.000
Used extra shift in X per scan(micron)= 0.000 -11.964 -24.781
Used extra shift in Y per scan(micron)= 0.000 -12.085 -24.985
Dataset Origin=Skyscan1172
Dataset Prefix=31B_~02
First Section=13
Last Section=1764
Reconstruction duration per slice (seconds)=0.228495
Total reconstruction time (1116 slices) in seconds=255.000000
Section to Section Step=1
Sections Count=1752
Result File Type=PNG
Result File Header Length (bytes)=Unknown: compressed JPG format (100%)
Result Image Width (pixels)=1000
Result Image Height (pixels)=1000
Pixel Size (um)=27.28215
Reconstruction Angular Range (deg)=360.00
Use 180+=OFF
Angular Step (deg)=0.5000
Smoothing=2
Smoothing kernel=0 (Asymmetrical boxcar)
Ring Artifact Correction=7
Draw Scales=OFF
Object Bigger than FOV=ON
Reconstruction from ROI=OFF
Filter cutoff relative to Nyquist frequency=100
Filter type=0
Filter type description=Hamming (Alpha=0.54)
Undersampling factor=1
Threshold for defect pixel mask (%)=0

Beam Hardening Correction (%)=0
CS Static Rotation (deg)=0.00
CS Static Rotation Total(deg)=0.00
Minimum for CS to Image Conversion=0.000000
Maximum for CS to Image Conversion=0.020000
HU Calibration=OFF
BMP LUT=0
Cone-beam Angle Horiz.(deg)=6.008924
Cone-beam Angle Vert.(deg)=4.003985