

Faculté des bioingénieurs

Impacts de la transition d'une agriculture conventionnelle vers une agriculture de conservation sur la qualité physique des sols

Auteur : Valentine Verlaine

Promoteur(s) : Pr. Charles Bielders (UCLouvain/ELI/ELIE)

Lecteur(s) : Pr. Mathieu Javaux (UCLouvain/ELI/ELIE)

Aline Fockedey (CRA-W)

Année académique 2023-2024

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur en Sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, prof. Charles Bielders, sans qui ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour. Son encadrement, ses conseils avisés ainsi que ses multiples retours sur mon travail ont été fortement appréciés.

Je remercie également le CRA-W, et plus particulièrement Aline Fockedey, ainsi que le responsable des fermes universitaires de l'UCLouvain, Hugues Falys, de m'avoir permis de travailler sur cette parcelle. De plus, je suis très reconnaissante envers Aline pour ses conseils ainsi que sa grande disponibilité pour répondre à mes questions.

Je tiens également à remercier mes lecteurs, Aline Fockedey et Mathieu Javaux, pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de mon travail.

Une attention particulière va également aux techniciens du hall GERU et plus particulièrement à Olivier Lebbe et Francois Sebastien qui ont pris de leur temps pour m'aider et m'expliquer les différentes manipulations en laboratoire.

Un grand merci à toutes les personnes qui m'ont aidée sur le terrain, et plus particulièrement au prof. Charles Bielders, William Monoyer, Claire Steens ainsi que Théo Stoquart. Bien que la météo n'ait pas toujours été de notre côté, je garderais un bon souvenir de nos journées de terrain.

Table des matières

Introduction	1
Première partie : Etat de l’art	3
1. Qualité du sol	3
1.1. Indicateurs biologiques	4
1.1.1. Matière organique	4
1.1.2. Vers de terre.....	4
1.2. Indicateurs physiques	5
1.2.1. Masse volumique apparente	6
1.2.2. Résistance mécanique.....	6
1.2.3. Stabilité structurale	7
1.2.4. Capacité de rétention en eau du sol	7
1.2.5. Conductivité hydraulique à saturation	8
2. Histoire de l’agriculture	9
3. Agriculture conventionnelle	10
4. Agriculture de conservation	12
4.1. Premier principe : Perturbation mécanique minimale du sol	13
4.1.1. Influence de l’arrêt du labour sur le sol	15
4.2. Deuxième principe : Couverture organique permanente du sol	19
4.3. Troisième principe : Diversification des espèces	20
Deuxième partie : Objectifs.....	22
Troisième partie : Matériels et Méthodes.....	23
1. Site d’étude.....	23
2. Densité de vers de terre	25
3. Teneur en Carbone organique	26
4. Échantillonnage	26
5. Masse volumique apparente	28
6. Résistance à la pénétration	28
7. QuantiSlakeTest	29
8. Rétention en eau du sol	30
8.1. Bac à saturation	31
8.2. Bac à sable.....	31
8.3. Casserole à pression	32
9. Détermination de la conductivité hydraulique à saturation.....	33
9.1. Infiltrométrie	33

9.1.1.	Colorant Brillant Blue	34
9.2.	Perméamètre à charge constante « Eijkelkamp »	36
9.3.	Perméamètre de type Vergière	37
10.	Quantification de la biomasse aérienne sèche	38
11.	Pourcentage de couverture du sol	39
11.1.	Pourcentage de couverture par la biomasse verte	39
11.2.	Pourcentage de couverture par les résidus morts et la mousse.....	39
11.2.1.	Pourcentage de couverture par la mousse	40
11.2.2.	Pourcentage de couverture par les résidus morts	40
12.	Mini-profil	41
13.	Analyse des données.....	41
Quatrième Partie : Résultats		42
1.	Teneur en carbone organique	42
2.	Densité de VDT.....	43
3.	Masse volumique apparente	43
4.	Résistance à la pénétration	44
5.	Stabilité structurale.....	46
6.	Rétention en eau	49
7.	Conductivité hydraulique à saturation.....	51
7.1.	Colorant Brilliant Blue	53
8.	Quantification de la biomasse aérienne sèche	56
9.	Couverture du sol	57
10.	Mini-profil	58
11.	Corrélation entre les indicateurs	59
11.1.	Teneur en carbone organique	59
11.2.	Densité de vers de terre	60
Cinquième partie : Discussion.....		62
1.	Teneur en carbone organique	62
2.	Activité biologique	62
3.	Indicateurs associés à la compaction du sol	63
3.1.	Masse volumique apparente	63
3.2.	Résistance à la pénétration	64
3.3.	Comparaison des indicateurs.....	66
4.	QuantislakeTest.....	67
5.	Capacité de rétention en eau du sol	70

6. Conductivité hydraulique à saturation.....	71
6.1. Colorant <i>Brilliant Blue</i>	74
7. Récapitulatif de l'influence d'une transition sur les indicateurs	74
Conclusion.....	76
Bibliographie	78
Annexes	86

Liste des Figures

Figure 1 - Relation entre la résistance à la pénétration (« resistance to penetration ») et la masse volumique apparente (« volume density ») en lien avec la teneur en matière organique du sol (« organic matter content ») à une tension d'humidité de pF2. (Royal Eijkelpkamp, 2022a).	7
Figure 2 - Courbe de rétention théorique avec ses indicateurs associés : teneur en eau à saturation (« saturated water content »), volume de macropores (« macropores volume »), capacité en air (« air capacity »), réserve en eau utile (« available water capacity »), capacité au champs (« field capacity »), point de flétrissement permanent (« permanent wilting point »). (Adapté de Rabot et al., 2018).	8
Figure 3 - Distribution des pratiques de travail du sol (labour (« conventional tillage »), travail de conservation du sol (« conservation tillage ») et le semis direct (« zero tillage »)) en Europe et au Royaume-Uni pour l'année 2016. (Eurostat, 2020).	11
Figure 4 - Les différents types de travail du sol ainsi que l'outillage associé, classé en fonction de la profondeur du travail, le pourcentage des zones travaillées ainsi que son impact sur le sol. (Roger-Estrade et al., 2014).	14
Figure 5 – Délimitation du site d'étude et des zones associées à différentes modalités de travail du sol : A = Labour, T = techniques culturales simplifiées, A = agriculture biologique de conservation. (Réalisé à partir de CRA-W, 2020).	23
Figure 6 - Représentation de la chaîne de manipulation pour les 4 lots.....	27
Figure 7 - Photo de l'échantillonnage d'une Vergière avant de mettre la paraffine chaude. Photo personnelle.	28
Figure 8 - Illustration du pénétromètre et de sa plaque de référence. (Royal Eijkelpkamp, 2022a).	29
Figure 9 - Dispositif expérimental du QuantislakeTest.(Vanwindekens & Hardy, 2023).	29
Figure 10 - bac de saturation pour échantillon. Photo personnelle.	31
Figure 11 – Bac à sable pour échantillons. Photo personnelle.	31
Figure 12 - Photo de la casserole à pression. Photo personnelle.....	32
Figure 13 – À gauche : échantillons sur la plaque poreuse, dans la casserole à basse pression. À droite : échantillons sous forme de boue sur la plaque poreuse, dans la casserole à haute pression. Photos personnelles.	33
Figure 14 - Infiltromètre à charge constante simple anneau.(Biielders & Javaux, 2023).	33
Figure 15 - Exemple d'une coupe dans le sol après infiltration d'une solution de colorant Brilliant Blue. La surface analysée est délimitée par le cercle blanc. Photo référencée modalité ABC, zone d'échantillonnage 1, profondeur de 10 cm. Photo personnelle.	35
Figure 16 - Représentation schématique du perméamètre. (Royal Eijkelpkamp, 2022b).	36
Figure 17 - Dispositif expérimental de mesure de conductivité hydraulique par perméamétrie de type Vergière. Photo personnelle.	37

Figure 18 - Dispositif expérimental pour la délimitation de la zone d'étude pour la quantification massique de la biomasse verte. Réalisation personnelle.....	38
Figure 19 – Exemple d'un traitement d'image afin de quantifier le pourcentage de couverture de la biomasse verte (sauf la mousse). Photo référencée modalité labour, zone d'échantillonnage 1, échantillon 2. Réalisation personnelle.....	39
Figure 20 - Exemple d'un traitement d'image afin de quantifier le pourcentage de couverture de la mousse avec l'image originale à gauche et la photo ne prenant qu'en compte la zone d'étude au milieu. Photo référencée modalité TCS, zone d'échantillonnage 1, échantillon 1. Réalisation personnelle.	40
Figure 21 - Exemple d'un traitement d'image afin de quantifier le pourcentage de couverture des résidus morts avec l'image originale en haut à gauche, la photo ne prenant en compte que la zone d'intérêt en haut à droite, l'image inversée de la zone d'étude en bas à droite et en bas à gauche le résultat final. Photo référencée modalité ABC, zone d'échantillonnage 1, échantillon 2. Réalisation personnelle.	40
Figure 22 - Boîte à moustache représentant le taux de carbone organique en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) et de la profondeur (0-15 cm et 15-30 cm) avec les lettres de comparaison des moyennes issues de l'ANOVA. Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.	42
Figure 23 - Boîte à moustache représentant la biomasse totale de vers de terre (VDT) en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) avec les lettres de comparaison des moyennes issues de l'ANOVA. Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.	43
Figure 24 - Résistance à la pénétration des modalités étudiées (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) en fonction de la profondeur (gauche) et les lettres de comparaison des moyennes après ANOVA à un facteur 'modalité' par profondeur et après transformation des variables en log10 (droite). Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %. Les barres d'erreurs correspondent à l'écart-type. Les bandes roses indiquent les profondeurs pour lesquelles la condition de normalité des résidus n'est pas respectée malgré la transformation de la variable.	45
Figure 25 – Évolution de la masse relative des échantillons pour les 3 modalités étudiées (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) après immersion dans l'eau (QuantiSlakeTest). Les barres d'erreurs correspondent à l'écart-type.....	46
Figure 26 - Boîte à moustache représentant la durée nécessaire pour que la masse atteigne son maximum t_{max} après immersion (QuantiSlakeTest) en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA associée après transformation log10 de la variable. Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.....	47
Figure 27 - Boîte à moustache représentant la durée nécessaire pour que l'échantillon perde entre 50 % et 75 % de sa masse relative dt_{50-75} lors du QuantiSlakeTest en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA associée après transformation log10 de la variable. Les	

traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.	47
Figure 28 - Boîte à moustache représentant la masse relative de l'échantillon en fin de QuantiSlakeTest Wend en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA après transformation cubique de la variable. Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.	48
Figure 29 - lien de corrélation entre les différents indicateurs du QuantiSlakeTest (W_{end} , dt_{50-75} , pen_{30-60} et t_{max}).	48
Figure 30 – Corrélation entre les indicateurs du QuantiSlakeTest (t_{max} , dt_{50-75} , pen_{30-60} et W_{end}) possédant un coefficient de corrélation significatif au seuil de 5 %. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).	49
Figure 31 - Courbe de rétention en eau pour les 3 modalités étudiées (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).	50
Figure 32 - lien de corrélation entre la teneur en eau à saturation θ_{sat} , la teneur en eau à pF 1 θ_{pF1} , la teneur en eau à la capacité au champs θ_{cc} , et la teneur en eau au point de flétrissement θ_{PF} .	50
Figure 33 – Corrélation entre la réserve en eau utile et la teneur en eau à saturation θ_{sat} . (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).	50
Figure 34 – Corrélation entre les différentes teneurs en eau de la courbe de rétention la teneur en eau à saturation θ_{sat} , la teneur en eau à pF 1 θ_{pF1} , la teneur en eau à la capacité au champs θ_{cc} , et la teneur en eau au point de flétrissement θ_{PF}) possédant un coefficient de corrélation significatif au seuil de 5 %. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).	51
Figure 35 - Boîte à moustache représentant le log de la conductivité hydraulique à saturation en fonction du dispositif (infiltromètre simple anneau, perméamètre Vergière, perméamètre Eijkelkamp), avec les lettres de comparaison des moyennes issues de l'ANOVA associée après transformation log10 de la variable. Les dispositifs partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.	52
Figure 36 – Corrélation entre les dispositifs perméamètre Eijelkamp et infiltromètre simple anneau. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).	52
Figure 37 - Boîte à moustache représentant le log de la conductivité hydraulique à saturation en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC), avec les lettres de comparaison des moyennes issues de l'ANOVA associée après transformation log10 de la variable. Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.	53
Figure 38 - Boîte à moustache représentant la couverture par le colorant en fonction de la profondeur avec les lettres de comparaison des moyennes issues de l'ANOVA associée après transformation log10 de la variable. Les profondeurs partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.	54
Figure 39 - Boîte à moustache représentant le nombre de macropores par m^2 en fonction de la profondeur avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA associée. Les	

profondeurs partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.	54
Figure 40 - Boîte à moustache représentant le nombre de macropores en fonction de l'interaction entre la profondeur et la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA associée. Les profondeurs partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.	55
Figure 41 - Boîte à moustache représentant la densité de flux d'eau au travers des macropores (estimée selon l'équation de Poiseuille) en fonction de la profondeur avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA associée après transformation log10 de la variable. Les profondeurs partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.	55
Figure 42 – Corrélation entre la densité de flux $J_{\text{macropores}}$ (après transformation log10) et la conductivité hydraulique à saturation mesurée par l'infiltromètre Ksat infiltromètre (après transformation log10).	56
Figure 43 - Couverture du sol dans chacune des modalités (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) en fonction des campagnes (05/02/24, 15/03/24 et 14/04/24) , avec les lettres de comparaison des moyennes associées à chaque campagne. Les modalités (pour une même campagne) partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.	58
Figure 44 – Corrélation entre la masse volumique apparente ρ_a et la teneur en carbone organique. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).	59
Figure 45 – Corrélation entre la réserve en eau utile et la teneur en carbone organique. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).	59
Figure 46 - Corrélation entre la résistance à la pénétration (2-8 cm ; données moyennées) et la densité de vers de terre (= VDT). (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).	60
Figure 47 – Corrélation entre les indicateurs du QuantiSlakeTest W_{end} (gauche) et dt_{50-75} (droite) avec l'indicateur de densité de vers de terre (=VDT). (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).	60
Figure 48 - Évolution de la masse relative de l'échantillon au cours du QuantislakeTest (gauche) avec un zoom sur la période 78-158sec (droite) pour l'échantillon référencié modalité ABC, zone d'échantillonnage 2, échantillon 1.	68
Figure 49 – Représentation des zones de profondeurs de sols concernées par les trois dispositifs de mesure de conductivité hydraulique avec à gauche les trois zones (I, II, III) de compaction observées avec le mini profil. Dans le cas de l'infiltromètre, il est difficile de savoir précisément jusqu'à quelle profondeur les mesures sont impactées.	73

Liste des tableaux

Tableau 1 - Fonctions du sol dans le cadre agricole, avec leurs propriétés associées (non exhaustif). (Réalisé à partir de (Delgado & Gómez, 2016; Hatfield et al., 2017; Schlüter et al., 2020).	3
Tableau 2 - Les différents types de matière organique (= MO) du sol et leurs rôles au sein du sol. (Réalisé à partir de Calvet, 2013; Blume et al., 2016; Duchaufour et al., 2018).	4
Tableau 3 - Classification écologique des vers de terre. (Synthèse personnelle réalisée à partir de Klavivko, 2001; Balabane et al., 2005; Citeau et al., 2008; Observatoire participatif des vers de terre (OPVT), s. d.).....	5
Tableau 4 - Itinéraire technique simplifié associé aux trois modalités de travail du sol (labour (L), TCS (T) et ABC (A)) pour la période étudiée. (Réalisé à partir de CRA-W, 2024). 24	
Tableau 5 – Caractéristiques des lots d'échantillonnage.	27
Tableau 6 – Effet des facteurs ‘modalité’ et ‘profondeur’ sur la teneur en carbone organique. Les p-valeurs écrites en orange sont significatives au seuil de 5 %.	42
Tableau 7 – Résultats des ANOVA à un facteur selon les modalités (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) pour la masse volumique apparente ρ_a , différentes teneurs en eau caractéristiques à la courbe de rétention en eau du sol (teneur en eau à saturation θ_s , teneur en eau à pF1 θ_1 , teneur en eau à la capacité au champs θ_{cc} et teneur en eau θ_{PFP}) et la pente ₃₀₋₆₀ dérivée des résultats du QuantiSlakeTest en fonction de la modalité, avec la p-valeur associée à chaque ANOVA. Les valeurs suivies d’une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.....	43
Tableau 8 – Effet des facteurs ‘dispositif’ et ‘modalité’ sur la conductivité hydraulique à saturation après transformation des variables en log10. Les p-valeurs écrites en orange sont significatives au seuil de 5 %.....	51
Tableau 9 – Effet des facteurs ‘modalité’ et ‘profondeur’ sur la couverture par le colorant Brilliant Blue après transformation des variables en log10, le nombre de macropores et la densité de flux d’eau à travers les macropores après transformation des variables en log10. Les p-valeurs écrites en orange sont significatives au seuil de 5 %.	53
Tableau 10 – Coefficients de corrélation entre les indicateurs de la densité de flux au travers des macropores $J_{\text{macropore}}$, le nombre total de macropores par m^2 , la couverture du colorant et la conductivité hydraulique à saturation obtenue avec l’infiltromètre K_{sat} . Les coefficients de corrélation écrits en orange sont significatifs au seuil de 5 %.....	56
Tableau 11 - Résultats des ANOVA à un facteur ‘modalité’ pour la quantification de la biomasse aérienne sèche, la couverture par les résidus, la mousse ou leur combinaison en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC), avec les lettres de connexion et la p-Valeur associée à chaque ANOVA. Les valeurs suivies d’une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.....	57
Tableau 12 - Coefficients de corrélation entre les indicateurs de teneur en eau à saturation θ_{sat} , de teneur en eau à pF 1 θ_{pF1} , de teneur en eau à la capacité au champs θ_{cc} , de teneur en eau au point de flétrissement θ_{pfp} , de réserve en eau utile RU, des indicateurs du QuantiSlakeTest (T_{max} , Pente ₃₀₋₆₀ , dt_{50-75} , Wend), des conductivités hydrauliques à	

saturation mesurées avec l'infiltromètre simple anneau (Ksat infiltromètre), avec le perméamètre type Vergière (Ksat vergière) et le perméamètre type Eiljelkamp (Ksat perméamètre), de teneur en carbone organique entre 0 et 15 cm (C_{org} 0-15), de masse volumique apparente pa, de résistance à la pénétration entre 2 et 8 cm ainsi que de densité de vers de terre (VDT). Les coefficients de corrélation écrits en orange sont significatifs au seuil de 5 %. 61

Tableau 13 - Tableau récapitulatif des effets d'une transition d'une agriculture conventionnelle vers une agriculture de conservation, selon deux temporalités représentées par les modalités TCS (5 ans) et ABC (15 ans). ↗ augmentation, ↘ diminution, = pas d'influence, ↗ = pas d'influence voir une augmentation et ↘ = pas d'influence voir une diminution. . 75

Abréviations

ABC : Agriculture biologique de conservation

AgriCons : Agriculture de conservation

AgriConv : Agriculture conventionnelle

C_{org} : Carbone organique

CRA-W : Centre Wallon de Recherche agronomique

ESR : Système en Réseau de parcelles

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

J_{Poiseuille} : Densité de flux

K_{sat} : Conductivité hydraulique à saturation

MO : Matière organique

QST : QuantiSlakeTest

RU : Réserve en eau utile

TCS : Technique culturale simplifiée

MO : Matière organique

VDT : Vers de terre

ρ_a : Masse volumique apparente

θ : Teneur en eau

θ_{cc} : Teneur en eau à la capacité au champs

θ_{pfp} : Teneur en eau au point de flétrissement permanent

θ_{sat} : Teneur en eau à saturation

ε : Porosité

ΔH : Différence de pression hydrostatique

Introduction

Depuis son apparition lors de la révolution agricole néolithique, l'agriculture n'a cessé de s'étendre à travers toute l'Europe en se transformant progressivement d'une agriculture extensive en une agriculture intensive. Actuellement, l'agriculture dominante en Belgique et de manière générale dans les pays dits « développés¹ » est appelée agriculture conventionnelle (AgriConv). Son objectif principal est la maximisation des rendements agricoles en utilisant diverses pratiques selon les besoins et les situations (Basche & DeLonge, 2019; Songliang & Caldwell, 2020; Ren et al., 2023): utilisation de produits phytosanitaires et d'engrais en grandes quantités, travail du sol conséquent avec usage récurrent de la charrue (labour), rotations culturales courtes et simplifiées, irrigation. Ceci est généralement accompagné d'investissements dans des équipements agricoles de plus en plus performants. Le travail du sol constitue un des aspects clés de cette agriculture et il génère des impacts négatifs variés sur le sol dont les plus importants sont la perturbation de l'activité biologique, la compaction des sols en profondeur (semelle de labour) et l'augmentation de la sensibilité à l'érosion (Citeau et al., 2008; Bouthier et al., 2014; Or et al., 2021). Ces différents impacts constituent des enjeux pour la qualité de l'environnement et questionnent la durabilité de l'agriculture actuelle pour le futur.

Les terres agricoles occupant un peu plus de la moitié de la Wallonie (51,6 %), l'agriculture est un acteur clé dans la gestion de l'espace rural (SPW, 2022b). La manière dont elle est majoritairement pratiquée actuellement a des impacts négatifs sur le territoire et ses composantes environnementales (Lal, 1991; Kladivko, 2001; Kassam et al., 2018). Dès lors, bien que l'AgriConv remplisse ses objectifs de production en Wallonie, ses différents impacts négatifs mènent à l'apparition de nouvelles manières de pratiquer l'agriculture depuis quelques décennies. L'agriculture de conservation (AgriCons) en fait partie (Hobbs et al., 2007; Ogieriakhi & Woodward, 2022; Osujie et al., 2023). Celle-ci repose sur trois piliers : une perturbation mécanique minimale du sol, une couverture organique permanente du sol ainsi qu'une diversification des espèces cultivées (FAO, 2023). Remettant en question certaines pratiques de l'AgriConv et principalement la manière dont le sol doit être travaillé (1^{er} pilier) elle constitue un des nouveaux paradigmes pour affronter les enjeux environnementaux actuels de l'agriculture proposant une manière plus durable et environnementalement respectueuse de gérer les cultures (Hobbs et al., 2007; Ulrich et al., 2010; Toth et al., 2024).

Dans une optique de définir si la transition de pratiques conventionnelles vers la mise en place de pratiques de conservation favorise réellement une gestion durable des sols cultivés, il est crucial de comprendre l'influence des pratiques sur la production agricole, la qualité des sols et, plus généralement, les incidences sur l'environnement. Plusieurs points de questionnement se posent donc, et l'un d'entre eux concerne l'influence de cette transition sur les propriétés du sol, et en particulier sur les propriétés physiques telles que la masse volumique apparente (ρ_a), la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}), la capacité de rétention en eau, la résistance

¹ Appellation économique pour désigner un état considéré comme riche et offrant à ses habitants un niveau de vie confortable (accès aux services de santé et à l'éducation notamment) (Linternaute, 2021).

mécanique ou encore la stabilité structurale. La période écoulée depuis la mise en place de cette transition est également un facteur important sur le potentiel agricole de l'AgriCons, les propriétés du sol étant susceptibles de varier au cours de l'implémentation de ces nouvelles pratiques.

C'est dans ce cadre que mon mémoire se situe. Bien que l'ensemble des impacts de cette transition soit à prendre en compte, ce mémoire se focalise sur l'étude des sols et plus particulièrement sur leur qualité physique ainsi que leur évolution temporelle face à des changements de pratiques agricoles. Le mémoire s'inscrit dans le projet d'Expérimentation Système en Réseau de parcelles (ESR), aussi appelé essai ABC, opéré par les acteurs TRANSAE², DiverIMPACTS³, le Centre Wallon de Recherche agronomique⁴ (CRA-W) ainsi que Greenotec⁵. Ces expérimentations systèmes à long terme, débutées en 2020, sont conduites dans plusieurs fermes belges. Elles ont pour objectif de mettre à l'épreuve des systèmes à horizon « sans labour et sans pesticides », dans le but de renforcer les fonctions de l'agroécosystème et donc les services rendus par celui-ci (CRA-W, 2023; Fockedey, 2023). Bien que le projet ESR implique plusieurs fermes wallonnes, une seule parcelle, appartenant aux fermes universitaires de l'UCLouvain, est étudiée. Elle comporte plusieurs modalités de travail du sol, deux sous AgriCons et une sous AgriConv.

Quant à la structure du travail, elle est divisée en quatre parties. La première partie ("État de l'art") se divise en 4 sections. La première section concerne la qualité du sol, ce qu'elle représente dans le cadre de l'agriculture ainsi que les différents indicateurs pour la déterminer. La deuxième section s'articule autour de l'histoire de l'agriculture. Considérer l'évolution agricole de la société permet de mieux comprendre le contexte de l'agriculture d'aujourd'hui ainsi que les enjeux qui s'en suivent. La troisième s'intéresse à l'AgriConv et plus particulièrement les impacts du labour, travail du sol dominant dans celle-ci. La dernière concerne l'AgriCons en tant que telle. Les différents principes qui la constituent et leur importance respective pour le sol sont expliqués. La deuxième partie ("Matériels et méthodes") comprend une présentation de la zone d'étude, la méthode d'acquisition des données ainsi que leur méthodologie de traitement. La troisième partie ("Résultats") comprend l'ensemble des résultats obtenus pour les différents indicateurs de qualité du sol étudiés. La quatrième partie ("Discussion") discute les résultats obtenus pour les différentes modalités de travail du sol, les comparer avec la littérature et met en évidence leurs limites. Une conclusion clôture ce travail, reprenant les points clés apportés au cours de ces recherches.

² Projet visant à développer l'agroécologie en s'appuyant sur un réseau d'agriculteurs belges et français (TRANSAE, s. d.).

³ Projet visant à atteindre le meilleur potentiel de la diversification des systèmes de culture afin d'améliorer la productivité, fournir les services écosystémiques, utiliser de manière efficiente les ressources ainsi que de proposer des chaînes de valeurs durables (DiverIMPACTS, s. d.)

⁴ Centre combinant des fonctions de recherche scientifique, de service et de support au bénéfice des agriculteurs, éleveurs, horticulteurs, sylviculteurs wallons et des opérateurs du secteur agro-alimentaire (CRA-W, s. d.).

⁵ ASBL aidant les agriculteurs à la recherche de solutions concrètes aux problèmes pratiques dans l'adoption de techniques de conservation des sols sur leur exploitation (Greenotec, s. d.)

Première partie : Etat de l'art

1. Qualité du sol

Les définitions pour décrire la qualité du sol sont multiples dans la littérature scientifique. Cela s'explique par des objectifs d'utilisation ou de gestion du sol qui ne convergent pas toujours. La manière de voir ce concept dans le cadre de ce mémoire doit prendre en compte l'aspect environnemental en plus de celui de la fertilité agronomique. Elle peut alors être définie comme étant la « *capacité d'un sol à fonctionner à l'intérieur de ses frontières afin de soutenir la productivité biologique, maintenir un environnement de qualité et promouvoir la santé végétale et animale* » (Magdoff, 1995). Cette qualité est largement définie par les différentes fonctions du sol et exprimée comme une combinaison de ses propriétés physiques, biologiques et chimiques qui peuvent dès lors servir d'indicateurs de la qualité du sol (Delgado & Gómez, 2016; Hatfield et al., 2017; Schlüter et al., 2020 ; Tableau 1).

Tableau 1 - Fonctions du sol dans le cadre agricole, avec leurs propriétés associées (non exhaustif). (Réalisé à partir de (Delgado & Gómez, 2016; Hatfield et al., 2017; Schlüter et al., 2020)).

Fonctions du sol	Exemples de propriétés du sol associées
Disponibilité/stockage de l'eau	Capacité de rétention en eau, réserve en eau utile, porosité du sol, ...
Transport de l'eau	Masse volumique apparente, abondance des lombrics, conductivité hydraulique à saturation, ...
Recyclage des nutriments	Diversité biologique du sol, capacité d'échange des cations, pH du sol, ...
Stockage et cycle du carbone	Teneur en carbone organique du sol, taux de respiration du sol, pH du sol, ...
Propriétés mécaniques (Ex : ancrage des racines)	Teneur en carbone organique du sol, diversité biologique du sol, résistance mécanique, ...
Croissance des plantes	Teneur en carbone organique et en azote du sol, porosité du sol, résistance à la pénétration, ...

Partageant certaines de leurs définitions, la santé du sol est un concept également utilisé dans la littérature scientifique. Celui-ci, créé dans les années 1990, se propage depuis une dizaine d'années, au détriment de la qualité du sol (Magdoff, 1995; Lehmann et al., 2020). Cependant, bien que souvent considérés comme synonyme, certaines études, dont celles de Lehmann et al. (2020), soutiennent que ces deux concepts doivent être différenciés. La santé du sol constituerait un principe plus global contribuant à des objectifs larges de durabilité et la qualité du sol serait une simple propriété à mesurer qui se concentre sur les services écosystémiques utiles pour l'humain (Lehmann et al., 2020). Le concept de santé du sol inclut dès lors celui de qualité du sol mais il possède une portée plus large (Delgado & Gómez, 2016).

Cependant, définir la santé des sols de manière quantitative représente un véritable défi dû à l'hétérogénéité des sols, les différentes gestions/utilisations de ces sols et le fait que les services écosystémiques rendus par ceux-ci sont parfois contradictoires ou concurrents (Lehmann et al., 2020). Dès lors, ce concept en pleine expansion n'est pas encore totalement accepté dans la communauté scientifique, ce qui explique pourquoi le concept de qualité du sol est utilisé dans ce mémoire.

1.1. Indicateurs biologiques

1.1.1. Matière organique

Bien que présente en moyenne à des concentrations massiques comprises entre 2 et 5 % dans les horizons superficiels des sols cultivés, la matière organique (MO) est un indicateur biochimique essentiel pour évaluer la qualité d'un sol (Calvet, 2013). En effet, elle a de nombreuses influences que ce soit au niveau biologique en favorisant l'activité biologique, au niveau physique en permettant d'améliorer la structure ou encore au niveau chimique en augmentant la capacité d'échange cationique (Blume et al., 2016).

La MO du sol est présente sous plusieurs formes. Tout d'abord, il y a une différenciation entre la MO vivante - les organismes vivants (faune, flore et microflore du sol) - et la MO morte. Dans cette dernière, on trouve la MO fraîche, la MO labile et la MO stable (humus). Ces 4 compartiments ont tous des rôles différents au sein du sol (Tableau 2) et sont en relation les uns avec les autres.

Tableau 2 - Les différents types de matière organique (= MO) du sol et leurs rôles au sein du sol. (Réalisé à partir de Calvet, 2013; Blume et al., 2016; Duchaufour et al., 2018).

Types de MO		Rôles
MO vivante		- Décomposition de la MO fraîche
		- Soutien de la fertilité chimique
		- Amélioration de la structure du sol
MO morte	MO fraîche	- Source d'énergie pour les organismes du sol
		- Soutien de la fertilité chimique
	MO labile	- Amélioration de la structure du sol
		- Soutien de la fertilité chimique
		- Source d'énergie pour les organismes du sol
	Humus	- Amélioration de la structure du sol
		- Soutien de la fertilité chimique

Lorsque de la MO fraîche est apportée au sol, que ce soit par la mort d'organismes vivants du sol, des résidus de cultures ou encore à la suite d'un apport extérieur comme du fumier ou des engrais verts, elle va pouvoir être transformée après sa décomposition. En fonction de la composition de la MO et de son temps de résidence au sein du sol, son utilité va varier. Dans le cas d'un turnover rapide, elle va plutôt contribuer à la libération d'éléments nutritifs en subissant la minéralisation et très peu à alimenter le stock d'humus au sein du sol. C'est le cas inverse lorsque son turnover est lent ; dans ce cas, la majorité va plutôt contribuer à la stabilisation du sol par la formation du complexe argilo-humique.

1.1.2. Vers de terre

Les microorganismes et la faune présents dans le sol sont divers, chacun ayant un rôle afin de contribuer à son bon fonctionnement (Citeau et al., 2008; Bonilla-Bedoya et al., 2023). En ce qui concerne plus particulièrement celui de la faune, sa taille ainsi que son mode de vie (manière

de se nourrir et mobilité), déterminent ses actions sur le sol (Magdoff, 1995). Ces différents organismes, en influençant le fonctionnement du sol, ont également un impact sur sa qualité.

Dans le cadre d'une étude de généralisation des indicateurs biologiques du sol les plus utilisés dans la littérature scientifique, Bonilla-Bedoya et al. (2023) proposent 25 indicateurs dont les vers de terre (VDT). L'utilisation de la macrofaune comme indicateur est en effet intéressante car elle est facilement visible, a le potentiel d'effets directs le plus important sur les propriétés du sol (Magdoff, 1995) mais est également une des plus sensibles aux effets du travail du sol (Blume et al., 2016). De plus, les VDT sont un indicateur biologique bien connu pour les études de qualité du sol, les scientifiques recourant à différents indicateurs : abondance, biomasse, structure écologique, structure de la population, ... (Citeau et al., 2008). En particulier, les VDT peuvent être classés en 3 classes écologiques : les épigés, les endogés ainsi que les anéciques. Comme le montre le Tableau 3, ces différentes classes ne possèdent pas la même morphologie et n'ont pas la même contribution au maintien du bon fonctionnement du sol.

Tableau 3 - Classification écologique des vers de terre. (Synthèse personnelle réalisée à partir de Klavdivko, 2001; Balabane et al., 2005; Citeau et al., 2008; Observatoire participatif des vers de terre (OPVT), s. d.)

	Épigé	Endogé	Anécique
Taille	Petite (1-5 cm)	Moyenne à grande (1-20 cm)	Grande (10-110 cm)
Couleur	Rouge sombre	Faiblement pimentée	Variable
Site de vie	En surface et dans la litière	Principalement dans les premiers 30 cm	Dans l'ensemble du profil de sol
Mode de vie	Ne crée pas ou peu de galeries	Crée des galeries horizontales temporaires	Crée des galeries verticales permanentes Jusqu'à la surface
Rôles dans le sol	- Fractionnement de la matière organique - Augmentation de la porosité en surface	- Agrégation des sols - Stabilisation de la matière organique	- Amélioration de l'infiltration de l'eau - Création d'espaces pour les racines - Structuration du sol - Enfouissement de la matière organique en profondeur
Présence dans les terrains agricoles	Souvent absent	Oui	Oui

1.2. Indicateurs physiques

Dans cette sous-section, 5 indicateurs physiques de qualité des sols sont présentés : ρ_a , la résistance mécanique, la capacité de rétention en eau du sol, K_{sat} et la stabilité structurale. Ces différents indicateurs ont été choisis car ils représentent les caractéristiques physiques du sol les plus communes en termes d'intérêt agricole. Ils sont liés entre eux, s'influençant mutuellement.

1.2.1. Masse volumique apparente

L'indicateur ρ_a est défini comme la masse de sol sec par unité de volume de sol. Il est directement lié à la porosité ε du sol grâce à l'Équation 1.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad [-] \quad (1)$$

Avec :

ρ_a , la masse volumique apparente du sol [g/cm³] ;

ρ_s , la masse volumique réelle de solide, avec pour référence courante la masse volumique du quartz qui vaut 2,65 g/cm³.

Pour une même texture, ρ_a permet de donner une estimation de l'état de compaction du sol pour la profondeur étudiée (Kaufmann et al., 2010; Rai et al., 2017). Le phénomène de compaction se produit lorsque le sol n'est plus capable de restaurer sa porosité initiale suite à l'application d'une pression externe sur celui-ci. Les agrégats⁶ du sol sont soumis à une modification de leur disposition spatiale (en se rapprochant les uns des autres), de leur taille et de leur forme. Par conséquent, ces modifications mènent à une diminution de ε (et donc à une augmentation de ρ_a) ainsi qu'à une diminution de la connectivité des pores.

La porosité du sol reprend une large gamme de tailles de pores, du nanomètre (espaces entre les feuillets des particules argileuses) au millimètre (biopores, fissures), voire plus dans le cas de galeries créées par la macrofaune. Cette porosité peut être divisée en 3 classes principales selon leur diamètre: les macropores (> 50 nm), les mésopores (2-50 nm) ainsi que les micropores (< 2 nm) (Burwell, 1977). La compaction mène à une diminution de la porosité totale du sol mais majoritairement par la diminution des macropores (McKyes, 1985a; Nawaz et al., 2013). La densité des mésopores a tendance à augmenter par la diminution de taille des macropores et celle des micropores reste relativement inchangée (Hillel, 1974; Rabot et al., 2018).

1.2.2. Résistance mécanique

Un autre indicateur de la compaction du sol est la résistance mécanique. Elle peut être mesurée à partir de la résistance à la pénétration du sol, c'est-à-dire « *la résistance offerte par la matrice du sol à la pénétration des racines en croissance* » (Tsegaye & Mullins, 1994), mesurée par un pénétromètre. Celle-ci estime, comme ρ_a , le niveau de compaction du sol et permet de mettre en évidence la capacité du sol à supporter une contrainte sans se déformer (Biielders et al., 2013). Plus la résistance est élevée, plus la masse volumique est grande et plus la compaction du sol est importante. En effet, les particules de sol auront plus difficile à se déplacer latéralement lors du passage du pénétromètre lorsque le sol est plus compacté.

Outre la texture, l'indicateur dépend également de l'humidité du sol, de la teneur en MO et de ρ_a (reflet de la structure du sol). La Figure 1 met en évidence le lien entre la résistance à la pénétration avec ces deux derniers facteurs pour une teneur en eau (θ) donnée. Une

⁶ Unité structurale du sol (Menon et al., 2020).

augmentation de la MO, une diminution de ρ_a et/ou une augmentation de l'humidité du sol permettent de diminuer la résistance à la pénétration du sol (Royal Eijkelpkamp, 2022a).

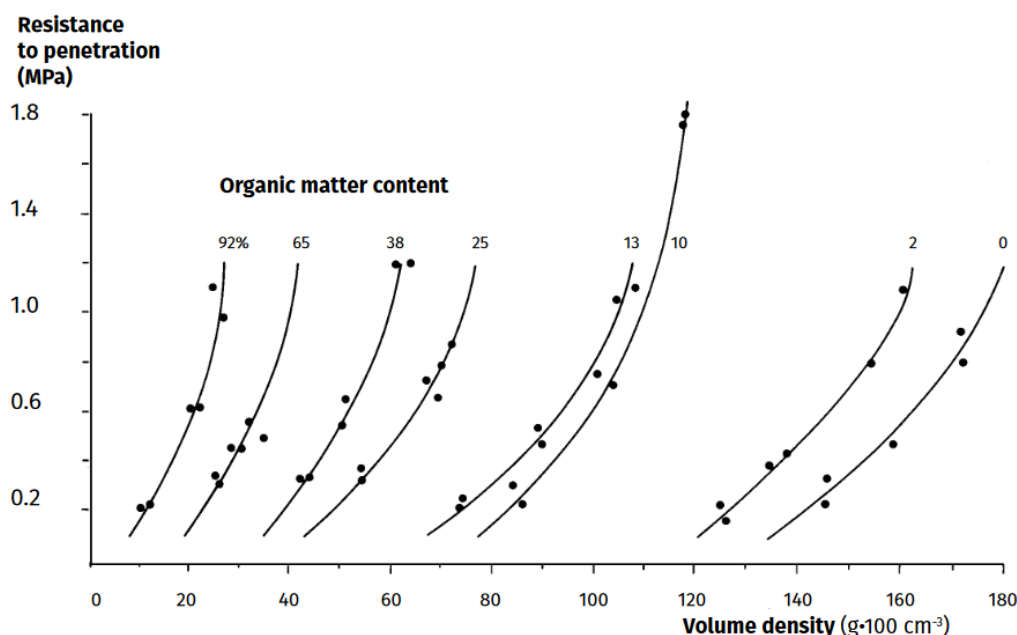


Figure 1 - Relation entre la résistance à la pénétration (« resistance to penetration ») et la masse volumique apparente (« volume density ») en lien avec la teneur en matière organique du sol (« organic matter content ») à une tension d'humidité de pF2. (Royal Eijkelpkamp, 2022a).

1.2.3. Stabilité structurale

La stabilité structurale est définie comme « la capacité du sol à conserver l'arrangement des solides et de l'espace vide, ainsi que leurs caractéristiques fonctionnelles par rapport à l'état naturel » (Lal, 1991). En région tempérée, la stabilité structurale constitue l'un des principaux facteurs contrôlant la fertilité des sols agricoles travaillés de manière intensive, celle-ci influençant les processus du sol ainsi que la régulation de la qualité de l'environnement (Lal, 1991; Citeau et al., 2008; Vanwindekens & Hardy, 2023). Elle a donc un rôle important dans la durabilité de la production agricole et dans la qualité environnementale (Tableau 1).

1.2.4. Capacité de rétention en eau du sol

La disponibilité et le stockage de l'eau dans les sols est une fonction importante en agriculture (Tableau 1), la capacité de rétention en eau dans le sol étant un des facteurs les plus importants pour la croissance des plantes (Minasny & McBratney, 2018). La rétention en eau d'un sol est représentée généralement par une courbe de rétention en eau du sol (Figure 2⁷), représentant la θ du sol en fonction du potentiel matriciel (h) de celle-ci, exprimé dans cette figure par le pF⁸. À partir de cette courbe de rétention en eau, plusieurs indicateurs se rapportant à la rétention en eau du sol peuvent en être dérivés dont la réserve en eau utile (RU). Cette dernière est « la capacité des sols à stocker et à fournir de l'eau aux racines des plantes » (Rabot et al., 2018).

⁷ Figure utilisée à titre schématique, les seuils des indicateurs pouvant ne pas être les mêmes que ceux utilisés dans ce mémoire.

⁸ Expression du potentiel matriciel (h) du sol. pF = $\log(-h)$, $h < 0$ cm

Comme le montre la Figure 2, il s'agit donc de la quantité d'eau retenue entre la capacité au champ⁹ ($pF \approx 2,5$) et le point de flétrissement permanent¹⁰ ($pF \approx 4,2$).

Les courbes de rétention permettent également de mettre en évidence le volume occupé par chacune des classes de pores (Rabot et al., 2018). Lorsqu'une succion est appliquée sur un sol initialement saturé, il va commencer à se vider une fois le point d'entrée d'air¹¹ atteint. La vidange se poursuit au fur et à mesure que la succion augmente, vidant successivement les macro-, méso- et micro-pores. De plus, la teneur en eau à saturation (θ_{sat}) obtenue lorsque tous les pores sont remplis d'eau, renseigne sur la porosité totale.

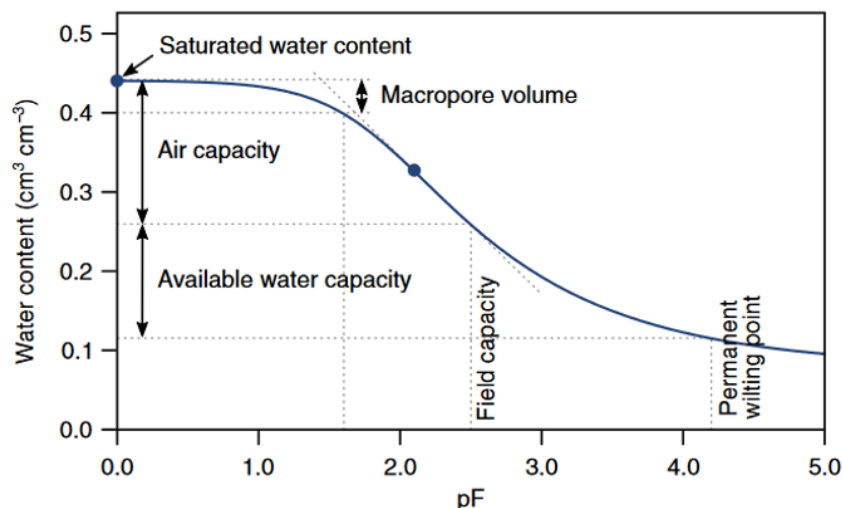


Figure 2 - Courbe de rétention théorique avec ses indicateurs associés : teneur en eau à saturation (« *saturated water content* »), volume de macropores (« *macropores volume* »), capacité en air (« *air capacity* »), réserve en eau utile (« *available water capacity* »), capacité au champs (« *field capacity* »), point de flétrissement permanent (« *permanent wilting point* »). (Adapté de Rabot et al., 2018).

1.2.5. Conductivité hydraulique à saturation

La conductivité hydraulique est définie comme étant « *une grandeur qui caractérise l'aptitude du sol et plus généralement celle d'un milieu poreux à permettre le déplacement d'une phase liquide continue dans des pores non fermés* » (Calvet, 2013). Elle s'exprime comme le rapport entre la densité de flux d'eau et le gradient de potentiel hydrique total.

Lorsque toute la porosité du sol est remplie d'eau, le terme de conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) est utilisé. K_{sat} dépend majoritairement de la structure du sol¹² dont trois paramètres principaux : le rayon des pores, leur tortuosité¹³ et la connectivité du milieu poral

⁹ Teneur en eau volumique du sol après 48h de drainage d'un sol initialement saturé (Rai et al., 2017).

¹⁰ Teneur en eau volumique du sol pour laquelle les plantes ne sont plus capables de prélever l'eau au sein du sol (Rai et al., 2017).

¹¹ Succion minimale à appliquer pour que les plus gros pores commencent à se vider.

¹² Géométrie de l'espace poral (Calvet, 2013).

¹³ Rapport entre la longueur réelle des chemins suivis et par le transport et la longueur apparente de ces chemins (Calvet, 2013).

(Calvet, 2013; Wardak et al., 2022). Les pores de grandes tailles (loi de Poiseuille), avec une faible tortuosité et une grande connectivité permettent de maximiser K_{sat} (Brady, 2014).

2. Histoire de l'agriculture

L'agriculture et surtout la vision que la société en a ne sont pas statiques. Elle a évolué au cours du temps, au gré des différents enjeux et révolutions auxquels l'humanité a ou va faire face.

L'agriculture a pris naissance lors de la révolution agricole néolithique, il y a moins de 10 000 ans, lorsque les personnes abandonnèrent progressivement leurs techniques de chasseurs-cueilleurs pour la domestication végétale et l'élevage. Il est alors question seulement d'agriculture de subsistance, avec des rendements faibles ne permettant pas d'obtenir de surplus. Au fil des siècles, de nouvelles techniques apparaissent afin de faciliter et maximiser le travail des paysans. Les premières traces de labour remonteraient en l'an 3000 av. J.-C en Égypte, au bord des rivières Euphrate et Nil (McKyes, 1985b). Dans ses débuts, le travail du sol était limité en raison de l'outillage disponible, ce qui menait à une forme très primitive de labour. Par exemple, en Égypte, on utilisait une forme primitive de charrue légère en bois et dans le système agraire inca, un simple bâton enfouisseur appelé « taccla » (Mazoyer & Roudart, 2002; McKyes, 1985b). Durant l'Antiquité, il y a eu l'araire avec traction animale mais il a fallu attendre le Moyen Âge pour avoir une généralisation des charrues en Europe (Mazoyer & Roudart, 2002).

À partir de la fin du XVIII^e siècle, la révolution industrielle a un impact fort sur différents secteurs d'activités en Europe, dont le secteur agricole qui prend alors un tournant décisif. La société est en train de vivre la transformation progressive du système agraire de l'époque, menant à une modification des pratiques agricoles, grâce aux innovations technologiques développées au cours de cette période (Hudson, 1992). La mécanisation de l'agriculture ainsi que l'intensification qui l'accompagne permettent dorénavant de produire beaucoup plus qu'auparavant. L'agriculture se transforme en agriculture capitaliste et il s'agit dès lors de toujours produire plus.

Cependant, cette manière de pratiquer l'agriculture ne peut pas continuer à se développer et perpétuer si la fertilité du sol n'est pas prise en compte. Avant la généralisation des engrais chimiques, l'élevage et l'agriculture étaient couplés. D'une part, le fumier issu de l'élevage pouvait être utilisé comme source principale d'apports de nutriments permettant de compenser les pertes nutritives du sol et donc de maintenir une fertilité du sol nécessaire pour les cultures suivantes. D'autre part, une partie des cultures pouvait être utilisée pour l'alimentation du bétail. Il y avait un certain équilibre. Avec l'augmentation des superficies de terres cultivées grâce à la mécanisation, cette contribution animale n'était plus suffisante pour maintenir la fertilité des terres. L'arrivée de la Révolution verte, dans la seconde partie du XX^e siècle, est vue comme une solution à ce manque limitant le potentiel de productivité. En apportant des engrais en abondance, les cultures disposent de tous les nutriments essentiels pour leur croissance.

Cette envie de toujours produire plus ne s'est pas estompée avec les années. Plusieurs mesures comme la politique agricole commune¹⁴ (PAC), la sélection génétique ainsi que l'amélioration des technologies agricoles ont encouragé les agriculteurs à continuer sur cette voie. Le résultat de cette transformation progressive du système agricole de l'époque peut être chiffré. Par exemple, la production européenne de céréales a augmentée de 100 % pour la période 1961-2022 (Our World in Data, s. d.) alors que la superficie utilisée pour ce type de culture au cours de cette période diminue (-39 %). Cette forte augmentation met en lumière les effets de cette transformation, permettant ainsi d'obtenir une meilleure productivité par unité de surface de terre cultivée en Europe. Cela a été démontré ici pour les céréales mais il s'agit d'un constat plus généralisé. De plus, ces pratiques sont aussi intéressantes sur le plan socio-économique : de meilleures conditions de vie pour les agriculteurs, une stabilisation des marchés, des produits alimentaires disponibles et accessibles à bas prix pour les consommateurs (SPW, 2021). L'évolution de l'agriculture, depuis son origine jusqu'à aujourd'hui, représente donc un long processus d'intensification, bien que beaucoup plus complexe que ce qui a été décrit. Cet héritage agricole a permis d'aboutir au système agricole dominant actuellement, nommé AgriConv, restant dans cette optique de maximisation des rendements agricoles.

3. Agriculture conventionnelle

L'AgriConv, agriculture dominante en Wallonie, est un système agricole intensif dont l'objectif principal est la maximisation des rendements agricoles. En effet, bien qu'aucun chiffre ne soit disponible en 2023, l'État de l'environnement wallon décrit encore l'agriculture wallonne comme majoritairement intensive et conventionnelle, montrant toujours sa prédominance sur le territoire (SPW, 2021).

Bien que très peu durable, plusieurs pratiques peuvent être mises en place pour atteindre les objectifs de production (Basche & DeLonge, 2019; Songliang & Caldwell, 2020; Ren et al., 2023) : utilisation de produits phytosanitaires et d'engrais en grandes quantités, travail du sol conséquent avec usage récurrent de la charrue (labour), rotations culturales courtes et simplifiées, irrigation (peu pratiquée en Belgique avec seulement 1 % de l'eau utilisée pour l'agriculture (Defourny, 2023)). Ceci est généralement accompagné d'investissements dans des équipements agricoles de plus en plus performants.

En ce qui concerne plus particulièrement le travail du sol, le labour fait partie intégrante de l'AgriConv. Sa mise en place se réfère à l'utilisation d'une charrue pour effectuer un traitement du sol entre la récolte et la prochaine culture ou semis. La profondeur de travail est de manière générale comprise entre 20 et 30 cm, menant à une fragmentation et un retournement du sol dans le profil travaillé (Roger-Estrade et al., 2014). Le labour est pratiqué sur un peu moins de 80 % des terres arables en Belgique (Figure 3).

¹⁴ Politique européenne rentrée en vigueur en 1962, afin de promouvoir une modernisation de l'agriculture en la mécanisant, tout en garantissant une sécurité monétaire pour les agriculteurs afin de les encourager vers cette transformation du système agricole (MASA, s. d.).

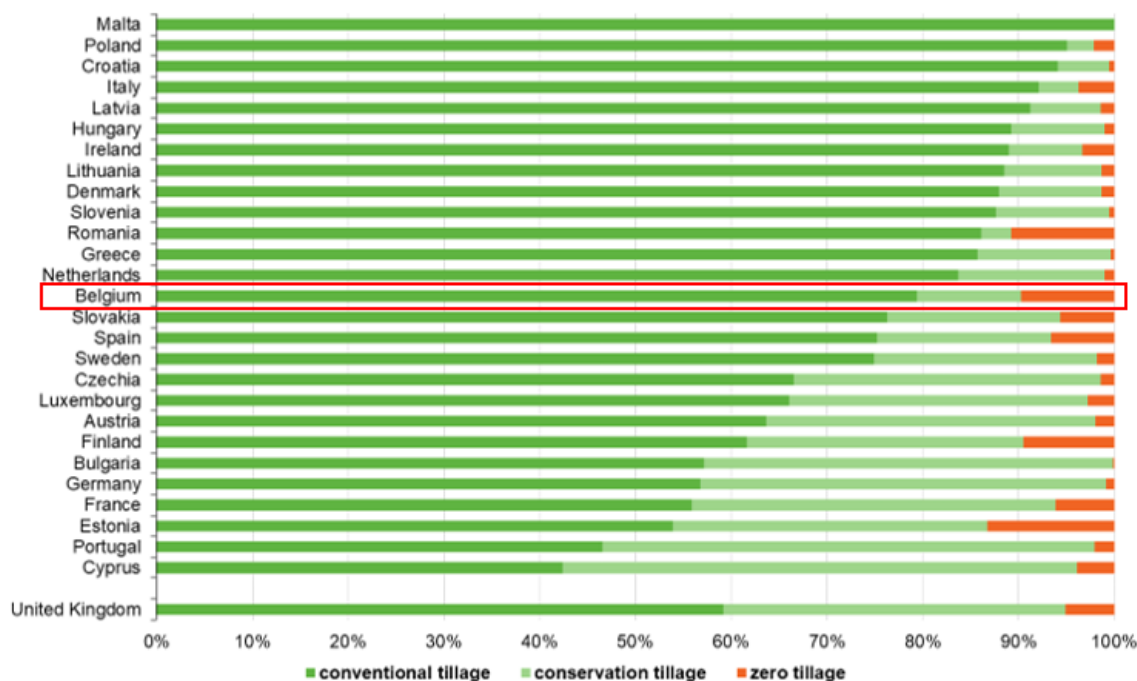


Figure 3 - Distribution des pratiques de travail du sol (labour (« conventional tillage »), travail de conservation du sol (« conservation tillage ») et le semis direct (« zero tillage ») en Europe et au Royaume-Uni pour l'année 2016. (Eurostat, 2020).

La pratique récurrente du labour en AgriConv s'explique par ses nombreux avantages. De manière générale, trois objectifs principaux sont atteints par sa mise en place.

Le premier est une amélioration temporaire de la structure du sol (Hobbs et al., 2007; Labreuche, Lecomte, et al., 2014; Manley et al., 2019). En effet, il vise à modifier les propriétés du sol, dont celles physiques, afin d'améliorer les conditions pour la croissance de la culture (Farooq & Siddique, 2015). Cela permet par la suite de préparer un lit de semence assurant une bonne germination et uniformité, affecte le régime thermique du sol en réchauffant plus rapidement le sol au printemps ce qui accélère la germination, décompacte le sol en surface par la création de macropores permettant, aussi d'améliorer le drainage interne et l'aération du sol.

Le deuxième est la gestion des adventices¹⁵ (Hobbs et al., 2007; Singh et al., 2015; Manley et al., 2019). En les enfouissant, le labour permet de limiter la compétition avec la culture d'intérêt au début de son cycle de croissance. Cela peut se faire de plusieurs manières : destruction directe par la charrue des mauvaises herbes, enfouissement du stock de graines ne leur permettant pas de germer ou encore création d'un faux lit de germination faisant germer les adventices pour les détruire avant de semer la nouvelle culture.

Le troisième est l'enfouissement et le mélange de la MO et autres apports, comme les engrais, au sein du sol (Hobbs et al., 2007). Cette pratique permet de limiter les pertes de certains éléments par volatilisation ou ruissellement, d'homogénéiser la répartition des éléments

¹⁵ Toute plante non désirée, et plus particulièrement sur la parcelle agricole cultivée (Manley et al., 2019).

nutritifs dans la couche cultivée du sol ou encore de permettre à certains nutriments d'être plus facilement accessibles par les racines.

Le labour est une pratique bénéfique pour l'agriculteur car en mettant en place des conditions propices à la croissance de ses cultures, il peut atteindre un meilleur rendement. Cette pratique a fait ses preuves afin de promouvoir la croissance des plantes (Or et al., 2021). Cependant, elle a un coût pour le sol et son environnement. En effet, le labour présente également des désavantages, contribuant à la dégradation des sols.

Tout d'abord, cette pratique mène à une compaction du sol en profondeur. En dessous de la zone travaillée par la charrue, il y a formation d'une semelle de labour, défini comme étant « *une zone compacte dans le sol faisant obstacle à la pénétration en profondeur des racines ou à la circulation de l'eau* » (Mazoyer et al., 2002). Cette compaction en profondeur est difficilement réversible naturellement car les facteurs favorables à la décompaction ont une action limitée en profondeur (Citeau et al., 2008). De plus, en créant une discontinuité mécanique et hydrique, elle peut compromettre l'accès aux ressources nécessaires aux plantes dans certaines situations (Or et al., 2021).

Ensuite, une baisse de la teneur en MO au sein des sols agricoles est observée et cela en partie à cause du labour. Pour la Wallonie, la part de superficie cultivée concernée par des teneurs en MO trop faibles pour garantir une bonne structure des sols est estimée à 90% pour la période 2015-2019 (SPW, 2021). En retournant le sol, le labour fait remonter des couches moins riches en MO à la surface ce qui mène à une couche arable avec une teneur en MO uniforme mais devenue plus faible en surface. L'influence du travail du sol est détaillée dans la section 4.1.1.

Après, le labour mène à une perturbation de l'activité biologique du sol, que ce soit au niveau des microorganismes où la diversité génétique microbienne observée est moins importante ou au niveau de la faune où le travail du sol a un impact négatif sur leur densité, leur activité ainsi que leur diversité (Kladivko, 2001; Citeau et al., 2008; Bouthier et al., 2014).

Enfin, le labour crée des conditions propices à l'érosion, menant donc à une perte en terre de la partie superficielle des sols cultivés. En contribuant à une déstabilisation de la surface par la diminution de la teneur en MO ainsi que par une perturbation de l'activité biologique, le labour va mener à une moindre stabilité structurale du sol en surface, favorisant la formation d'une croûte de battance (Le Bissonnais, 1995). Cette croûte va impacter négativement les propriétés physiques du sol comme K_{sat} . Cependant, il n'y a pas que le travail du sol qui initie l'érosion. La couverture du sol a également une place importante et c'est justement leur combinaison, labour et sol nu, qui favorise au maximum la sensibilité à l'érosion (Citeau et al., 2008). En effet, un sol couvert permet de protéger le sol face à l'effet splash mais également de ralentir le ruissellement en lui faisant obstacle.

4. Agriculture de conservation

La manière dont l'agriculture est pratiquée pose aujourd'hui question à cause des conséquences qui y sont associées au fil des années dont la dégradation du sol et de l'environnement (Songliang & Caldwell, 2020). Un point clé de cette remise en question est la faible durabilité

dans la manière dont le sol est travaillé en pratiquant le labour. Bien que l'AgriConv permette d'atteindre les objectifs de production à travers des pratiques intensives, elle dégrade simultanément les ressources naturelles, ce qui pourrait à son tour mettre en péril le potentiel productif à l'avenir (FAO, 2011). C'est là que l'AgriCons pourrait intervenir.

L'AgriCons est un système agricole visant des rendements élevés pouvant faire appel à des pratiques agricoles intensives, tout en limitant les impacts négatifs sur l'environnement. Bien que l'utilisation courante d'herbicides, dont le glyphosate, reste une pierre d'achoppement, elle vise une production durable et supportrice des services écosystémiques par une utilisation maximisée des ressources disponibles, de leur recyclage efficace ainsi que par l'amélioration des propriétés du sol (Ren et al., 2023). Osujieke et al. (2023) la décrivent comme le système moderne de restauration et de gestion de la fertilité des sols applicable à l'échelle mondiale. Elle repose sur trois piliers : une perturbation mécanique minimale du sol, une couverture organique permanente du sol ainsi qu'une diversification des espèces cultivées (FAO, 2023).

L'AgriCons trouve son origine aux États-Unis où le labour a été remis en question dès les années 1930 après avoir été la cause de nombreuses tempêtes de sable (« *dustbowls* ») au niveau de vastes zones, ce qui a eu un impact négatif sur le rendement des cultures. Ces événements sont le résultat d'une érosion massive due à une dénudation des sols et un appauvrissement en MO (Laurent, 2015). Afin de limiter cela, des concepts de réduction du travail du sol et de maintien de la couverture du sol ont vu le jour afin de protéger le sol (Kassam et al., 2018).

Après s'être répandues tout d'abord à travers les États-Unis, ces pratiques se sont exportées à l'étranger, dont en Europe, mais toujours dans une optique de résoudre des problèmes ponctuels d'érosion ou comme un moyen de limiter la consommation en carburant grâce à une moins grande utilisation des engins agricoles. Durant les années 90, le développement de l'AgriCons attire l'attention, incluant des organisations de recherches internationales, dont l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) (Kassam et al., 2018). En 2001, le terme d'« agriculture de conservation » en tant que tel est défini par la FAO lors du « First World Congress on Conservation Agriculture » (Molier, 2013). Tout d'abord introduite comme une pratique pour réguler l'érosion éolienne et hydrique, l'AgriCons pourrait donc aujourd'hui jouer un rôle crucial vers la transition d'une agriculture plus durable.

4.1. Premier principe : Perturbation mécanique minimale du sol

Le premier principe de l'AgriCons prône, dans la mesure du possible, une perturbation mécanique minimale du sol cultivé. Il s'agit du principe le plus souvent associé à l'AgriCons car celui-ci est complètement opposé aux pratiques de travail du sol rencontrées dans l'AgriConv étant donné que le labour ne peut pas être pratiqué.

Cependant, l'arrêt du labour n'est pas toujours synonyme d'arrêt du travail du sol pour l'AgriCons. Un travail du sol peut être encore effectué. Sur son site officiel, la FAO explique qu'une perturbation du sol minimale fait référence à un spectre de travail allant de l'arrêt total jusqu'à une perturbation maximale autorisée qui doit respecter certaines conditions. La première condition est l'interdiction d'effectuer un travail du sol menant à un retournement. La

deuxième concerne la surface travaillée du sol, la zone perturbée devant avoir une largeur inférieure à 15 cm ou représenter moins de 25 % de la surface cultivée (la valeur la plus faible étant retenue) (FAO, 2023). Cette définition est parfois nuancée, permettant une plus grande surface de travail. De plus, aucune restriction n'est imposée par la FAO en ce qui concerne la profondeur du travail, pouvant être aussi profonde que ce qui est effectué sous labour. C'est par exemple le cas du pseudo-labour ou du décompactage. Au sein des techniques culturales simplifiées (TCS), il existe donc une grande diversité pouvant être plus ou moins radicale par rapport au travail conventionnel du sol (Figure 4). Le semis direct quant à lui est une pratique où aucun travail du sol n'est effectué avant de semer les cultures. La seule perturbation mécanique, très superficielle (< 5 cm), que subissent ces parcelles en semis direct est le passage du semoir (Soane et al., 2012). Celui-ci va créer un sillon étroit afin d'y placer les semences, sans retourner le sol, pour ensuite le refermer (Ogieriakhi & Woodward, 2022).

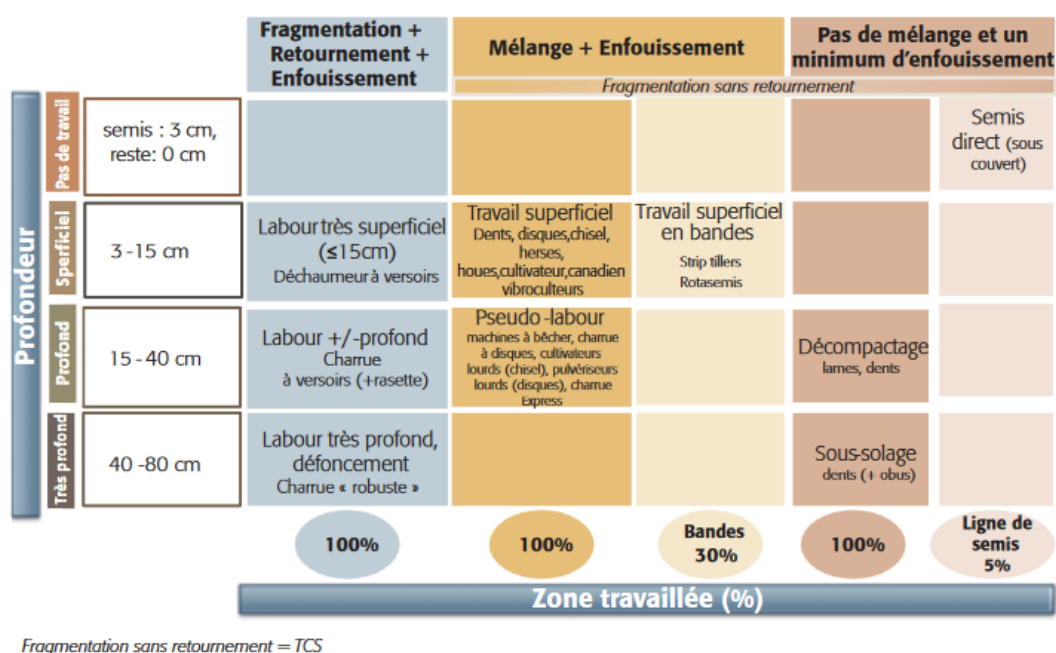


Figure 4 - Les différents types de travail du sol ainsi que l'outillage associé, classé en fonction de la profondeur du travail, le pourcentage des zones travaillées ainsi que son impact sur le sol. (Roger-Estrade et al., 2014).

La manière de travailler le sol va avoir une influence sur la profondeur du sol travaillée, le pourcentage de zone travaillée mais également sur la manière dont les résidus et autres apports sont mélangés et enfouis au sein du sol. En Belgique, le travail de conservation du sol occuperait un peu plus de 10 % de la superficie des terres arables tandis que le semis direct occuperait 10 % (Figure 3). L'AgriConv occuperait donc un total approximatif de 20 %, données obtenues pour les années 2016-2017 (FAOSTAT, 2017; Eurostat, 2020). Celagri estime quant à lui à 4 % le nombre d'adeptes d'AgriConv en 2020 (Celagri, 2020), pourcentage faible comparé à la superficie occupée en AgriCons sur le territoire. Une explication serait que ce type de pratiques est adopté davantage dans les grandes exploitations.

4.1.1. Influence de l'arrêt du labour sur le sol

La transition d'un système agricole conventionnel vers un système de conservation va mener à une nouvelle dynamique au sein sol. L'arrêt du labour va permettre de modifier le cycle de la MO, l'activité biologique, la structure du sol et par la suite les propriétés physiques du sol.

Matière organique du sol

Il est admis que ces nouvelles pratiques mènent à une stratification de la MO dans le sol (Stockfisch et al., 1999; Basche & DeLonge, 2019; Schlüter et al., 2020). Sous labour, le sol présente une MO distribuée uniformément au sein de l'horizon travaillé suite à l'inversion réalisé, faisant remonter des couches moins riches en MO. Dès lors, son arrêt mène à une accumulation de MO au niveau de la surface et un apport de MO par la décomposition de la matière végétale en surface (Hobbs et al., 2007; Schlüter et al., 2020; Or et al., 2021).

Cependant, un point important reste à éclaircir, car il présente des résultats contradictoires selon les études (Farooq & Siddique, 2015; Basche & DeLonge, 2019). Il s'agit de l'accumulation nette de MO après la transition. Ce point d'ombre peut être expliqué par un changement lent de la dynamique de séquestration de la MO. Tandis que certaines études montrent qu'après une décennie de transition aucune accumulation nette au sein du profil n'est observable, d'autres études affirment que c'est le cas mais seulement après plusieurs décennies (Citeau et al., 2008; Or et al., 2021). Détecter un changement sous AgriCons n'est donc pas évident et s'il est visible, c'est sur une longue période (Ulrich et al., 2010). L'AgriCons ne constitue donc pas une solution sur le court terme afin d'augmenter le taux de MO au sein des sols agricoles.

Activité biologique

L'arrêt du labour met en évidence des impacts positifs sur l'activité biologique de manière générale, bien que les organismes du sol ne réagissent pas tous de la même manière (Kladivko, 2001; Citeau et al., 2008; Bouthier et al., 2014). En effet, travailler le sol et plus particulièrement le labour peut les impacter directement en les fractionnant, les blessant, les tuant ou en les exposant à la prédation (Henneron et al., 2015). De plus, cette pratique mène à des effets indirects comme la modification de leur habitat mais impacte aussi leur source d'éléments nutritifs par la diminution du stock de MO au sein des sols qui constitue leur principale source d'énergie (Citeau et al., 2008; Bouthier et al., 2014).

En ce qui concerne plus précisément les VDT, un grand nombre d'études s'est intéressé à la question. Elles ont permis de mettre en évidence une tendance généralisée et communément acceptée, celle-ci étant que les populations de VDT et leurs fonctions (Tableau 3) sont compromises par le labour (Balabane et al., 2005; Greenotec, 2019; Or et al., 2021; Wardak et al., 2022; Schlüter et al., 2020; Blanchy et al., 2023). Une diminution, voire un arrêt du travail du sol, a un impact positif sur les communautés de lombrics en augmentant leur densité, leur activité ainsi que leur diversité. La nouvelle stratification de la MO en AgriCons permet également de promouvoir l'activité de ceux-ci en surface (Wardak et al., 2022). Ne voyant plus leurs galeries détruites et ayant un meilleur accès à leur nourriture, les VDT anéciques sont particulièrement favorisés (Blume et al., 2016; Blanchy et al., 2022).

Cependant, ces changements nécessitent plusieurs années afin de prendre place. Wardak et al. (2022) ont observé une augmentation de la population après 3 ans. Également, la reformation des galeries après labour prend plusieurs années (Citeau et al., 2008; Kladviko, 2001; Wardak et al., 2022). De plus, aucune conclusion ne peut être tirée sur l'avantage du semis direct par rapport au travail superficiel sur la densité de lombrics car les résultats sont sensiblement similaires (Balabane et al., 2005), bien qu'il est généralement admis que le semis direct est plus avantageux (Hobbs et al., 2007; Henneron et al., 2015). Un point important à ne pas négliger est que les effets observés sont difficilement attribuables seulement au travail du sol car d'autres facteurs sont à prendre en compte comme la présence d'un couvert végétal. Dès lors, le système montrant l'effet positif le plus important sur les organismes du sol est celui de l'AgriCons et plus particulièrement la pratique du semis direct combinée avec des rotations longues ainsi qu'un couvert végétal permanent (Henneron et al., 2015).

Structure

Contrairement à la texture, la structure est très dynamique temporellement et elle est donc sensible aux pratiques de travail du sol (Hillel, 1974; Schlüter et al., 2020; Or et al., 2021). Les processus de formation et de reconstruction de la structure ne sont pas les mêmes sous labour et sous AgriCons. La structure du sol sous labour dépend essentiellement de processus abiotiques (Or et al., 2021). La fragmentation mécanique ainsi que la réorganisation des fragments créés par la pratique mènent à une modification de la morphologie des pores (Wardak et al., 2022). Une augmentation de la porosité, dont la macroporosité, est observée par la création de pores isotropes, avec la conservation de la structure interne des fragments (Schlüter et al., 2020). En ce qui concerne la dynamique de la structure sous AgriCons, elle dépend essentiellement de processus biologiques et plus particulièrement l'activité de la faune (dont les VDT) et des racines (Wardak et al., 2022). Dès lors, un système plus grand et plus complexe est observable sous AgriCons (Weninger et al., 2019).

La porosité du sol peut être décrite par plusieurs caractéristiques, influençant les processus au sein du sol : la forme des pores, la distribution des tailles de pores, la densité surfacique, la connectivité, la tortuosité et l'hétérogénéité de l'espace poral. Ces caractéristiques varient en fonction de la pratique de travail du sol, menant à des influences différentes sur ses fonctions (Rabot et al., 2018; Wardak et al., 2022). De manière générale, une macroporosité plus importante est observée sous labour (Schlüter et al., 2020; Wardak et al., 2022). Cependant, les techniques de conservation vont permettre un réseau de biopores plus grand, avec des pores de diamètres plus élevés en moyenne (Schlüter et al., 2020), possédant une meilleure connectivité (Wardak et al., 2022) ainsi qu'une connexion du réseau à la surface plus importante (Wardak et al., 2022). Ce développement est possible sous AgriConv par le maintien du réseau de biopores sur le long terme par arrêt de sa destruction par le labour et l'augmentation de l'activité biologique (Kladviko, 2001; Citeau et al., 2008; Kaufmann et al., 2010; Schlüter et al., 2020).

La nouvelle dynamique de la MO, avec la formation du complexe argilo-humique favorisant l'agrégation, et de l'activité biologique, à travers ses sécrétions et la bioperturbation, promeuvent également l'agrégation du sol (Blume et al., 2016; Minasny & McBratney, 2018;

Duchaufour et al., 2018; Schlüter et al., 2020; Blanchy et al., 2023). De manière générale et par les modifications de la structure expliquées dans cette section, la qualité de cette dernière a tendance à être améliorée sous AgriCons (Minasny & McBratney, 2018; Toth et al., 2024). Cependant, cet état n'est pas atteint dès le début de la transition. Comme pour les dynamiques de la MO et de l'activité biologique, du temps est nécessaire pour observer une amélioration.

Propriétés physiques du sol

La modification de la structure, associée également à l'influence des dynamiques de la MO et de l'activité biologique, va mener à une modification des propriétés physiques du sol. Étant donné que ces modifications ne se produisent pas instantanément et varient au cours de la transition, les résultats sur le court et long terme doivent être différenciés lors de l'analyse.

Masse volumique apparente et résistance mécanique

Sur le court terme, le sol devient de plus en plus compact lors du passage vers l'AgriCons, ce qui engendre une augmentation de ρ_a et de la résistance à la pénétration (Schlüter et al., 2020; Sartori et al., 2022). Cela est dû tout d'abord au fait que la pratique annuelle du labour permettait de régénérer de manière instantanée la porosité du sol alors que ce n'est pas le cas pour les processus biologiques qui demandent beaucoup plus de temps (Wardak et al., 2022). Ensuite, le passage de machines agricoles lourdes, en particulier lors de la récolte, renforce la compaction du sol (Nawaz et al., 2013; Rücknagel et al., 2017; Toth et al., 2024). Bien que ce problème soit également présent sous labour, il peut être corrigé temporairement par une pratique régulière de ce dernier si les traces de compaction ne sont pas trop profondes (Wardak et al., 2022). En l'absence de travail du sol, la persistance de la compaction est plus longue.

Sur le long terme, l'amélioration de la structure du sol permet de compenser l'augmentation de ρ_a après arrêt du labour, bien que ne lui permettant pas de la diminuer plus que ce qui est observé chez ce dernier (Tebrügge & Düring, 1999; Schlüter et al., 2020; Wardak et al., 2022). Grâce à la nouvelle stratification de la MO et son rôle dans l'amélioration structurale du sol, un taux plus important en surface va mener à une amélioration de la structure en surface avec diminution de ρ_a (Minasny & McBratney, 2018). Additionnellement, la meilleure structure obtenue avec l'augmentation de la stabilité structurale offre une meilleure résistance à la déformation au sol sous AgriCons, bien que cette résistance est sensible au poids de la machine et dépendante de l'humidité du sol (Rücknagel et al., 2017; Or et al., 2021). Un sol labouré va plus facilement perdre sa macroporosité et la connectivité associée qu'un sol sous techniques de conservation (Tebrügge & Düring, 1999; Wardak et al., 2022), mais si la structure est détruite, même partiellement, il faudra une dizaine d'années en AgriCons pour la restaurer (Rücknagel et al., 2017; Or et al., 2021).

En ce qui concerne l'influence de la compaction sur la productivité végétale, il est largement admis qu'elle peut compromettre la fonction de croissance des plantes en empêchant la croissance racinaire ou l'apport en oxygène (Kaufmann et al., 2010; Zhou et al., 2021; Royal Eijkelpkamp, 2022a). Cependant, grâce au développement d'un réseau de biopores permanent sous AgriCons et la tendance des racines à préférentiellement exploiter des biopores existants,

les problèmes liés à la croissance racinaire peuvent être contournés (Or et al., 2021; Wardak et al., 2022; Zhou et al., 2021). De plus, pour une même espèce, la profondeur racinaire va dépendre de plusieurs facteurs comme les besoins en eau et nutriments de la plante et la disponibilité de ces ressources dans la couche superficielle du sol (Zhou et al., 2021). Dès lors, les indicateurs de ρ_a et de résistance à la pénétration sont de bons indicateurs de la compaction du sol mais ils ne permettent pas toujours à eux seuls d'exprimer la productivité végétale (Rabot et al., 2018).

Stabilité structurale

Tandis que sur le court terme la stabilité structurale n'est pas améliorée voir amoindrie, sur le long terme, elle est plus importante sous AgriCons que sous AgriConv (Blume et al., 2016; Duchaufour et al., 2018; Wardak et al., 2022). Cette propriété est importante afin de diminuer la susceptibilité du sol à l'érosion et la formation d'une croûte de battance (Rücknagel et al., 2017; Duchaufour et al., 2018; Blanchy et al., 2022). L'augmentation de la teneur en MO en surface en tant qu'agent liant et l'activité biologique, vont favoriser la stabilité et la formation d'agrégats (Vanwindekens & Hardy, 2023) avec un plus gros impact sur la macroporosité (Minasny & McBratney, 2018).

Une manière de mettre en évidence la stabilité des agrégats est de tester leur mouillabilité. En effet, les fragments produits par le labour et les agrégats formés biologiquement sont mécaniquement et écologiquement différents. Les agrégats de sols labourés sont plus sensibles au *slaking* (éclatement) que les agrégats de sols sous AgriCons (Or et al., 2021; Wardak et al., 2022). Lorsque le sol est immergé dans l'eau, les fragments créés par le labour vont fusionner entre eux et la structure homogène initialement présente sera détruite (Or et al., 2021). Un affaissement rapide du sol est donc observé pour les sols labourés dû à cette sensibilité (Or et al., 2021). Pour les agrégats formés de manière naturelle par les processus biologiques, ils sont intégrés dans la matrice du sol et sont donc plus stables (Or et al., 2021).

Un autre aspect important qui permet de garantir la stabilité structurale en surface de manière complémentaire à la diminution de la perturbation du sol afin d'éviter la formation d'une croûte de battance est la couverture permanente du sol (Toth et al., 2024). En effet, elle joue un rôle essentiel dans la protection du sol face à la désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie.

Rétention en eau du sol

De manière générale, une amélioration de la capacité de rétention en eau du sol suite au passage à l'AgriCons est acceptée dans la littérature (Basche & DeLonge, 2019; Wardak et al., 2022; Blanchy et al., 2023). Cependant, elle reste incertaine et peut être surestimée (Minasny & McBratney, 2018). Sur le long terme, l'accumulation de la MO ainsi que l'augmentation de l'activité biologique dont la création de biopores vont avoir un effet théorique positif sur la capacité de rétention du sol (Or et al., 2021; Wardak et al., 2022). Par une modification de la porosité et de la distribution des pores, l'amélioration se produit plus particulièrement pour les suctions plus faibles (Blume et al., 2016; Minasny & McBratney, 2018). L'effet est donc plus

important sur θ_{sat} , suivi de la teneur en eau à capacité au champ (θ_{cc}) et de la teneur en eau au point de flétrissement (θ_{pfp}). Cependant, Minasny & McBratney (2018) ont déterminé que, de manière générale, une augmentation de 1 % de la teneur en C_{org} augmente en moyenne la RU de 1,16 % (volumique). Dès lors, le faible taux annuel de séquestration de C_{org} sous AgriCons n'a qu'un effet négligeable sur la RU du sol (Minasny & McBratney, 2018), d'autant plus que cela ne concerne que la partie superficielle du sol. Certaines études non en effet pas remarqué de changements (Weninger et al., 2019; Toth et al., 2024).

Conductivité hydraulique à saturation

Sur le court terme, une diminution de K_{sat} est observée due à deux facteurs principaux (Nawaz et al., 2013). Le premier facteur concerne l'augmentation de la compaction du sol, ce dernier menant à une diminution de la macroporosité ainsi que de la connectivité de l'espace poral. Le deuxième facteur concerne le réseau de pores d'origine biologique qui n'a pas eu le temps de se former complètement, présentant un réseau de biopores peu développé.

Sur le long terme, un plus grand K_{sat} sous AgriCons que sous labour est communément admis dans la littérature scientifique. Comme expliqué précédemment, les sols labourés présentent une macroporosité généralement plus importante que sous AgriCons, le flux d'eau empruntant préférentiellement cette porosité (Schlüter et al., 2020). Cependant, la quantification de la macroporosité seule n'est pas suffisante pour estimer K_{sat} (Schlüter et al., 2020; Wardak et al., 2022). D'autres propriétés du système poral peuvent limiter la pertinence de cet indicateur dont le diamètre des pores et la connectivité du réseau qui sont eux plus importants en AgriCons grâce à la bioperturbation. L'augmentation de l'activité biologique avec la création d'un réseau permanent, de galeries connectées et en partie verticales permet d'augmenter K_{sat} en AgriCons (Duchaufour et al., 2018; Basche & DeLonge, 2019; Or et al., 2021; Blanchy et al., 2022).

Ce réseau de pores d'origine biologique permet également de contrer la compaction parfois plus importante sous AgriCons étant donné que de manière générale le flux d'eau se produit préférentiellement dans les macropores connectés (Weninger et al., 2019; Schlüter et al., 2020). Une plus grande abondance de VDT permet dès lors de compenser la perte de macroporosité totale et d'augmenter K_{sat} (Blanchy et al., 2022). De plus, la plus grande stabilité structurale sous AgriCons va permettre d'éviter l'effondrement de la structure du sol par le passage de l'eau (Minasny & McBratney, 2018).

Cependant, la grande variabilité spatiale et temporelle peut compromettre cette tendance entre traitements (Basche & DeLonge, 2019; Schlüter et al., 2020; Wardak et al., 2022). Toutes les études ne montrent pas toujours une dominance du K_{sat} sous AgriCons comparé à celui de l'AgriConv (Rücknagel et al., 2017; Weninger et al., 2019).

4.2. Deuxième principe : Couverture organique permanente du sol

La FAO considère que pour que les parcelles cultivées respectent l'AgriCons, elles doivent avoir une couverture minimale de 30 % (FAO, 2023). Bien que la FAO détermine cela comme une norme, il s'agit plutôt d'un objectif à atteindre pour limiter les problèmes d'érosion. En

effet, il a été déterminé de manière expérimentale qu'une couverture de 30 % permet de diminuer de moitié l'érosion comparé à un sol nu (Wischmeier & Smith, 1978). Ce pourcentage peut également être atteint en AgriConv, bien que pas en permanence vu que le labour mène à l'enfouissement du couvert.

La nature de la couverture du sol peut être diverse. Tout d'abord, il y a les cultures intermédiaires qui sont des cultures ne possédant pas d'intérêt économique direct, implantées durant les périodes de jachère ou durant les phases de croissance des cultures d'intérêts et fauchées ou tuées avant ou pendant la préparation du sol pour la prochaine culture (Farooq & Siddique, 2015). Dans celles-ci sont comprises les cultures de couverture, « *culture intermédiaire implantée pour protéger les sols contre l'érosion* » (PROTECT'EAU, s. d.). Ensuite, il y a les résidus de culture, principaux éléments de la couverture permanente, résultant de la précédente culture récoltée (Farooq & Siddique, 2015). Il y a également la pratique du mulching, le mulch étant un « *matériau organique (feuilles en décomposition, écorce ou compost) répandu sur le sol et autour d'une culture pour l'enrichir et l'isoler* » (FAO, 2023).

Outre l'amélioration du recyclage des nutriments (Hobbs et al., 2007; Farooq & Siddique, 2015; Adetunji et al., 2020; FAO, 2023), une meilleure efficacité de leur utilisation (Singh et al., 2015; FAO, 2023) ainsi qu'une meilleure gestion des adventices (Hobbs et al., 2007; Soane et al., 2012; Labreuche, Jezequel, et al., 2014; Roger-Estrade et al., 2014; Singh et al., 2015; FAO, 2023), instaurer une couverture permanente du sol a plusieurs avantages. Le premier avantage est son rôle préventif dans le phénomène d'érosion (Hobbs et al., 2007; Citeau et al., 2008; Roger-Estrade et al., 2014; Farooq & Siddique, 2015; FAO, 2023). Comme expliqué précédemment, la présence d'une couverture au niveau du sol permet de diminuer l'effet splash et ralentir le ruissellement.

Le deuxième est l'apport et la protection de la MO au niveau de la surface du sol (Hobbs et al., 2007; Farooq & Siddique, 2015; Rusinamhodzi, 2015; Adetunji et al., 2020; FAO, 2023). Les résidus de culture (en ce compris les racines) se trouvant sur la parcelle vont progressivement se décomposer et s'intégrer dans le sol, augmentant la concentration de MO. De plus, en protégeant le sol et en limitant l'érosion, la MO en surface est moins érodée.

Le dernier avantage est la stimulation des organismes du sol (Kladivko, 2001; Roger-Estrade et al., 2014; Farooq & Siddique, 2015; Hobbs et al., 2007). La couverture du sol fournit des nutriments et de l'énergie aux microorganismes et à la faune du sol dont les VDT qui vont agir au niveau du bon fonctionnement de celui-ci. L'utilisation de certaines cultures de couverture, dont celles à racines profondes et la stimulation de l'activité des organismes du sol vont contribuer à le structurer en réduisant la compaction. De plus, pour les VDT par exemple, la présence d'un couvert végétal permanent permet une prolongation de leur activité en retardant leur hibernation (Kladivko, 2001).

4.3. Troisième principe : Diversification des espèces

Afin que la parcelle respecte l'AgriCons, la FAO établit pour la rotation culturale – « *succession de cultures dans le temps sur une même parcelle* » (Manley et al., 2019) - qu'elle doit faire

intervenir des séquences de cultures et des associations impliquant au minimum trois espèces de cultures différentes sur une année (FAO, 2023). Choisir une rotation doit prendre plusieurs facteurs en compte, en plus des conditions locales et les caractéristiques de la parcelle cultivée (Behera et al., 2023). Ces facteurs sont la complémentarité des cultures dans leurs besoins en nutriments, leur mode de croissance ainsi que leurs sensibilités aux ravageurs et maladies, le timing afin de garantir l'efficacité de la rotation des cultures sur les maladies et les ravageurs et le choix effectué dans la séquence de rotation qui doit réussir à maximiser ce que le sol peut offrir pour les cultures.

Lorsque la rotation est implantée de manière réfléchie, elle présente plusieurs avantages. Ceux-ci concernent l'augmentation de la fertilité du sol et le rendement associé (Rusinamhodzi, 2015; Behera et al., 2023; FAO, 2023), le contrôle des populations de ravageurs et des maladies (Farooq & Siddique, 2015; Behera et al., 2023; FAO, 2023) et la gestion des adventices (Arvalis, 2014; Farooq & Siddique, 2015; Rusinamhodzi, 2015; Singh et al., 2015).

Deuxième partie : Objectifs

La dégradation des sols arables ainsi que les autres conséquences environnementales associées commencent à devenir préoccupantes et la prise de conscience de la nécessité d'un changement dans les pratiques agricoles augmente. C'est pour cela que la vision de l'agriculture évolue de plus en plus vers d'autres alternatives que celle dominante actuellement. Afin de faire face à ces enjeux, une des solutions proposées est la transition d'une AgriConv vers une AgriCons. Cependant, afin d'accompagner cette transition de manière généralisée par les agriculteurs en Wallonie, il est important de connaître les conséquences, positives et négatives, de cette transition sur les cultures mais aussi sur l'environnement.

L'objectif principal de cette recherche est donc d'étudier le potentiel de l'AgriCons en tant qu'agriculture plus durable à travers une étude comparative entre les deux systèmes. Bien qu'une étude systématique soit cruciale afin de comprendre toute la complexité de cette transition, la présente recherche se concentre principalement sur l'étude de la qualité physique du sol ainsi que sur le 1^{er} pilier de l'agriculture de conservation. Dès lors, deux objectifs spécifiques sont définis :

- i) Évaluer l'impact de l'AgriCons sur la qualité physique du sol en comparaison avec celle de l'AgriConv.
- ii) Évaluer l'évolution des indicateurs utilisés pour quantifier la qualité du sol après le début de la transition à partir de l'analyse d'une transition court terme (5 ans) et long terme (15 ans).

Troisième partie : Matériels et Méthodes

Dans cette section, trois points sont abordés. Tout d'abord, le site d'étude est présenté ainsi que les itinéraires techniques associés aux différentes sections. Ensuite, l'échantillonnage ainsi que les modes opératoires des expériences sur le terrain et des manipulations en laboratoire sont détaillés. Enfin, l'analyse des données est expliquée.

1. Site d'étude

La parcelle étudiée appartient aux fermes universitaires de l'UCLouvain. Elle se situe à Vieusart et se trouve plus précisément aux coordonnées WGS84 (DMS) Long = 4°38'03,483'', Lat = 50°40'50,732''. Celle-ci est divisée en trois sections, correspondant à trois modalités de travail différentes : labour (L), techniques culturales simplifiées TCS (T) et techniques culturales agroécologiques ou agriculture biologique de conservation ABC (A) (Figure 5). Ces sections sont à leur tour divisées en trois zones d'échantillonnage. Sur base d'analyses texturales, l'ensemble des zones se trouvent sur un sol limoneux (CRA-W, 2020). La carte pédologique confirme ces résultats, la parcelle étant notée Aba, correspondant à un sol limoneux avec un drainage naturel favorable (SPW, 2022a).

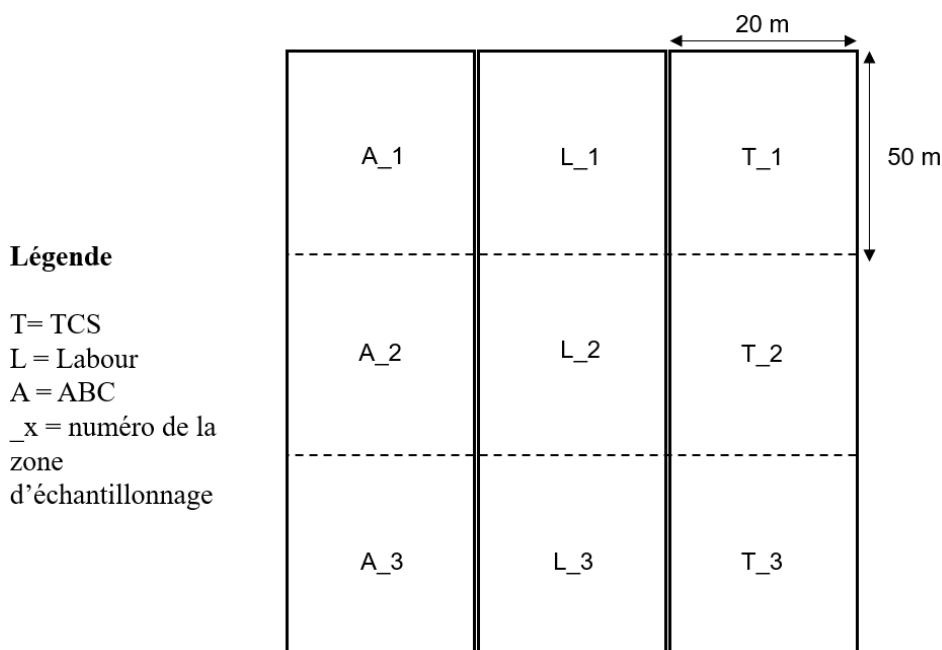


Figure 5 – Délimitation du site d'étude et des zones associées à différentes modalités de travail du sol : A = Labour, T = techniques culturales simplifiées, A = agriculture biologique de conservation. (Réalisé à partir de CRA-W, 2020).

Le Tableau 4 présente l'itinéraire technique simplifié des trois modalités de travail du sol pour la période étudiée. Les cultures présentes durant cette période sont le colza (comme interculture) et le froment (comme culture de rente). Les cultures prenant place sur les trois modalités sont donc identiques, et cela depuis 2020 (Annexe B). Cependant, leur gestion varie selon la modalité.

En ce qui concerne la modalité labour, elle implique un travail du sol dit conventionnel par la pratique annuelle d'un labour avant le semis. Il est pratiqué avec une charrue jusqu'à une profondeur de 25 cm.

Pour la modalité TCS, un travail du sol superficiel est effectué. Celui-ci consiste en un décompactage du sol et un enfouissement partiel des résidus avec une perturbation sur une profondeur allant jusqu'à 10 cm. L'outillage utilisé pour cette pratique varie selon les années mais consiste à l'utilisation d'un Chisel (années précédentes) ou d'un scalpeur Treffel (préparation du semis de froment 2023-2024). Cette section a transitionné d'une pratique conventionnelle vers une pratique de conservation du sol (dont l'arrêt du labour) depuis 5 ans.

La dernière modalité, ABC, teste un ensemble de pratiques de conservation co-discutées avec le CRA-W et Greenotec avec la mise en place du semis direct et du broyage de la culture de couverture. Bien que le semis direct ne soit pratiqué que depuis un an (depuis le froment 2023-2024), cette section a transitionné vers des techniques de conservation du sol depuis une plus longue période (15 ans). La gestion de cette parcelle prend également en considération l'objectif « horizon sans labour et sans pesticides » dans une optique de recherche pour l'agriculture biologique de conservation (ABC). Dans le cadre de ce mémoire, l'intérêt est porté sur les modifications physiques du sol. Les aspects phytosanitaire et chimique ne sont donc pas ou peu analysés.

Tableau 4 - Itinéraire technique simplifié associé aux trois modalités de travail du sol (labour (L), TCS (T) et ABC (A)) pour la période étudiée. (Réalisé à partir de CRA-W, 2024).

Année	Culture	Date	Labour L	TCS T	ABC A
2022	Colza		Préparation semis		
		12-09-22	Labour (Charrue, 25 cm de profondeur)	—	Déchaumage (Chisel Kongskilde, 10 cm de profondeur)
			Semis colza		
		12-09-22	Semis au Horsh Pronto (avec disques)	Idem	Idem
			Colza var. Dk Excited (+ 5 % de var. de printemps Alicia), densité 4,44 kg/ha	Idem	Idem
			Traitement phyto		
22-09-22		Herbicide	Idem	Idem	
		Butisan Gold, 2,542 L/ha	Idem	Idem	
2023			Fertilisation		
		17-02-23	Engrais minéral	Idem	Idem
			Ammonitrate 27 %, 375 kg/ha	Idem	Idem
		24-02-23	Engrais minéral	Idem	Idem
			TMSB oligo, 100 kg/ha	Idem	Idem
			Traitement phyto		
	02-05-23	Fongicide	Idem	Idem	
		Pictor Active, 0,63 L/ha	Idem	Idem	
	Récolte colza				
10-08-23	Moisson par entrepreneur	Idem	Idem		
	Moissonneuse-batteuse, 5.3 m	Idem	Idem		

2024	Froment		Préparation semis		
			<i>Repousses de colza</i>		
		10-10-23	—	—	Broyage repousses de colza
		16-10-23	Labour (Charrue, 25 cm de profondeur)	Déchaumage (Treffler, 5-10 cm de profondeur)	—
			Semis froment (mélange de variétés)		
		16-10-23	Semis au Horsh Pronto	<i>Idem que L</i>	Semis direct au Horsch Pronto
			Avec travail des disques devant éléments semeurs	<i>Idem que L</i>	Sans travail des disques devant éléments semeurs
			Froment var. Extase, 150 kg/ha	<i>Idem que L</i>	Froment - mélange de 8 var., 200 kg/ha
			Traitement phyto		
		15-11-23	Anti-limaces	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>
			Anti-limaces, 5 kg/ha	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>
		30-11-23	Anti-limaces	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>
			Anti-limaces, 5 kg/ha	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>
			Fertilisation		
		06-03-24	Engrais minéral	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>
			Terrabiotek (20 %N), 335 kg/ha (67 u.N)	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>
			Traitement phyto		
		20-03-24	Herbicide	<i>Idem</i>	<i>Idem</i> Élimination totale du colza
			Fertilisation		
		22-03-24	Engrais minéral	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>
			TMS (20 %N), 100 kg/ha (oligo-éléments)	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>
			Traitement phyto		
		06-04-24	Herbicide + régulateur	<i>Idem</i>	—
			Fertilisation		
		11-04-24	Engrais minéral	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>
			Terrabiotek (20 %N), 250 kg/ha (50 u.N)	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>
			Traitement phyto		
		26-04-24	Fongicide + régulateur	<i>Idem</i>	—
			Fertilisation		
		26-04-24	Engrais minéral	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>
			Ammonitrate 27 %, 222 kg/ha (60 u.N)	<i>Idem</i>	<i>Idem</i>

2. Densité de vers de terre

La quantification de la biomasse totale de VDT a été réalisée le 12 avril 2024 par le CRA-W. Au total, neuf mesures ont été effectuées dont une par zone d'échantillonnage. Les résultats sont obtenus à partir d'un test à la moutarde du protocole moutarde et d'un test à la bêche, les deux protocoles provenant de l'Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT, s. d.).

Le test à la moutarde est réalisé comme suit. Une zone de 1 m² est tout d'abord définie avec un quadrant rond. La végétation au sein de cette zone est coupée le plus court possible et retirée. Par la suite, une toile de jute est déposée sur cette zone afin de limiter la formation d'une croûte de battance lors de l'arrosage. Une fois la préparation de la zone terminée, une solution de 20 l contenant de la moutarde est versée de manière homogène sur celle-ci, la molécule irritante de cette dernière, Allyl isothiocyanate (AITC), permettant de faire remonter les VDT en surface. La concentration de la solution est de 0,1 g d'AITC/l d'eau. Les VDT remontés en surface sont collectés durant 10 min. L'opération (arrosage et collecte) est répétée une deuxième fois sur la même zone. Les VDT collectés sont préservés dans de l'alcool à 70 %, l'alcool étant changé plusieurs fois par jour jusqu'à la pesée.

En ce qui concerne le test à la bêche, un bloc de 20 x 20 sur 25 cm de profondeur est prélevé après le test moutarde au centre de la zone d'intérêt. Les VDT se trouvant dans ce bloc sont ensuite collectés et préservés dans de l'alcool à 70 %, l'alcool étant changé plusieurs fois par jour jusqu'à la pesée. La masse obtenue est ensuite multipliée par 25 afin d'obtenir des résultats pour une superficie de 1 m². La masse totale de VDT obtenue comprend la masse obtenue à partir du test à la moutarde ainsi que celle obtenue à partir du test à la bêche.

3. Teneur en carbone organique

L'échantillonnage a été réalisé en juin 2024 par le CRA-W. Un échantillon composite par profondeur (0-15 cm et 15-30 cm) composé d'une cinquantaine d'échantillons est prélevé par zone d'échantillonnage. Au total, 9 échantillons composites sont donc collectés par profondeur.

Les échantillons sont prélevés à partir d'une sonde de prélèvement de sol à main d'1 cm de diamètre jusqu'à 30 cm de profondeur. Les 15 premiers centimètres collectés sont ensuite mis dans un seau et les 15 derniers dans un autre seau. Cette opération est réalisée au total 50 fois sur une même zone d'échantillonnage, les échantillons allant dans un des deux seaux selon la profondeur collectée. Les échantillons composites sont ensuite placés dans des sachets plastiques fermés et gardés au frais. Une fois tous les échantillons composites prélevés, ils sont tamisés avec une grille de 8 mm et homogénéisés à la main. Un sous-échantillon de chaque échantillon composite, de minimum 450 g, est ensuite envoyé au laboratoire de la Hulpe afin de déterminer la teneur en C_{org}.

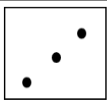
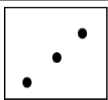
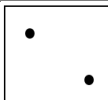
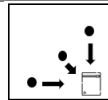
La teneur en C_{org} est déterminée à partir de l'analyse du carbone total avec soustraction du carbone inorganique lorsque sa teneur dépasse le seuil de 0,66 % du carbone total. La mesure du carbone total est réalisée avec la méthode DUMAS (combustion sèche) et celle du carbone organique est dérivée de NF EN 15936. Ces deux méthodes sont accréditées en Belac ISO 17025.

4. Échantillonnage

Durant la campagne d'échantillonnage, 4 ensembles d'échantillons (lots) ont été prélevés dans la couche superficielle du sol au sein du site d'étude (Tableau 5). Les lots 1, 2 & 4 ont été prélevés au même endroit sur chaque zone d'échantillonnage. Les lots 1 & 2 (anneau de

Kopeckis de 100 cm³, 5 cm de hauteur) ont été en effet échantillonnés le plus proche possible afin de limiter l'influence de la variabilité spatiale et permettre une meilleure analyse des résultats issus de ces lots. Le lot 4 est composé d'échantillons perturbés pris à chaque point de prélèvement des lots 1 & 2. Ces différents lots ont ensuite subi une suite de manipulations (Figure 6) afin de déterminer ρ_a (lot 1), une partie de la courbe de rétention en eau (lots 1 & 4), K_{sat} sur des échantillons de 100 cm³ (lot 1) et 1000 cm³ (10 cm x 10 cm x 10 cm ; méthode Vergière, lot 3), ainsi que la stabilité structurale du sol (lot 2).

Tableau 5 – Caractéristiques des lots d'échantillonnage.

	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 4
État de la structure de l'échantillon	Non perturbé ¹⁶	Non perturbé	Non perturbé	Perturbé
Contenant	Kopecki	Kopecki	Vergière	Sachet plastique
Volume [cm³]	100	100	1000	/
Profondeur de prélèvement [cm]	2,5 – 7,5	2,5 – 7,5	2,0 – 12,0	2,5 – 7,5
Nombre d'échantillons par modalité	9	9	6	3
Prélèvements (●) par zone d'échantillonnage				
Date de prélèvement	27/02/24	27/02/24	28/02/24	27/02/24

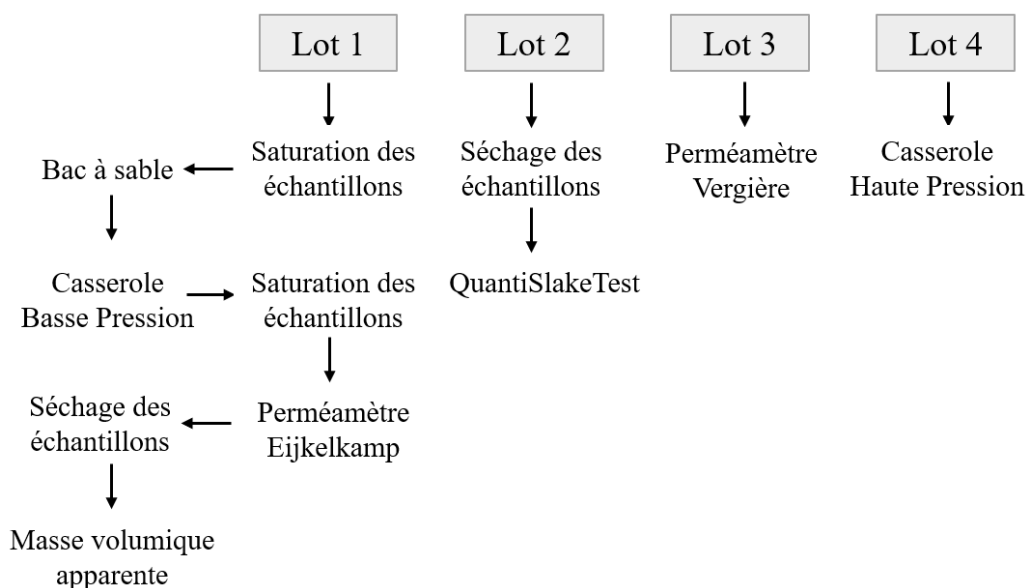


Figure 6 - Représentation de la chaîne de manipulation pour les 4 lots.

En ce qui concerne la méthodologie de prélèvement des échantillons, les kopeckis et échantillons perturbés sont échantillonnés de manière standard. Étant donné que le prélèvement des échantillons pour la méthode Vergière est moins commun, il est expliqué ci-dessous.

La méthode Vergière repose sur la prise d'échantillons non perturbés d'environ 10 cm x 10 cm de section et de 10 cm de hauteur. Tout d'abord, les premiers centimètres de sol sont retirés sur

¹⁶ Dont la structure est conservée.

une surface un peu plus grande que celle occupée par la Vergière (10 cm x 10 cm). La Vergière est posée au centre de cette zone. Avec une bêche, le sol aux alentours de celle-ci est enlevé sur une profondeur approximative de 15 cm (un peu plus que la hauteur de la vergière). Ensuite, le sol est taillé à l'aide d'une truelle et d'une spatule afin que le bloc de sol ainsi dégagé puisse rentrer à l'intérieur du cadre de la Vergière. On veille à garder environ 0,5 cm entre la paroi et le sol (Figure 7). De la paraffine, chauffée préalablement afin d'être liquide, est coulée ensuite le long des bords de la Vergière. Cette opération est effectuée plusieurs fois car la paraffine a tendance à se rétracter en refroidissant. Le sommet du bloc est ensuite égalisé puis un couvercle placé. La Vergière est extraite avec une bêche. Une fois cette étape réalisée, l'autre côté de la Vergière est égalisé et le couvercle placé.



Figure 7 - Photo de l'échantillonnage d'une Vergière avant de mettre la paraffine chaude. Photo personnelle.

5. Masse volumique apparente

ρ_a est la masse de sol sec par volume d'échantillon structuré. Elle est obtenue en pesant les échantillons du lot 1 après un passage de une semaine dans une étuve à 105 °C. Connaissant le volume des échantillons, 100 cm³, ρ_a est déterminé.

6. Résistance à la pénétration

Le pénétromètre permet de mesurer la résistance à la pénétration du sol jusqu'à 80 cm de profondeur. Au total, 27 mesures avec le pénétromètre sont effectuées par modalité dont 9 par zone d'échantillonnage. La campagne de mesure a été effectuée le 08/03/24.

Le dispositif en tant que tel est illustré par la Figure 8. La pointe du pénétromètre (4), de 1 cm² de section, est enfoncée verticalement dans le sol à une vitesse approximative de 2 cm/s. Un niveau (10) est intégré au sein du dispositif afin de garder la mesure le plus verticale possible. Une plaque de référence (5), à travers laquelle la pointe passe, est également utilisée. Celle-ci permet d'obtenir un enregistrement correct de la profondeur grâce à un capteur à ultrasons, les signaux ultrasoniques transmis par le capteur étant réfléchis par la plaque vers le capteur. Les mesures sont effectuées dos au vent afin d'éviter qu'il ne perturbe pas le détecteur à ultrason.

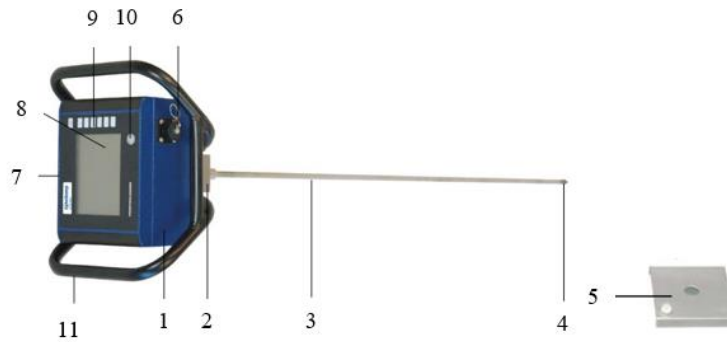


Figure 8 - Illustration du pénétromètre et de sa plaque de référence. (Royal Eijkelkamp, 2022a).

7. QuantiSlakeTest

Le QuantiSlakeTest (QST) est une méthode de mesure de la stabilité structurale du sol, s'inspirant du test d'humectation rapide de la méthode Le Bissonnais¹⁷. Cependant, contrairement à cette dernière, une mesure continue de la masse de l'échantillon est effectuée. De plus, tandis que Le Bissonnais s'effectue sur des agrégats de 3 à 5 mm, des échantillons non perturbés de 100 cm³ sont utilisés pour le QST. Celui-ci repose sur la pesée dynamique d'échantillons non perturbés, brusquement immergés dans de l'eau (Vanwindekens & Hardy, 2023).

Le dispositif expérimental est illustré par la Figure 9 et les échantillons utilisés sont issus du lot 2 (Figure 6). Afin de mesurer l'évolution de la masse de l'échantillon, préalablement séché pendant une semaine dans une étuve à 30 °C, est placé dans un panier connecté à une balance. Il est ensuite plongé rapidement dans de l'eau déminéralisée. La balance est raccordée à un ordinateur qui va permettre d'enregistrer la valeur de la masse de l'échantillon à intervalles réguliers, permettant d'avoir son évolution au cours de l'expérience. La prise de données commence à t_0 et se finit lorsque la masse de l'échantillon est stabilisée, ce qui correspond de manière générale à une vingtaine de minutes après le début de l'expérimentation.

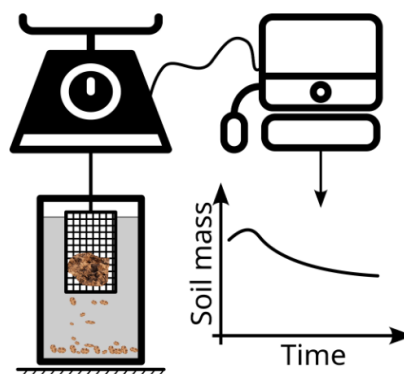


Figure 9 - Dispositif expérimental du QuantislakeTest.(Vanwindekens & Hardy, 2023).

Lorsque l'échantillon est immergé dans l'eau, il est soumis à la dégradation par *slaking* (éclatement). Tout d'abord, sa masse augmente car une fraction de l'air est rapidement

¹⁷ Méthode comprenant 3 tests : test d'humectation rapide, test de désagrégation mécanique par agitation et test d'humectation lente.

remplacée par l'eau au sein de la porosité. Lorsque la perte de masse par désagrégation dépasse le gain de masse par perte d'air, la masse de l'échantillon diminue. Au cours du processus de désagrégation, le *slaking* laisse progressivement sa place de processus dominant à la désagrégation par gonflement différentiel et à la dispersion physico-chimique des argiles (Vanwindekens & Hardy, 2023). Vanwindekens & Hardy (2023) ont déterminé quatre principaux types d'indicateurs pour analyser la stabilité structurale du sol à partir du QST.

Le premier indicateur est un indicateur se référant à l'augmentation de la masse de l'échantillon se produisant juste après l'immersion dans l'eau. Il s'agit de t_{max} , correspondant à la durée nécessaire pour atteindre la valeur maximale de la masse (M) de l'échantillon. L'utilisation de cet indicateur permet de mettre en avant la porosité du sol dans l'analyse. Le deuxième type d'indicateur concerne les valeurs des pentes ($\Delta M/\Delta t$) dans la partie décroissante de la courbe, lors de la perte de masse de l'échantillon. Le choix des pentes varie en fonction de ce qui est étudié. Pour des comparaisons de pratiques de travail du sol, la **pen**₃₀₋₆₀ est utilisée. Le troisième type d'indicateur se réfère à la détermination d'un seuil de perte de masse, c'est-à-dire la durée nécessaire pour que l'échantillon perde un certain pourcentage de sa masse totale. Utiliser des indicateurs prenant en compte la masse relative plutôt que la masse absolue permet de comparer des échantillons de masse initiale différente. L'indicateur retenu est la durée nécessaire pour que l'échantillon perde entre 50 % et 75 % de sa masse relative (**dt**₅₀₋₇₅), calculée entre la masse maximale et la masse minimale de l'échantillon au cours de l'expérience. Le quatrième type indicateur est global. Il s'agit de **W**_{end} qui représente la masse relative de l'échantillon à la fin de l'expérience (durée variable).

8. Rétention en eau du sol

Pour estimer la rétention en eau du sol, quatre valeurs de θ (volumique) sont déterminées : θ_s (Équation 2), la teneur en eau θ_1 associée à pF_1 (Équation 3), θ_{cc} correspondant à $pF_{2,4}$ (Équation 4) et θ_{pfp} correspondant à $pF_{4,2}$ (Équation 5).

$$\theta_s = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{\frac{\rho_{eau}}{V_{ech}}} * 100 \quad [\%] \quad (2)$$

$$\theta_{cc} = \frac{m_{BP} - m_{sec}}{\frac{\rho_{eau}}{V_{ech}}} * 100 \quad [\%] \quad (4)$$

$$\theta_1 = \frac{m_{bac \text{ à sable}} - m_{sec}}{\frac{\rho_{eau}}{V_{ech}}} * 100 \quad [\%] \quad (3)$$

$$\theta_{pfp} = \frac{m_{HP} - m_{sec}}{\frac{\rho_{eau}}{m_{HP}}} * \rho_a * 100 \quad [\%] \quad (5)$$

Avec :

V_{ech} , le volume de l'échantillon. Il vaut 100 cm³;

m_{sec} , la masse de l'échantillon lorsqu'il est sec [g];

m_{sat} , la masse de l'échantillon après sa sortie du bac de saturation [g];

$m_{bac \text{ à sable}}$, la masse de l'échantillon après sa sortie du bac à sable [g];

m_{BP} , la masse de l'échantillon après sa sortie de la casserole basse pression [g];

m_{HP} , la masse de l'échantillon après sa sortie de la casserole haute pression [g];

ρ_a , la masse volumique apparente de l'échantillon [g/cm³].

ρ_{eau} , la masse volumique de l'eau. Elle vaut 1 g/cm³.

8.1. Bac à saturation

Préalablement à la détermination de la rétention en eau du sol et de K_{sat} , les échantillons doivent être saturés en eau (Figure 6). Pour cela, un bac de saturation est utilisé (Figure 10) et une fois l'échantillon saturé, m_{sat} est déterminé. L'explication détaillée se trouve en Annexe C.



Figure 10 - bac de saturation pour échantillon. Photo personnelle.

8.2. Bac à sable

Le bac à sable (Figure 11) permet d'appliquer de faibles suctions¹⁸ sur un échantillon initialement saturé. La succion est appliquée sur les échantillons grâce au déplacement vertical d'une colonne d'eau (1) connectée au bac à sable (2). Afin d'obtenir un pF de 1, la colonne est déplacée verticalement de 10 cm. Les échantillons sont placés sur le substrat (mélange de kaolinite et de sable) qui agit comme un intermédiaire entre la colonne d'eau et les échantillons. Ces échantillons vont perdre une certaine quantité d'eau jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint entre ceux-ci et la succion exercée par la colonne d'eau. Le temps d'équilibre varie entre 3 à 10 jours. Une fois atteint, l'échantillon est pesé afin d'obtenir $m_{bac \text{ à sable}}$.



Figure 11 – Bac à sable pour échantillons. Photo personnelle.

¹⁸ Succion maximale de 73 cm ($pF \approx 1,8$), qui correspond au point d'entrée d'air du mélange sable-kaolinite.

8.3. Casserole à pression

Une casserole à pression (Figure 12) est utilisée afin d'obtenir θ_{cc} et θ_{pfp} . Elle est reliée à un ajutage pour l'arrivée d'air comprimé et à un manomètre pour le contrôle de la pression. Le principe de ce dispositif consiste à appliquer une pression barométrique au-dessus des échantillons afin de simuler une succion en dessous de ceux-ci. Les échantillons sont placés sur une plaque poreuse saturée en eau. Lorsque la pression de l'air à l'intérieur de la casserole est supérieure à la pression atmosphérique, celle-ci va forcer l'eau qui se trouve en excès au sein de l'échantillon à travers les pores de la plaque de céramique. L'équilibre est alors atteint lorsque le potentiel total de l'eau au sein de l'échantillon est en équilibre avec celui de l'eau à pression atmosphérique, située sous la plaque poreuse. Il n'y a dès lors plus de flux d'eau qui sort de l'échantillon.



Figure 12 - Photo de la casserole à pression. Photo personnelle.

Pour déterminer θ_{cc} , une casserole basse pression (pression de 0,25 bar) et les kopeckis du lot 1 après leur sortie du bac à sable (Figure 6) sont utilisés (Figure 13, image de gauche). À pF 2,5, la structure et la texture de l'échantillon vont influencer la perte en eau de l'échantillon, d'où l'importance de travailler avec des échantillons non perturbés. Pour déterminer θ_{pfp} , une casserole haute pression (pression de 15 bars) et les échantillons du lot 4 (Figure 6) sont utilisés (Figure 13, image de droite). Contrairement aux basses pressions, l'eau retenue dans les échantillons à pF 4,2 ne fait intervenir que la porosité texturale¹⁹, ce qui explique pourquoi il est possible de travailler avec des échantillons déstructurés. Les échantillons sont donc mis dans la casserole sous forme de boue.

Une fois l'expérience terminée, les échantillons sont pesés à la sortie de la casserole afin de déterminer m_{BP} et m_{HP} . Les échantillons sont ensuite placés dans une étuve à 105 °C durant

¹⁹ Porosité résultant de l'arrangement des particules primaires du sol, en opposition à la porosité structurale résultant de l'activité biologique, du climat et des pratiques agricoles (Rabot et al., 2018).

une semaine. Ils sont pesés à leur sortie afin de déterminer m_{sec} . Ensuite, la RU peut être déterminé en soustrayant θ_{cc} et θ_{pp} .



Figure 13 – À gauche : échantillons sur la plaque poreuse, dans la casserole à basse pression. À droite : échantillons sous forme de boue sur la plaque poreuse, dans la casserole à haute pression. Photos personnelles.

9. Détermination de la conductivité hydraulique à saturation

K_{sat} est mesurée à partir de trois dispositifs différents : l'infiltrométrie simple anneau, la perméamétrie sur échantillons de 100 cm³ et la perméamétrie sur échantillons Vergières. La détermination de K_{sat} se fait donc à partir d'échantillons de volumes différents, l'infiltrométrie mobilisant le plus grand volume de sol et la perméamétrie sur échantillons Kopecki le plus petit.

9.1. Infiltrométrie

L'infiltromètre simple anneau à charge constante est un dispositif de mesure permettant d'estimer l'indicateur *in situ*. Il est composé d'un anneau d'infiltration et d'un vase de Mariotte (Figure 14).

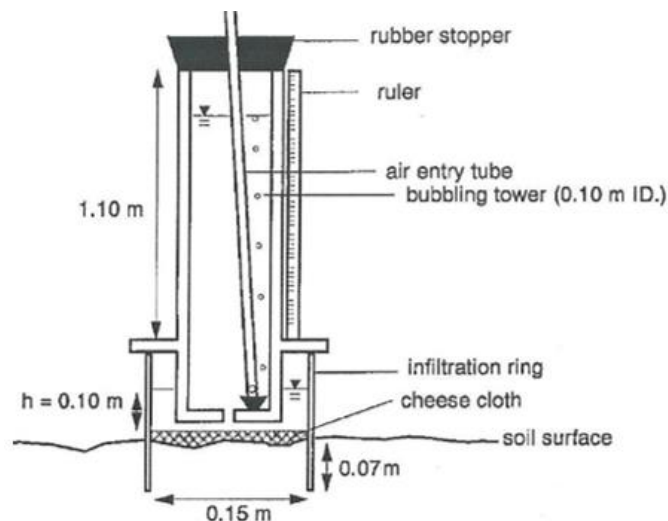


Figure 14 - Infiltromètre à charge constante simple anneau. (Biolders & Javaux, 2023).

Tout d'abord, l'anneau de 15 cm de diamètre est enfoncé dans le sol à une profondeur de 7 cm. Sa section intérieure a été enduite préalablement de graisse afin d'éviter la formation de flux préférentiels le long des parois de l'anneau. Le sol est ensuite préhumecté à l'aide d'un goutteur

pour une période approximative de 30 min. Cela évite une saturation du sol trop rapide qui pourrait le déstructurer. Un tissu est placé au niveau de la surface du sol afin d'éviter que la force des gouttes d'eau qui arrive sur le sol déstructure la surface de celui-ci au début de l'expérience lorsqu'il n'y a pas encore la formation d'une lame d'eau. Une fois cette étape finie, l'infiltrométrie en tant que telle peut commencer. Une pression hydrostatique constante d'environ 10 cm (valeur pouvant parfois varier) est appliquée sur la surface grâce au vase de Mariotte.

Une fois le régime permanent atteint, K_{sat} peut être déterminé à partir de l'Équation de Wooding (Équation 6). Celle-ci est valable pour une infiltration à flux constant, sous charge constante, à partir d'un anneau dans un sol rigide, homogène et isotrope qui sont donc les hypothèses considérées.

$$K_{sat} = \frac{GQ}{aH + \pi a^2 + \frac{a}{\alpha}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (6)$$

Avec :

Q, le débit d'infiltration, déterminé à partir de la variation du niveau d'eau dans le vase de Mariotte [m^3/s];

H, l'épaisseur de la lame d'eau dans l'anneau ou charge hydrostatique [m];

a, le rayon interne de l'anneau d'infiltration [m]. Il vaut 0,15 m ;

α , le paramètre de l'équation de Gardner décrivant la forme de la courbe de conductivité hydraulique du sol [m^{-1}] (Équation 7). Il vaut 12 m^{-1} pour un sol limoneux ;

$$K(h) = K_s \exp(\alpha * h) \quad (7)$$

G, le paramètre de forme tenant compte de la géométrie du dispositif [-]. Il est déterminé à partir de l'Équation 8 où d correspond à la profondeur d'enfoncement de l'anneau au sein du sol [m]. Elle vaut 0,07 m.

$$G = 0.316 \frac{d}{a} + 0.184 \quad [-] \quad (8)$$

Par zone d'échantillonnage, 2 mesures sont réalisées. Au total, 6 mesures d'infiltration sont effectuées par modalité. La campagne de mesures s'est faite sur un intervalle de deux jours : les 9 infiltrations avec colorant (1 par zone d'échantillonnage) ont été réalisées le 12/04/24 et les 9 restants (1 par zone d'échantillonnage) le 13/04/24.

9.1.1. Colorant *Brillant Blue*

Afin de mettre en évidence la contribution des macropores (dont certains formés par l'activité biologique) à l'infiltration de l'eau au sein du sol, le colorant *Brillant Blue* est utilisé. De formule chimique $C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9S_3$, il est vendu sous forme de poudre et possède une couleur bleue une fois solubilisé dans l'eau. L'application de ce colorant dans le sol ne participe pas à sa pollution car il s'agit d'un colorant alimentaire.

Après avoir atteint K_{sat} avec l'infiltromètre, le vase de Mariotte est enlevé. Le reste d'eau au sein de l'anneau s'infiltré dans le sol avant d'appliquer la solution de colorant de concentration

5 g/l²⁰ préparée préalablement. La hauteur de la lame de colorant dans l'anneau est de 13 cm. L'utilisation du colorant après l'infiltrométrie n'a été appliquée que sur une des deux mesures au niveau de la zone d'échantillonnage. Une fois l'ensemble de la lame de colorant infiltrée, l'anneau est enlevé et le sol recouvert d'une bâche durant toute la durée de ressuyage du sol (48 h) afin d'éviter la dilution du colorant en cas de pluie. Après cette période, la section à l'intérieur de l'anneau est découpée horizontalement successivement tous les 5 cm jusqu'à atteindre 20 cm de profondeur. Pour chaque coupe, une photo de la section horizontale de l'anneau est prise (exemple avec la Figure 15). La zone d'intérêt, qui correspond à la surface de l'anneau, y est délimitée par le cercle blanc. À partir de ces photos, le pourcentage de couverture par le colorant (sauf pour 0 cm) ainsi que le nombre de pores (dont la taille est supérieure à 1 mm) contribuant à son transport (pores colorés en bleu) et leur diamètre ont été déterminés pour chaque coupe à partir du logiciel ImageJ.



Figure 15 - Exemple d'une coupe dans le sol après infiltration d'une solution de colorant Brilliant Blue. La surface analysée est délimitée par le cercle blanc. Photo référencée modalité ABC, zone d'échantillonnage 1, profondeur de 10 cm. Photo personnelle.

Pour chaque pore, la densité de flux ($J_{\text{Poiseuille}}$) est calculée à partir de la loi de Poiseuille (Équation 9). Celle-ci pose les hypothèses que le flux d'eau suit un régime permanent et un écoulement laminaire et que les pores correspondent à des tubes droits. L'hypothèse est faite que ces tubes sont cylindriques.

$$J_{\text{Poiseuille}} = -g * \frac{\rho_w}{\mu} * \frac{R^2}{a} * \frac{\Delta H}{L} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ s}} \right] \quad (9)$$

Avec :

g , la pesanteur. Elle vaut 9,81 m/s²;

ρ_w , la densité de l'eau. Elle vaut 1000 [kg/m³] ;

μ , la viscosité de l'eau. Elle vaut 0,001002 Pa.s ;

R , le rayon du pore [m] ;

²⁰ Concentration choisie en se basant sur le rapport INFOSOL de 2013 dont l'objectif était de déterminer des indicateurs de qualité du sol afin d'évaluer l'état des sols (Biélders et al., 2013).

a, facteur de forme. Il vaut 8 pour un cylindre.

$\frac{\Delta H}{L}$, gradient de charge totale. Il est fixé à 1[m/m].

Pour un gradient de charge unitaire, $J_{\text{Poiseuille}}$ (Équation 9) correspond au K_{sat} du pore étudié. Il correspond à un débit par unité de section de pore. Afin de comparer ces valeurs avec la conductivité hydraulique du sol – qui correspond à un débit par unité de section du sol pour un gradient de charge totale unitaire – la densité de flux de chaque pore ($J_{\text{Poiseuille}}$), pour un gradient unitaire) a été ramenée à la surface totale d'infiltration (S_{surface}) selon l'Équation 10. Ces densités de flux ont ensuite été additionnées pour l'ensemble des pores d'une même profondeur, permettant ainsi d'estimer la conductivité hydraulique attribuable aux macropores pour une profondeur donnée (moyennant les hypothèses précitées).

$$J_{\text{macropores}} = \frac{\sum J_{\text{poiseuille}} * S_{\text{pore}}}{S_{\text{surface}}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (10)$$

Avec :

$J_{\text{Poiseuille}}$, la densité de flux à travers un pore [m/s] ;

S_{pore} , la surface totale du pore [m²] ;

S_{surface} , la surface d'infiltration (surface occupée par l'anneau). Elle vaut 0,07 m².

9.2. Perméamètre à charge constante « Eijkelkamp »

Les mesures de perméamétrie utilisent les échantillons du lot 1 après une re-saturation des échantillons suite à leur passage dans la casserole basse pression (Figure 6). Le dispositif en tant que tel est illustré par la Figure 16.

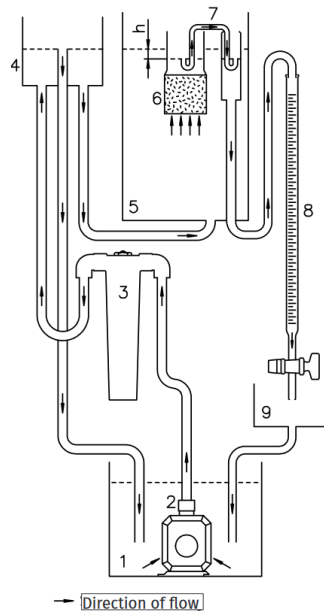


Figure 16 - Représentation schématique du perméamètre. (Royal Eijkelkamp, 2022b).

Le niveau d'eau au sein du perméamètre (5) est maintenu constant grâce à un réservoir avec un trop-plein (4) raccordé par un siphon. L'échantillon est placé en (6). Grâce à un autre siphon (7), le niveau d'eau au-dessus de l'échantillon est également maintenu constant, à un niveau inférieur au niveau du bac (5). La différence de hauteur d'eau au sein de l'échantillon et du bac

va créer une différence de charge aux deux extrémités d'un échantillon de sol saturé, ce qui va mener à un écoulement d'eau à travers l'échantillon de bas en haut. Au cours de cette expérience, le débit de sortie est mesuré en utilisant la burette graduée (8). Une fois le débit stabilisé, l'expérience est terminée et ce résultat utilisé pour déterminer K_{sat} .

K_{sat} est déterminé à partir de la loi de Darcy. Selon cette loi, un écoulement laminaire et permanent peut être décrit par l'Équation 11. La section mouillée S , la hauteur du sol L ainsi que la différence de charge hydraulique totale entre l'entrée et la sortie du système ΔH sont mesurées à partir du dispositif.

$$Q = -K_{sat} S \frac{\Delta H}{L} \quad (11)$$

Avec :

Q , le débit [m^3/s];

S , la section de l'échantillon = $0,00196 m^2$ pour un kopecki de $100cm^3$;

ΔH , la différence de charge hydraulique entre l'entrée et la sortie du système [m]. Elle est représentée par h sur la Figure 16;

K_{sat} , la conductivité hydraulique du sol à saturation [m/s];

L , la hauteur de l'échantillon de sol [m].

9.3. Perméamètre de type Vergière

La mesure du débit à saturation est effectuée en utilisant les échantillons du lot 3 (Figure 6). Afin d'obtenir K_{sat} , la loi de Darcy (Équation 11) est utilisée. La section S des Vergières est déterminée à partir du logiciel ImageJ sur base de photos de la partie supérieure de chaque Vergière, en soustrayant la surface occupée par la paraffine de la surface d'intérêt théorique de $100 cm^2$. Le débit Q , la différence de charge hydraulique entre l'entrée et la sortie du système ΔH sont déterminés à partir du dispositif représenté par la Figure 17.

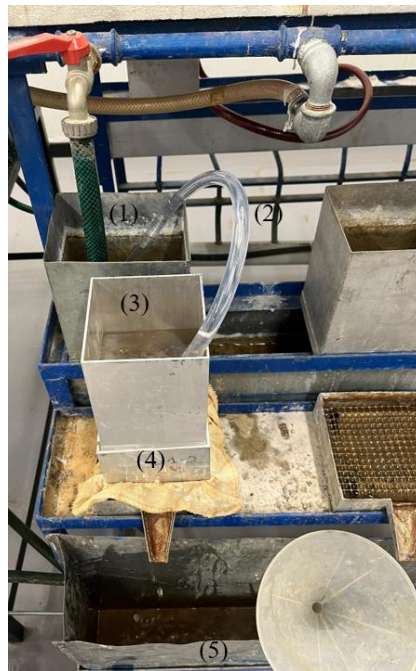


Figure 17 - Dispositif expérimental de mesure de conductivité hydraulique par perméamétrie de type Vergière. Photo personnelle.

Afin d'obtenir ce dispositif expérimental, il faut tout d'abord placer un tissu sur la partie inférieure de la Vergière (4). Au niveau de la partie supérieure, un cadre rectangulaire de dimension 10,5 cm (3) est enfoncé à une profondeur approximative de 1 cm dans la paraffine. Pour cela, la paraffine est légèrement chauffée afin de faciliter l'entrée du cadre. Positionner ce tube rectangulaire au sein de la paraffine et non directement au sein du sol permet d'éviter de créer des flux préférentiels et d'altérer la structure du sol. L'ensemble (3 & 4) est placé sur une grille. Une pression hydrostatique est ensuite appliquée au-dessus de la Vergière en appliquant une lame d'eau de hauteur constante grâce à un siphon (2) reliant ce compartiment avec un réservoir trop-plein (1). Une fois l'eau ayant traversée la Vergière, elle se retrouve dans un bac (5) qui va l'évacuer. Le débit Q est mesuré à la sortie de la Vergière, avant l'évacuation de l'eau. ΔH correspond quant à lui à l'addition de la hauteur de la Vergière (10cm) et de la hauteur d'eau au sein du cadre rectangulaire. Cette dernière varie légèrement d'un échantillon à l'autre et est comprise entre 17 et 22 cm.

10. Quantification de la biomasse aérienne sèche

Afin de quantifier la biomasse aérienne sèche, 2 prélèvements par zone d'échantillonnage sont effectués pour un total de 6 mesures par modalité. La campagne de prélèvement a été effectuée le 06/02/24.

Une zone d'intérêt est également définie pour chaque prélèvement. Celle-ci est délimitée par un cadre possédant une aire intérieure de $0,23 \text{ m}^2$. L'emplacement du cadre prend en compte la distance entre les lignes de semis afin d'avoir un nombre de rangs identiques pour chaque prélèvement (Figure 18). Une fois le cadre positionné, les parties aériennes de la biomasse verte vivante (sauf la mousse) se trouvant à l'intérieur de celui-ci sont prélevées. Les échantillons sont ensuite placés dans une étuve à 60°C pour une semaine. Après cette période, la biomasse est pesée et rapportée à la surface d'échantillonnage.

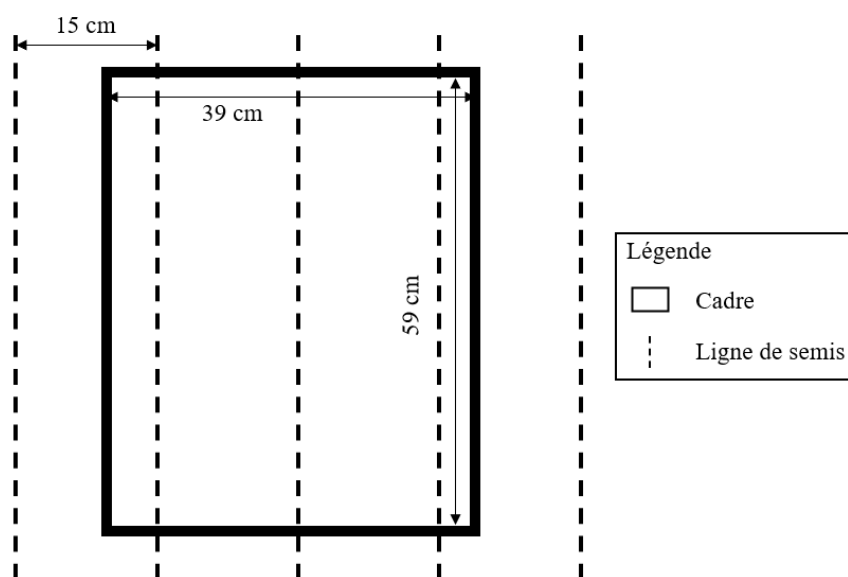


Figure 18 - Dispositif expérimental pour la délimitation de la zone d'étude pour la quantification massique de la biomasse verte. Réalisation personnelle.

11. Pourcentage de couverture du sol

La couverture du sol est composée des résidus morts et de la biomasse verte (dont de la mousse). Le pourcentage de couverture par ces différents éléments est déterminé à partir de photos en utilisant le logiciel ImageJ.

11.1. Pourcentage de couverture par la biomasse verte

Afin de calculer le pourcentage de couverture par la biomasse verte, trois campagnes sont effectuées. La première, réalisée le 05/02/24, comprend 3 photos par zone d'échantillonnage pour un total de 9 photos par modalité. La deuxième, réalisée le 15/03/24, et la troisième campagne, réalisée le 14/04/24, comprennent 2 photos par zone d'échantillonnage pour un total de 6 photos par modalité. Les photos sont prises parallèlement à la surface du sol et approximativement à 1 m de hauteur pour ensuite être traitées dans le logiciel. Tout d'abord, la biomasse verte (sauf la mousse) est séparée du reste de l'image. Pour cela, un filtre est appliqué en utilisant un seuil de couleur. Ensuite, elle est transformée en noir (ce qui n'est pas sélectionné) et blanc (la biomasse sélectionnée). L'image est ensuite homogénéisée en éliminant le bruit. Le pourcentage de couverture peut enfin être déterminé en calculant la fraction occupée par la couleur blanche dans l'image (Figure 19).

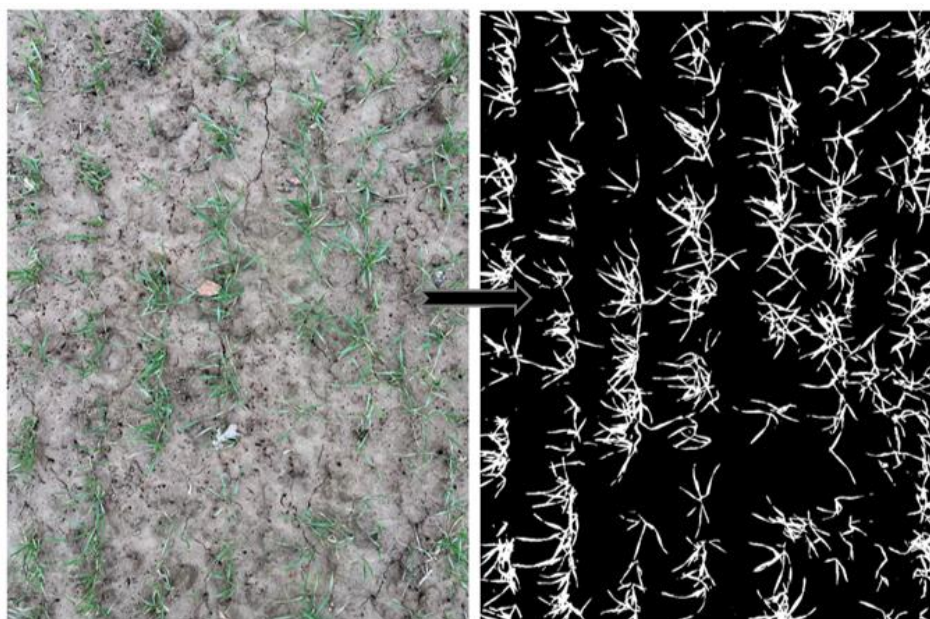


Figure 19 – Exemple d'un traitement d'image afin de quantifier le pourcentage de couverture de la biomasse verte (sauf la mousse). Photo référencée modalité labour, zone d'échantillonnage 1, échantillon 2. Réalisation personnelle.

11.2. Pourcentage de couverture par les résidus morts et la mousse

A la fin de chaque prélèvement de la biomasse verte, une photo est prise parallèlement à la surface du sol et approximativement à 1 m de hauteur. Dès lors, 2 photos par zone d'échantillonnage sont effectuées pour un total de 6 photos par modalité. La campagne a été réalisée le 06/02/24. Ces images sont ensuite traitées dans le logiciel afin de mettre en évidence deux pourcentages d'occupation du sol lorsque la biomasse verte n'est plus prise en compte : le pourcentage de couverture par la mousse et celui occupé par les résidus morts.

11.2.1. Pourcentage de couverture par la mousse

Les étapes sont identiques à celles utilisées pour déterminer le pourcentage de couverture de la biomasse, en prenant soin de ne pas tenir compte des surfaces externes au cadre (Figure 20).

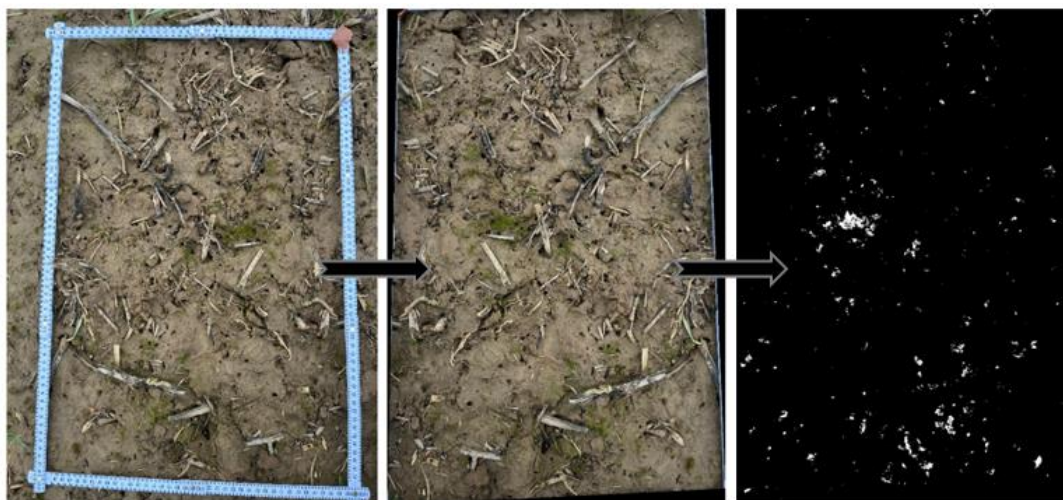


Figure 20 - Exemple d'un traitement d'image afin de quantifier le pourcentage de couverture de la mousse avec l'image originale à gauche et la photo ne prenant qu'en compte la zone d'étude au milieu. Photo référencée modalité TCS, zone d'échantillonnage 1, échantillon 1. Réalisation personnelle.

11.2.2. Pourcentage de couverture par les résidus morts

La détermination du pourcentage occupé par les résidus morts nécessite une approche un peu différente de celle utilisée pour la couverture par la mousse. En effet, la présence de résidus clairs et foncés et qui sont pour la plupart proches de la couleur du sol demande une étape supplémentaire. Avant d'appliquer le seuil de couleur, l'image est transformée en image inversée afin de permettre une meilleure différenciation entre le sol et les résidus (Figure 21).

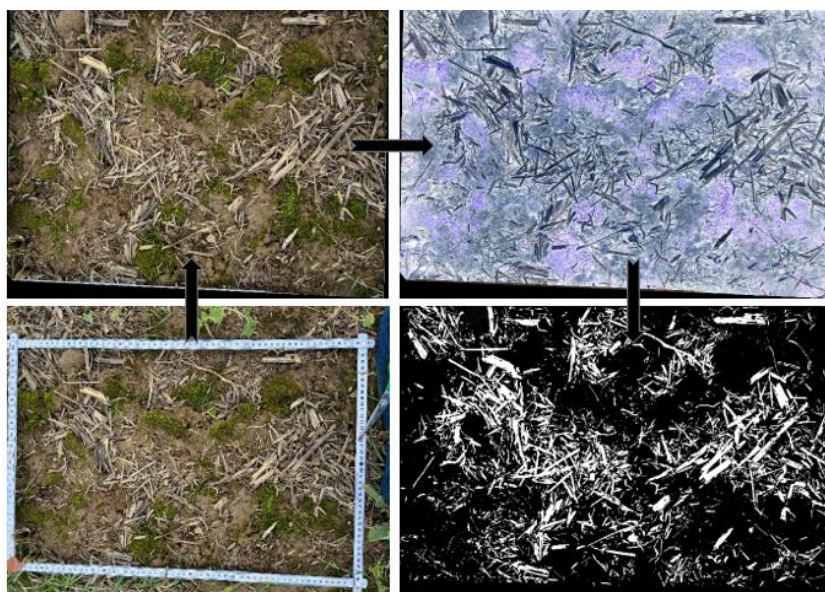


Figure 21 - Exemple d'un traitement d'image afin de quantifier le pourcentage de couverture des résidus morts avec l'image originale en haut à gauche, la photo ne prenant en compte que la zone d'intérêt en haut à droite, l'image inversée de la zone d'étude en bas à droite et en bas à gauche le résultat final. Photo référencée modalité ABC, zone d'échantillonnage 1, échantillon 2. Réalisation personnelle.

12. Mini-profil

Un mini-profil par modalité, devant les zones d'échantillonnage 1 de chaque modalité, a été réalisé le 13/05/2024. Ceux-ci possèdent une profondeur approximative de 35 cm et incluent l'horizon Ap ainsi que la partie supérieure du deuxième horizon de sol (visible par un changement de couleur brusque). La densité racinaire, les variations de couleur ainsi qu'une appréciation de la compacité à l'aide d'un couteau ont été observées sur l'ensemble du profil de sol.

13. Analyse des données

Les résultats obtenus sont analysés statistiquement avec le logiciel JMP sur base de tableaux comprenant les indicateurs afin d'en dériver des matrices de corrélation et d'effectuer des ANOVA. Cette dernière analyse permet de déterminer s'il existe des différences statistiquement significatives entre les groupes d'échantillons. Si la p-valeur est inférieure à 0,05, un test de Tukey-Kramer est utilisé afin de mettre en évidence ce(s) groupe(s).

Pour réaliser une ANOVA, trois hypothèses doivent être respectées : la normalité des résidus, vérifiée avec le test de Shapiro-Wilk (p-valeur > 0,05); l'homoscédasticité des résidus, vérifiée avec le test de Bartlett (p-valeur > 0,05) et l'indépendance des observations. Cette dernière est considérée respectée sur base du dispositif expérimental. Lorsqu'au moins une des deux premières hypothèses n'est pas respectée, l'indicateur subit une transformation de ses variables.

Les résultats issus des ANOVA sont représentés sous deux formes. La première est sous forme de tableaux comprenant la moyenne et l'écart-type associé. La deuxième est sous forme de boîtes à moustache. La ligne centrale de celle-ci correspond à la médiane et la croix représente la moyenne. Les extrémités de la boîte quant à elles correspondent au 25^{ème} et 75^{ème} quantile. Les moustaches montrent la variation attendue des données, pouvant aller jusqu'à 1,5 fois l'intervalle interquartile, ce dernier correspondant à la longueur de la boîte. Pour ces deux formes, des lettres de comparaison des moyennes sont utilisées, les catégories partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Quatrième Partie : Résultats

1. Teneur en carbone organique

Les résultats de l'ANOVA à 2 facteurs 'modalité' et 'profondeur' pour la teneur en C_{org} du sol sont représentés dans le Tableau 6. Seule la profondeur présente un effet significatif sur la teneur en C_{org} .

Tableau 6 – Effet des facteurs 'modalité' et 'profondeur' sur la teneur en carbone organique. Les p-valeurs écrites en orange sont significatives au seuil de 5 %.

Source	p-valeur
Modalité	0,343
Profondeur	0,0005
Modalité*profondeur	0,0517

Bien que l'effet de l'interaction entre la modalité et la profondeur n'est pas significatif, Il est très proche du seuil de 0,05. Dès lors, la Figure 22 montrant cet effet est représentée. Alors que le labour ne présente pas un taux de C_{org} statistiquement différent entre les profondeurs, une stratification est visible pour les deux modalités sous AgriCons. Cette dernière tend à être plus marquée en ABC qu'en TCS bien que les moyennes associées à chaque profondeur ne soient pas statistiquement différentes entre elles.

Bien que non significativement différentes entre elles, une plus grande teneur moyenne de C_{org} est observée en surface sous AgriCons comparé au labour. Cette augmentation est de 13 et 10 % pour les modalités TCS et ABC, respectivement par rapport au labour. En profondeur, le contraire est observé avec une diminution de 7 et 20 % pour les modalités TCS et ABC respectivement par rapport au labour.

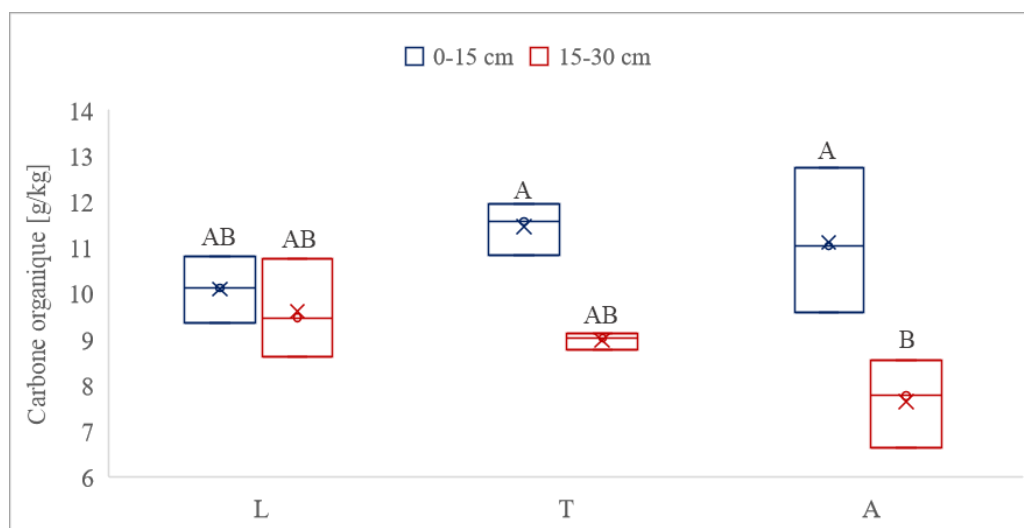


Figure 22 - Boîte à moustache représentant le taux de carbone organique en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) et de la profondeur (0-15 cm et 15-30 cm) avec les lettres de comparaison des moyennes issues de l'ANOVA. Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

2. Densité de VDT

La p-valeur obtenue à partir de l'ANOVA pour l'effet « modalité », bien que l'hypothèse d'homoscédasticité n'a pas été respectée, est de 0,0039. Cet effet a donc une influence significative sur la biomasse totale de VDT. La Figure 23 met en évidence une moyenne statistiquement plus importante sous ABC que sous labour, avec une valeur intermédiaire pour la modalité TCS. Bien que la moyenne de biomasse totale sous TCS n'est pas significativement différente des deux autres modalités, une augmentation de la biomasse avec la durée de la transition est observée. En effet, la moyenne de biomasse totale de VDT augmente de 68 % du labour vers TCS et de 127 % du labour vers ABC.

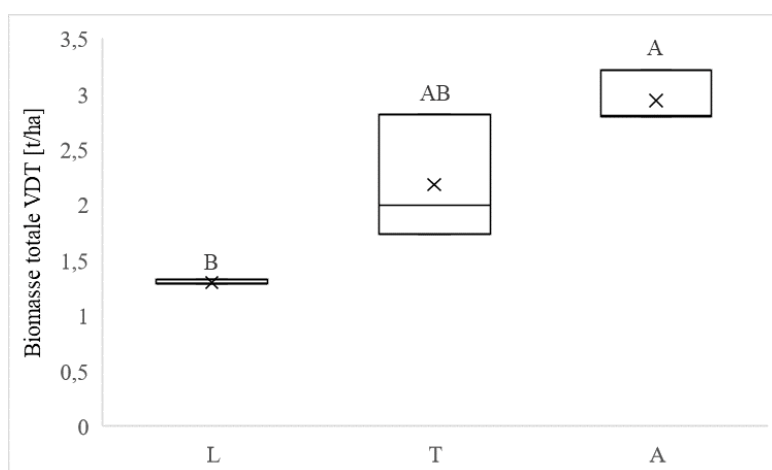


Figure 23 - Boîte à moustache représentant la biomasse totale de vers de terre (VDT) en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) avec les lettres de comparaison des moyennes issues de l'ANOVA. Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

3. Masse volumique apparente

Il n'y a pas de différence significative de ρ_a entre les modalités ($p > 0,05$; Tableau 7). En moyenne, ρ_a est de 1,51 g/cm³.

Tableau 7 – Résultats des ANOVA à un facteur selon les modalités (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) pour la masse volumique apparente ρ_a , différents teneurs en eau caractéristiques à la courbe de rétention en eau du sol (teneur en eau à saturation θ_s , teneur en eau à pF1 θ_1 , teneur en eau à la capacité au champs θ_{cc} et teneur en eau θ_{pFP}) et la pente₃₀₋₆₀ dérivée des résultats du QuantiSlakeTest en fonction de la modalité, avec la p-valeur associée à chaque ANOVA. Les valeurs suivies d'une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Indicateur	Modalité			p-valeur
	L	T	A	
ρ_a [g/cm ³]	1,52 ± 0,048 ^A	1,51 ± 0,070 ^A	1,50 ± 0,084 ^A	0,875
θ_s [%]	45,79 ± 1,45 ^A	45,70 ± 1,65 ^A	45,77 ± 2,77 ^A	0,995
θ_1 [%]	42,53 ± 0,93 ^A	42,45 ± 1,42 ^A	41,97 ± 1,60 ^A	0,643
θ_{cc} [%]	36,87 ± 0,87 ^A	37,36 ± 1,26 ^A	36,50 ± 0,86 ^A	0,218
θ_{pF} [%]	22,02 ± 2,29 ^A	21,89 ± 1,26 ^A	19,68 ± 2,17 ^A	0,348
RU [%]	14,68 ± 2,39 ^A	15,29 ± 2,15	16,76 ± 1,80 ^A	0,630
Pente ₃₀₋₆₀ [s ⁻¹]*	0,00046 ± -0,00035 ^A	-0,00017 ± 0,000085 ^A	-0,00029 ± 0,00035 ^A	0,220

*ANOVA déterminée à partir de la transformation racinée carrée de la variable.

4. Résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration de chaque modalité est illustrée à la Figure 24 pour une profondeur allant jusqu'à 35 cm (correspondant à la profondeur du mini-profil). Le profil de chaque échantillonnage individuel réalisé (jusqu'à 35 cm) se trouve en Annexe D. L'ANOVA a été réalisée après transformation des variables en $\log_{10}$ pour chaque profondeur. Même après transformation, toutes les observations ne respectaient pas l'hypothèse de normalité (0, 1, 4, 5, 6, 7, 15, 16 cm) et celle d'homoscédasticité (0, 1, 8, 9, 10, 11, 28, 29, 30 cm) nécessaires pour l'ANOVA. On observe que les écarts-types des profils sont significativement plus grands pour la modalité ABC, suivi de la modalité TCS et enfin de la modalité labour.

Pour les 2 premiers cm, les moyennes des trois modalités ne sont pas significativement différentes, avec une moyenne de 0,56 MPa. Les 2 cm suivants entament le processus de différenciation entre les modalités, les moyennes pour le labour et la modalité ABC étant significativement différentes avec une résistance à la pénétration 29 % plus importante en moyenne sous ABC que sous labour. À partir du 5^{ème} cm, le labour se différencie statistiquement des deux modalités sous AgriCons, sa moyenne de résistance à la pénétration étant plus faible et cela pour chaque profondeur (sauf à 35 cm). Contrairement à la résistance à la pénétration associée au labour (en moyenne égale à 0,61 MPa), celles en TCS et ABC varient beaucoup en fonction de la profondeur entre 5 et 26 cm. Les modalités présentent toutes les deux le début d'une zone de compaction à ± 18 cm. Cependant, celle de la modalité ABC se termine plus profondément (± 26 cm) que celle de la modalité TCS (± 23 cm). La valeur maximale moyenne dans cette zone de compaction est de 2,27 MPa sous TCS et de 2,89 MPa sous ABC. Tandis qu'après cette zone de compaction, les valeurs de résistance à la pénétration de la modalité TCS restent stables jusqu'à la fin du profil, les valeurs issues de la modalité ABC diminuent de 26 %.

Bien que la moyenne associée à la modalité ABC est toujours plus élevée que celle du TCS, elles ne sont statistiquement différentes que pour les profondeurs 8-10 cm et 23-26 cm. À partir du 26^{ème} cm, la résistance à la pénétration du labour augmente tandis que celle de la modalité ABC diminue. À partir du 27^{ème} cm, les moyennes entre le labour et l'ABC ne sont plus significativement différentes. Les trois modalités ont à nouveau une résistance à la pénétration non significativement différente pour le 35^{ème} cm, avec une moyenne de 1,95 MPa toutes modalités confondues.

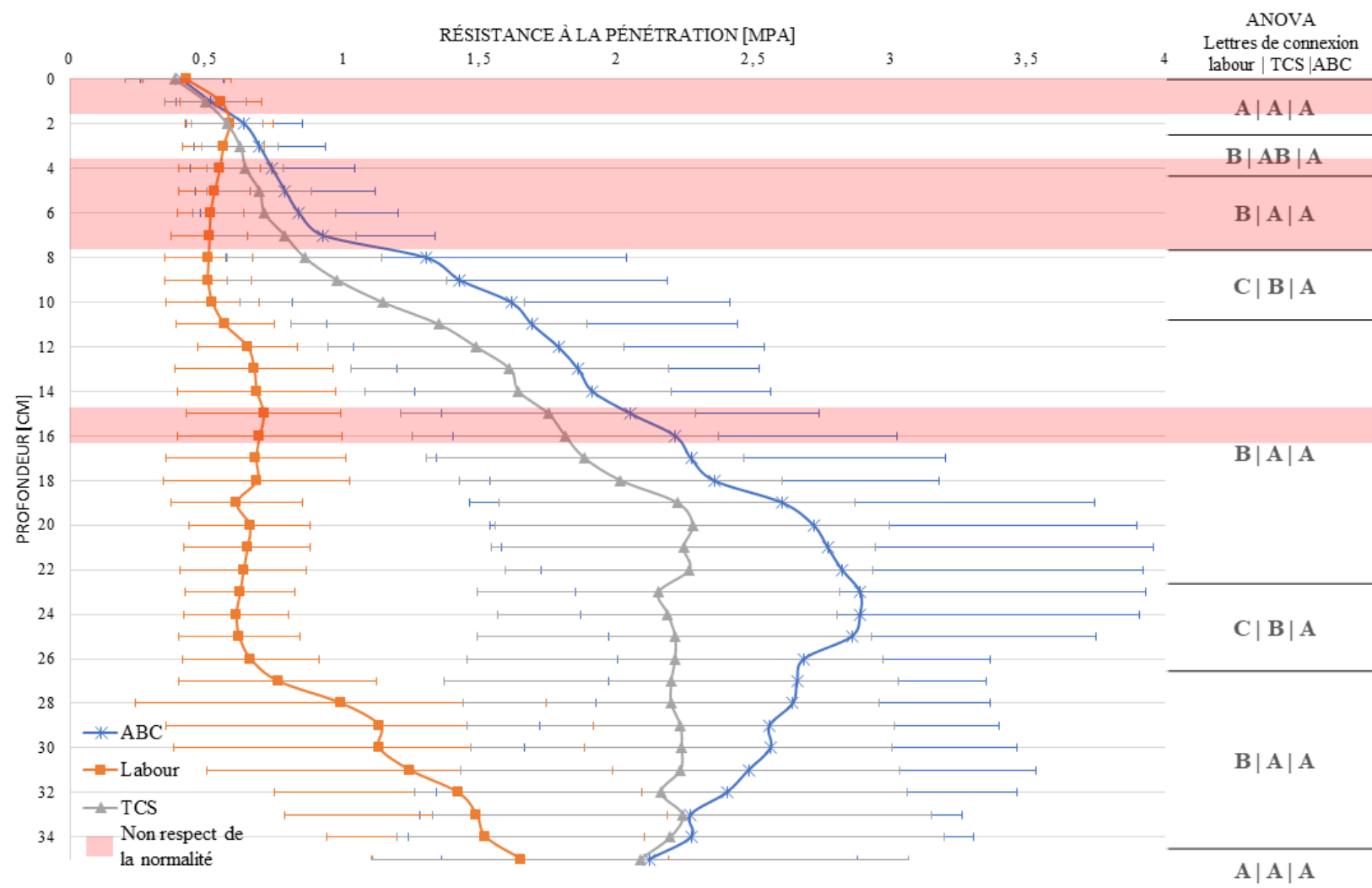


Figure 24 - Résistance à la pénétration des modalités étudiées (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) en fonction de la profondeur (gauche) et les lettres de comparaison des moyennes après ANOVA à un facteur 'modalité' par profondeur et après transformation des variables en log10 (droite). Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %. Les barres d'erreurs correspondent à l'écart-type. Les bandes roses indiquent les profondeurs pour lesquelles la condition de normalité des résidus n'est pas respectée malgré la transformation de la variable.

5. Stabilité structurale

La Figure 25 représente l'allure générale de l'évolution de la masse relative des échantillons lors du QST et ce en fonction des modalités, les graphiques relatifs à chaque échantillon se trouvant en Annexe E. Suite à des problèmes de logiciel, trois échantillons n'ont pas été pris en compte dont deux appartenant au labour et un au TCS. Cette Figure 25 met en évidence une première différenciation entre l'AgriCons et l'AgriConv en terme de stabilité structurale. Bien que l'allure des trois courbes suit les mêmes étapes avec tout d'abord une augmentation de la masse des échantillons, un maximum suivi d'une diminution de la masse pour finir avec sa stabilisation, certaines différences sont observées. Tout d'abord, le labour présente une plus grande variabilité que les modalités sous AgriConv. Ensuite, le labour atteint plus rapidement sa masse relative maximale que les modalités ABC et TCS. Par la suite, dans la phase descendante, la pente est plus forte sous labour ce qui mène également à une masse en fin d'expérience plus faible.

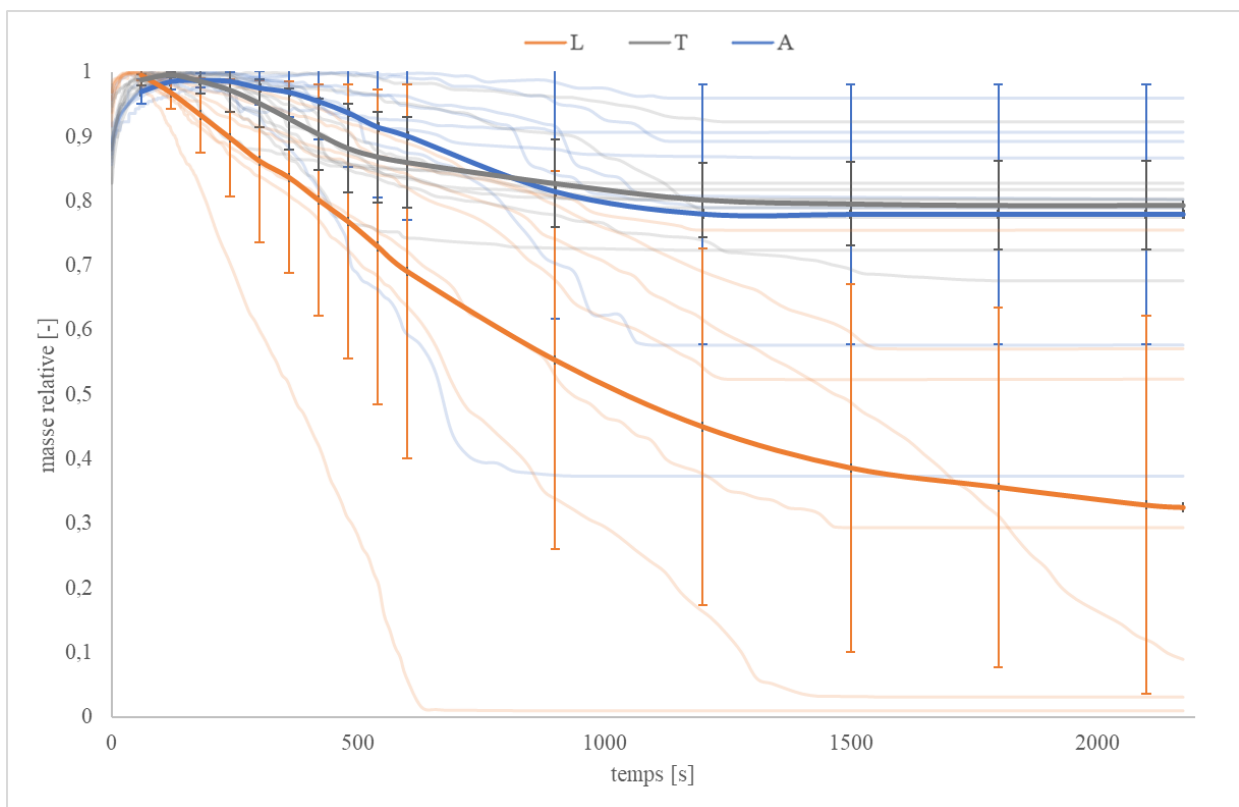


Figure 25 – Évolution de la masse relative des échantillons pour les 3 modalités étudiées (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) après immersion dans l'eau (QuantiSlakeTest). Les barres d'erreurs correspondent à l'écart-type.

À partir de ces données, quatre indicateurs ont été calculés afin d'obtenir des résultats quantitatifs. Selon l'ANOVA, les échantillons sous modalité TCS et ABC prennent significativement plus de temps en moyenne pour atteindre leur masse maximale ($t_{\max}$) que ceux sous modalité labour ($p < 0,0001$). En effet, alors que les modalités TCS et ABC prennent en moyenne 250 et 136 s respectivement, le labour n'en prend que 47 s. Bien que la modalité TCS prenne en moyenne 84 % de temps en plus que la modalité ABC, aucune différence significative n'est observée entre ces deux modalités (Figure 26).

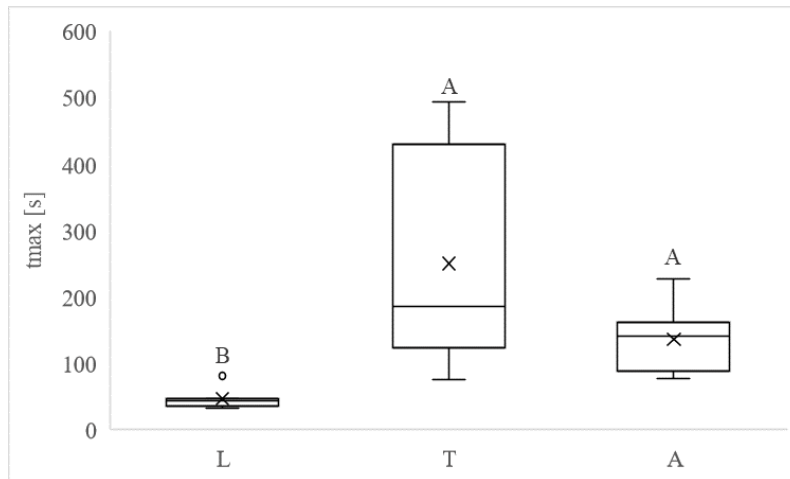


Figure 26 - Boîte à moustache représentant la durée nécessaire pour que la masse atteigne son maximum $t_{\max}$ après immersion (QuantiSlakeTest) en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA associée après transformation $\log_{10}$ de la variable. Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

Le deuxième indicateur est la pente entre la masse relative à 30 s et celle à 60 s après avoir atteint $t_{\max}$. Afin d'effectuer l'ANOVA, les valeurs de pente positives ont été négligées et les variables transformées en racine carrée après les avoir transformées en valeur absolue. En résultat, aucune différence significativement différente dans les moyennes des modalités n'est observée (Tableau 7).

L'ANOVA met en évidence que la durée nécessaire pour que l'échantillon perde entre 50 % et 75 % de sa masse relative (dt_{50-75}) pour chaque modalité n'est pas significativement égale ($p = 0,0119$). Les échantillons des modalités TCS et ABC possèdent une durée en moyenne plus faible de 46 % et 36 % respectivement (mais pas significativement différente entre elles) par rapport au labour (Figure 27).

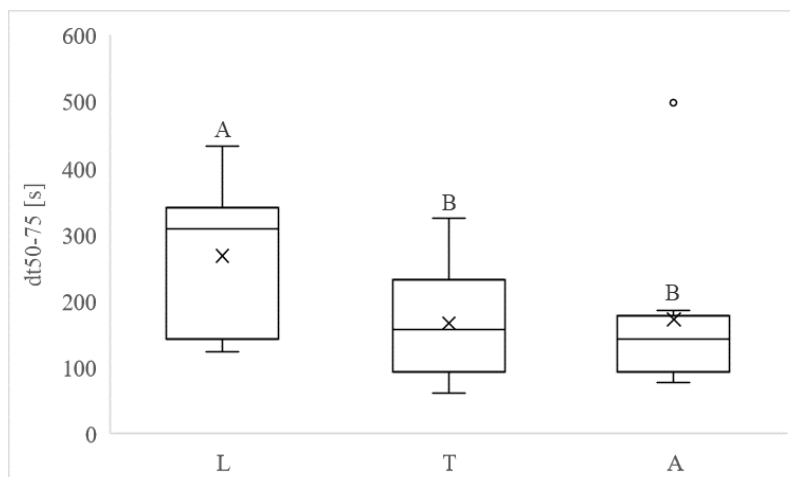


Figure 27 - Boîte à moustache représentant la durée nécessaire pour que l'échantillon perde entre 50 % et 75 % de sa masse relative dt_{50-75} lors du QuantiSlakeTest en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA associée après transformation $\log_{10}$ de la variable. Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

Enfin, l'ANOVA révèle un effet significatif de la modalité sur W_{end} , la masse relative des échantillons en fin de test ($p < 0,0001$). Les échantillons appartenant à la modalité ABC et TCS possèdent une masse relative en moyenne plus élevée, de 76 % et 79 % respectivement de leur masse maximale (mais pas significativement différente entre elles) que celle des échantillons sous labour. Pour ce dernier traitement, W_{end} n'est que de 32 % en moyenne (Figure 28).

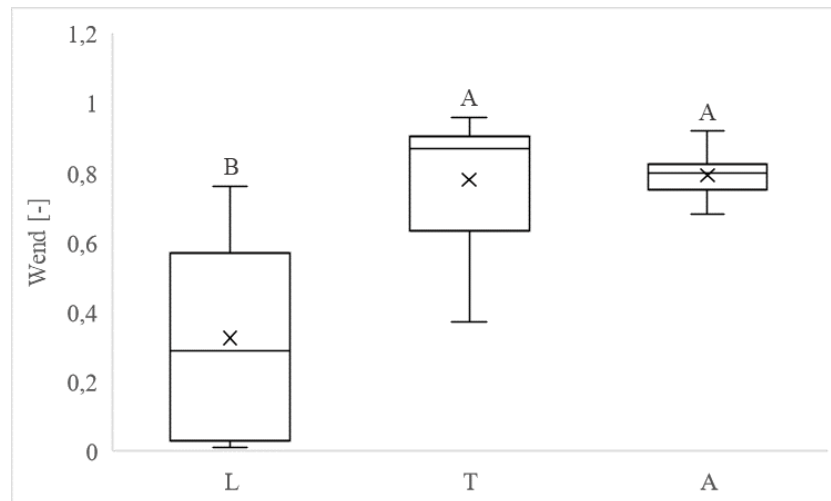


Figure 28 - Boîte à moustache représentant la masse relative de l'échantillon en fin de QuantiSlakeTest W_{end} en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA après transformation cubique de la variable. Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

Les différents indicateurs du QST sont fortement liés entre eux (bien que le coefficient de corrélation entre les indicateurs dt_{50-75} et pente_{30-60} ne soit pas significatif au seuil de 5 %), comme le montre la Figure 29 construite à partir des coefficients de corrélation (Tableau 12). Par exemple, une augmentation de t_{max} est associée à une augmentation de W_{end} , une diminution de dt_{50-75} ainsi qu'une augmentation de la pente (atténuation de la pente). Les combinaisons d'indicateurs présentant les coefficients de régression les plus élevés sont W_{end} avec pente_{30-60} ($R^2 = 0,55$) et W_{end} avec t_{max} ($R^2 = 0,51$) (Figure 30).

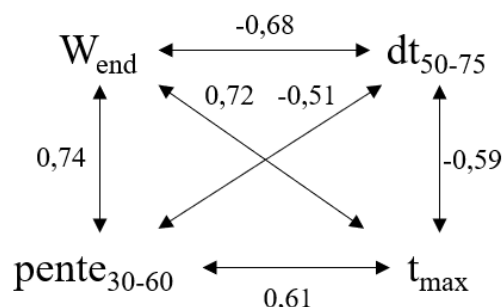


Figure 29 - lien de corrélation entre les différents indicateurs du QuantiSlakeTest (W_{end} , dt_{50-75} , pente_{30-60} et t_{max}).

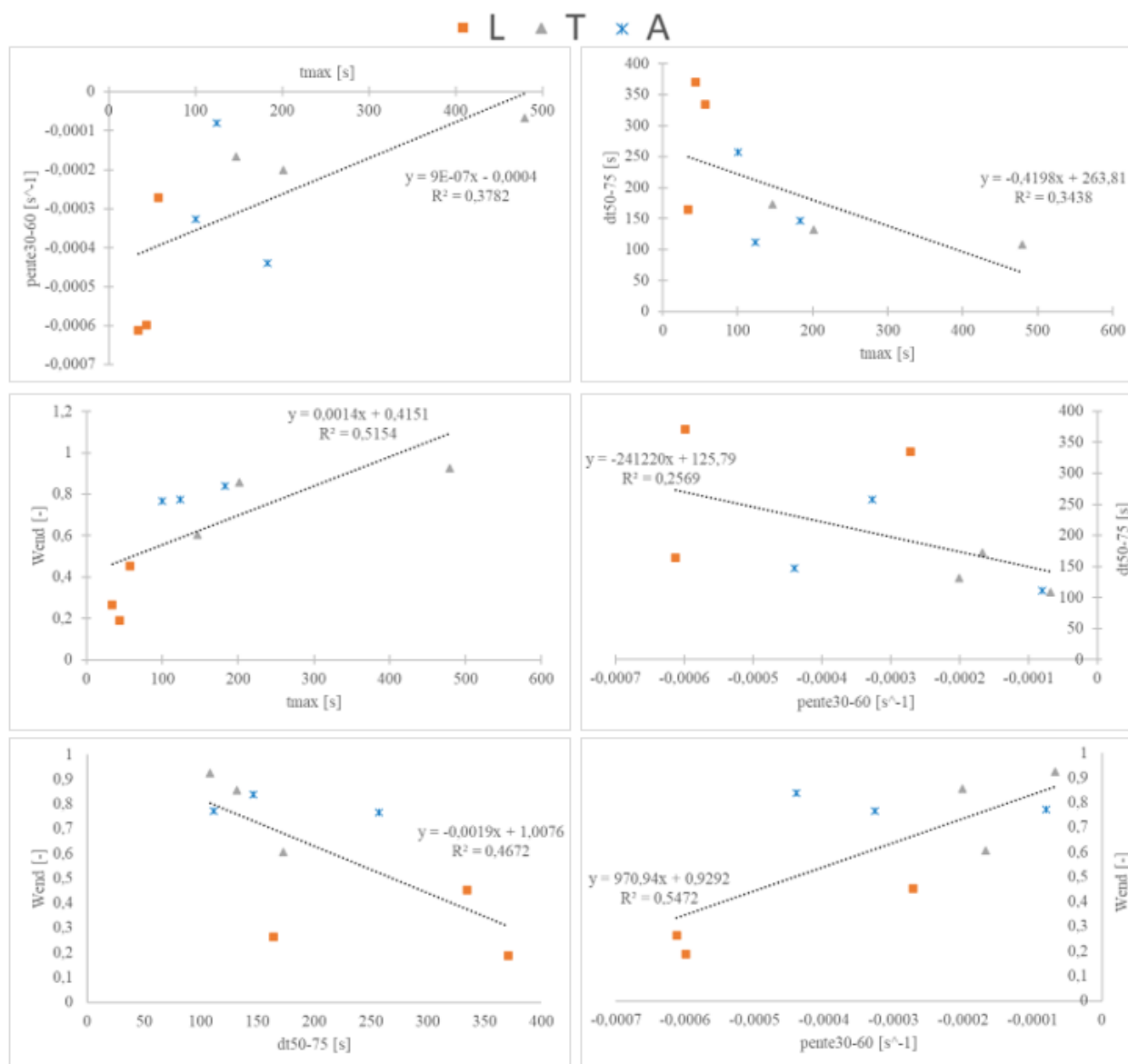


Figure 30 – Corrélation entre les indicateurs du QuantisLakeTest (t_{max} , dt_{50-75} , pen_{30-60} et W_{end}) possédant un coefficient de corrélation significatif au seuil de 5 %. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).

6. Rétention en eau

Visuellement, les courbes de rétention créées à partir de θ_{sat} , θ_1 , θ_{cc} et θ_{pfp} associées à chaque modalité sont très similaires au niveau de leur forme mais aussi par rapport aux valeurs de θ étudiées (Figure 31). Ce constat est confirmé par les différentes ANOVA qui montrent que, pour chaque point mesuré de la courbe de rétention, les moyennes de chacune des modalités ne sont pas significativement différentes entre elles (Tableau 7). Le même constat est obtenu pour RU, également non significativement différent entre les modalités et de 15,6 % (volumique) de moyenne, toutes les modalités confondues.

Ces différents θ sont fortement liés entre eux, comme le montre les coefficients de corrélation entre ces indicateurs (Figure 32 ; Tableau 12), bien que ce coefficient ne soit pas significatif au

seuil de 5 % entre θ_1 et θ_{pfp} ainsi qu'entre θ_{cc} et θ_{pfp} . De plus, le coefficient de régression entre θ_{sat} et θ_{pfp} est un peu faible ($R^2 = 0,35$; Figure 34).

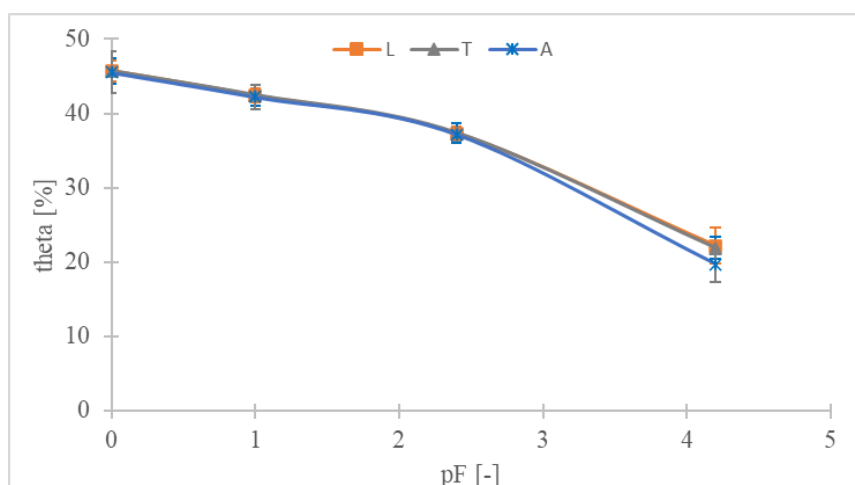


Figure 31 - Courbe de rétention en eau pour les 3 modalités étudiées (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).

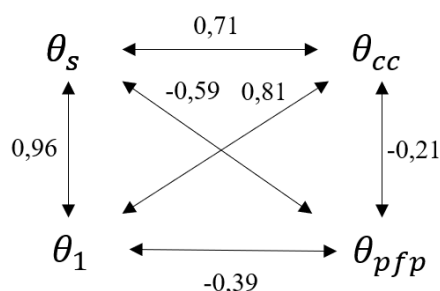


Figure 32 - lien de corrélation entre la teneur en eau à saturation θ_{sat} , la teneur en eau à pF 1 θ_{pF1} , la teneur en eau à la capacité au champs θ_{cc} , et la teneur en eau au point de flétrissement θ_{pF} .

En ce qui concerne la RU, elle possède un coefficient de corrélation significatif avec θ_{pfp} (à partir duquel elle a été déterminée) de valeur -0,96 et avec θ_{sat} de valeur 0,74 (Figure 32 ; Tableau 12). Le coefficient de régression obtenu entre RU et θ_{sat} est de 0,55 (Figure 33).

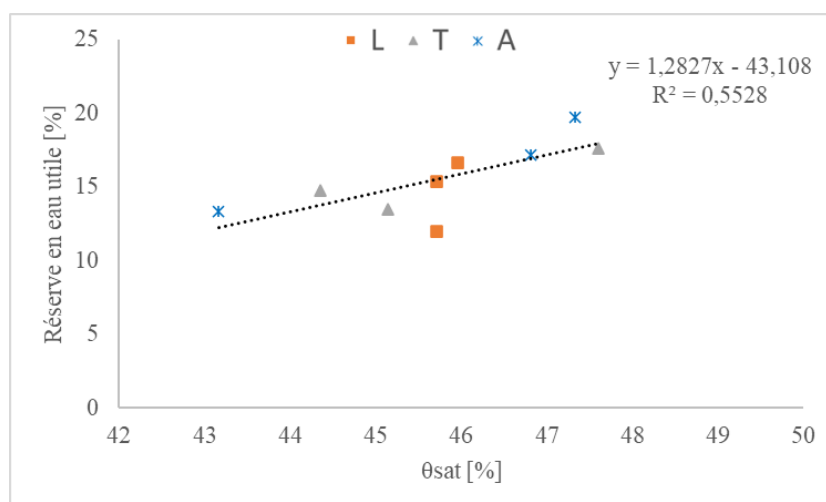


Figure 33 – Corrélation entre la réserve en eau utile et la teneur en eau à saturation θ_{sat} . (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).

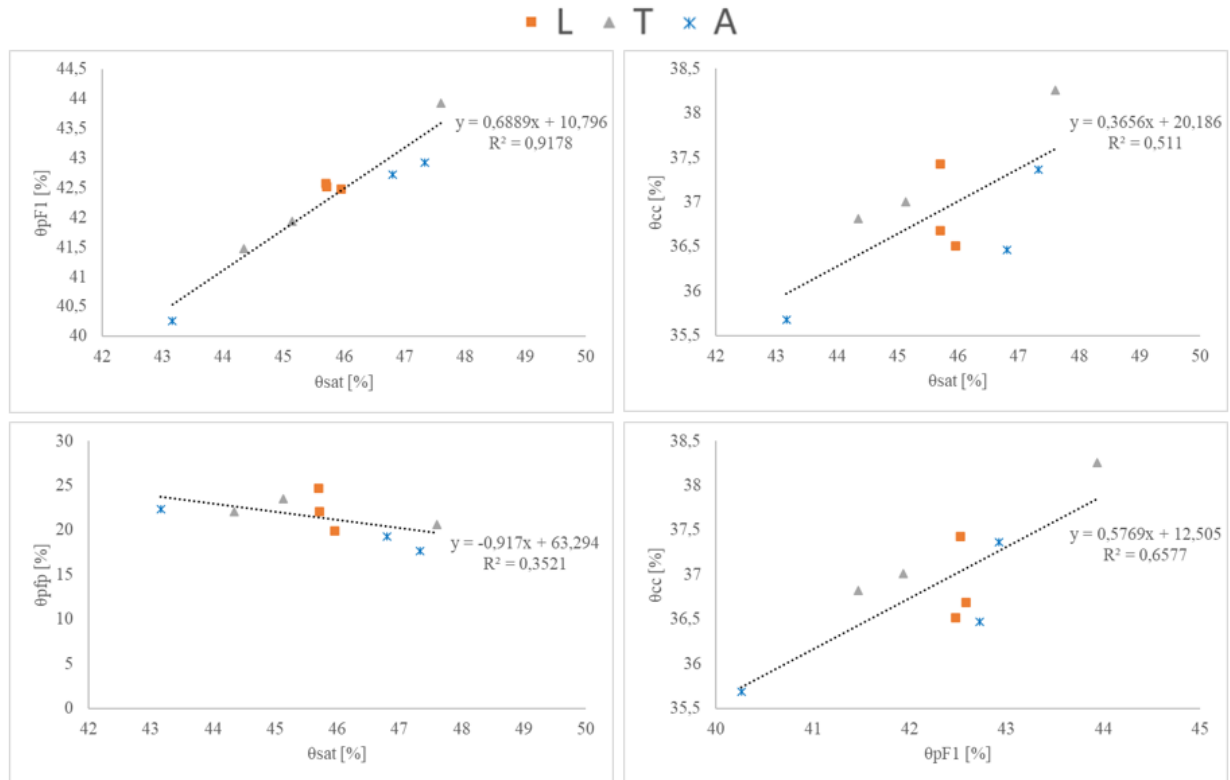


Figure 34 – Corrélation entre les différentes teneurs en eau de la courbe de rétention la teneur en eau à saturation θ_{sat} , la teneur en eau à pF 1 θ_{pF1} , la teneur en eau à la capacité au champs θ_{cc} , et la teneur en eau au point de flétrissement θ_{pF} possédant un coefficient de corrélation significatif au seuil de 5 %. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).

La porosité calculée à partir de ρ_a et θ_s sont toutes les deux des indicateurs de la porosité. Le test de Student met en évidence une différence significative de leur moyenne ($p < 0,0001$), celle de θ_s (valeur de 45,7 %) étant statistiquement supérieure à celle de porosité calculée à partir de ρ_a (valeur de 43,1 %).

7. Conductivité hydraulique à saturation

Les résultats de l'ANOVA à 2 facteurs 'dispositif' et 'modalité' pour K_{sat} sont représentés dans le Tableau 8. Tandis que les effets associés au dispositif et à la modalité sont significatifs, celui de l'interaction entre dispositif et modalité ne l'est pas.

Tableau 8 – Effet des facteurs 'dispositif' et 'modalité' sur la conductivité hydraulique à saturation après transformation des variables en $\log_{10}$. Les p-valeurs écrites en orange sont significatives au seuil de 5 %.

Source	p-valeur
Dispositif	< 0,0001
Modalité	0,0348
Dispositif*modalité	0,294

L'utilisation du perméamètre Vergière mène à une moyenne de K_{sat} ($10^{-4,09}$ m/s) significativement plus grande que celle obtenue avec l'infiltromètre ($10^{-4,82}$ m/s), qui est également plus grande que celle obtenue avec le perméamètre Eijkelkamp ($10^{-5,68}$ m/s) (Figure 35). Les dispositifs présentant la plus grande corrélation sont le perméamètre Eijkelkamp et l'infiltromètre ($r = 0,57$, $p = 0,107$; Tableau 12). Le coefficient de régression obtenu est cependant faible ($R^2 = 0,33$; Figure 36). En ce qui concerne l'influence de la modalité, le labour a une moyenne ($10^{-4,6}$ m/s) significativement plus grande que celle du TCS ($10^{-5,34}$ m/s), la modalité ABC présentant des valeurs intermédiaires avec une moyenne de 10^{-5} m/s (Figure 37).

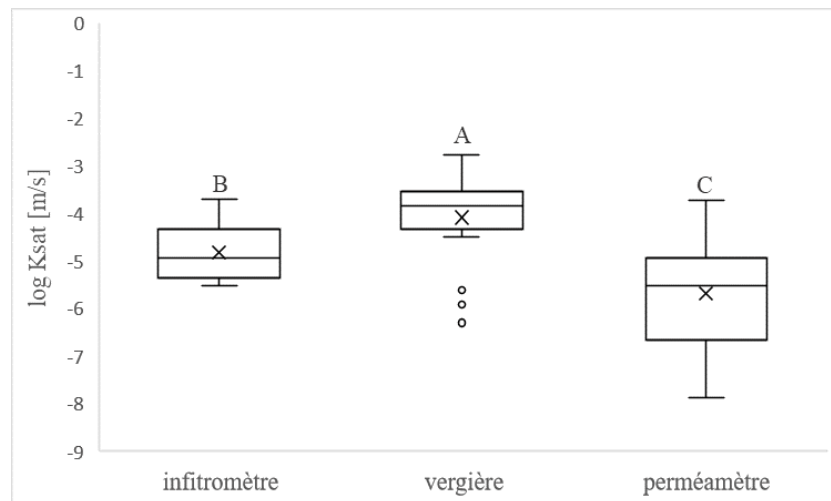


Figure 35 - Boîte à moustache représentant le log de la conductivité hydraulique à saturation en fonction du dispositif (infiltromètre simple anneau, perméamètre Vergière, perméamètre Eijkelkamp), avec les lettres de comparaison des moyennes issues de l'ANOVA associée après transformation log10 de la variable. Les dispositifs partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

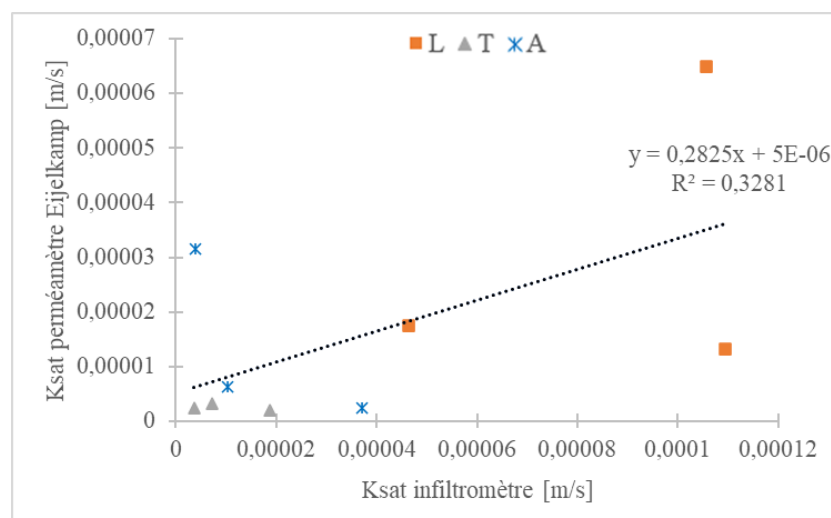


Figure 36 – Corrélation entre les dispositifs perméamètre Eijkelkamp et infiltromètre simple anneau. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).

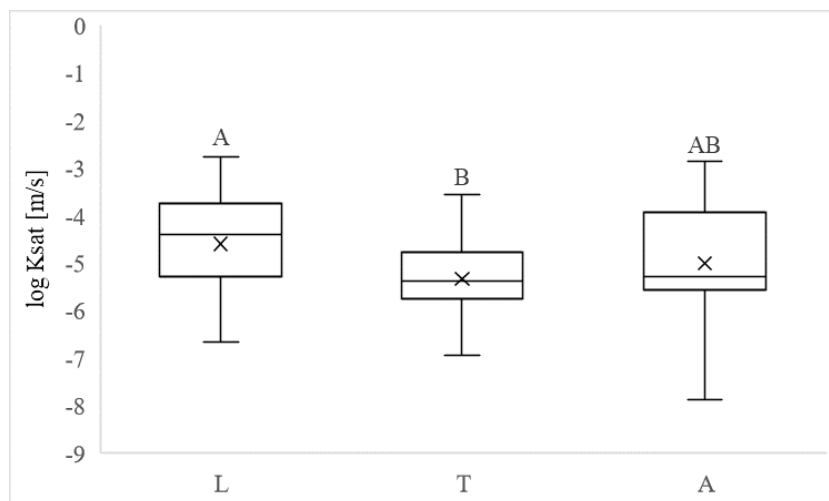


Figure 37 - Boîte à moustache représentant le log de la conductivité hydraulique à saturation en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC), avec les lettres de comparaison des moyennes issues de l'ANOVA associée après transformation log10 de la variable. Les traitements partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

7.1. Colorant Brilliant Blue

L'analyse des images met en évidence trois résultats principaux. Il s'agit de la couverture par le colorant, du nombre de macropores observés par m² ainsi que de la densité de flux d'eau à travers les pores (pour un gradient unitaire), rapportés à la surface de la zone d'étude $J_{\text{macropores}}$.

L'ANOVA concernant le pourcentage de couverture par le colorant met en évidence l'effet de la profondeur sur celui-ci (Tableau 9). Une tendance à la diminution est observable bien que non significative pour les profondeurs 5, 10, 15 cm et les profondeurs 15 et 20 cm (Figure 38). Une diminution de 77 % est observée entre les profondeurs 5 et 20 cm. L'effet de la modalité et de l'interaction entre les facteurs ne sont quant à eux pas significatifs (Tableau 9).

Tableau 9 – Effet des facteurs 'modalité' et 'profondeur' sur la couverture par le colorant Brilliant Blue après transformation des variables en log10, le nombre de macropores et la densité de flux d'eau à travers les macropores après transformation des variables en log10. Les p-valeurs écrites en orange sont significatives au seuil de 5 %.

Variable étudiée	Source	p-valeur
Couverture par le colorant*	Modalité	0,689
	Profondeur	0,0139
	Modalité*profondeur	0,430
Nombre de macropores	Modalité	0,404
	Profondeur	< 0,0001
	Modalité*profondeur	0,0073
$J_{\text{macropores}}$*	Modalité	0,465
	Profondeur	0,0102
	Modalité*profondeur	0,150

*ANOVA déterminée à partir de la transformation log10 de la variable.

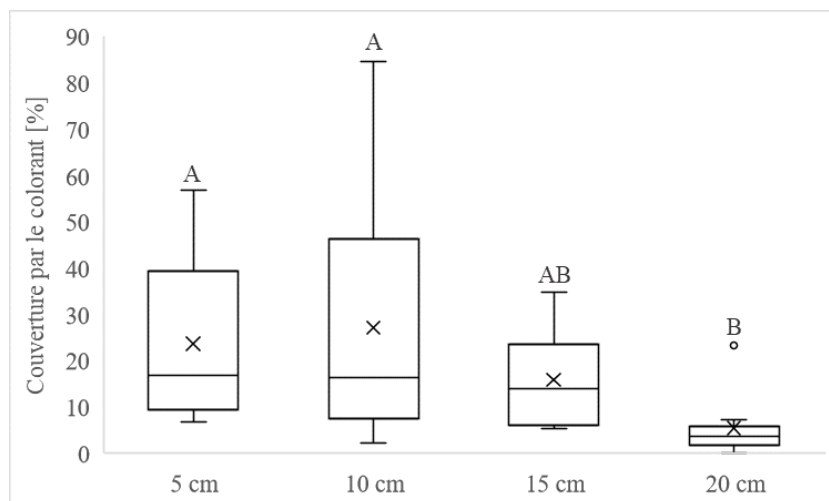


Figure 38 - Boîte à moustache représentant la couverture par le colorant en fonction de la profondeur avec les lettres de comparaison des moyennes issues de l'ANOVA associée après transformation log10 de la variable. Les profondeurs partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

En ce qui concerne le nombre de macropores, l'effet de la profondeur et l'interaction entre la profondeur et la modalité sont significatifs (Tableau 9). La Figure 39 met en évidence une diminution progressive du nombre de macropores par m^2 , en moyenne de 86 % de 0 à 20 cm, mais seul le nombre de macropores à la surface (0 cm) est significativement plus important que ce qui est observé plus profondément au sein du sol. L'effet de l'interaction entre la modalité et la profondeur (Figure 40) souligne l'importance de la macroporosité à la surface pour la modalité TCS, le nombre de macropores en TCS en surface (757 macropores par m^2 en moyenne) étant significativement plus élevé que pour l'ABC (372 macropores par m^2 en moyenne), la modalité labour présentant des valeurs intermédiaires (462 macropores par m^2 en moyenne)). Pour les autres profondeurs, les modalités ne se différencient pas.

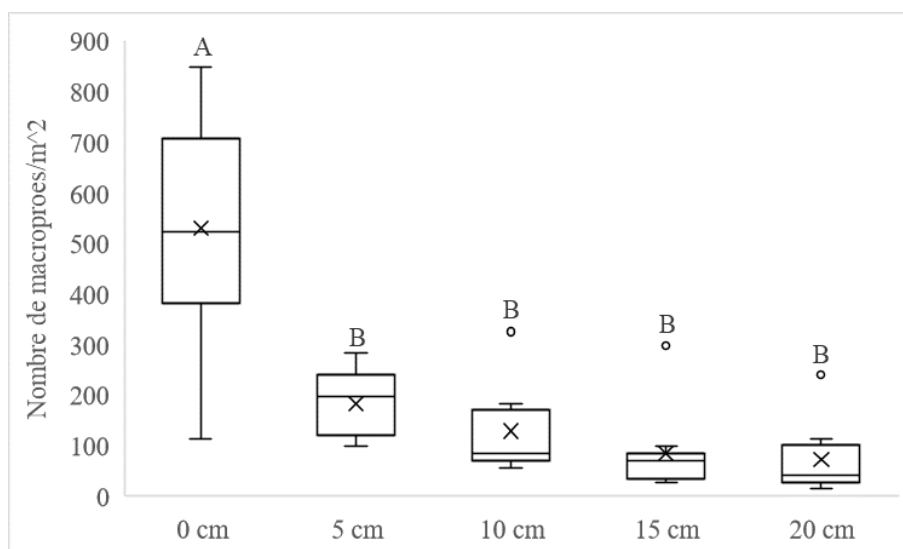


Figure 39 - Boîte à moustache représentant le nombre de macropores par m^2 en fonction de la profondeur avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA associée. Les profondeurs partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

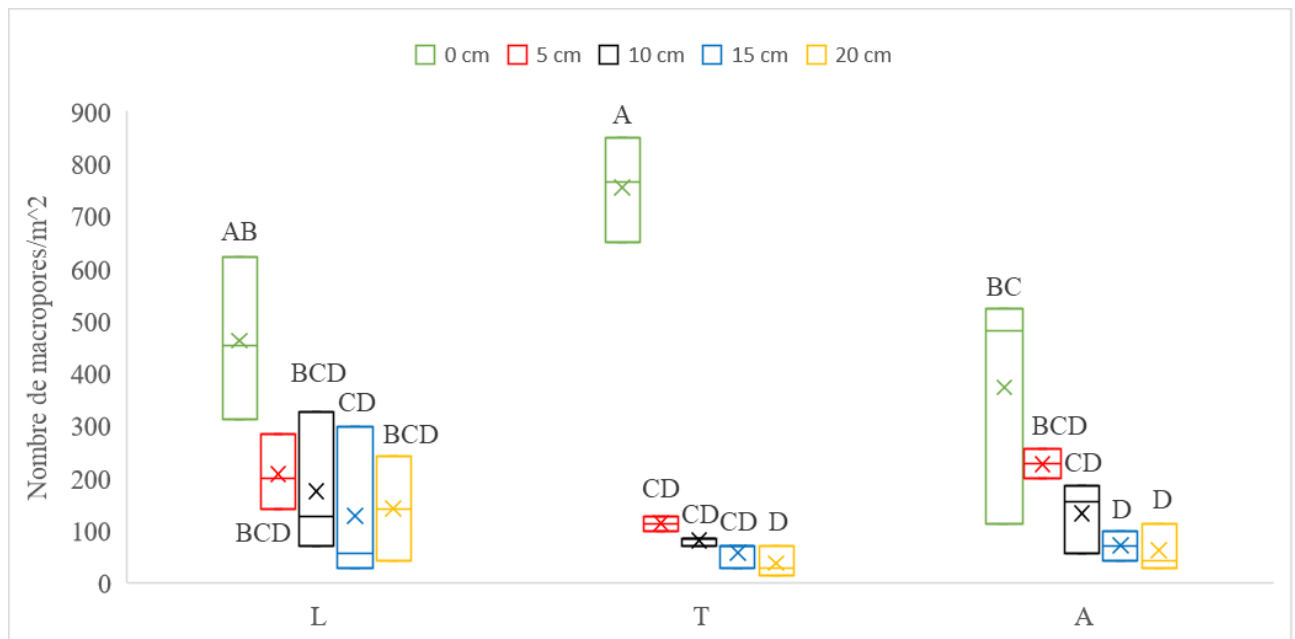


Figure 40 - Boîte à moustache représentant le nombre de macropores en fonction de l'interaction entre la profondeur et la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA associée. Les profondeurs partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

En ce qui concerne $J_{\text{macropores}}$, seul l'effet de la profondeur est significatif (Tableau 9). Une diminution de la densité de flux est observée, avec des moyennes (après transformation $\log_{10}$) de -2,23, -2,52, -2,78, -3,36 et -3,62 listées par profondeur croissante. Cependant, $J_{\text{macropores}}$ présente des valeurs significativement différentes seulement entre la densité de flux à la surface (0 cm) et aux profondeurs 15 et 20 cm (Figure 41).

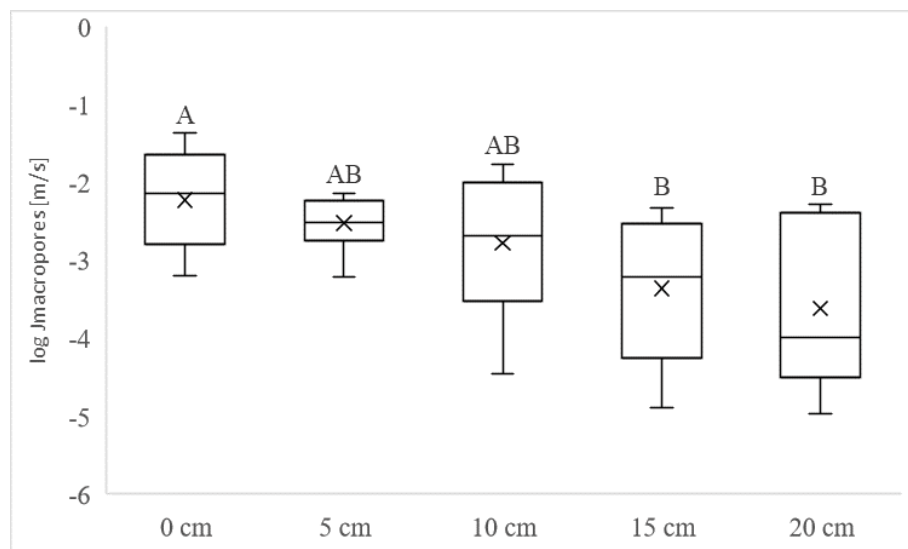


Figure 41 - Boîte à moustache représentant la densité de flux d'eau au travers des macropores (estimée selon l'équation de Poiseuille) en fonction de la profondeur avec les lettres de comparaison des moyennes issue de l'ANOVA associée après transformation $\log_{10}$ de la variable. Les profondeurs partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

A partir des coefficients de corrélation déterminés avec ces trois indicateurs ($J_{\text{macropores}}$, couverture par le colorant et nombres de macropores par m^2) ainsi qu'avec le K_{sat} (infiltromètre), un seul coefficient de corrélation est significatif au seuil de 5 %. Il s'agit de celui entre $J_{\text{macropores}}$ (après transformation $\log_{10}$) et K_{sat} (après transformation $\log_{10}$) ($r = 0,64$; Tableau 10). Le coefficient de régression obtenu entre ces deux indicateurs est quant à lui égal à 0,41 (Figure 41).

Tableau 10 – Coefficients de corrélation entre les indicateurs de la densité de flux au travers des macropores $J_{\text{macropore}}$, le nombre total de macropores par m^2 , la couverture du colorant et la conductivité hydraulique à saturation obtenue avec l'infiltromètre K_{sat} . Les coefficients de corrélation écrits en orange sont significatifs au seuil de 5 %.

Profondeur [cm]	Corrélation entre les indicateurs				
	Total macropores - Couverture par le colorant	$J_{\text{macropores}}$ - Couverture par le colorant	Couverture par le colorant - K_{sat} infiltromètre	Total macropores - K_{sat} infiltromètre	Log ($J_{\text{macropores}}$) - Log K_{sat} infiltromètre
0	/	/	/	0,24	0,64
5	0,054	-0,35	-0,072	-0,19	0,47
10	0,11	-0,49	0,50	-0,15	0,11
15	0,32	0,23	-0,18	-0,61	-0,25
20	-0,29	-0,21	0,43	0,54	0,39
Profondeurs confondues	0,39	-0,15	/	/	/

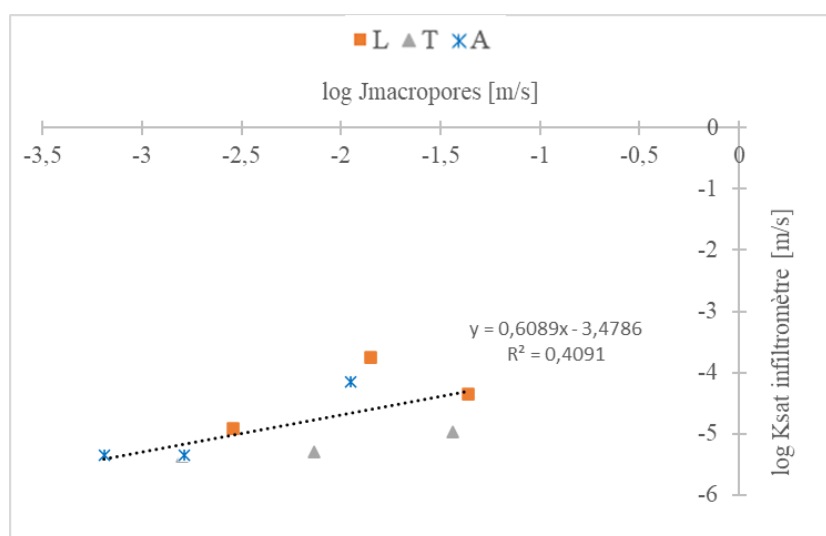


Figure 42 – Corrélation entre la densité de flux $J_{\text{macropores}}$ (après transformation $\log_{10}$) et la conductivité hydraulique à saturation mesurée par l'infiltromètre K_{sat} infiltromètre (après transformation $\log_{10}$).

8. Quantification de la biomasse aérienne sèche

En début de culture du froment (06/02/24), la biomasse sèche récoltée varie en fonction de la modalité (Tableau 11). La modalité ABC (composée de repousses de colza et de froment) possède une biomasse moyenne sèche aérienne 2,6 fois plus grande que celle de la modalité labour (composée de froment), qui elle-même est 1,5 fois plus grande que celle collectée en TCS (composée de froment).

Tableau 11 - Résultats des ANOVA à un facteur 'modalité' pour la quantification de la biomasse aérienne sèche, la couverture par les résidus, la mousse ou leur combinaison en fonction de la modalité (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC), avec les lettres de connexion et la p-Valeur associée à chaque ANOVA. Les valeurs suivies d'une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Indicateur	Modalité			p-valeur
	L	T	A	
Biomasse aérienne sèche* [kg/m ²]	0,02 ± 0,005 ^B	0,01 ± 0,003 ^C	0,07 ± 0,01 ^A	< 0,0001
Couverture par les résidus** [%]	0,6 ± 0,5 ^C	4,4 ± 0,9 ^B	14,5 ± 4,9 ^A	< 0,0001
Couverture par la mousse*** [%]	0,6 ± 0,3 ^B	0,7 ± 0,3 ^B	9,6 ± 1,6 ^A	< 0,0001
Couverture par les résidus et la mousse** [%]	1,2 ± 0,6 ^C	5,1 ± 1,1 ^B	25,7 ± 3,0 ^A	< 0,0001

*ANOVA déterminée à partir de la transformation racine carrée de la variable. **ANOVA déterminée à partir de la transformation log10 de la variable. ***ANOVA déterminée à partir de la transformation racine cubique de la variable.

9. Couverture du sol

Plusieurs estimations de couverture du sol ont été effectuées : la couverture par les résidus, par la mousse, par la combinaison de ces deux premiers ainsi que par la couverture par la biomasse verte. En ce qui concerne la couverture par les résidus, la modalité ABC possède une moyenne significativement plus grande que celle observée en TCS de 10 % (en absolu) qui est elle-même plus grande que celle en labour de 3,8 % (en absolu) (Tableau 11). Pour la couverture par la mousse, une valeur aberrante appartenant à la modalité ABC a été négligée. L'ANOVA met en évidence que les modalités labour et TCS présentent une couverture par la mousse en moyenne plus faible (mais pas significativement différente entre elles) que celle de la modalité labour (Tableau 11). La moyenne de couverture totale (résidus + mousse) pour la modalité ABC est significativement plus grande que celle observée en TCS de 20,6 % (en absolu) qui est elle-même plus grande que celle en labour de 3,9 % (en absolu) (Tableau 11).

En ce qui concerne la couverture par la biomasse verte, trois ANOVA ont été réalisées à partir des trois campagnes de mesure. La campagne ayant eu lieu au début de la culture de froment montre une différence significative entre les trois modalités, la moyenne de la modalité ABC étant la plus grande avec une moyenne de 26 % et celle de la modalité TCS la plus petite avec une moyenne de 9 %. Approximativement deux mois plus tard, tandis que l'indicateur pour la modalité ABC reste supérieur aux deux autres modalités, les modalités TCS et labour ne sont plus significativement différentes avec des moyennes respectives de 27 % et 33 %. La campagne réalisée au mois de mai montre à son tour un nouveau changement avec les 3 modalités qui ne sont plus significativement différentes avec une moyenne de 60 %. Tandis que pour les modalités TCS et labour la biomasse verte n'est composée que de froment, celle de la modalité ABC comprend également des repousses de colza. La Figure 43 met également en évidence la limite minimale de couverture du sol (30 %) conseillée en AgriCons pour protéger le sol de l'érosion. Cette limite est presque atteinte dès la première campagne en ABC et seulement grâce à la biomasse verte, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres modalités pour

lesquelles cette valeur n'est atteinte que quatre semaines plus tard pour le labour et cinq semaines pour le TCS.

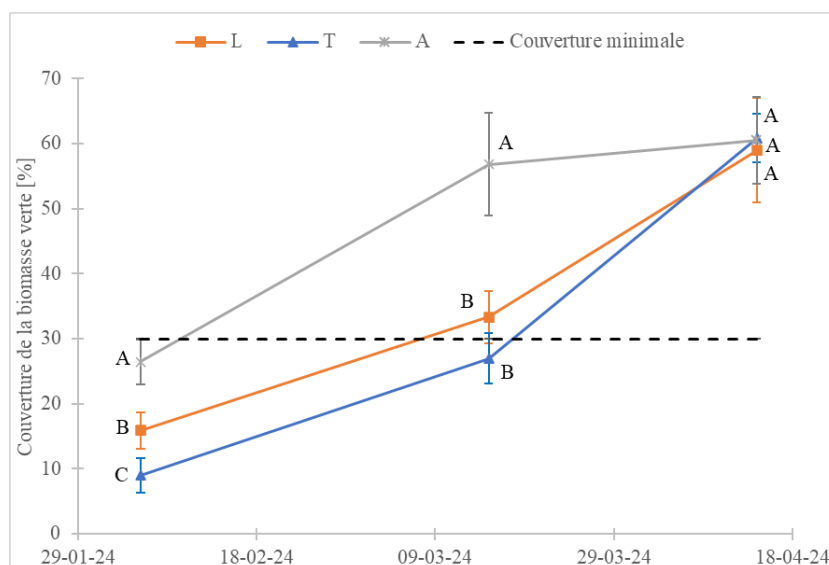


Figure 43 - Couverture du sol dans chacune des modalités (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC) en fonction des campagnes (05/02/24, 15/03/24 et 14/04/24) , avec les lettres de comparaison des moyennes associées à chaque campagne. Les modalités (pour une même campagne) partageant une même lettre capitale ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 %.

Étant donné que les photos analysées pour la couverture de la biomasse verte et celle de la combinaison résidus et mousse ne sont pas les mêmes, il n'est pas possible de calculer une couverture totale prenant en compte les trois composantes. En effet, une addition des pourcentages des différentes composantes constituerait une surestimation, une partie de la mousse et des résidus se trouvant sous la biomasse verte.

10. Mini-profil

Le profil associé à chaque modalité (photos en Annexe F) permet de mettre en évidence plusieurs observations. Tout d'abord, l'ensemble des profils présente trois zones différentes de compaction qui se trouvent aux mêmes profondeurs pour tous les profils et donc pour les 3 modalités. Les transitions entre les trois zones se situent à ± 14 cm et à ± 22 cm. La compacité augmente de la zone la moins profonde à la zone la plus profonde. Bien que les trois modalités présentent une même tendance, la modalité ABC semble beaucoup plus compacte que le labour pour une même zone. La modalité TCS est quant à elle plus similaire à celle de la modalité ABC qu'au labour.

Outre la compacité, la qualité de la structure observée semble diminuer avec la profondeur. En effet, pour l'ABC et le TCS, les agrégats du sol observés peu profondément sont plutôt de type sub-angulaire alors que plus en profondeur ils s'apparentent plus à des agrégats angulaires. Le labour présente également cette tendance mais les agrégats peu profonds s'émiettent encore plus facilement que les deux autres modalités traduisant une structure plus friable.

Enfin, la densité racinaire (photos Annexe F) au sein de chaque modalité a pu être observée. Celle retrouvée au sein du labour semble plus importante que celle observée pour les modalités TCS et ABC en profondeur.

11. Corrélation entre les indicateurs

11.1. Teneur en carbone organique

Tandis que ρ_a présente une corrélation significative pour un seuil de 5 % avec la teneur en C_{org} du sol ($r = -0,82$), ce n'est pas le cas pour la résistance à la pénétration ($r = 0,55$), également un indicateur de la compaction du sol (Tableau 12). Le coefficient de régression obtenu entre ρ_a et la teneur en C_{org} est de 0,68 (Figure 44). La RU est le deuxième indicateur présentant une corrélation significative avec la teneur en C_{org} ($r = 0,60$; Tableau 12) et son coefficient de régression avec cet indicateur est de 0,36 (Figure 45).

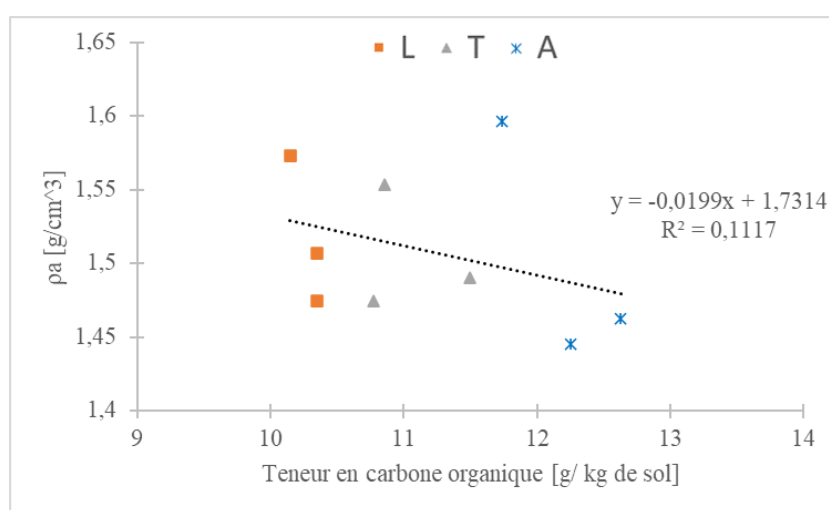


Figure 44 – Corrélation entre la masse volumique apparente ρ_a et la teneur en carbone organique. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).

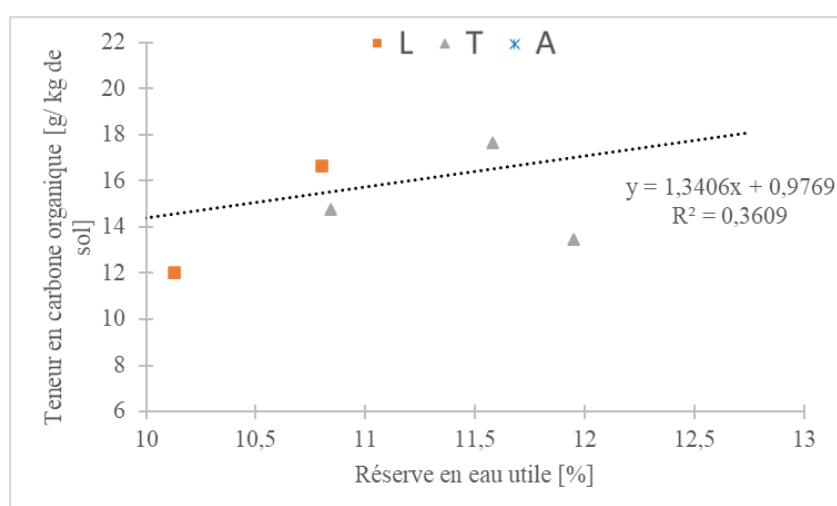


Figure 45 – Corrélation entre la réserve en eau utile et la teneur en carbone organique. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).

11.2. Densité de vers de terre

Tandis que la résistance à la pénétration possède un coefficient de corrélation significatif avec la densité de VDT ($r = 0,81$), ce n'est pas le cas de ρ_a ($r = -0,047$; Tableau 12 ; Figure 46). Le coefficient de régression entre ρ_a et la densité de VDT est de 0,66. En ce qui concerne le QST, seulement deux indicateurs possèdent une corrélation significative avec la densité de VDT (Tableau 12). Il s'agit de W_{end} ($r = -0,72$) et dt_{50-75} ($r = 0,83$). Leur coefficient de régression avec la densité de VDT sont respectivement de 0,69 et 0,35 (Figure 47).

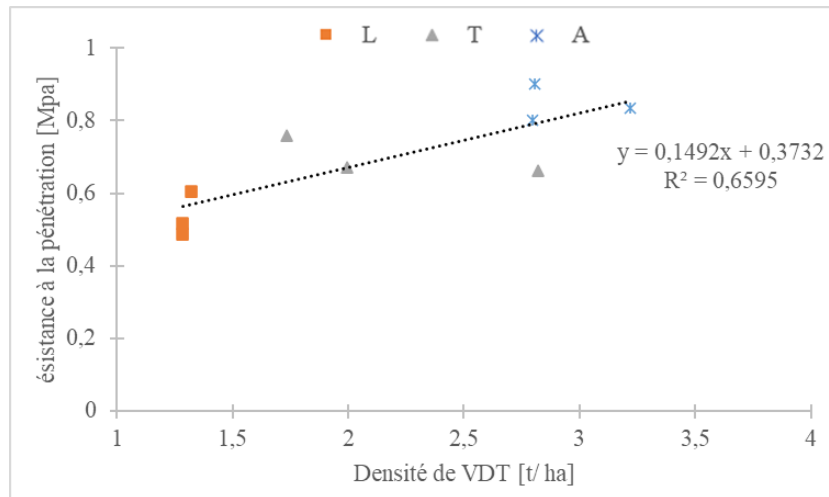


Figure 46 - Corrélation entre la résistance à la pénétration (2-8 cm ; données moyennées) et la densité de vers de terre (= VDT). (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).

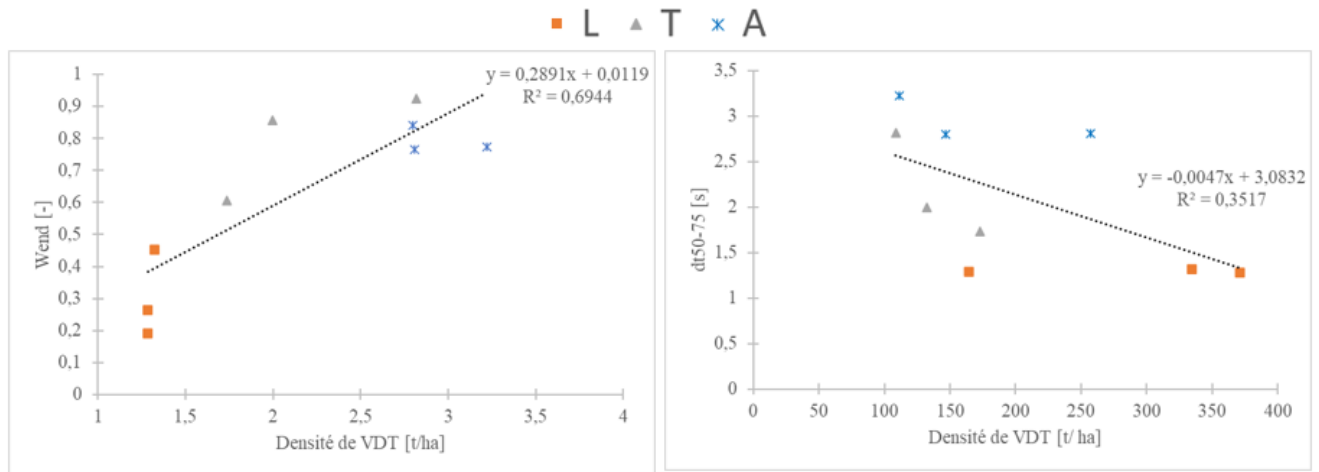


Figure 47 – Corrélation entre les indicateurs du QuantiSlakeTest W_{end} (gauche) et dt_{50-75} (droite) avec l'indicateur de densité de vers de terre (=VDT). (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC).

Tableau 12 - Coefficients de corrélation entre les indicateurs de teneur en eau à saturation θ_{sat} , de teneur en eau à pF 1 θ_{pF1} , de teneur en eau à la capacité au champs θ_{cc} , de teneur en eau au point de flétrissement θ_{pfp} , de réserve en eau utile RU, des indicateurs du QuantiSlakeTest (Tmax, Pente₃₀₋₆₀, dt₅₀₋₇₅, Wend), des conductivités hydrauliques à saturation mesurées avec l'infiltromètre simple anneau (Ksat infiltromètre), avec le perméamètre type Vergière (Ksat vergière) et le perméamètre type Eiljerkamp (Ksat perméamètre), de teneur en carbone organique entre 0 et 15 cm (C_{org} 0-15), de masse volumique apparente pa, de résistance à la pénétration entre 2 et 8 cm ainsi que de densité de vers de terre (VDT). Les coefficients de corrélation écrits en orange sont significatifs au seuil de 5 %.

	θ_{sat}	θ_{pF1}	θ_{cc}	θ_{pfp}	RU	tmax	Pente ₃₀₋₆₀	dt ₅₀₋₇₅	Wend	Ksat infiltro	Ksat verg.	Ksat perm.	C _{org} 0-15	pa	Résistance 2-8	VDT
θ_{sat}	1	0,96	0,71	-0,59	0,74	-0,46	0,15	0,21	-0,27	-0,13	0,34	0,16	0,58	-0,76	0,22	-0,14
θ_{pF1}		1	0,81	-0,39	0,59	-0,43	0,14	0,29	-0,19	-0,033	0,16	0,22	0,46	-0,65	0,0058	-0,35
θ_{cc}			1	-0,21	0,48	-0,087	0,16	0,30	-0,22	-0,31	-0,27	-0,18	0,44	-0,33	-0,036	-0,34
θ_{pfp}				1	-0,96	0,17	0,039	0,20	-0,048	0,34	-0,71	0,35	-0,52	0,51	-0,50	-0,41
RU					1	-0,18	0,013	-0,090	-0,021	-0,40	0,55	-0,37	0,60	-0,55	0,44	0,27
tmax						1	0,62	-0,59	0,72	-0,56	-0,46	-0,44	0,12	0,30	0,18	0,52
Pente ₃₀₋₆₀							1	-0,51	0,74	-0,63	-0,35	0,031	0,45	-0,28	0,52	0,56
dt ₅₀₋₇₅								1	-0,68	0,45	-0,16	0,51	-0,33	0,15	-0,40	-0,59
Wend									1	-0,71	-0,26	-0,38	0,44	-0,054	0,73	0,83
Ksat infiltro										1	0,24	0,57	-0,48	0,051	-0,66	-0,72
Ksat verg.											1	0,025	0,19	-0,51	0,078	0,12
Ksat perm.												1	-0,33	-0,12	0,24	-0,31
C _{org} 0-15 cm													1	-0,82	0,55	0,30
pa														1	-0,31	-0,047
Résistance 2-8 cm															1	0,81
VDT																1

Cinquième partie : Discussion

1. Teneur en carbone organique

Les teneurs en C_{org} obtenues pour l'ensemble des profils sont en accord avec les valeurs trouvées au sein de la littérature. Les valeurs attendues sous cultures pour la région agricole limoneuse wallonne, estimée à partir des données REQUASUD pour la période 2016-2019, sont comprises entre 10 et 15 g/kg de sol (SPW, 2020). Des valeurs dans la même gamme sont également obtenues par Shi et al. (2020). Cependant, ces teneurs sont considérées comme faibles, un seuil minimal de 20 g/kg de sol ayant été défini comme la limite inférieure afin d'éviter un risque important d'instabilité structurale du sol (Shi et al., 2020). Bien que la teneur en C_{org} est reconnue comme étant un facteur essentiel pour la stabilité structurale en tant qu'agent liant (Schlüter et al., 2020; Blanchy et al., 2022; Vanwindekens & Hardy, 2023), ce seuil est à prendre avec du recul car cet indicateur ne constitue pas le seuil facteur à influencer cette stabilité.

La transition de l'AgriConv vers l'AgriCons mène à une modification de la dynamique de l'indicateur. La littérature scientifique se focalise de manière générale sur 2 points en particulier, qui sont l'évolution de la distribution du C_{org} au sein du profil et l'évolution temporelle de cette teneur dans le profil. En ce qui concerne ce premier point, une stratification au sein du profil est attendue, avec des teneurs en C_{org} diminuant avec la profondeur au sein de l'horizon Ap pour les sols soumis à des pratiques de conservation du sol (Basche & DeLonge, 2019; Schlüter et al., 2020). L'arrêt du labour, action qui permettait une homogénéisation du profil, permet dorénavant une accumulation de la teneur en C_{org} au niveau de la surface, avec la contribution des résidus. Bien que l'ANOVA ne mette pas en évidence des teneurs en C_{org} différentes entre les modalités pour les deux gammes de profondeur étudiées, une stratification est visible sous AgriCons (bien qu'il ne s'agisse que d'une tendance pour la modalité TCS dont les teneurs pour les deux profondeurs ne sont pas significativement différentes). La stratification de la teneur en C_{org} est considérée comme étant un processus rapide (Basche & DeLonge, 2019; Schlüter et al., 2020), ce qui est observé dans ce mémoire étant donné que la stratification est présente au sein de la modalité TCS qui est à sa 5^{ème} année de transition.

En ce qui concerne l'évolution au cours de la transition de la teneur moyenne de C_{org} au sein du profil, aucune conclusion ne peut être tirée à partir de ce mémoire. En effet, bien que l'ANOVA ne met pas en évidence une différence significative même après 15 ans de transition, une évaluation des stocks de C_{org} ainsi qu'un échantillonnage sur une profondeur plus grande que celle disponible pour ce mémoire sont nécessaires pour confirmer ou non le potentiel de stockage du carbone organique de l'AgriCons.

2. Activité biologique

Dans la littérature scientifique, il est largement accepté que l'intensité du travail du sol est inversement proportionnelle à la biomasse de VDT (Balabane et al., 2005; Greenotec, 2019; Or et al., 2021; Wardak et al., 2022; Schlüter et al., 2020; Blanchy et al., 2023). Dès lors, une augmentation de la population de VDT est attendue sous AgriCons. C'est ce qui est observé

dans ce mémoire. Après une transition de 15 ans appliquant des TCS (dont 1 an sans aucun travail), la densité de VDT sous la modalité ABC est plus importante que sous la modalité labour. En ce qui concerne la modalité TCS, la population semble encore se reformer, l'indicateur étant intermédiaire entre celle du labour et de l'ABC. Ces valeurs sont attendues, la reconstruction des communautés de VDT pouvant prendre plusieurs années (Wardak et al., 2022). De manière théorique, une différenciation entre le labour et le TCS est attendue dans les prochaines années.

Les résultats obtenus peuvent également être comparés quantitativement avec la littérature. La campagne de prélèvement réalisée par Greenotech (2019) en Wallonie met en évidence une augmentation de 64 % en moyenne de la biomasse de VDT après la transition de l'AgriConv vers l'AgriCons (Annexe G). Celle-ci est beaucoup plus faible que les 127 % d'augmentation obtenus pour la modalité ABC (avec comme référence la modalité labour) mais proche des 68 % d'augmentation obtenus pour la modalité TCS (avec comme référence la modalité labour). Les valeurs de densité de VDT obtenues pour ce mémoire sont plus élevées de manière générale d'un facteur de 10 ou 100 que celles trouvées dans la littérature (Wardle, 1995; Balabane et al., 2005; Greenotec, 2019; Edwards & Arancon, 2022). Cependant, comparer ces résultats entre eux reste compliqué parce que bien que la biomasse de VDT dépend du travail du sol, elle est également influencée par d'autres facteurs dont la durée de la transition, les conditions météorologiques (température, précipitation, ...) qui influencent leur fonctionnement et leur déplacement au sein du sol mais aussi les interactions écologiques dont la prédation et la compétition (Kladivko, 2001; Fründ et al., 2010).

3. Indicateurs associés à la compaction du sol

3.1. Masse volumique apparente

L'indicateur ρ_a est couramment utilisé pour estimer la compaction des sols de même texture pour une profondeur choisie (Kaufmann et al., 2010; Rai et al., 2017). Dans ce cas-ci, aucune différence n'est observée entre les modalités pour la gamme de profondeur 2,5-7,5 cm. Cependant, ces résultats doivent être étudiés plus en détail avant de tirer une quelconque conclusion. En effet, les valeurs de ρ_a sont élevées comparé à ce qui est attendu pour un sol limoneux, les valeurs variant normalement de 1,3 à 1,4 g/cm³ (Biolders, 2022). Bien que plausibles, des valeurs aussi élevées pour un sol labouré peuvent résulter d'une surestimation suite à une compaction des échantillons. Ce biais pourrait être expliqué par

- (i) Des conditions non optimales durant le prélèvement qui auraient contribué à homogénéiser les valeurs entre les modalités. En effet, peu avant le prélèvement du lot 1, il a beaucoup plu (Annexe H) rendant le sol peut-être trop humide pour permettre un échantillonnage de qualité ;
- (ii) Un affaissement de la structure de la modalité labour après quatre mois pluvieux (Annexe H) sans aération mécanique. Il est communément accepté que la macroporosité créée par le labour diminue au cours de la saison de culture, d'autant plus si la stabilité structurale est faible (Tebrügge & Düring, 1999; Wardak et al., 2022);

Un autre point de questionnement concerne les valeurs de ρ_a qui ne sont pas significativement différentes entre les modalités labour et TCS. Bien que des ρ_a similaires au labour après une longue période de transition (ex : ABC, 15 ans) sont rapportées dans la littérature (Schlüter et al., 2020; Wardak et al., 2022), une augmentation de ρ_a est attendue dans les premières années après la transition (ex : TCS, 5 ans) (Schlüter et al., 2020; Sartori et al., 2022).

Bien que surprenants, les résultats obtenus sont en accord avec ceux de la campagne de (Crismer, 2024) réalisée dans le cadre de son mémoire, celle-ci ayant eu lieu également le 27/02/2024. Les ρ_a entre les modalités ne sont pas significativement différents. Encore une fois, le statut du sol au moment de la prise de mesure a pu fortement influencer les résultats (points (i) et (ii) précédents), ce qui pourrait expliquer pourquoi ceux des deux campagnes présentent cette même tendance. Cependant, des différences entre utilisateurs, mises en évidence par une ANOVA (Annexe I), sont observées. Les valeurs obtenues par Crismer (2024) sont significativement plus faibles (= 1,38 g/cm³ en moyenne, toutes modalités confondues) que celles obtenues pour la présente campagne (= 1,51 g/ cm³ en moyenne, toutes modalités confondues). Outre les erreurs systématiques attribuables à des utilisateurs différents, l'utilisation d'anneaux différents²¹ (pour une même méthode de prélèvement) constitue peut-être une partie de l'explication.

3.2.Résistance à la pénétration

Bien que les résultats obtenus ne respectaient pas toujours la condition de normalité des résidus, la cohérence générale des résultats au sein du profil permet quand même de les interpréter. Les différents profils de résistance à la pénétration mettent en évidence une tendance dominante. Il s'agit de la compaction moins importante de la modalité labour comparé à celle observée sous AgriCons.

En ce qui concerne la comparaison des modalités pour les 15 premiers cm de sol, le labour possède une résistance à la pénétration plus faible que les modalités sous AgriCons, résultats généralement acceptés dans la littérature (Tebrügge & Düring, 1999; Schlüter et al., 2020; Wardak et al., 2022). Cependant, des valeurs plus similaires entre les modalités ABC et labour sont attendues. En effet, grâce à l'augmentation de la MO en surface et une bonne stabilité structurale, le sol après 15 ans de transition devrait être capable d'atteindre une résistance à la pénétration comparable à un sol labouré même sans aération mécanique dans cette partie du profil (Rücknagel et al., 2017; Minasny & McBratney, 2018). Bien que cela ne soit pas le cas dans ce mémoire, les résultats obtenus peuvent être expliqués par plusieurs raisons :

- (i) Il est possible que la structure créée biologiquement ne permette pas encore d'obtenir des valeurs proches de celles obtenues sous labour même après 15 ans de transition ;

²¹ Anneaux de 3,5 cm de rayon et de 2 cm d'hauteur, pour un volume total de 77 cm³ pour Crismer (2024).

- (ii) Ces résultats ne peuvent pas exprimer toute la dynamique de la structure du sol durant la saison de croissance de la culture avec seulement un seul profil, les valeurs de résistance à la pénétration variant au cours de cette dernière ;
- (iii) Des θ différents entre les modalités peuvent influencer les résultats en modifiant les propriétés mécaniques du sol par des différences de cohésion entre les particules, diminuant la qualité des résultats pour la comparaison ;
- (iv) La plus grande variabilité observée sous ABC peut dissimuler le potentiel de cette modalité à présenter des valeurs de résistance à la pénétration proche à ce qui est obtenu avec le labour.
- (v) Une meilleure portance du sol est généralement acceptée sous AgriCons (Tebrügge & Düring, 1999; Wardak et al., 2022). Dès lors, le sol sous AgriCons aurait une meilleure capacité à supporter une contrainte, dont la pénétration de la tige du pénétromètre, sans se déformer rendant plus difficile le passage de cette dernière au sein du sol.

Les valeurs obtenues pour la modalité TCS sont intermédiaires entre le labour et l'ABC (bien que non significativement différentes pour l'ABC). Une résistance à la pénétration plus faible est attendue sous modalité ABC comparé à la modalité TCS. En effet, la structure créée biologiquement ne devrait pas avoir un impact significatif à court terme étant donné qu'elle n'est pas assez développée sur une courte période de transition comme celle de la modalité TCS (Schlüter et al., 2020; Sartori et al., 2022). Bien que les explications (ii) et (iii) citées précédemment dans cette section 14.2 ainsi que la plus grande variabilité sous ABC restent valables, le fait que la modalité ABC n'ait plus été travaillée depuis un an pourrait constituer une grande part de l'explication. Bien qu'une meilleure résistance à la déformation est observée de manière générale en AgriCons, une fois la structure détruite, même partiellement, il faudra une dizaine d'années en AgriCons pour la restaurer à travers les processus naturels de formation de la structure du sol (Rücknagel et al., 2017; Or et al., 2021). Le travail du sol, même superficiel dans le cas de la modalité TCS, va permettre de diminuer la résistance à la pénétration beaucoup plus rapidement que les processus naturels où la persistance de la compaction est dès lors plus longue.

En ce qui concerne les 20 cm suivants, certaines observations concordent avec la littérature. Étant donné que le travail effectué sous AgriCons concerne une profondeur maximale de 15 cm pour la zone d'étude, l'observation d'une zone de compaction, la semelle de travail, sous cette profondeur fait sens pour les modalités TCS et ABC. De plus, une nouvelle zone de compaction, la semelle de labour, en dessous de 25 cm (profondeur du labour) fait également sens, et cela pour les trois modalités car une semelle de labour est difficilement réversible naturellement dû à une action de décompaction biologique limitée à cette profondeur (Citeau et al., 2008). Cependant, la semelle de travail observée sous la modalité ABC est plus profonde que celle sous la modalité TCS. Cela pourrait être expliqué par un travail superficiel du sol plus profond sous ABC avant que la modalité TCS ne transitionne (donc il y a plus de 10 ans) mais aucun historique de travail avant 2019 n'est accessible. Une autre explication serait que la variabilité

au sein de chaque profil ne permette pas d'obtenir une moyenne représentative pour les modalités sous AgriCons.

3.3.Comparaison des indicateurs

Les résultats issus de ρ_a , de la résistance à la pénétration ainsi que des miniprofils sont contradictoires. Tout d'abord, aucune corrélation n'est obtenue entre les indicateurs de ρ_a et de résistance à la pénétration pour les mêmes profondeurs considérées. Cette constatation se fait sous réserve que les mesures de ρ_a ne soient pas biaisées et que les θ des différentes modalités soient similaires.

Ensuite, tandis que l'indicateur ρ_a montre un niveau de compaction similaire entre les modalités, les profils de résistance à la pénétration pour la même gamme de profondeur mettent en évidence quant à eux la moins grande compaction du labour comparé aux modalités sous AgriCons. Cette dernière affirmation est également appuyée par les observations dans les miniprofils pour les parties supérieures du sol.

Les différences observées entre ρ_a et la résistance à la pénétration montrent également des contradictions dans leurs relations au C_{org} et aux VDT, facteurs essentiels pour une bonne structure du sol. En ce qui concerne ρ_a , une corrélation négative significative est observée avec la teneur en C_{org} mais aucune avec la densité de VDT. Obtenir une corrélation significative entre ρ_a et la teneur en C_{org} n'est pas attendue étant donné que les ρ_a des différentes modalités ne sont pas significativement différents. Cependant, la Figure 44 met en évidence une variabilité notable de ρ_a entre les zones d'échantillonnage d'une même modalité, ces variations s'expliquant en partie par les variations de la teneur en C_{org} , ce qui pourrait à son tour expliquer la présence d'une corrélation significative entre ces deux indicateurs. Sur base de la même explication, aucune corrélation entre ρ_a et la densité de VDT n'est attendue étant donné que ρ_a n'est pas significativement différent entre modalités.

En ce qui concerne la résistance à la pénétration, aucune corrélation (teneur en C_{org} et densité de VDT) n'est significative au seuil de 5 %. N'observer aucune corrélation avec la densité de VDT fait sens étant donné que, contrairement aux racines des cultures, la tige du pénétromètre possède une trajectoire verticale droite ne prenant pas en compte des zones de résistance à la pénétration plus faibles dont les galeries de VDT (Cairns et al., 2011; Biolders et al., 2013). Cependant, un lien étroit entre la résistance à la pénétration et la teneur en C_{org} est généralement accepté dans la littérature, une augmentation de la teneur en C_{org} menant à une diminution de la résistance à la pénétration (Royal Eijkelpamp, 2022a).

Pour des profondeurs plus importantes ($> 7,5$ cm), seuls la résistance à la pénétration et les miniprofils sont comparés. Bien que les mêmes zones de compaction ne sont pas observées aux mêmes profondeurs chez les deux indicateurs, la tendance principale reste la même, à savoir que la modalité labour est moins compacte que celles sous AgriCons.

En ce qui concerne plus spécifiquement la croissance racinaire, elle peut être affectée négativement lorsque l'état de compaction est trop important, rendant le passage des racines dans la porosité du sol trop compliqué (Kaufmann et al., 2010; Zhou et al., 2021; Royal Eijkelkamp, 2022a). Plusieurs valeurs de seuil maximal à ne pas dépasser sont retrouvables dans la littérature scientifique. Pour l'indicateur de ρ_a , elle équivaut à 1,60 g/cm³ pour les sols limoneux (USDA, 1987). 7 % des valeurs (appartenant toutes aux modalités ABC et TCS) sont supérieures à ce seuil et 19 % (au moins une valeur dans chaque modalité) se situent entre 1,55 et 1,6 g/cm³. En ce qui concerne la résistance à la pénétration, le seuil est défini à un maximum de 3 MPa (Nawaz et al., 2013). Ce seuil est seulement dépassé pour certaines profondeurs, à partir de la formation de la semelle de travail pour les modalités ABC et TCS. Ce seuil n'est dépassé pour aucune profondeur (sur le profil de 35 cm) pour la modalité labour. Bien que les mini-profils ne permettent pas une analyse quantitative, la densité racinaire sous labour était plus importante que sous AgriCons laissant sous-entendre une plus grande facilité pour les racines de croître en profondeur dans la modalité labour.

Cependant, même dans un sol présentant des horizons compactés, une même production végétale peut être atteinte lorsque les ressources en eau et en nutriments sont disponibles en quantité suffisante pour la culture dans la couche superficielle du sol (Zhou et al., 2021). Le réseau de biopores sous AgriCons permet également de surpasser le problème de compaction du sol, les racines préférant exploiter ces passages (Or et al., 2021; Wardak et al., 2022; Zhou et al., 2021). Lors de la dernière campagne de mesure de la couverture par la biomasse verte, les couvertures de chaque modalité étaient identiques, permettant une première estimation de la production au cours de cette période. Seuls les rendements permettront de confirmer ou non cette proposition mais une grande différence de rendement entre les modalités, sur base de la couverture, n'est pas attendue.

4. QuantislakeTest

Lorsque l'échantillon est plongé dans l'eau, deux processus simultanés s'opposent : la perte de masse par désagrégation due au phénomène de *slaking* ainsi que l'augmentation de la masse par remplacement de l'air par l'eau au sein de la porosité. La dominance d'un des deux processus va influencer la valeur de t_{max} . Une valeur plus importante met en évidence une prédominance du processus de remplacement de l'air par l'eau par rapport au processus de *slaking* au début de l'expérience. C'est ce qui est observé pour les échantillons sous modalités ABC et TCS. Ces échantillons possèdent donc une meilleure résistance à la dégradation par le phénomène de *slaking* : la bonne stabilité structurale permet d'évacuer l'air de la porosité en limitant la désagrégation causée par l'action. Dans le cas inverse, lorsque t_{max} est atteint rapidement, l'augmentation de la masse dans le début de l'expérience est masquée par la perte de masse due à la désagrégation par *slaking*. C'est ce qui est observé pour les échantillons sous modalité labour. Une même tendance est observée par Vanwindekens & Hardy (2023, Annexe J), avec des échantillons sous labour présentant des valeurs plus faibles que ceux sous AgriCons.

Une fois $t_{\max}$ atteint, la masse de l'échantillon diminue. Le remplacement de l'air par l'eau est terminé ou du moins devenu trop faible pour empêcher la phase descendante de la masse de l'échantillon. La pente₃₀₋₆₀ met en évidence la rapidité du processus de désagrégation peu de temps après que l'échantillon ait atteint sa masse maximale. Cependant, toutes les pentes obtenues ne sont pas négatives, indiquant la présence de phases de réaugmentation de masse significative dans certains cas même après $t_{\max}$. C'est par exemple le cas pour le 2^{ème} échantillon de la zone 2 pour la modalité ABC (Figure 48). Bien que la courbe obtenue après expérience suit la tendance généralement observée pour un QST (Figure 48, à gauche), un zoom sur une période de 80 sec après avoir atteint $t_{\max}$ met en évidence la contribution encore présente d'augmentation de la masse par remplacement de l'air par l'eau (Figure 48, à droite).

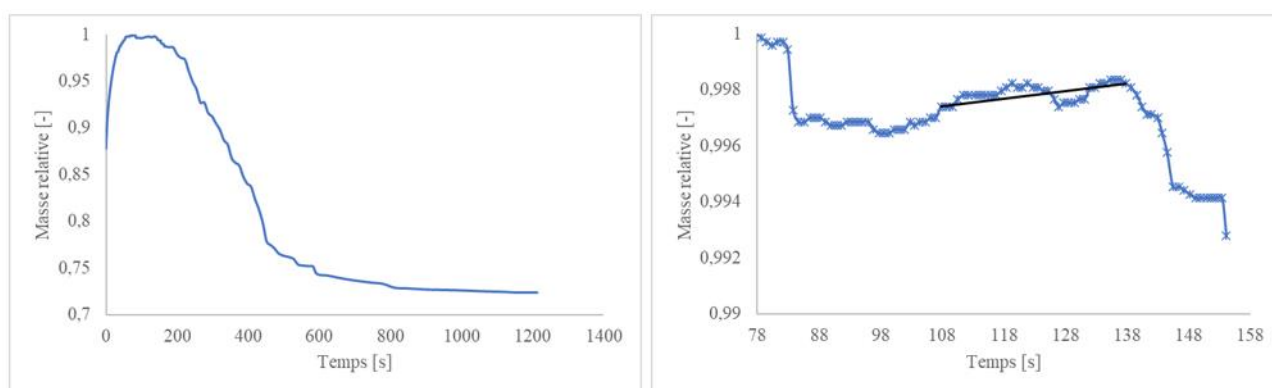


Figure 48 - Évolution de la masse relative de l'échantillon au cours du QuantislakeTest (gauche) avec un zoom sur la période 78-158sec (droite) pour l'échantillon référencé modalité ABC, zone d'échantillonnage 2, échantillon 1.

Les valeurs de pentes positives ont été obtenues pour des échantillons sous modalité ABC ou TCS qui sont des modalités où la dégradation est moins importante que ce qui est observé sous labour. Dans les cas où la dégradation n'est pas clairement dominante sur l'augmentation de la masse, ce qui est visiblement le cas pour certains échantillons sous ABC et TCS, l'indicateur de pente₃₀₋₆₀ ne semble pas intéressant pour évaluer la vitesse de dégradation, une période de 30 sec n'étant pas suffisante pour enlever le faible bruit d'augmentation de masse lié aux fluctuations dans la minute qui suit $t_{\max}$.

Les résultats de Vanwindekens & Hardy (2023 ; Annexe J) ne montrent quant à eux aucune pente positive ainsi que des pentes significativement plus grandes (une atténuation de la pente) pour les échantillons sous AgriConv comparé à ceux sous labour (ce qui n'est pas le cas dans ce mémoire). Cette différence peut être expliquée par des dynamiques de désagrégation différentes. En effet, bien que les deux études présentent une même tendance pour l'indicateur $t_{\max}$, les valeurs obtenues par Vanwindekens & Hardy (2023) sont plus faibles que celles obtenues dans ce mémoire, mettant en avant un processus de désagrégation beaucoup plus dominant que celui d'augmentation de la masse en début d'expérience. Les différentes valeurs de pente₃₀₋₆₀ obtenues sont quant à elles plus élevées (en valeur absolue) que celles obtenues dans ce mémoire, montrant encore une fois un processus de désagrégation plus rapide qui pourrait supprimer le problème de ré-augmentation localisée de la masse.

À partir de ce constat, l'égalité des moyennes de pente₃₀₋₆₀ obtenues avec l'ANOVA peut être remise en question étant donné que certaines des valeurs pour les modalités ABC et TCS ont été retirées de l'analyse. Le frein que pourrait constituer la contribution de l'augmentation de la masse pour des échantillons dont le phénomène de dégradation est faible n'a pas pu être pris en compte. On pourrait donc s'attendre à une augmentation de la moyenne de la pente (une atténuation de la pente) pour les échantillons sous ABC et TCS si la période de temps choisie était plus grande.

Un autre indicateur permettant de mettre en évidence le taux de perte en masse dans la partie décroissante de la courbe est l'indicateur dt_{50-75} . Les résultats de l'ANOVA montrent que le labour prend le plus de temps en moyenne pour que les échantillons perdent entre 50 % et 75 % de leur masse relative. Ces résultats sont en opposition avec la tendance (bien que non significative) de Vanwindekens & Hardy (2023, Annexe J). Cela s'explique par deux facteurs :

- (i) La durée de l'expérience. Pour Vanwindekens & Hardy (2023), elle a été limitée à 15 min, la majorité des échantillons ayant atteint la stabilisation de leur masse à la fin de cette période. Pour ce mémoire, l'expérience a duré jusqu'à ce que la masse de l'échantillon soit stabilisée, celle-ci variant entre 15 et 36 min en fonction des échantillons.
- (ii) La vitesse de dégradation des échantillons. Comme expliqué précédemment, les échantillons de Vanwindekens & Hardy présentent des vitesses de désagrégation plus rapides que celles obtenues dans ce mémoire, toutes modalités concernées.

Dans ce mémoire, puisque les échantillons de la modalité labour ont une moins bonne stabilité structurale comparé à ceux des modalités sous AgriCons, ils ont besoin en général de plus de temps afin d'arriver à une masse relative plus faible, allant parfois jusqu'à ne laisser que les racines dans le panier. Cette durée est en général plus longue que celle des échantillons de Vanwindekens & Hardy (2023) étant donné qu'ils ont des vitesses de désagrégation plus rapides. Ils sont capables d'atteindre une même masse relative beaucoup plus rapidement pour n'importe quelle modalité (démonstré par les indicateurs t_{max} et pente₃₀₋₆₀). En choisissant une durée fixe de 15 min, et en considérant la masse stabilisée comme étant celle obtenue après cette période (alors que dans certains cas elle aurait pu être écourtée ou rallongée), cela mène donc à une tendance opposée à ce qui est observé dans ce mémoire. Si la durée avait été fixée, la même tendance dans ce mémoire aurait sûrement pu être observée également.

À la fin de l'expérience, la masse relative obtenue W_{end} constitue un indicateur global de la dégradation de l'échantillon. Ce résultat dépend énormément de la durée de l'expérience. Pour comparer les résultats entre les différentes modalités, il est crucial que la perte en masse de l'échantillon se soit stabilisée avant d'arrêter l'expérience. Les échantillons sous modalité ABC et TCS présentent une masse relative plus importante en fin d'expérience que ceux de la modalité labour. Cela met en évidence que les échantillons sous AgriCons sont plus stables lorsqu'ils sont immergés dans l'eau sur le long terme que les échantillons sous labour. La même constatation a été mise en évidence par Vanwindekens & Hardy (2023, Annexe J), présentant une même gamme de valeurs pour chaque système agricole.

Les différents indicateurs du QST sont fortement liés entre eux, comme montré par les coefficients de corrélation entre ceux-ci, le tout démontrant une amélioration de la stabilité structurale du sol lui permettant une plus grande résistance à la mouillabilité. Les différentes corrélations entre les indicateurs font sens par rapport à la stabilité structurale associée.

À partir de ces différents indicateurs de stabilité structurale, l'AgriCons mène à une meilleure stabilité structurale du sol, et cela déjà sur le court terme (transition de 5 ans en TCS). Cette amélioration est attribuée à la nature de la formation/reconstruction de la structure du sol (Or et al., 2021). L'augmentation de la MO et de l'activité biologique en surface va permettre de créer une structure plus stable que celle formée par le labour. Aucune corrélation significative n'est obtenue entre les indicateurs du QST et la teneur en C_{org} (0-15 cm). Étant donné que le C_{org} est un agent important dans le maintien de la stabilité structurale, l'absence de corrélation est inattendue. Quant à eux, deux indicateurs du QST, W_{end} et dt_{50-75} présentent une corrélation significative avec la densité de VDT.

5. Capacité de rétention en eau du sol

La forme d'une courbe de rétention est le reflet de deux facteurs principaux : la texture et la structure du sol étudié (Hillel, 1974; Brady, 2014; Blume et al., 2016). Des sols possédant la même composition granulométrique vont présenter des formes semblables, la courbe de rétention étant entre autres fonction de la distribution des différents pores au sein du sol (Rabot et al., 2018). De manière générale, et bien que cela peut varier en fonction de la littérature, la RU d'un sol limoneux se situe aux alentours de 20 % (volumique) (Marshall & Holmes, 1980; Blume et al., 2016), cette valeur pouvant être considérée comme « idéale » pour répondre aux besoins des cultures (Hall et al., 1977). Les valeurs obtenues, toutes les modalités confondues, sont pourtant plus faibles que cette référence et sont comprises entre 13 % et 18 % (volumique). Cela représente plutôt une RU « limitée » voir « pauvre » (Hall et al., 1977). Cependant, elles ne sont pas significativement différentes de celles obtenues par Crismer (2024), les échantillons utilisés ayant également été prélevés le 27/02/2024.

La structure, quant à elle, va plutôt influencer la courbe de rétention sur une gamme de suctions faibles (Brady, 2014; Blume et al., 2016; Minasny & McBratney, 2018). Dès lors, l'augmentation de la teneur en C_{org} , (mais ne présentant aucune corrélation significative avec les points de la courbe de rétention) ainsi que la création de biopores par l'activité biologique (mais ne présentant aucune corrélation significative avec les points de la courbe de rétention) dans la gamme de profondeur étudiée devrait donc avantager l'AgriCons par rapport à l'AgriConv. Cependant, cette différenciation n'est pas visible, quelle que soit la succion considérée. Cette constatation n'est cependant pas en opposition avec toute la littérature scientifique, l'impact sur la capacité de rétention étant parfois décrite comme surestimée (Minasny & McBratney, 2018), plusieurs études n'ayant également observé aucun changement dans les courbes de rétention (Weninger et al., 2019; Toth et al., 2024). Crismer (2024) a quant à lui mis en évidence une différenciation entre les modalités pour un seul point de la courbe de rétention, θ_{cc} étant plus faible sous labour (Annexe K). Bien que dans l'absolu cela n'est pas

impossible, observer une différenciation significative pour θ_{cc} mais pas pour une succion plus faible comme θ_1 peut poser question.

Un dernier point concerne la présence d'une erreur systémique potentielle lors des mesures de θ . En effet, θ_{sat} estimée après le bac de saturation et utilisée pour construire les courbes de rétention, est une sous-estimation de la valeur réelle de θ_{sat} . En effet, tout l'échantillon n'étant pas immergé dans l'eau lors de l'étape de saturation (environ 4/4,5 cm sur les 5 cm du kopecki), la partie au-dessus du niveau d'eau pourrait ne pas être complètement saturée (en fonction du point d'entrée d'air). Dès lors, la porosité totale calculée à partir ρ_a devrait être supérieure à la valeur de θ_{sat} . Cependant, ce n'est pas le cas et la source de l'erreur reste inconnue. Cette surestimation semble continuer jusqu'à la casserole basse pression étant donné que les valeurs de θ_1 et θ_{cc} sont toutes les deux plus faibles que ce qui est observé avec celles obtenues par Crismer (2024).

6. Conductivité hydraulique à saturation

L'analyse ANOVA pour K_{sat} met en évidence deux points importants : une influence de la modalité mais également une influence du dispositif utilisé. En ce qui concerne les différences au sein des modalités, un K_{sat} plus élevé est observé sous les modalités labour et ABC, cette dernière n'étant pas significativement différente de ce qui est observé sous la modalité TCS. Les résultats obtenus dans la littérature sont très contrastés. Sur le court terme, un K_{sat} plus faible est attendu suite à l'augmentation de la compaction après transition qui implique une diminution de la macroporosité et un réseau de biopores peu développé (Nawaz et al., 2013). Sur le long terme, grâce à l'augmentation de la bioperturbation formant un réseau de biopores complexes avec de plus grands diamètres et une connectivité plus importante que sous labour, K_{sat} est plus grand sous AgriCons que sous AgriConv (Duchaufour et al., 2018; Basche & DeLonge, 2019; Or et al., 2021; Blanchy et al., 2022). De plus, une meilleure stabilité structurale, ce qui est le cas pour la modalité ABC comparé à la modalité labour, devrait permettre un meilleur transport de l'eau au sein du sol, une stabilité structurale trop faible présentant un risque plus élevé de voir la structure s'effondrer une fois le sol saturé (Brady, 2014). Bien que la modalité TCS présente des valeurs significativement plus faibles que la modalité labour, la modalité ABC est intermédiaire. La grande hétérogénéité au sein des sols sous AgriConv peut rendre compliqué la mise en évidence de cette tendance (Schlüter et al., 2020; Wardak et al., 2022). Dès lors, toutes les études ne montrent pas une dominance de l'AgriCons sur l'AgriConv (Basche & DeLonge, 2019; Schlüter et al., 2020; Wardak et al., 2022).

De plus, présenter un K_{sat} très élevé n'est pas toujours synonyme de meilleure qualité physique du sol. En effet, des valeurs de K_{sat} se situant entre 5.10^{-6} m/s et 5.10^{-5} m/s sont considérées comme « idéales » par Reynolds et al. (2007) afin de permettre une infiltration rapide, une réduction de l'érosion hydrique en surface, une redistribution de la RU nécessaire aux cultures ainsi qu'un drainage rapide de l'excès d'eau. La modalité présentant les meilleurs K_{sat} est la modalité labour (38 % des valeurs comprises dans cette gamme), suivie de la modalité TCS (29 % des valeurs comprises dans cette gamme) et enfin la modalité ABC (24 % des valeurs

comprises dans cette gamme). Bien que la modalité ABC était tout d'abord considérée comme présentant de meilleurs K_{sat} comparé à la modalité TCS avec comme référence la modalité labour, il semblerait qu'au final les valeurs obtenues avec la modalité TCS sont meilleures que celles de la modalité ABC lorsque la référence de Reynolds et al. (2007) est utilisée.

Les résultats de Crismer (2024) obtenus à partir d'un infiltromètre simple anneau montrent quant à eux une différenciation entre AgriConv et AgriCons, peu importe la durée de transition (Annexe L). Le même constat est également obtenu pour ce mémoire lorsque seulement l'infiltromètre est considéré, bien que les valeurs de Crismer (2024) sont significativement plus élevées.

Bien qu'étant le reflet de la structure, K_{sat} dépend également de la texture du sol. Plusieurs gammes de valeurs pour les sols limoneux ont été trouvées dans la littérature. Horton et al. (2016) considèrent des valeurs variant entre 10^{-3} et 10^{-7} m/s tandis que Calvet (2013) propose une gamme plus restreinte et plus faible allant de 10^{-5} et 10^{-8} m/s. Les différentes valeurs obtenues, toutes modalités confondues, sont cohérentes avec ces références, présentant le sol limoneux comme un sol perméable à semi-perméable (Calvet, 2013).

Les résultats montrent également un effet important du dispositif sur la valeur obtenue. Cela peut s'expliquer par :

(i) Le volume élémentaire représentatif²²

Étudier K_{sat} à partir de trois dispositifs différents a mené à l'utilisation de trois volumes d'échantillons différents, avec un volume décroissant lorsqu'on passe de l'infiltromètre, au perméamètre type Vergière et au perméamètre Eijkelkamp. Le choix du volume n'est pas anodin car il doit permettre de représenter la variabilité spatiale du sol, un échantillon trop petit ne permettant pas de prendre en compte le réseau de biopores pourtant essentiel au flux total étant donné qu'il y contribue majoritairement (Schlüter et al., 2020). Le dispositif du perméamètre Eijkelkamp n'est peut-être pas compatible avec la grande hétérogénéité observée, surtout sous AgriCons, ce qui peut mener à une sous-estimation de K_{sat} , qui d'ailleurs est significativement plus faible avec ce dispositif comparé aux deux autres.

(ii) La gamme de profondeurs étudiée

Les propriétés du sol variant en fonction de la profondeur et ne considérer qu'une faible gamme, comme c'est le cas pour le perméamètre type Vergière et le perméamètre Eijkelkamp (Figure 49), empêche de prendre en compte toute la complexité du transport de l'eau au sein du profil.

(iii) La considération (ou non) de la croûte de battance

La présence d'une croûte de battance diminue considérablement K_{sat} , pouvant mener à une surestimation de la capacité d'infiltration du sol (Hillel, 1974; Brady, 2014). Des sols possédant une meilleure stabilité structurale ainsi qu'une couverture du sol suffisante afin de protéger le

²² Correspond au plus petit volume permettant de représenter la variabilité au sein de ce qu'on observe.

sol des impacts des gouttes de pluie vont présenter une absence ou du moins limiter la formation d'une croûte de battance. Celle-ci est plutôt attendue sous AgriConv que sous AgriCons étant donné que ce dernier présente une meilleure stabilité structurale dans la partie superficielle et une meilleure couverture en ne considérant que la couverture par la biomasse verte pour la modalité ABC et avec également la couverture de résidus pour la modalité TCS, au cours de la saison de croissance du froment. Cependant, cette croûte de battance n'est prise en compte que pour le dispositif infiltromètre (Figure 49), ce qui permet dans ce cas d'avoir une meilleure représentation du transfert d'eau à partir de la surface.

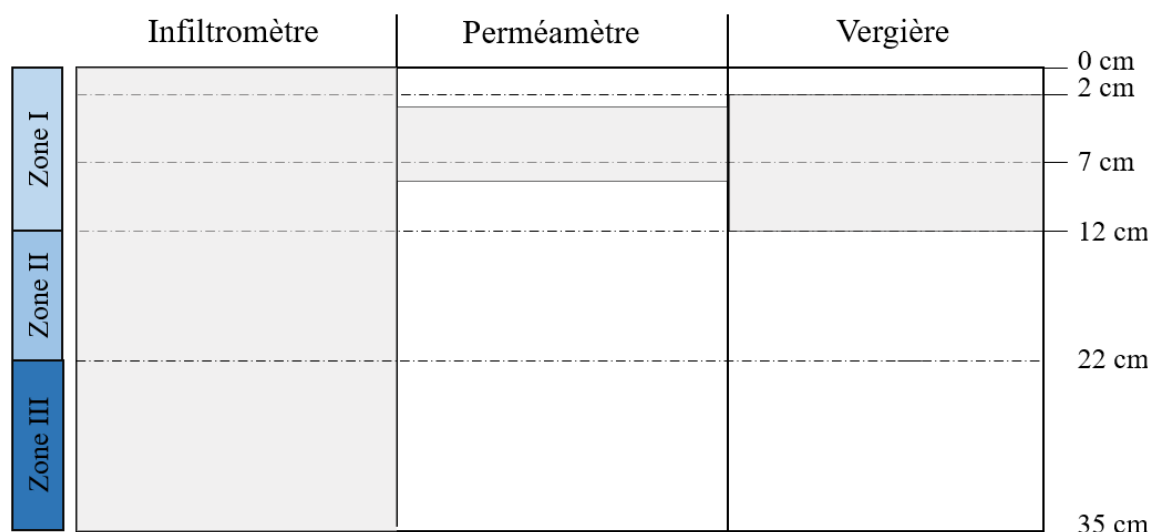


Figure 49 – Représentation des zones de profondeurs de sols concernées par les trois dispositifs de mesure de conductivité hydraulique avec à gauche les trois zones (I, II, III) de compaction observées avec le mini profil. Dans le cas de l'infiltrmètre, il est difficile de savoir précisément jusqu'à quelle profondeur les mesures sont impactées.

(iv) La variabilité temporelle

Les propriétés du sol varient au cours du temps, suite au travail du sol, les conditions climatiques ainsi que le stade de croissance de la culture (Schlüter et al., 2020). L'influence du planning d'échantillonnage/prise des mesures n'est donc pas à négliger lorsque les données sont prises à différents moments. Tandis que les prélèvements des kopeckis et des Vergières ont été effectués à la même période (bien que ça ne les empêche pas de montrer des différences significatives entre elles), les mesures d'infiltration à partir de l'infiltrmètre ont été effectuées deux mois plus tard.

(v) Les erreurs relatives à la méthode d'échantillonnage et de mesure

Chaque dispositif est associé avec ses propres erreurs aléatoires d'utilisation (Schlüter et al., 2020). Par exemple, les erreurs liées à des écoulements préférentiels le long des parois de l'anneau de l'infiltrmètre, un lissage de la surface supérieure et inférieure des échantillons lors du prélèvement, la paraffine qui rentre dans certains pores, la précision dans la lecture du débit, etc. Ces erreurs peuvent fausser les interprétations lorsqu'on compare ces résultats.

6.1. Colorant *Brilliant Blue*

L'utilisation du colorant *Brilliant Blue* avait pour objectif de mettre en évidence la contribution des macropores au flux d'eau dans un sol saturé afin de mieux comprendre le transfert de l'eau dans le sol ainsi que de voir le potentiel de cette méthode pour le faire. Au sein de chaque modalité, une diminution du colorant avec la profondeur est observée, mettant en évidence une dispersion progressive de celui-ci. Étant donné que toutes les coupes présentaient du colorant, il serait intéressant d'en effectuer d'autres plus en profondeur (au-delà de 20 cm) afin de voir si une ou plusieurs modalités montrent une infiltration plus profonde que d'autres. Le pourcentage de couverture par le colorant ne permet cependant pas d'exprimer le flux d'eau au sein du sol saturé, ne présentant aucune corrélation significative, quelle que soit la profondeur considérée, avec le K_{sat} mesuré à partir de l'infiltromètre.

En ce qui concerne le nombre de macropores contribuant, une diminution est observée avec la profondeur, ce qui est généralement accepté dans la littérature (Tebrügge & Düring, 1999; Wardak et al., 2022). Étant donné que les macropores sont empruntés préférentiellement par le flux d'eau lorsque le sol est saturé (Schlüter et al., 2020), comparer le nombre de macropores par m^2 avec le K_{sat} mesuré à partir de l'infiltromètre peut être intéressant. Cependant, son potentiel afin d'exprimer le flux d'eau à travers le sol n'est pas concluant, aucune corrélation significative, quelle que soit la profondeur considérée, n'étant obtenue. Cela peut s'expliquer par la complexité du déplacement du flux d'eau dans le sol, ce dernier dépendant d'autres facteurs que la présence de macropores dont leur rayon, leur tortuosité et la connectivité du milieu poral (Calvet, 2013; Wardak et al., 2022).

Utiliser $J_{macropores}$ devrait donc permettre une meilleure représentation du flux d'eau dans le sol étant donné que ce dernier prend en compte la taille des macropores. Une corrélation significative a été obtenue entre cet indicateur et le K_{sat} mesuré à partir de l'infiltromètre. Cependant, cela ne concerne qu'une seule profondeur (à la surface, 0 cm). Il semblerait donc que $J_{macropores}$ soit le plus intéressant des indicateurs présentés afin d'exprimer le flux d'eau à travers un sol saturé. Cependant, une meilleure corrélation serait attendue si d'autres facteurs essentiels, comme la connectivité et la tortuosité, avaient pu être pris en compte dans l'analyse comme c'est le cas lorsque des analyses par rayonnement X sont effectués pour observer la complexion du milieu poral (Menon et al., 2020; Wardak et al., 2022).

7. Récapitulatif de l'influence d'une transition sur les indicateurs

Le Tableau 13 reprend tous les impacts de la transition AgriConv vers AgriCons. Pour cela, une différenciation est faite entre les deux périodes de transition avec la modalité TCS (5 ans) et la modalité ABC (15 ans).

L'influence de la transition sur la qualité du sol est complexe. Tout d'abord, la capacité de rétention n'a montré aucun changement significatif et des valeurs de K_{sat} similaires à l'AgriConv, mais pas supérieures, peuvent être atteintes sous AgriCons. De plus, l'AgriCons promeut la qualité biologique avec une augmentation de la teneur en C_{org} et la densité de VDT ainsi que la qualité physique par une augmentation de la stabilité structurale. Cependant, ces

améliorations peuvent être compromises par l'état de compaction du sol, dont les indicateurs présentent des résultats contradictoires. Alors que ρ_a ne met en évidence aucun changement significatif entre modalités, ce n'est pas le cas pour la résistance à la pénétration et les mini-profilés qui ont déterminé une compaction plus importante dans le profil étudié (0 – 35 cm) pour les modalités ABC et TCS par rapport à AgriConv. Si cette compaction mène à une diminution des rendements, cela impacterait considérablement la qualité physique du sol pour ses fonctions de production végétale qui sont au centre de l'agriculture. Cependant, il faudra attendre la récolte pour en savoir plus sur les rendements obtenus.

En ce qui concerne l'influence de la durée de la transition sur la qualité du sol, elle ne semble pas importante. En effet, tous les indicateurs sous modalité ABC et TCS ne sont pas significativement différents entre eux. Cependant, deux indicateurs, la densité de VDT et K_{sat} sont encore en train de transitionner. En effet, la densité de VDT pour la modalité TCS présente des valeurs intermédiaires entre la modalité labour et la modalité ABC. En ce qui concerne K_{sat} pour la modalité TCS, les valeurs obtenues sont significativement plus faibles que celles obtenues sous labour, bien que non significativement différentes de celles obtenues pour la modalité ABC.

Tableau 13 - Tableau récapitulatif des effets d'une transition d'une agriculture conventionnelle vers une agriculture de conservation, selon deux temporalités représentées par les modalités TCS (5 ans) et ABC (15 ans). ↗ augmentation, ↘ diminution, = pas d'influence, ↗ = pas d'influence voir une augmentation et ↘ = pas d'influence voir une diminution.

Type d'indicateur	Indicateur	Transition de la modalité labour vers la	
		Modalité TCS	Modalité ABC
Bio-chimique	Teneur en carbone organique (0 – 15 cm)	↗	↗
Biologique	Densité de vers de terre	= ↗	↗
Physique	Masse volumique apparente	=	=
	Résistance à la pénétration	↗	↗
	Compacité du sol (Mini-profil)	↗	↗
	Stabilité structurale	↗	↗
	Capacité de rétention en eau du sol	=	=
	Conductivité hydraulique à saturation	↘	↘ =

Conclusion

Ce mémoire avait comme portée d'étudier le potentiel, en termes de qualité du sol, de la transition d'une AgriConv vers une AgriCons, cette dernière étant perçue comme une solution plus durable. Pour ce faire, plusieurs indicateurs ont été évalués au cours de l'année académique 2024 au sein d'une zone d'étude se situant à Vieusart (province du Brabant Wallon), appartenant aux fermes universitaires de l'UCLouvain. Il s'agit d'une parcelle agricole caractérisée par une texture limoneuse et composée de trois modalités : la modalité labour représentant l'AgriConv et deux modalités, TCS et ABC, caractérisées par des pratiques de conservation du sol. Ces deux modalités se différencient par leur durée de transition, la modalité TCS présentant une courte transition (5 ans) et la modalité ABC présentant une longue transition (15 ans).

Le premier objectif était d'évaluer l'influence de l'AgriCons sur la qualité du sol à partir d'une analyse comparative avec l'AgriConv. Pour ce faire, ce mémoire s'est concentré plus particulièrement sur l'étude de la qualité physique du sol ainsi que sur le 1^{er} pilier de l'agriculture de conservation qui concerne la perturbation mécanique minimale du sol. Les résultats ont montré une influence parfois contradictoire de l'AgriCons sur les propriétés physiques du sol étudiées comme indicateurs. Tout d'abord, la capacité de rétention n'a montré aucun changement significatif et des valeurs de K_{sat} similaires à l'AgriConv, mais pas supérieures, peuvent être atteintes sous AgriCons. La qualité physique est améliorée par une augmentation de la stabilité structurale. Cependant, cette amélioration peut être compromise par l'état de compaction du sol, dont les indicateurs présentent des résultats contradictoires. Alors que les mesures de ρ_a ne mettent en évidence aucun changement significatif, ce n'est pas le cas pour la résistance à la pénétration et les mini-profils qui ont révélé une compaction plus importante dans le profil étudié (0–35 cm) pour les modalités sous AgriCons. Dès lors, l'AgriCons a le potentiel d'améliorer la qualité physique du sol, bien que tous les indicateurs ne vont pas dans ce sens. Étant donné que l'étude de la qualité du sol reste dans une optique de qualité agronomique, il est essentiel de déterminer l'influence de l'augmentation de l'état de compaction du sol sur le potentiel de production végétal.

La qualité biologique du sol a également été étudiée brièvement à travers les indicateurs de teneur en C_{org} et de densité de VDT. Initialement dans une optique de mettre en lien ces deux indicateurs avec les indicateurs physiques étudiés, il a été difficile de montrer un lien direct de causalité. Cependant, cette courte exploration de la qualité biologique a pu mettre en évidence, bien que la portée de l'étude à ce sujet est très minime vu le faible nombre d'indicateurs, le potentiel de l'AgriConv à améliorer la qualité du sol dans les parties superficielles de ce dernier.

Le deuxième objectif était d'évaluer l'évolution des indicateurs utilisés pour quantifier la qualité du sol après le début de la transition à partir de l'analyse d'une transition court terme (modalité TCS) et long terme (modalité ABC). Les différents indicateurs ont mis une influence faible de la durée de la transition sur les valeurs obtenues. Tous les indicateurs sous modalité ABC et TCS ne sont pas significativement différents entre eux. Cependant, deux indicateurs, la densité de VDT et K_{sat} sont encore en train de transitionner. En effet, la densité de VDT pour

la modalité TCS présente des valeurs intermédiaires entre la modalité labour et la modalité ABC. En ce qui concerne K_{sat} pour la modalité TCS, les valeurs obtenues sont significativement plus faibles que celles obtenues sous labour, bien que non significativement différentes de celles obtenues pour la modalité ABC.

Dès lors, cette recherche a permis de mettre en lumière le potentiel de l'AgriCons à présenter une qualité physique (et biologique) identique voir améliorée comparé à celle obtenue sous pratiques conventionnelles. Cependant, ces résultats ne couvrent qu'une partie de la complexité que représente la zone d'étude au sein de son environnement. En effet, le développement durable ne concerne pas que l'aspect environnemental, les aspects économiques et sociaux n'ayant pas été abordés au sein du mémoire. De plus, même au sein de la sphère environnementale, dans laquelle est comprise la qualité du sol certains aspects essentiels n'ont pas été pris en compte, dont l'utilisation du glyphosate afin de maintenir ce système agricole. Bien que le mémoire n'ait pas adopté une étude systémique, il peut cependant être utilisé à cette fin grâce à son inscription dans le projet ESR où un suivi sera poursuivi sur cette parcelle.

Bibliographie

- Adetunji, A. T., Ncube, B., Mulidzi, R., & Lewu, F. B. (2020). Management impact and benefit of cover crops on soil quality : A review. *Soil and Tillage Research*, 204, 104717. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104717>
- Arvalis. (2014, août 21). *Lutte contre les adventices—Valoriser les rotations et les périodes de semis*. ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/valoriser-les-rotations-et-les-periodes-de-semis>
- Balabane, M., Bureau, F., Decaëns, T., Akpa-Vinceslas, M., Hedde, M., Puget, P., Pawlak, B., SA, B., Cluzeau, D., Labreuche, J., J.M., B., Le Bissonnais, Y., Saulas, P., Bertrand, M., Guichard, L., HOUOT, S., Arrouays, D., Brygoo, Y., & Chenu, C. (2005). *Restauration de fonctions et propriétés des sols de grande culture intensive. Effets de systèmes de culture alternatifs sur les matières organiques et la structure des sols limoneux et approche du rôle fonctionnel de la diversité biologique des sols (Dmostra)*.
- Basche, A. D., & DeLonge, M. S. (2019). Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods : A meta-analysis. *PLOS ONE*, 14(9), e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
- Behera, S., Pandey, R., & Bhatt, H. (2023). *Crop Rotation in Vegetable Production* (p. 165-185).
- Bielders, C. (2022). *Ordres de grandeur de certaines propriétés du sol, cours LBRES2203 – gestion et aménagements des sols en régions chaudes*.
- Bielders, C., & Javaux, M. (2023). *TP5 : Conductivité hydraulique à saturation, détermination en laboratoire. Travaux pratiques lbres2103 physique du sol appliquée à l'agronomie et à l'environnement (non publié)*.
- Bielders, C., Javaux, M., Roisin, C., & Vanclooster, M. (2013). *Vers des indicateurs de fonctionnement du sol (INFOSOL) : Approche méthodologique de développement d'indicateurs pédologiques pour les fonctions édaphiques de régulation hydrique et de support physique pour les plantes* (UCL-Université Catholique de Louvain). Article UCL-Université Catholique de Louvain.
- Blanchy, G., Bragato, G., Di Bene, C., Jarvis, N., Larsbo, M., Meurer, K., & Garre, S. (2022). *Soil and crop management practices and the water regulation functions of soils : A synthesis of meta-analyses relevant to European agriculture*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-270>
- Blanchy, G., Bragato, G., Di Bene, C., Jarvis, N., Larsbo, M., Meurer, K., & Garré, S. (2023). Soil and crop management practices and the water regulation functions of soils : A qualitative synthesis of meta-analyses relevant to European agriculture. *SOIL*, 9(1), 1-20. <https://doi.org/10.5194/soil-9-1-2023>
- Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2016). *Scheffer/Schachtschabel Soil Science*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30942-7>

- Bonilla-Bedoya, S., Valencia, K., Herrera, M. Á., López-Ulloa, M., Donoso, D. A., & Macedo Pezzopane, J. E. (2023). Mapping 50 years of contribution to the development of soil quality biological indicators. *Ecological Indicators*, 148, 110091. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110091>
- Bouthier, A., Pelosi, C., Villenave, G., Peres, G., Hedde, M., Ranjard, L., Vian, J.-F., Peigne, J., Bispo, A., & Piron, D. (2014). Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. In *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable* (1st edition). édition QUAE.
- Brady, N. C. (avec Weil, R. R.). (2014). *The nature and properties of soils* (14th ed.). Pearson education.
- Burwell, R. L. (1977). Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units—Appendix II Heterogeneous Catalysis. In D. D. Eley, H. Pines, & P. B. Weisz (Éds.), *Advances in Catalysis* (Vol. 26, p. 351-392). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0360-0564\(08\)60074-7](https://doi.org/10.1016/S0360-0564(08)60074-7)
- Cairns, J. E., Impa, S. M., O'Toole, J. C., Jagadish, S. V. K., & Price, A. H. (2011). Influence of the soil physical environment on rice (*Oryza sativa* L.) response to drought stress and its implications for drought research. *Field Crops Research*, 121(3), 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.01.012>
- Calvet, R. (2013). *Le sol*. Ed. France Agricole.
- Celagri. (2020). *Agriculture et coulée de boues*. https://www.celagri.be/wp-content/uploads/2021/07/CELAGRI_Coulees-de-boues_dossier-provisoire_140721.pdf
- Citeau, L., Bispo, A., Bardy, M., & King, D. (2008). *Gestion durable des sols* (1st edition). Éditions Quae.
- CRA-W. (s. d.). *A propos*. CRA-W | Centre wallon de Recherches agronomiques. Consulté 23 novembre 2023, à l'adresse <https://www.cra.wallonie.be/fr/a-propos>
- CRA-W. (2020). *Analyse de sol 2020—Parcelle VieuSart Marbais* [Fichier Excel].
- CRA-W. (2023). *Expérimentation système—Résultats agronomiques 2020, 2021, 2022—Hugues FALYS (parcelle AC)* [Rapport pour agriculteur].
- CRA-W. (2024). *Itinéraire technique de la parcelle de Vieusart* [Jeu de données].
- Crismer, C. (2024). *Résultats de la campagne de quantification de la courbe de rétention en eau du sol et de la conductivité hydraulique à saturation de la parcelle de Marbais (mémoire en cours de défense)* [fichier excel] [Jeu de données].
- Defourny, A. (2023, août 21). Episode 6 : L'irrigation des cultures aujourd'hui et demain. *Canopea*. <https://www.canopea.be/irrigation-cultures-demain/>
- Delgado, A., & Gómez, J. A. (2016). The Soil. Physical, Chemical and Biological Properties. In F. J. Villalobos & E. Fereres (Éds.), *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture* (p. 15-26). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_2
- DiverIMPACTS. (s. d.). *Diverimpacts—About*. Consulté 23 novembre 2023, à l'adresse <https://www.diverimpacts.net/about.html>

- Duchaufour, P., Faivre, P., Poulenard, J., Houot, S., & Gury, M. (2018). *Introduction à la science du sol - 7e éd. : Sol, végétation, environnement*. Dunod.
- Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2022). Effects of Agricultural Practices and Chemicals on Earthworms. In C. A. Edwards & N. Q. Arancon (Éds.), *Biology and Ecology of Earthworms* (p. 413-465). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74943-3_13
- Eurostat. (2020). *Agri-environmental indicator—Tillage practices*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agri-environmental_indicator_-_tillage_practices
- FAO. (2011). *Save and Grow. A Policymaker's Guide to the Sustainable Intensification of Smallholder Crop Production |Policy Support and Governance| Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/en/c/421716/>
- FAO. (2023). *Principes de l'agriculture de conservation | L'agriculture de conservation | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*. <https://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/conservation-agriculture-principles/fr/>
- FAOSTAT. (2017). *Land Use*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>
- Farooq, M., & Siddique, K. (2015). Conservation Agriculture : Concepts, Brief History, and Impacts on Agricultural Systems. In *Conservation Agriculture* (p. 3-17). https://doi.org/10.1007/978-3-319-11620-4_1
- Fockedey, A. (2023). *Une recherche participative pour soutenir la transition agroécologique*. CRA-W | Centre wallon de Recherches agronomiques. <https://www.cra.wallonie.be/fr/une-recherche-participative-pour-soutenir-la-transition-agroecologique>
- Fründ, H.-C., Graefe, U., & Tischer, S. (2010). *Earthworms as Bioindicators of Soil Quality* (p. 261-278). https://doi.org/10.1007/978-3-642-14636-7_16
- Greenotec. (s. d.). *Présentation de ASBL Greenotec*. Consulté 23 novembre 2023, à l'adresse <http://www.greenotec.be/pages/presentation.html>
- Greenotec. (2019). *Campagne de prélèvements de vers de terre 2019*. <http://www.greenotec.be/pages/c-est-pratique/regulation-des-maladies-ravageurs-adventices/campagne-de-prelevements-de-vers-de-terre-2019.html>
- Hall, D., Reeve, M., Thomasson, A., & Wright, V. (1977). *Water Retention, Porosity and Density of Field Soils*.
- Hatfield, J. L., Sauer, T. J., & Cruse, R. M. (2017). Chapter One - Soil : The Forgotten Piece of the Water, Food, Energy Nexus. In D. L. Sparks (Éd.), *Advances in Agronomy* (Vol. 143, p. 1-46). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.02.001>
- Henneron, L., Bernard, L., Hedde, M., Pelosi, C., Villenave, C., Chenu, C., Bertrand, M., Girardin, C., & Blanchart, E. (2015). Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 169-181. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0215-8>
- Hillel, D. (1974). *L'eau et le sol : Principes et processus hydriques*.

- Hobbs, P., Sayre, K., & Gupta, R. (2007). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 363, 543-555. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
- Hudson, P. (avec Internet Archive). (1992). *The industrial revolution*. London ; New York : E. Arnold ; New York, NY : Distributed in the USA by Routledge, Chapman, and Hall. <http://archive.org/details/industrialrevolu0000huds>
- Kassam, A., Friedrich, T., & Derpsch, R. (2018). Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies*, 76(1), 29-51. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>
- Kaufmann, M., Tobias, S., & Schulin, R. (2010). Comparison of critical limits for crop plant growth based on different indicators for the state of soil compaction. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(4), 573-583. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900129>
- Kladivko, E. J. (2001). Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research*, 61(1), 61-76. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00179-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00179-9)
- Labreuche, J., Jezequel, S., & Bremond, D. (2014). Le semis direct sur couverture végétale permanente. In *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable* (1st edition). édition QUAE.
- Labreuche, J., Lecomte, V., Sauzet, G., Leclech, N., Longueval, C., Martin, M., Eschenbrenner, G., & Roger-Estrade, J. (2014). Travail du sol et rendement des cultures : Conditions et modalités de mise en oeuvre pour les principales espèces de grande culture. In *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable* (1st edition). Éditions Quae.
- Lal, R. (1991). Soil Structure and Sustainability. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1(4), 67-92. https://doi.org/10.1300/J064v01n04_06
- Laurent, F. (2015). L'Agriculture de Conservation et sa diffusion en France et dans le monde. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27284>
- Le Bissonnais, Y. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Étude et Gestion des Sols*.
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Linternaute. (2021, janvier 1). *Pays développé : Définition simple et facile du dictionnaire*. <https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/pays-developpe/>
- Magdoff, F. (1995). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. *American Journal of Alternative Agriculture*, 10(1), 244. <https://doi.org/10.1017/S0889189300006123>
- Manley, W., Foot, K., & Davis, A. (2019). A Dictionary of Agriculture and Land Management. In *A Dictionary of Agriculture and Land Management*. Oxford University Press. <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/acref/9780199654406.001.0001/acref-9780199654406>

- Marshall, T. J., & Holmes, J. W. (1980). *Soil Physics*. Cambridge University Press.
- MASA, M. de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire. (s. d.). *La Politique agricole commune (PAC), 60 ans d'histoire*. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. Consulté 19 octobre 2023, à l'adresse <https://agriculture.gouv.fr/la-politique-agricole-commune-pac-60-ans-dhistoire>
- Mazoyer, M., Aubineau, M., Bermond, A., Bougler, J., Ney, B., & Roger-Estrade, J. (2002). *Larousse agricole : Le monde paysan au XXIe siècle* (4e édition). Larousse.
- Mazoyer, M., & Roudart, L. (2002). *Histoire des agricultures du monde : Du néolithique à la crise contemporaine*. Seuil.
- McKyes, E. (1985a). Chapter 5—Soil physical properties and plant growth. In *Soil cutting and Tillage* (Vol. 7).
- McKyes, E. (1985b). Introduction to tillage and earthmoving. In *Soil Cutting and Tillage* (1st edition, Vol. 7).
- Menon, M., Mawodza, T., Rabbani, A., Bland, A., Lair, G. J., Babaei, M., Kercheva, M., Rousseva, S., & Banwart, S. (2020). Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability. *Geoderma*, 366, 114259. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114259>
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 39-47. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>
- Molier, P. (2013). *Le tripode de l'agriculture de conservation*. INRAE Institutionnel. <https://www.inrae.fr/actualites/tripode-lagriculture-conservation>
- Nawaz, M. F., Bourrié, G., & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(2), 291-309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Observatoire participatif des vers de terre (OPVT). (s. d.). *Guide explicatif : Mieux connaître les vers de terre*. Consulté 5 janvier 2024, à l'adresse https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php
- Ogieriakhi, M. O., & Woodward, R. T. (2022). Understanding why farmers adopt soil conservation tillage : A systematic review. *Soil Security*, 9, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100077>
- OPVT. (s. d.). *Protocole participatif—Moutarde—EcoBioSoil*. Consulté 8 juillet 2024, à l'adresse <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/protocole-participatif-moutarde>
- Or, D., Keller, T., & Schlesinger, W. H. (2021). Natural and managed soil structure : On the fragile scaffolding for soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 208, 104912. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104912>
- Osujieke, D., Ali, A., Amodu, I., Nnabuihe, E., & Njoku, G. (2023). *Conservation Agriculture as A Modern Global System of Soil Fertility Restoration and Management*.

Our World in Data. (s. d.). *Yields vs. Land Use : How the Green Revolution enabled us to feed a growing population*. Our World in Data. Consulté 14 décembre 2023, à l'adresse <https://ourworldindata.org/yields-vs-land-use-how-has-the-world-produced-enough-food-for-a-growing-population>

PROTECT'EAU. (s. d.). *Cultures pièges à Nitrate | PROTECT'eau*. Consulté 8 janvier 2024, à l'adresse <https://www.protecteau.be/fr/cultures-pieges-nitrate>

Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H.-J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions : A review. *Geoderma*, 314, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>

Rai, R. K., Singh, V. P., & Upadhyay, A. (2017). Chapter 17—Soil Analysis. In R. K. Rai, V. P. Singh, & A. Upadhyay (Éds.), *Planning and Evaluation of Irrigation Projects* (p. 505-523). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811748-4.00017-0>

Ren, X., Zou, W., Jiao, J., Stewart, R., & Jian, J. (2023). Soil properties affect crop yield changes under conservation agriculture : A systematic analysis. *European Journal of Soil Science*, 74. <https://doi.org/10.1111/ejss.13413>

Reynolds, W. D., Drury, C. F., Yang, X. M., Fox, C. A., Tan, C. S., & Zhang, T. Q. (2007). Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil and Tillage Research*, 96(1), 316-330. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.07.003>

Roger-Estrade, J., Labreuche, J., & Boizard, H. (2014). Importance du travail du sol : Typologie des modes de mise en oeuvre et effets sur le rendement des cultures. In *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable* (1st edition). Éditions Quae.

Royal Eijkelkamp. (2022a). *Penetrologger—User manual*. <https://www.royaleijkelkamp.com/media/nrwjyah3/m-0615sae-penetrologger.pdf>

Royal Eijkelkamp. (2022b). *Soil water permeameters—User manuel*. <https://www.royaleijkelkamp.com/products/lab-testing-equipment/soil-physical-research/water-permeability/soil-water-permeameters/>

Rücknagel, J., Rademacher, A., Götze, P., Hofmann, B., & Christen, O. (2017). Uniaxial compression behaviour and soil physical quality of topsoils under conventional and conservation tillage. *Geoderma*, 286, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.015>

Rusinamhodzi, L. (2015). Crop rotation and residue management in conservation agriculture. In *Conservation agriculture*. Springer International Publishing.

Sartori, F., Piccoli, I., Polese, R., & Berti, A. (2022). A Multivariate Approach to Evaluate Reduced Tillage Systems and Cover Crop Sustainability. *Land*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/land11010055>

Schlüter, S., Sammartino, S., & Koestel, J. (2020). Exploring the relationship between soil structure and soil functions via pore-scale imaging. *Geoderma*, 370, 114370. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114370>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113958>
- Singh, V. P., Barman, K. K., Singh, R., & Sharma, A. R. (2015). *Weed Management in Conservation Agriculture Systems*. Springer International Publishing.
- Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., & Roger-Estrade, J. (2012). No-till in northern, western and south-western Europe : A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66-87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>
- Songliang, W., & Caldwell, C. D. (2020). Chapter 1 Agriculture and Its Anthropocentric Sciences. In *Introduction to Agroecology* (1^{re} éd.). Springer Singapore.
- SPW. (s. d.). *Hydrométrie en wallonie, Louvain-la-Neuve*. Consulté 23 juillet 2024, à l'adresse <https://hydrometrie.wallonie.be/home/observations/precipitation.html>
- SPW. (2020). *CARBIOSOL - Teneurs prédites en Carbone organique total—Période 2015-2019*. <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/0d9de746-b6c4-4147-a50d-25f02525fa01.html>
- SPW. (2021). *Agriculture—État de l'environnement wallon*. Etat de l'environnement wallon. http://etat.environnement.wallonie.be/cms/render/live/fr_BE/sites/eew/home/Infographies/infographie-agriculture.html
- SPW. (2022a). *Carte des Sols de Wallonie*. <http://geoapps.wallonie.be/Cigale/Public/#VIEWER=CNSW#BBOX=167247.63212221366,170306.22157272592,151587.72512550105,153183.16581638245>
- SPW. (2022b). *Utilisation du territoire wallon*. Etat de l'Agriculture Wallonne. http://etat-agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/reaw/contents/indicatorsheets/A_I_d_1.html
- Stockfisch, N., Forstreuter, T., & Ehlers, W. (1999). Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil and Tillage Research*, 52(1), 91-101. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00063-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00063-X)
- Tebrügge, F., & Düring, R.-A. (1999). Reducing tillage intensity—A review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research*, 53(1), 15-28. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00073-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00073-2)
- Toth, M., Stumpp, C., Klik, A., Strauss, P., Mehdi-Schulz, B., Liebhard, G., & Strohmeier, S. (2024). Long-term effects of tillage systems on soil health of a silt loam in Lower Austria. *Soil and Tillage Research*, 241, 106120. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106120>
- TRANSÆ. (s. d.). *Accueil | Transæ | Transition vers l'agro-écologie*. Consulté 23 novembre 2023, à l'adresse <https://transae.eu/fr>
- Tsegaye, T., & Mullins, C. E. (1994). Effect of mechanical impedance on root growth and morphology of two varieties of pea (*Pisum sativum* L.). *New Phytologist*, 126(4), 707-713. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb02965.x>

- Ulrich, S., Tischer, S., Hofmann, B., & Christen, O. (2010). Biological soil properties in a long-term tillage trial in Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(4), 483-489. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700316>
- USDA, S. Service. (1987). *SSoil compaction impact and modelling. A reviewoil Mechanics Level I. Module 3 – USDA Textural Soil Classification. Study Guide.*
- Vanwindekens, F. M., & Hardy, B. F. (2023). The QuantiSlakeTest, measuring soil structural stability by dynamic weighing of undisturbed samples immersed in water. *SOIL*, 9(2), 573-591. <https://doi.org/10.5194/soil-9-573-2023>
- Wardak, D. L. R., Padia, F. N., de Heer, M. I., Sturrock, C. J., & Mooney, S. J. (2022). Zero tillage has important consequences for soil pore architecture and hydraulic transport : A review. *Geoderma*, 422, 115927. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115927>
- Wardle, D. A. (1995). Impacts of Disturbance on Detritus Food Webs in Agro-Ecosystems of Contrasting Tillage and Weed Management Practices. In M. Begon & A. H. Fitter (Éds.), *Advances in Ecological Research* (Vol. 26, p. 105-185). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60065-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60065-3)
- Weninger, T., Kreiselmeier, J., Chandrasekhar, P., Julich, S., Feger, K.-H., Schwärzel, K., Bodner, G., & Schwen, A. (2019). Effects of tillage intensity on pore system and physical quality of silt-textured soils detected by multiple methods. *Soil Research*, 57. <https://doi.org/10.1071/SR18347>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (avec United States & Purdue University). (1978). *Predicting rainfall erosion losses : A guide to conservation planning.* U.S. Dept. of Agriculture, Science and Education Administration.
- Zhou, H., Whalley, W. R., Hawkesford, M. J., Ashton, R. W., Atkinson, B., Atkinson, J. A., Sturrock, C. J., Bennett, M. J., & Mooney, S. J. (2021). The interaction between wheat roots and soil pores in structured field soil. *Journal of Experimental Botany*, 72(2), 747-756. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa475>

Annexes

Annexe A : Caractérisation de la texture de la zone d'étude (Réalisé à partir de CRA-W, 2020).

Modalité	Zone d'éch.	Prof. [cm]	Limon fin [%]	Limon grossier [%]	Limon total [%]	Sable fin [%]	Sable grossier [%]	Sable total [%]	Texture [-]
A	1	0-15	26,32	51,87	78,18	6,73	1,74	8,47	Limon
A	2	0-15	27,12	52,31	79,43	6,20	1,58	7,78	Limon
A	3	0-15	29,01	46,80	75,80	9,25	1,41	10,66	Limon
T	1	0-15	29,21	49,07	78,27	6,74	1,74	8,49	Limon
T	2	0-15	29,84	48,21	78,05	5,97	1,44	7,41	Limon
T	3	0-15	28,48	48,11	76,59	5,82	1,43	7,25	Limon
L	1	0-15	29,58	49,81	79,39	5,74	1,63	7,38	Limon
L	2	0-15	29,66	48,54	78,20	5,27	1,12	6,39	Limon
L	3	0-15	29,46	47,68	77,14	6,16	1,19	7,35	Limon
A	1	15-30	26,32	51,87	78,18	6,73	1,74	8,47	Limon
A	2	15-30	27,12	52,31	79,43	6,20	1,58	7,78	Limon
A	3	15-30	29,01	46,80	75,80	9,25	1,41	10,66	Limon
T	1	15-30	29,21	49,07	78,27	6,74	1,74	8,49	Limon
T	2	15-30	29,84	48,21	78,05	5,97	1,44	7,41	Limon
T	3	15-30	28,48	48,11	76,59	5,82	1,43	7,25	Limon
L	1	15-30	29,58	49,81	79,39	5,74	1,63	7,38	Limon
L	2	15-30	29,66	48,54	78,20	5,27	1,12	6,39	Limon
L	3	15-30	29,46	47,68	77,14	6,16	1,19	7,35	Limon

Annexe B : Historique des cultures de la parcelle étudiée pour la période 2016-2024 (Réalisé à partir de (CRA-W, 2023).

Année	Labour	TCS	ABC
2016	Froment (Labour)	Froment (Labour)	Betteraves (Non labour)
2017	Escourgeon (Labour) Couvert : moutarde	Escourgeon (Labour) Couvert : moutarde	Épeautre (Non labour) Couvert : féverole
2018	Pomme de terre (Labour)	Pomme de terre (Labour)	Mais grain (Non labour)
2019	Froment (Labour) Couvert : multi espèces	Froment (Non Labour) Couvert : multi espèces	Escourgeon (Non labour) Couvert : multi espèces
2020	Betteraves (Labour)	Betteraves (Non labour)	Betteraves (Non labour)
2021	Froment (Labour)	Froment (Non labour)	Froment (Non labour)
2022	Pois de conserverie (Labour)	Pois de conserverie (Non labour)	Pois de conserverie (Non labour)
2023	Colza (Labour)	Colza (Non labour)	Colza (Non labour)
2024	Froment (Labour)	Froment (Non labour)	Froment (Non labour)

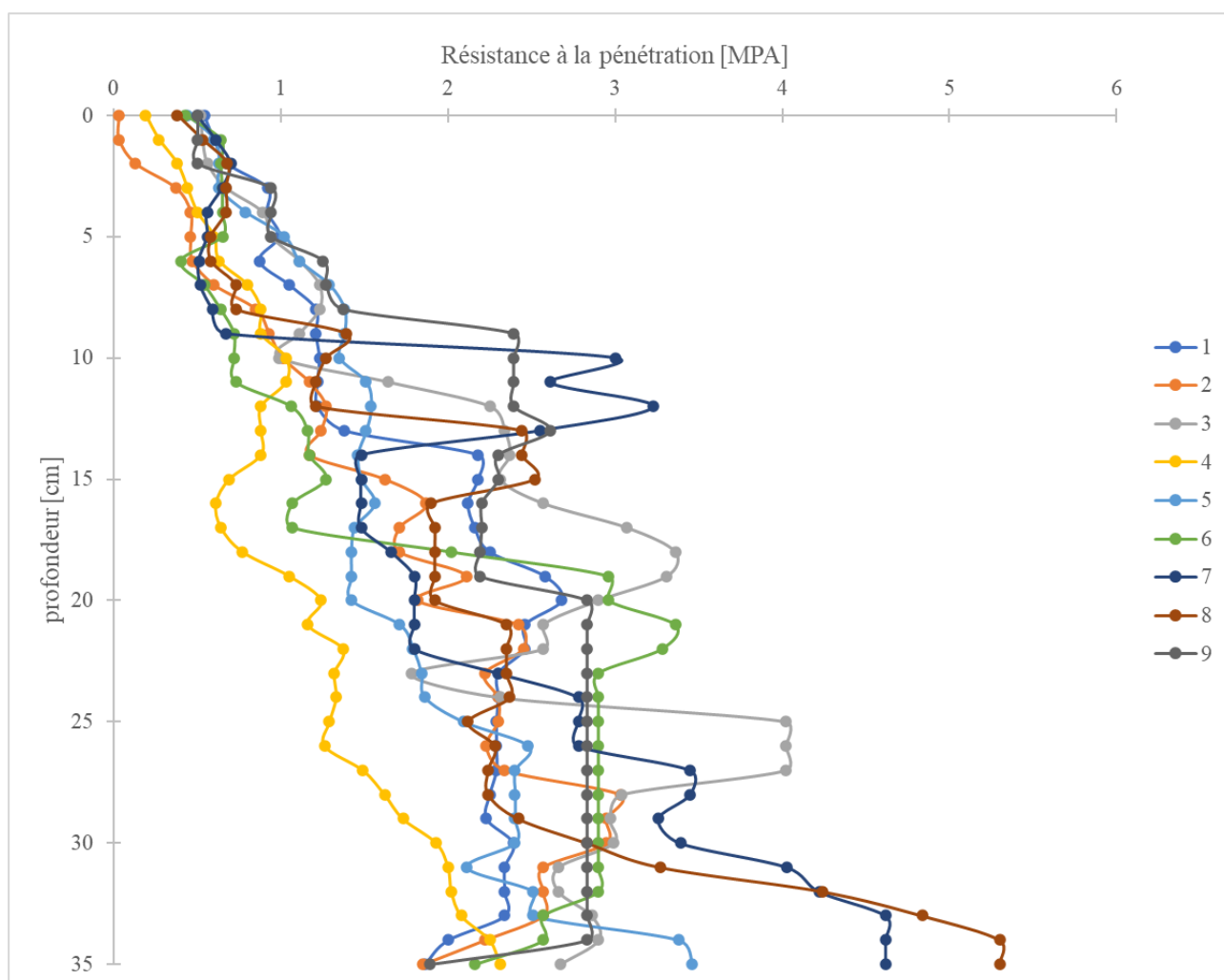
Annexe C : Mode opératoire du bac à saturation.

Le bac à saturation est constitué d'un bac en plastique dans lequel de petites lattes sont placées afin d'y poser les échantillons. Saturer les échantillons par le bas permet de limiter l'emprisonnement des bulles d'air dans le sol

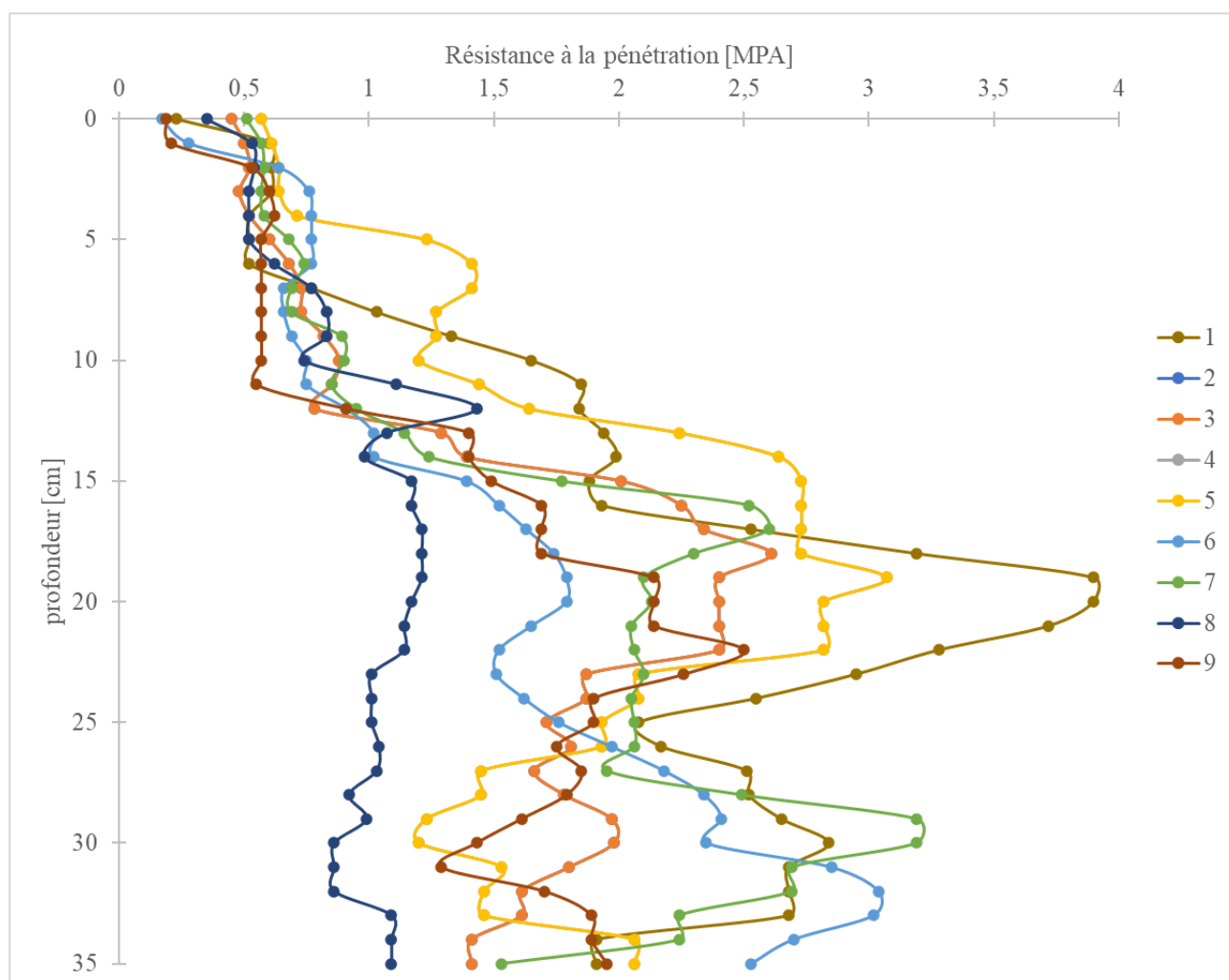
La hauteur de l'eau au sein du bac est augmentée au fur et à mesure. Au début de la saturation, elle correspond à un tiers de celle de l'échantillon. Après une demi-journée, la hauteur d'eau est augmentée afin que celle-ci corresponde à la moitié de celle de l'échantillon. Le jour suivant, la hauteur d'eau se situe approximativement 1 cm en dessous du dessus de l'échantillon. Une augmentation progressive de la hauteur d'eau permet de ne pas mener à une saturation trop rapide de l'échantillon qui pourrait perturber sa structure. L'eau utilisée pour la saturation est de l'eau déminéralisée, dégazée et dosée en CaSO_4 (0,68 g/l). Son dégazage permet une meilleure élimination des plus petites bulles d'air au sein de l'échantillon. De plus, utiliser une eau de composition et concentration connues permet d'obtenir une eau s'apparentant à la solution du sol mais qui est standardisée. Le processus dure 48 h.

Annexe D : Profils de résistance à la pénétration du sol. Les profils (jusque 35 cm) sont regroupés par zone d'échantillonnage , 9 profils par zone.

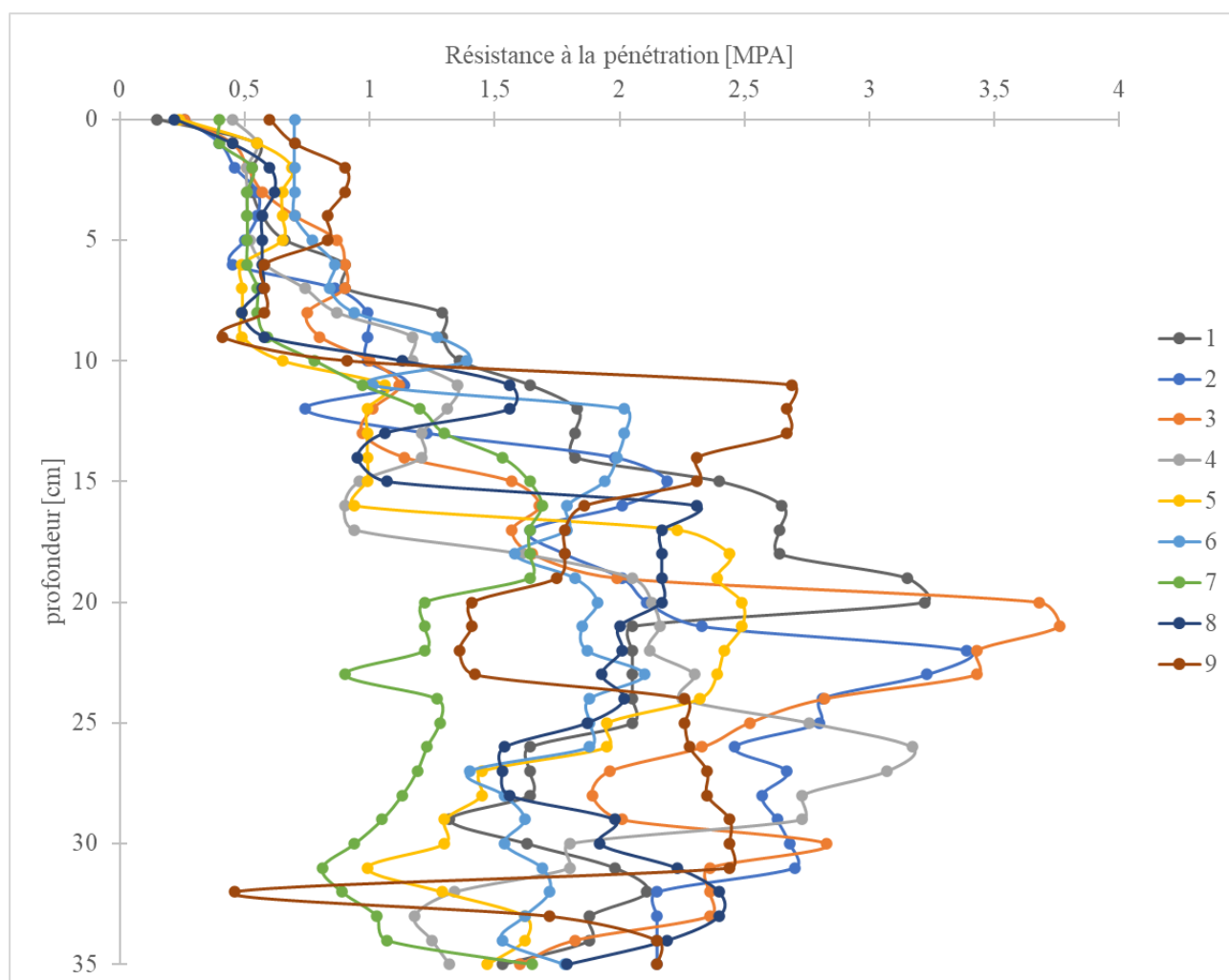
Modalité TCS, zone 1 :



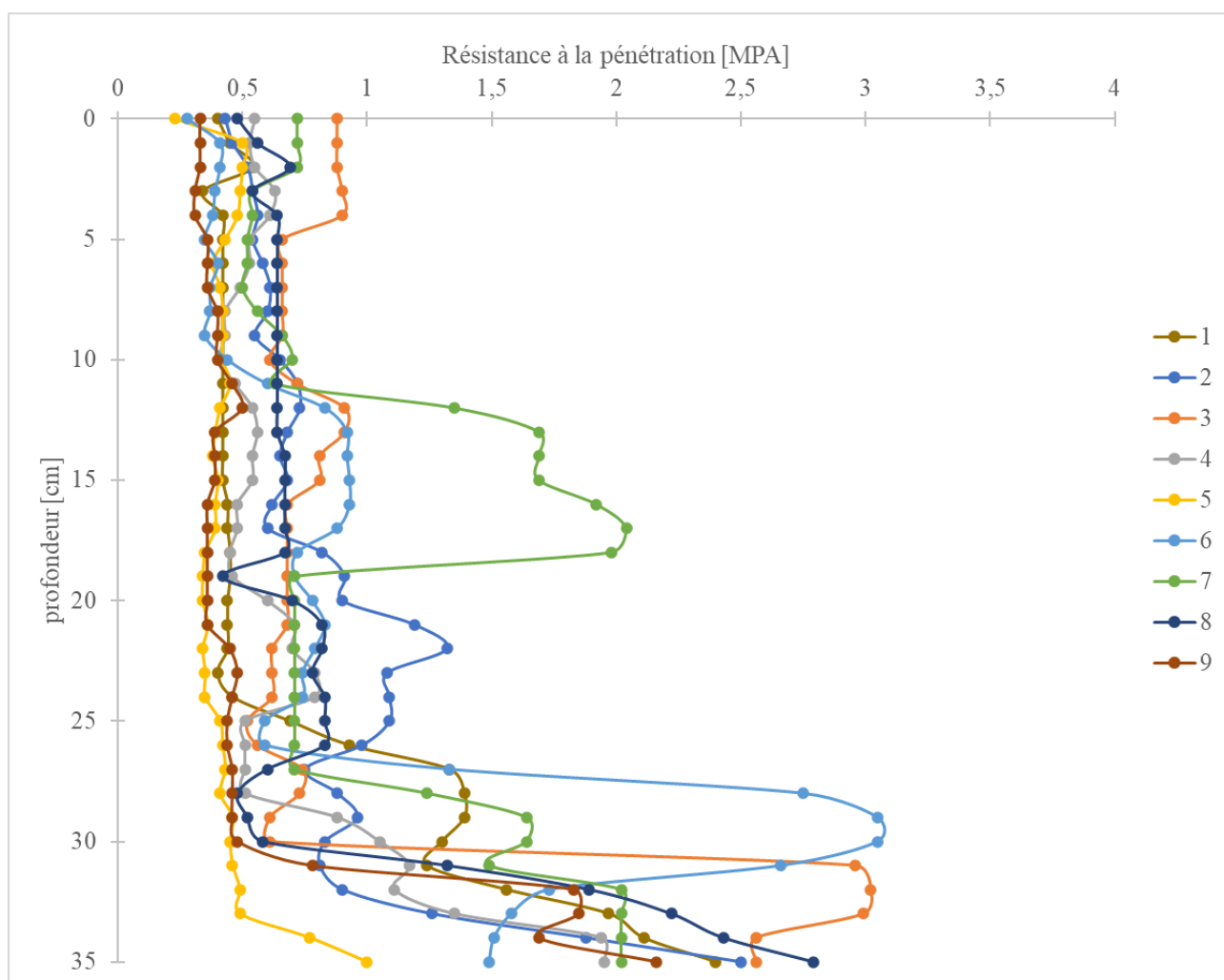
Modalité TCS, zone 2 :



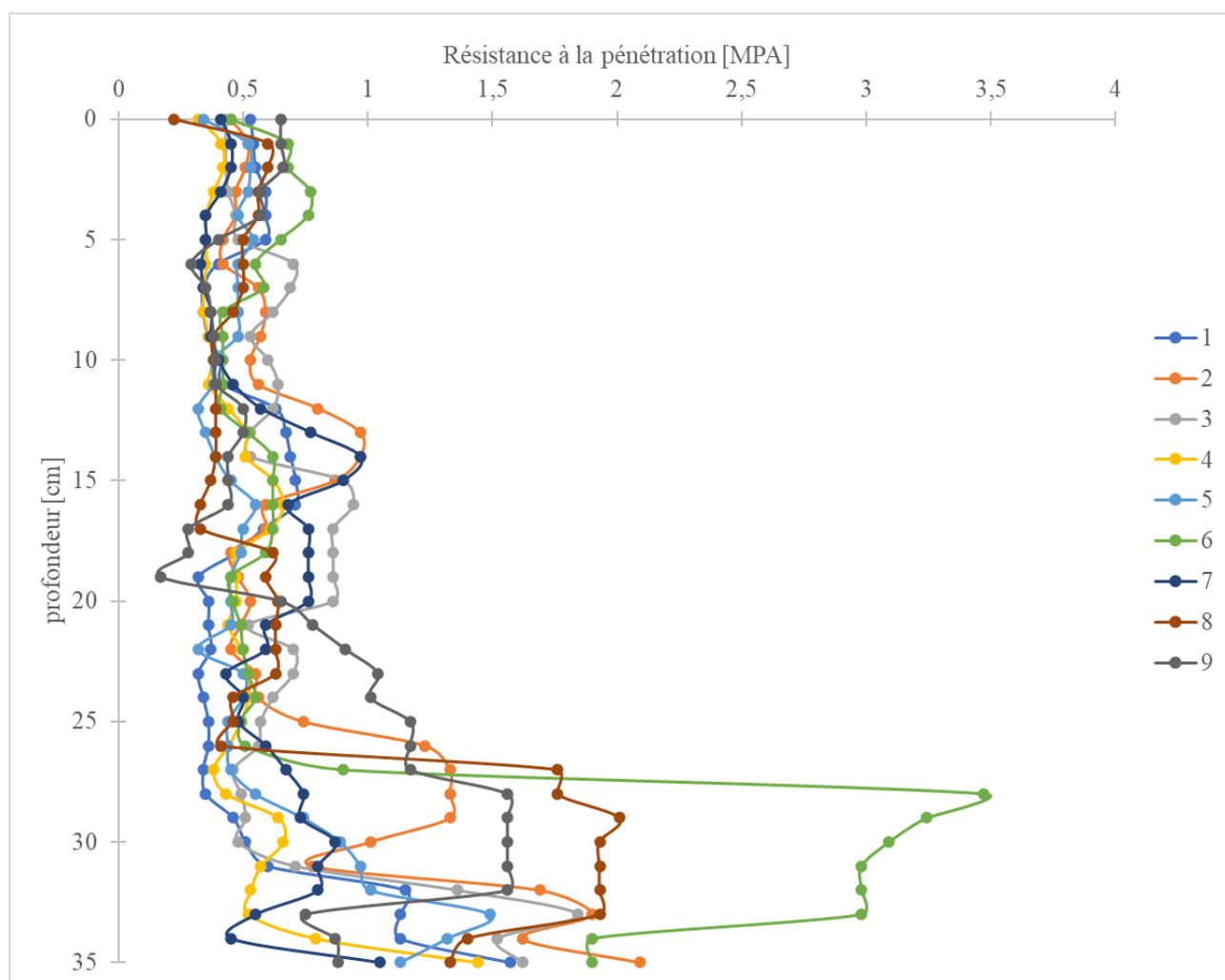
Modalité TCS, zone 3 :



Modalité Labour, zone 1 :



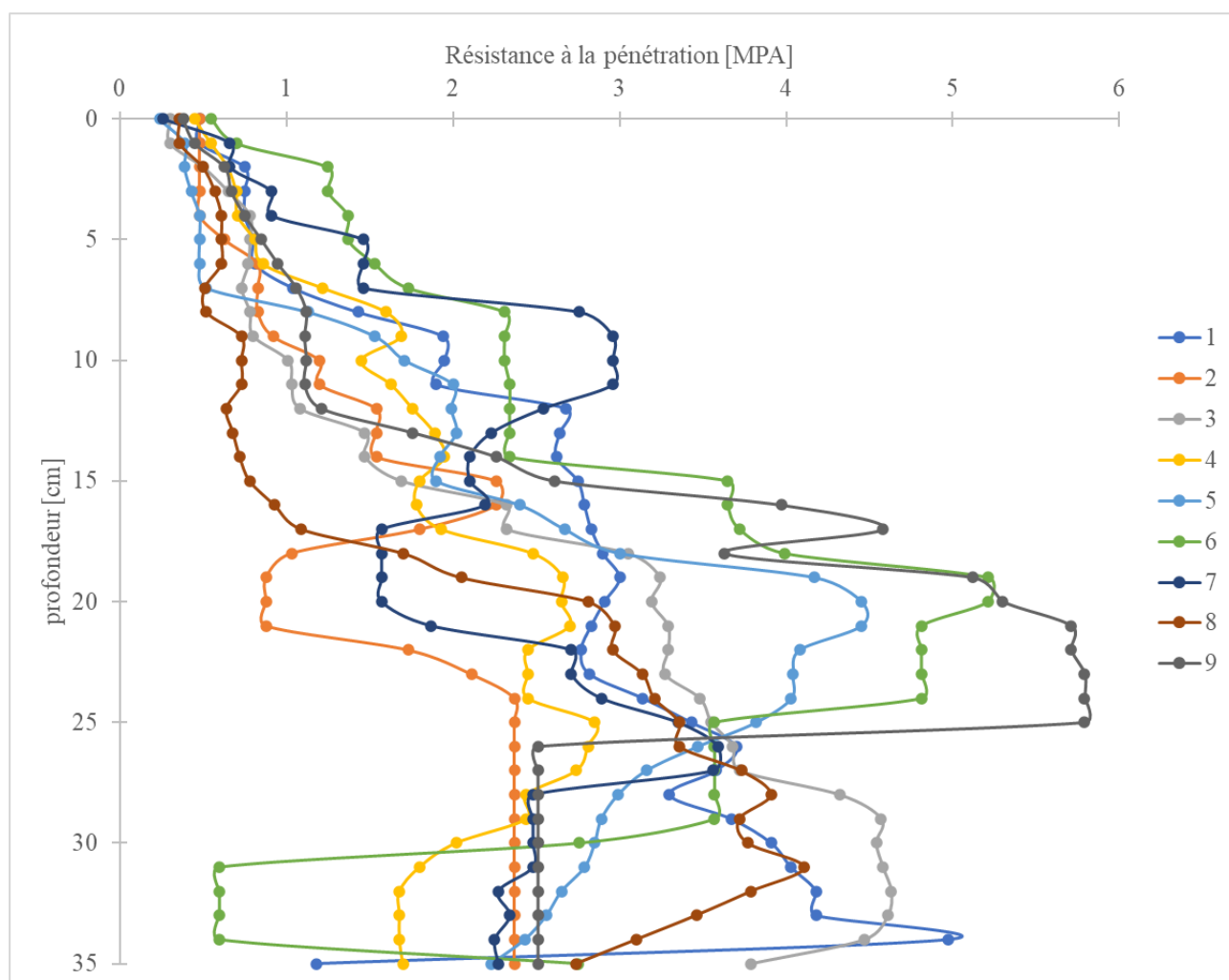
Modalité Labour, zone 2 :



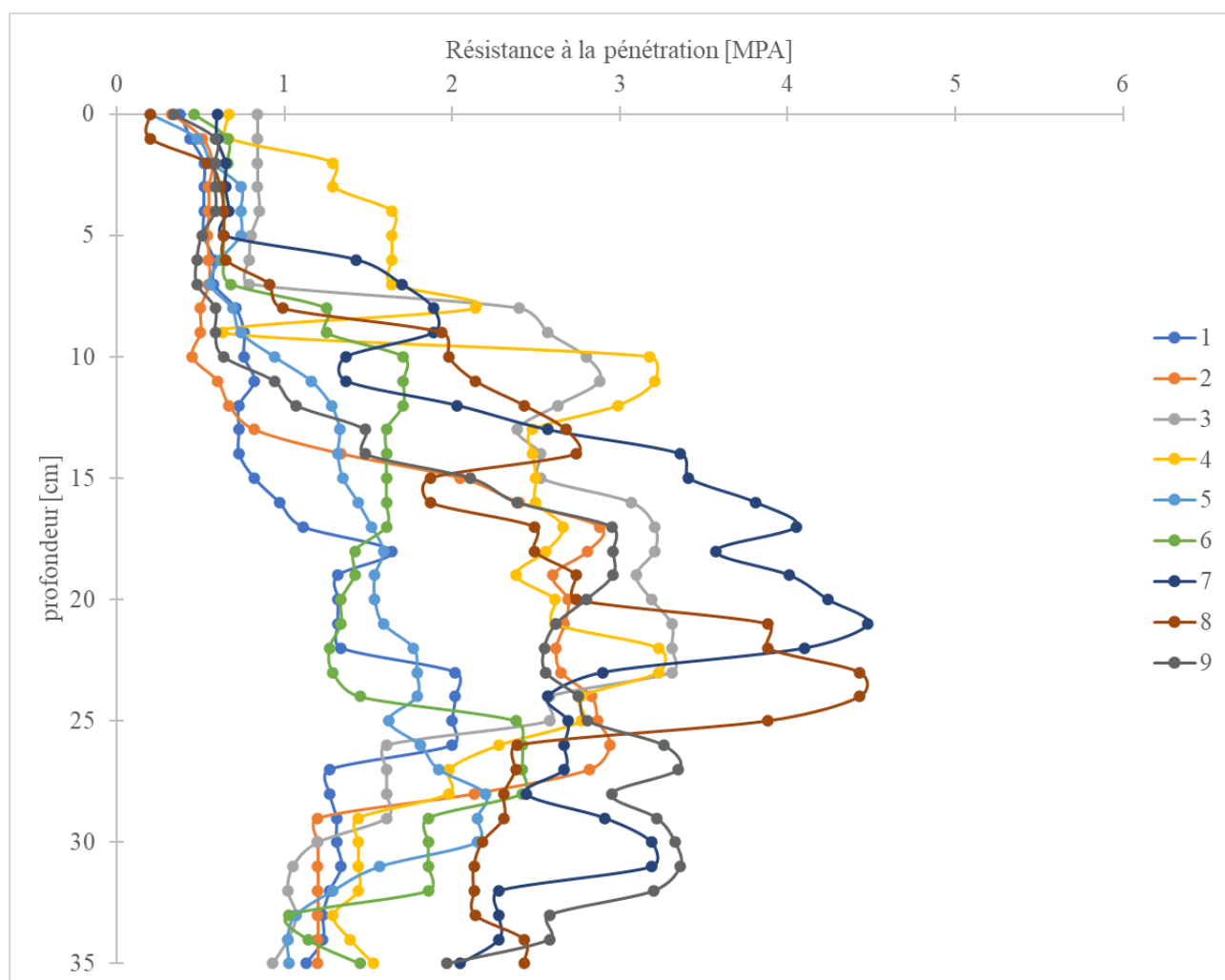
Modalité Labour, zone 3 :



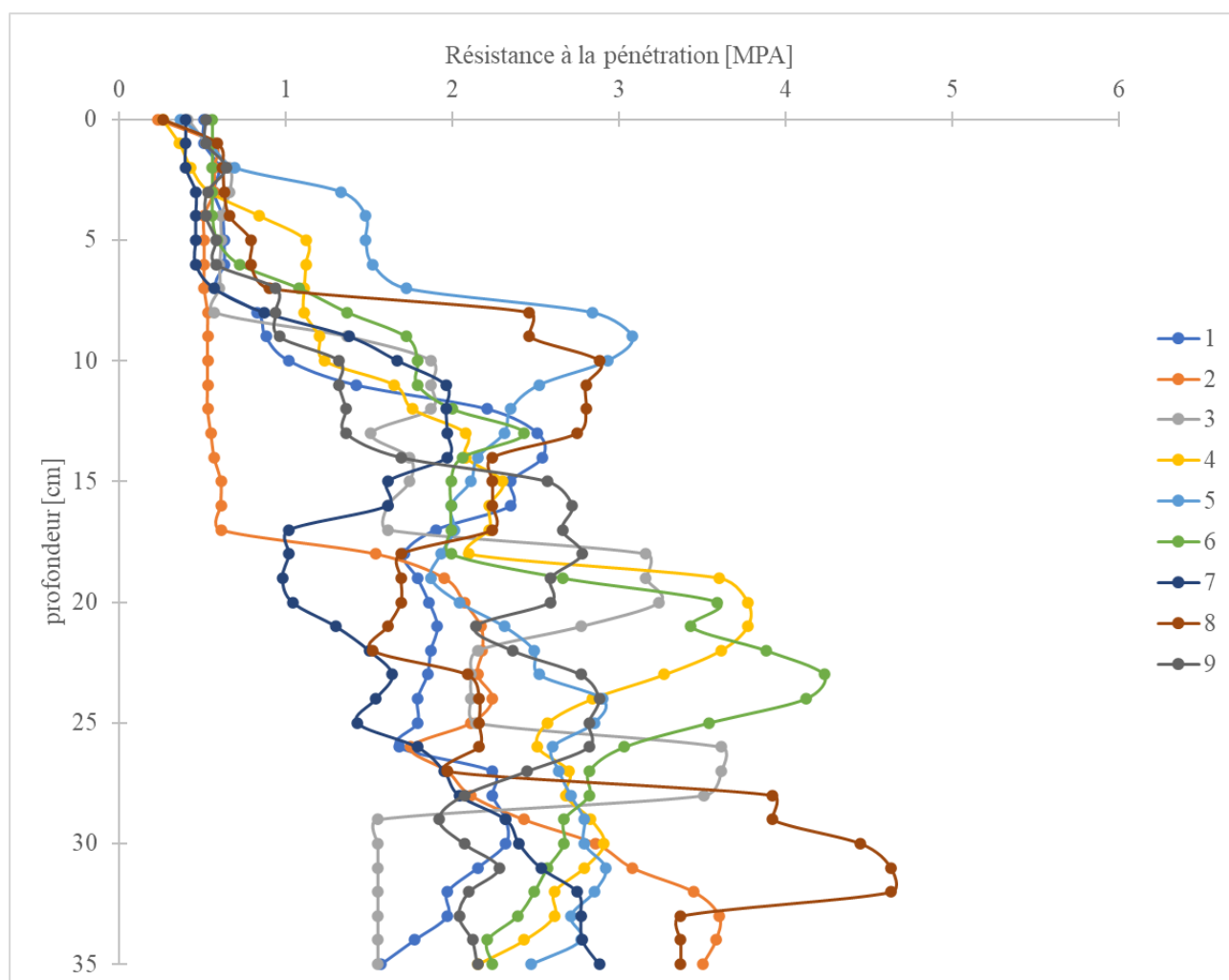
Modalité ABC, zone 1 :



Modalité ABC, zone 2 :

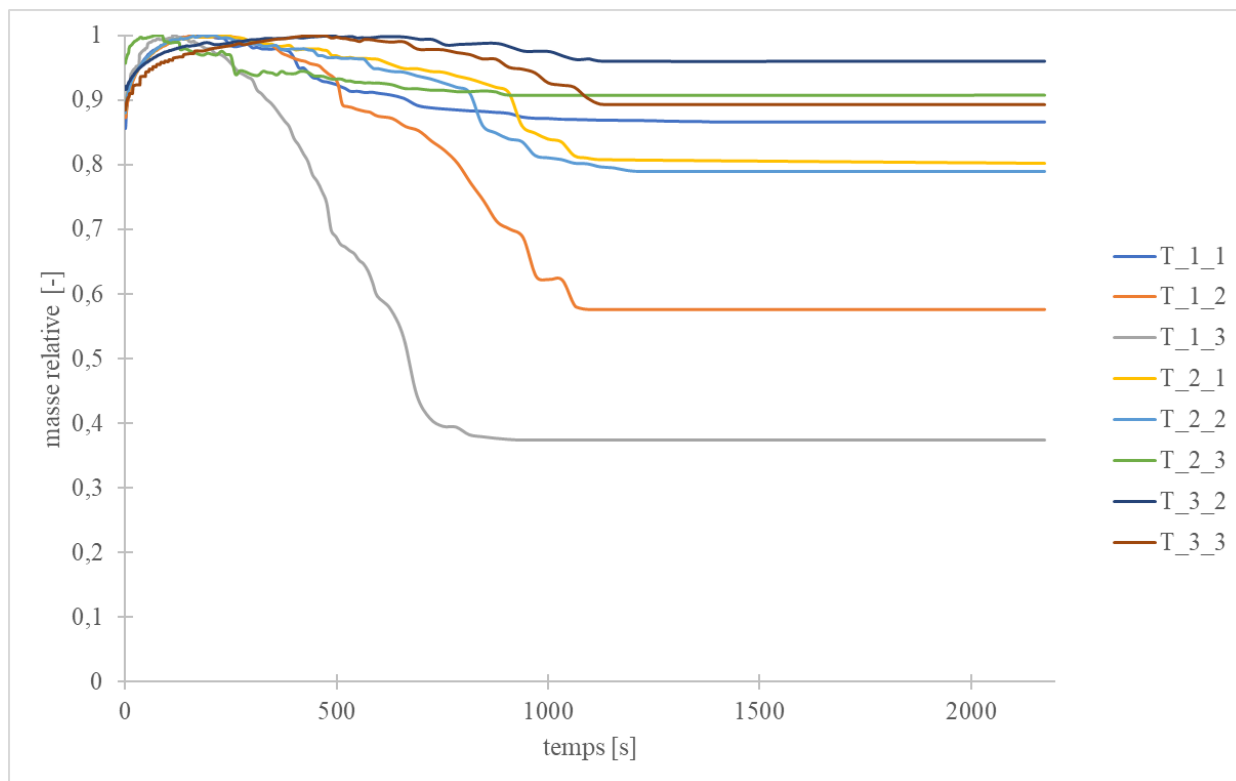


Modalité ABC, zone 3 :

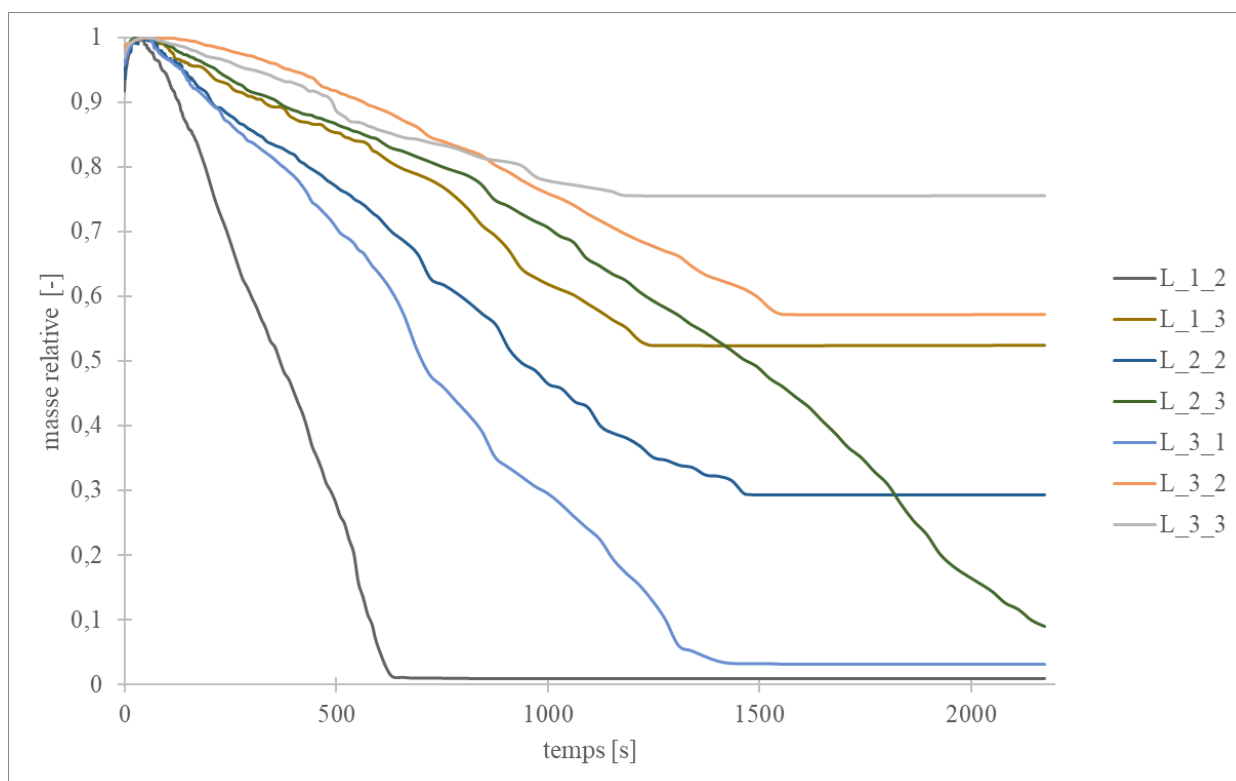


ANNEXE E : Evolution de la masse relative des échantillons de sol (100 cm³) après immersion dans l'eau, QuantiSlakeTest. Les QuantiSlakeTest sont représentés par modalité, trois échantillons par zone d'échantillonnage.

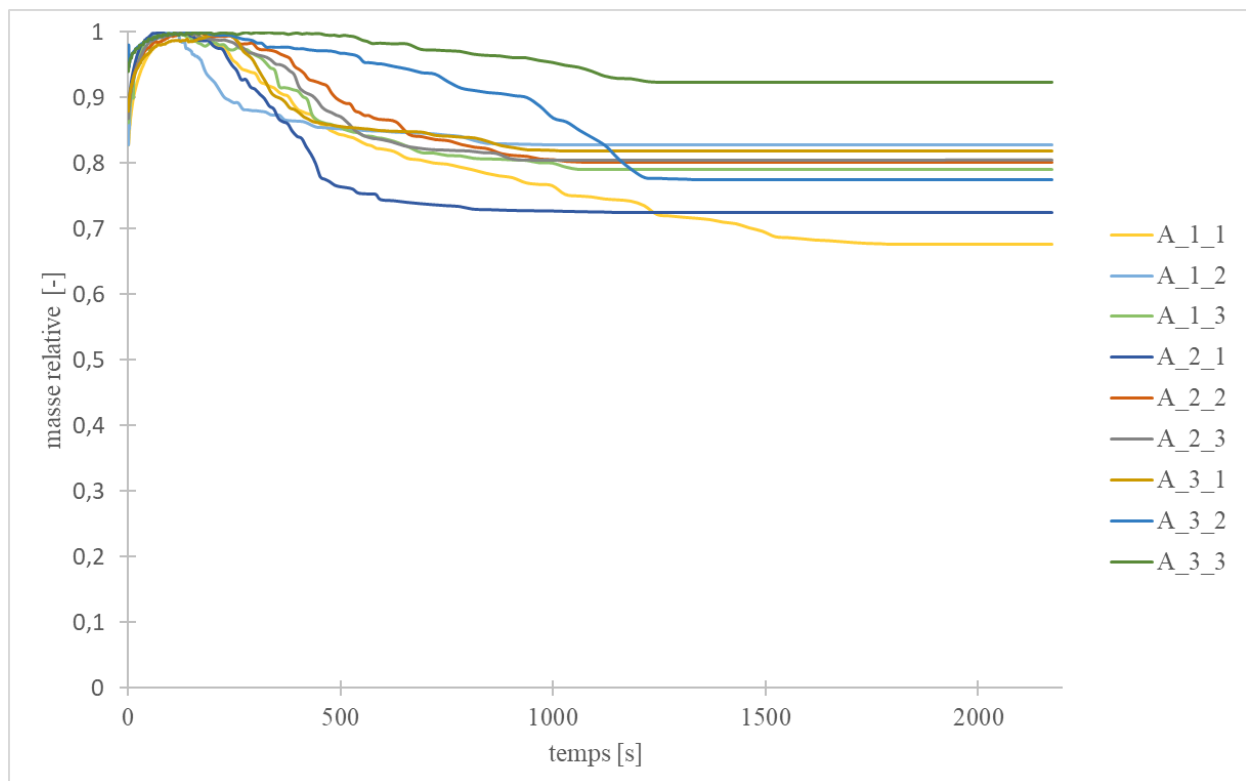
Modalité TCS :



Modalité Labour :



Modalité ABC :



Annexe F : Photos des profils des mini-profil pour les 3 modalités étudiées.

Modalité ABC :





Modalité labour :



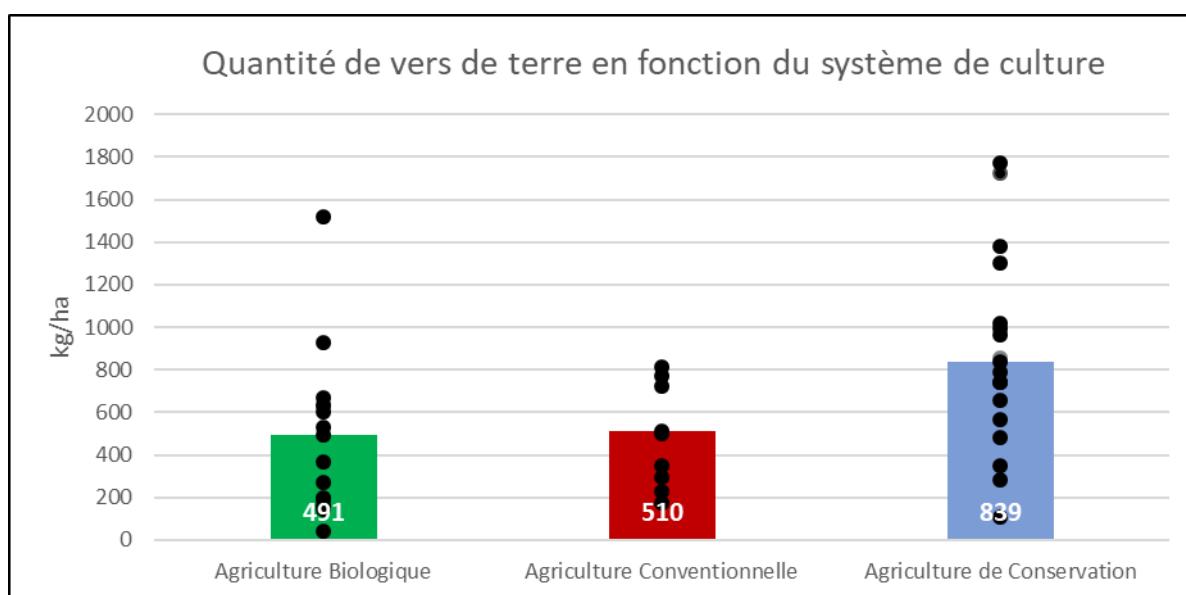


Modalité TCS :

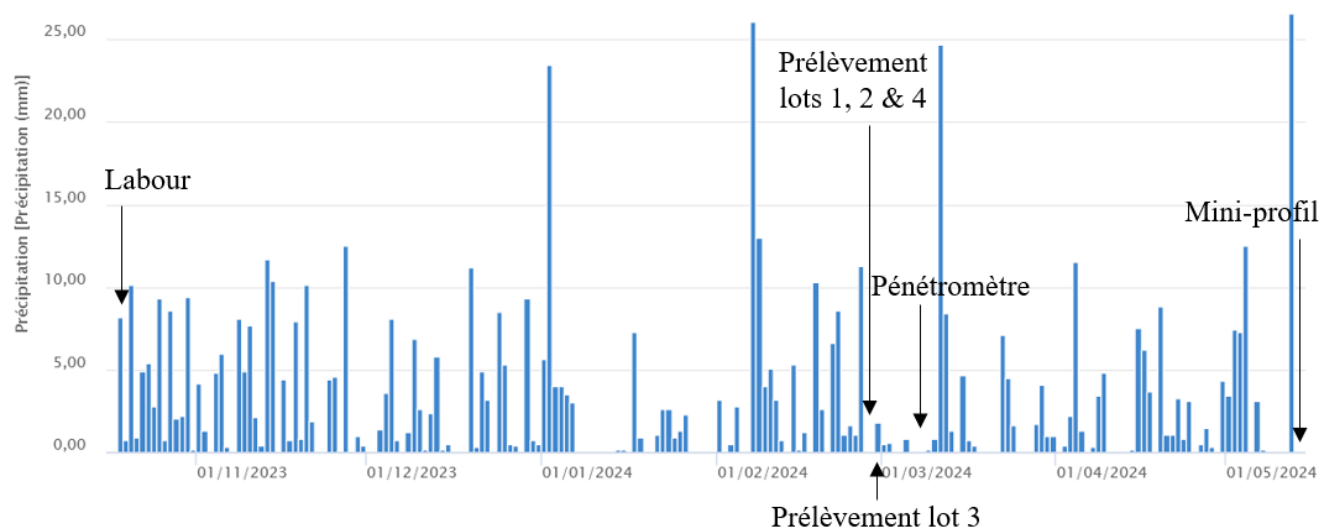




Annexe G : Campagne wallonne de prélèvements de vers de terre 2019. Champs implémentés en céréale (majorité en froment) et prélèvement des vers de terre à partir d'un test mixte moutarde-bêche. Greenotec. (s. d.)



Annexe H : Hydrométrie de Louvain-la-Neuve entre le 16 novembre 2023 et le 15 mai 2024, (Adapté de SPW, s. d.).

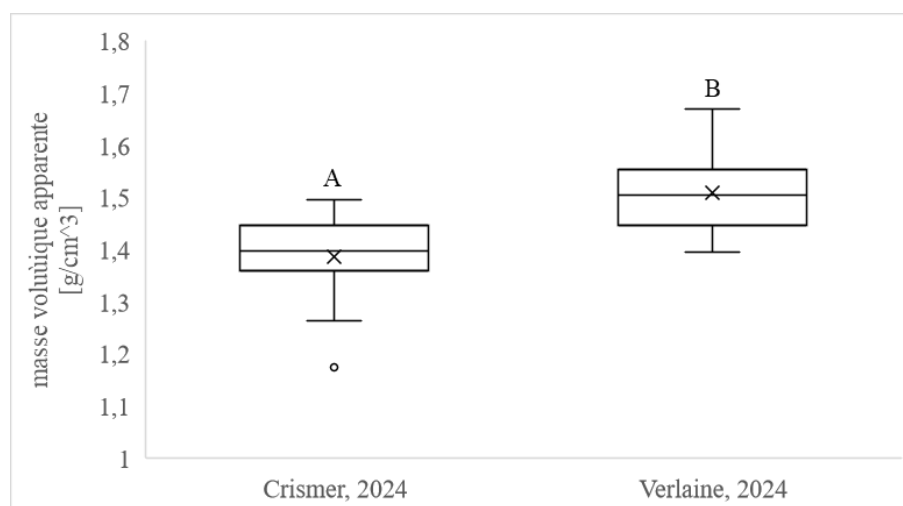


Annexe I : ANOVA à 2 facteurs ‘Modalité’ et ‘Utilisateur’ pour la masse volumique apparente. Comparaison entre les résultats obtenus pour ce mémoire et les résultats de Crismer (2024).

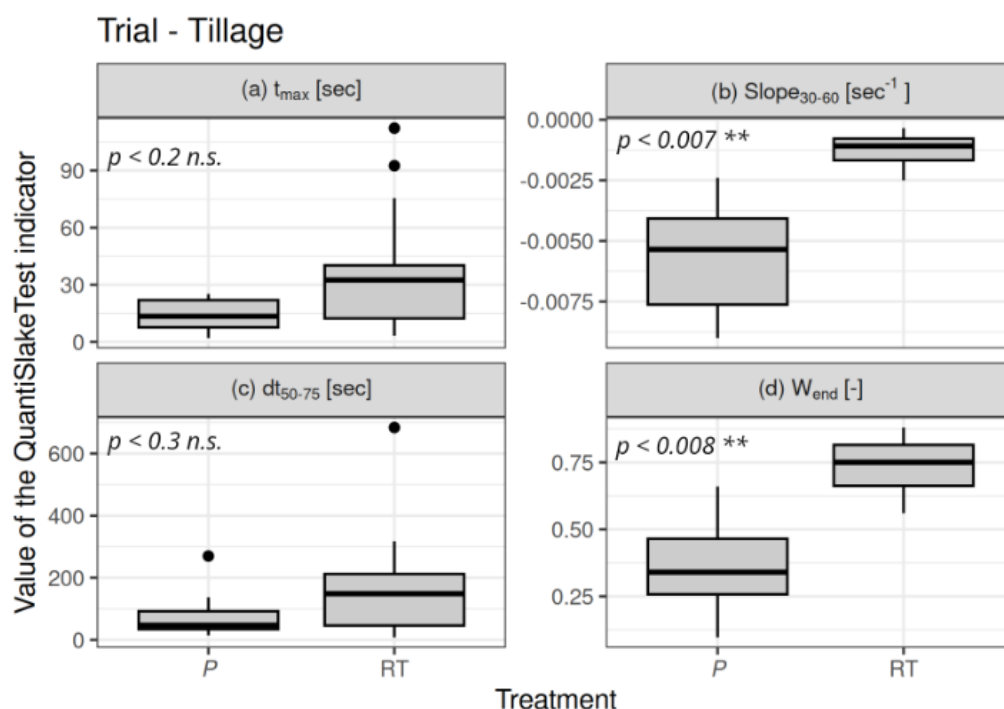
Les p-valeurs écrites en orange sont significatives au seuil de 5 %.

Source	p-valeur
Modalité	0,187
Utilisateur	<0,0001
Modalité*Utilisateur	0,326

Les boîtes à moustache suivies d’une lettre capitale différente sont statistiquement différentes au seuil de 5 %.



Annexe J : QuantiSlakeTest pour les indicateurs $t_{\max}$, pente30-60 (= slope30-60), dt_{50-75} et W_{end} en fonction du travail du sol (« P » = labour, « RT » = agriculture de conservation). Résultats de (Vanwindekens & Hardy, 2023).

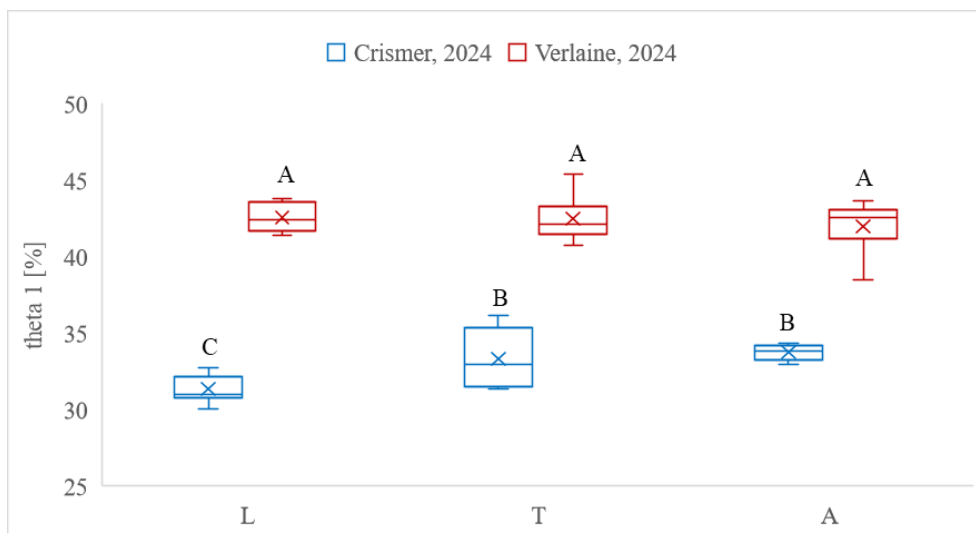


Annexe K : ANOVA à 2 facteurs ‘Modalité’ et ‘Utilisateur’ pour les teneurs en eau de la courbe de rétention (teneur en eau à pF 1 θ_{pF1} , la teneur en eau à la capacité au champs θ_{cc} , et la teneur en eau au point de flétrissement θ_{pfp}) et la réserve en eau utile (= RU). Comparaison entre les résultats obtenus pour ce mémoire et les résultats de Crismer (2024).

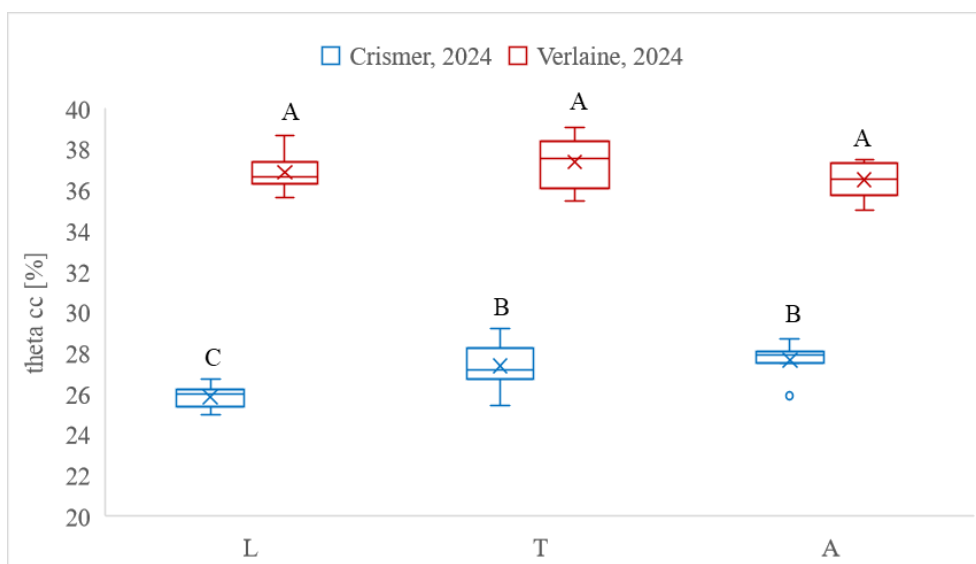
Les p-valeurs écrites en orange sont significatives au seuil de 5 %.

Variable étudiée	Source	p-valeur
θ_{pF1}	Modalité	0,069
	Utilisateur	< 0,0001
	Modalité*Utilisateur	0,0076
θ_{cc}	Modalité	0,0083
	Utilisateur	< 0,0001
	Modalité*Utilisateur	0,0073
θ_{pfp}	Modalité	0,0979
	Utilisateur	< 0,0001
	Modalité*Utilisateur	0,878
RU	Modalité	0,095
	Utilisateur	0,105
	Modalité*Utilisateur	0,859

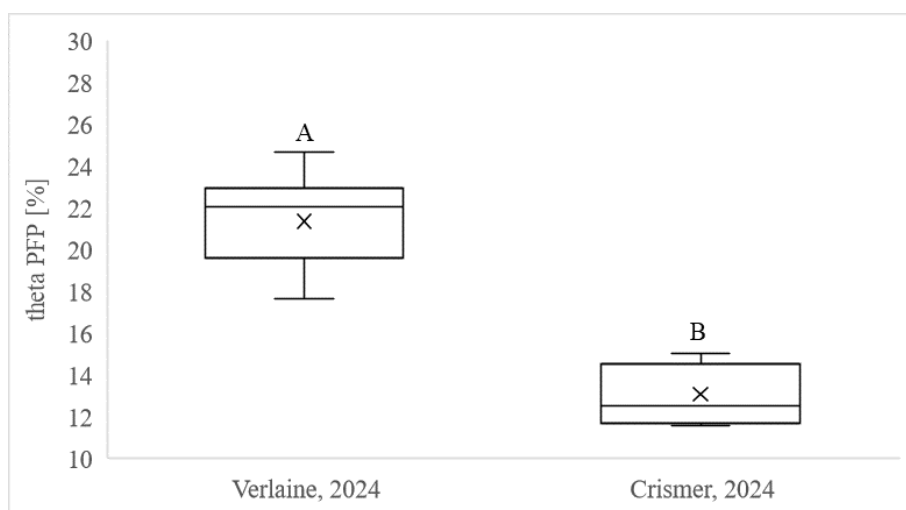
Les boîtes à moustache suivies d'une lettre capitale différente sont statistiquement différentes au seuil de 5 %. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC)



Les boîtes à moustache suivies d'une lettre capitale différente sont statistiquement différentes au seuil de 5 %. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC)



Les boîtes à moustache suivies d'une lettre capitale différente sont statistiquement différentes au seuil de 5 %.

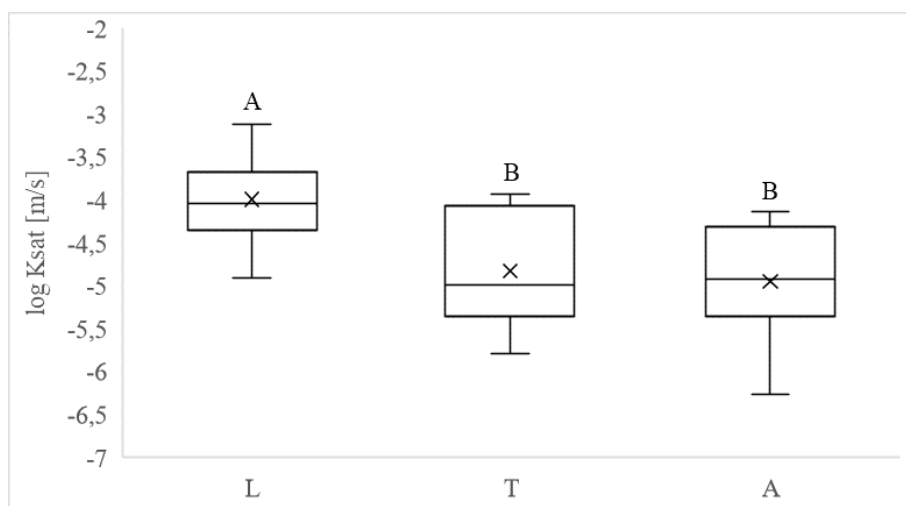


Annexe L : ANOVA à 2 facteurs ‘Modalité’ et ‘Utilisateur’ pour la conductivité hydraulique à saturation (infiltromètre simple anneau). Comparaison entre les résultats obtenus pour ce mémoire et les résultats de Crismer (2024).

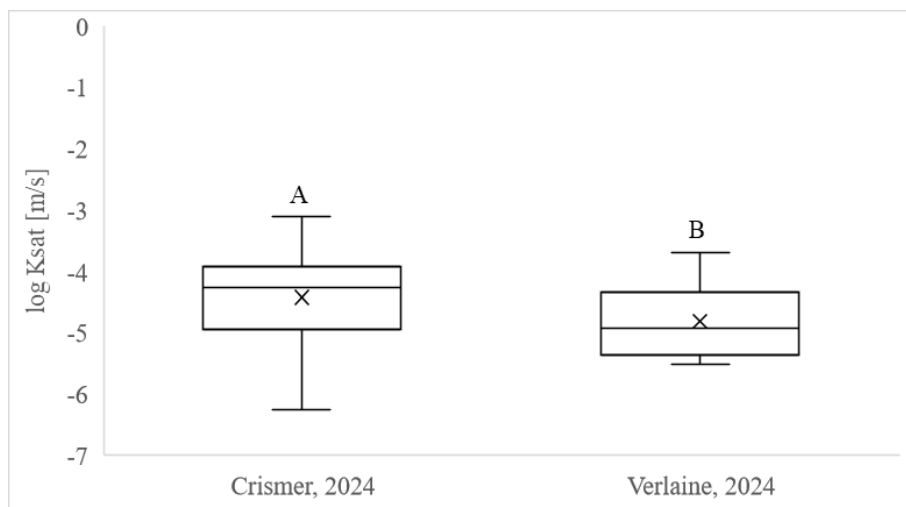
Les p-valeurs écrites en orange sont significatives au seuil de 5 %.

Source	p-valeur
Modalité	<0,001
Utilisateur	0,0409
Modalité*Utilisateur	0,853

Les boîtes à moustache suivies d'une lettre capitale différente sont statistiquement différentes au seuil de 5 %. (« L » = labour ; « T » = TCS et « A » = ABC)



Les boîtes à moustache suivies d'une lettre capitale différente sont statistiquement différentes au seuil de 5 %.



Impacts de la transition d'une agriculture conventionnelle vers une agriculture de conservation sur la qualité physique des sols.

Réalisé par Valentine Verlaine

L'agriculture dominante en Wallonie est appelée agriculture conventionnelle. Bien qu'elle remplisse les objectifs de production agricole, la prise de conscience de plus en plus importante de ses impacts négatifs sur l'environnement questionne sa pertinence pour le futur. À la recherche d'une agriculture plus durable, l'agriculture de conservation est vue comme une solution potentielle. Elle repose sur trois piliers : (i) une perturbation mécanique minimale du sol (ii) une couverture permanente du sol ainsi qu' (iii) une diversification des espèces cultivées.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier le potentiel de l'agriculture de conservation en tant qu'agriculture plus durable à travers une étude comparative de la qualité du sol entre ces deux systèmes. Un autre objectif est d'évaluer l'évolution des indicateurs utilisés pour quantifier la qualité du sol après le début de la transition à partir de l'analyse d'une transition court terme (5 ans) et long terme (15 ans). Le mémoire se concentre principalement sur l'étude de la qualité physique du sol ainsi que sur le 1^{er} pilier de l'agriculture de conservation. Pour ce faire, la zone d'étude choisie se situe à Vieusart, au sein des fermes universitaires de l'UCLouvain.

Les résultats mettent en évidence des différences en termes de qualité du sol entre les deux systèmes agricoles. Pour la qualité physique, une amélioration de la stabilité structurale a été observée. Aucune influence sur la capacité de rétention en eau n'a été obtenue et le mémoire a mis en évidence la capacité de l'agriculture de conservation à présenter des conductivités hydrauliques à saturation semblables (mais non supérieures) à celles obtenues sous labour. Un possible frein a cependant été identifié, et il concerne l'état de compaction du sol. La compaction est plus grande dans la partie superficielle du sol sous agriculture de conservation, bien que des résultats contradictoires ont été obtenus entre la masse volumique apparente (ne mettant en évidence aucune différence) et la résistance à la pénétration ainsi que l'analyse qualitative du mini-profil (mettant en avant la plus grande compaction sous agriculture de conservation). À partir de la brève analyse de la qualité biologique (densité de vers de terre et teneur en carbone organique), l'agriculture de conservation semble être en faveur de son amélioration. Dès lors, l'agriculture de conservation a le potentiel d'augmenter la qualité physique (et biologique), bien que l'influence de la plus grande compaction dans la partie superficielle du sol nécessite une attention particulière afin de déterminer son influence sur le potentiel de production végétal, cette fonction étant centrale dans ce contexte.

En ce qui concerne l'influence de la durée de la transition sur la qualité du sol, elle ne semble pas importante, les valeurs obtenues pour les deux périodes n'étant pas significativement différentes entre elles pour l'ensemble des indicateurs. Cependant, la densité de vers de terre et la conductivité hydraulique à saturation sont encore en transition. En effet, ce premier indicateur pour la transition court terme présente des valeurs intermédiaires entre le labour et la transition long terme. En ce qui concerne le deuxième indicateur pour la transition court terme, les valeurs obtenues sont significativement plus faibles que celles obtenues sous labour, bien que non significativement différentes de celles obtenues pour la transition long terme.