

Faculté des bioingénieurs

Impact du travail du sol sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques du système sol-plante en culture d'épeautre et blé

Auteur : Aurélie Dechef

Promoteur : Pr. Pierre Bertin (UCLouvain/ELI/ELIA)

Lecteurs : Pr. Xavier Draye (UCLouvain/ELI/ELIA)
Hugues Falys (UCLouvain)

Année académique 2021-2022

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : sciences agronomiques

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été rendue possible grâce à la contribution de plusieurs personnes auxquelles je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon promoteur, le Pr. Pierre Bertin pour son encadrement ainsi que ses conseils et remarques avisées tout au long de la réalisation de ce mémoire. Merci pour le temps que vous m'avez accordé, pour votre rigueur et votre disponibilité.

Je tiens également à remercier la doctorante Lola Leveau pour ses précieux conseils concernant les mesures de terrain ainsi que pour l'analyse des résultats.

Un merci particulier à Hugues Falys, responsable de la ferme de Marbaix mais également lecteur de ce mémoire pour les nombreuses informations fournies concernant les parcelles, pour l'apport du matériel lors des mesures de terrain ainsi que pour l'aide lors des récoltes. Un grand merci pour le temps que vous m'avez accordé. Je tiens également à remercier Rémi et Alexis, membres de la ferme de Marbaix pour leur aide précieuse lors des récoltes.

Ensuite mes remerciements s'adressent à Thomas Dagbert et Pierre Van Thorre, techniciens du laboratoire PEPA. Merci pour votre sympathie et pour votre aide à la fois sur le terrain et au laboratoire.

Je souhaite également remercier Sébastien François pour le prêt du pénétromètre et infiltromètre. Merci à Marco Bravin pour les analyses de carbone. Merci également à Lena Jeannerod pour les explications concernant le logiciel Rstudio.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance envers mes amies bioingénieures Anaïs et Amandine. Merci pour votre soutien et la motivation apportée tout au long de la rédaction de ce mémoire.

La réalisation de mes études ainsi que ce mémoire n'auraient sans doute pas été possible sans le soutien sans faille de mon compagnon Alexis. Merci pour ta patience, pour l'intérêt que tu as montré envers ce travail ainsi que pour l'aide précieuse que tu m'as apportée lors des journées de mesures et de rédaction interminables.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont relu avec attention ce travail écrit : Camille, Michèle, Christine et Anne-Thérèse.

Aurélié Dechef

Table des matières

Introduction	1
1. Etat de l'art.....	3
1.1 Evolution de l'agriculture et du travail du sol au cours du temps	3
1.1.1 Origine et expansion de l'agriculture	3
1.1.2 Le système de l'abattis-brûlis.....	3
1.1.3 Système associant culture et élevage à l'Antiquité	4
1.1.4 Les innovations du Moyen-Âge	4
1.1.5 La mise en culture des jachères	5
1.1.6 Révolutions industrielles et impact sur l'agriculture	6
1.2 Le travail du sol en agriculture conventionnelle.....	7
1.2.1 Définition et itinéraire classique en agriculture conventionnelle	7
1.2.2 Le labour plus en détails.....	8
1.2.3 La remise en question du labour.....	9
1.3 L'agriculture de conservation.....	10
1.3.1 Principes	10
1.3.2 Le non-labour plus en détails	11
1.3.3 Implantation de céréales en non-labour.....	13
1.4 Les services écosystémiques fournis par le sol et impact du travail du sol sur ceux-ci	14
1.4.1 Services écosystémiques fournis par les vers de terre	14
1.4.2 Matière organique du sol	16
1.4.3 L'eau dans le sol	18
1.5 Objectifs	19
2. Matériels et méthodes	21
2.1 Parcelles étudiées et caractéristiques	21
2.2 Plan expérimental.....	29
2.3 Mesures réalisées	29
2.3.1 Méthodes permettant d'évaluer l'activité biologique.....	29
2.3.2 Résistance à la pénétration	33
2.3.3 Stabilité du sol <i>via</i> la méthode VESS	34
2.3.4 Stabilité des agrégats <i>via</i> la méthode USDA	35
2.3.5 Infiltration d'eau.....	36
2.3.6 Taux de carbone organique stable et labile	37
2.3.7 Relevé d'adventices.....	38
2.3.8 Couverture foliaire	39
2.3.9 Tallage utile	40
2.3.10 Rendement	40

2.4	Analyses statistiques	41
2.4.1	Moyennes, écart-types et erreurs standards.....	41
2.4.2	Analyse de la variance et comparaison des moyennes	41
2.4.3	Analyse non-paramétrique	43
2.4.4	Coefficient de corrélation	43
3.	Résultats.....	45
3.1	Méthodes permettant d'évaluer l'activité biologique.....	45
3.1.1	Tea bag index	45
3.1.2	Paniers à vers de terre	48
3.1.3	Méthode moutarde.....	52
3.2	Résistance à la pénétration.....	55
3.3	Stabilité du sol <i>via</i> la méthode VESS	57
3.4	Stabilité des agrégats <i>via</i> la méthode USDA.....	59
3.5	Infiltration d'eau.....	61
3.6	Taux de carbone organique stable et labile.....	63
3.7	Relevé d'adventices	66
3.8	Couverture foliaire	69
3.9	Tallage utile	77
3.10	Rendement.....	79
4.	Discussion.....	81
4.1	Méthodes permettant d'évaluer l'activité biologique.....	81
4.1.1	Tea bag Index	81
4.1.2	Paniers à vers de terre	82
4.1.3	Méthode moutarde.....	82
4.2	Résistance à la pénétration.....	83
4.3	Stabilité du sol <i>via</i> la méthode VESS	84
4.4	Stabilité des agrégats <i>via</i> la méthode USDA.....	85
4.5	Infiltration d'eau.....	86
4.6	Taux de carbone organique stable et labile.....	87
4.7	Relevé d'adventices	88
4.8	Couverture foliaire	88
4.9	Tallage utile	89
4.10	Rendement.....	90
	Conclusion	93
	Références bibliographiques	95
	Annexes	99
	Annexe 1 : Diversité des pratiques de l'agriculture de conservation.....	99

Annexe 2 : Représentation de la disposition des différentes mesures au sein d'une bande de mesure	100
Annexe 3 : Fiche de suivi des paniers à vers de terre	101
Annexe 4 : Clé d'identification des lombriciens en 4 groupes fonctionnels.....	102
Annexe 5 : Protocole et clé permettant d'établir le score VESS	103
Annexe 6 : Plan de récolte au sein de chaque traitement.....	104

Liste des figures

Figure 1 : Exemple de travaux du sol avant l'implantation de céréales	7
Figure 2 : Schéma d'une charrue à socs réversibles	8
Figure 3 : Représentation du mouvement de la terre au cours du labour	9
Figure 4 : Composants pour une gestion intégrée des adventices en AC.....	13
Figure 5 : Fonctions remplies par la matière organique du sol	16
Figure 6 : Processus de décomposition de la matière organique fraîche.....	17
Figure 7 : Distribution du carbone organique en fonction de la profondeur en système labouré et non-labouré	18
Figure 8 : Différents traitements au sein des parcelles BLÉ et ÉPEAUTRE.....	21
Figure 9 : Schéma de la disposition des sachets de thé au sein d'une placette	31
Figure 10 : Méthode d'enfouissement des sachets de thé développée par le CRA-W ...	31
Figure 11 : Classe de recouvrement du sol par la paille proposée par l'OPVT	32
Figure 12 : Pénétrromètre digital utilisé pour la mesure de pénétrrométrie	34
Figure 13 : Filtre utilisé pour la méthode USDA.....	35
Figure 14 : Infiltrromètre simple anneau utilisé pour la mesure de conductivité hydraulique à saturation	36
Figure 15 : Cadre quadrillé utilisé pour la mesure de couverture foliaire.....	39
Figure 16 : Exemple du fonctionnement de l'application Canopéo	39
Figure 17 : Moissonneuse à essai utilisée pour l'évaluation du rendement	40
Figure 18 : Taux de décomposition moyen k [-] de la parcelle ÉPEAUTRE.	45
Figure 19 : Taux de stabilisation moyen S [-] de la parcelle ÉPEAUTRE.	46
Figure 20 : Taux de décomposition moyen k [-] de la parcelle BLÉ.	47
Figure 21 : Taux de stabilisation moyen S [-] de la parcelle BLÉ.	48
Figure 22 : Nombre moyen de cabanes apparues sur une période de 5 mois pour la parcelle ÉPEAUTRE.	48
Figure 23 : Nombre moyen de turricules apparues sur une période de 5 mois pour la parcelle ÉPEAUTRE.	49
Figure 24 : Evolution du recouvrement moyen du sol par la paille sur 5 mois pour la parcelle ÉPEAUTRE	50
Figure 25 : Nombre moyen de cabanes apparues sur une période de 5 mois pour la parcelle BLÉ.	50
Figure 26 : Nombre moyen de turricules apparues sur une période de 5 pour la parcelle BLÉ.	51
Figure 27 : Evolution du recouvrement moyen du sol par la paille sur 5 mois pour la parcelle BLÉ. Chaque classe correspondant à une gamme de % de surface occupée par la paille	52
Figure 28 : Nombre moyen de vers de terre récoltés <i>via</i> la méthode moutarde pour la parcelle ÉPEAUTRE	52

Figure 29 : Nombre moyen de vers de terre dans chacun des groupes fonctionnels pour la parcelle ÉPEAUTRE	53
Figure 30 : Nombre moyen de vers de terre récoltés <i>via</i> la méthode moutarde et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ.	54
Figure 31 : Nombre moyen de vers de terre dans chacun des groupes fonctionnels pour la parcelle BLÉ	54
Figure 32 : Pression moyenne exercée par unité de surface [Mpa] en fonction de la profondeur pour la parcelle ÉPEAUTRE.	55
Figure 33 : Pression moyenne exercée par unité de surface [Mpa] en fonction de la profondeur pour la parcelle BLÉ.	56
Figure 34 : Score VESS moyen de la parcelle ÉPEAUTRE.....	57
Figure 35 : Score VESS moyen de la parcelle BLÉ.....	58
Figure 36 : Classe USDA moyenne de la parcelle ÉPEAUTRE	59
Figure 37 : Classe USDA moyenne de la parcelle BLÉ	60
Figure 38 : Conductivité hydraulique à saturation moyenne K_s [$m.s^{-1}$] de la parcelle ÉPEAUTRE.....	61
Figure 39 : Conductivité hydraulique à saturation moyenne K_s [$m.s^{-1}$] de la parcelle BLÉ	62
Figure 40 : Taux moyen de carbone organique stable [g/100g ms] de la parcelle ÉPEAUTRE.	63
Figure 41 : Taux moyen de carbone organique labile [g/100g ms] de la parcelle ÉPEAUTRE.....	64
Figure 42 : Taux moyen de carbone organique stable [g/100g ms] de la parcelle BLÉ ...	65
Figure 43 : Taux moyen de carbone organique labile [g/100g ms] de la parcelle BLÉ	66
Figure 44 : Nombre moyen d'adventices de la parcelle ÉPEAUTRE au 16/03/21.....	67
Figure 45 : Nombre moyen d'adventices de la parcelle ÉPEAUTRE au 13/04/21.....	67
Figure 46 : Nombre moyen d'adventices de la parcelle BLÉ au 16/03/21.....	68
Figure 47 : Nombre moyen d'adventices de la parcelle BLÉ au 13/04/21.....	68
Figure 48 : Evolution de la couverture foliaire moyenne entre le 22/03/21 et le 26/04/21 pour la parcelle ÉPEAUTRE. Méthode de mesure : Cadre.	69
Figure 49 : Evolution de la couverture foliaire moyenne entre le 22/03/21 et le 26/04/21 pour la parcelle ÉPEAUTRE. Méthode de mesure : App Canopéo.....	69
Figure 50 : Evolution de la couverture foliaire moyenne entre le 22/03/21 et le 26/04/21 pour la parcelle BLÉ. Méthode de mesure : Cadre	73
Figure 51 : Evolution de la couverture foliaire moyenne entre le 22/03/21 et le 26/04/21 pour la parcelle BLÉ. Méthode de mesure : App Canopéo.....	73
Figure 52 : Nombre moyen d'épis par m^2 de la parcelle ÉPEAUTRE.....	77
Figure 53 : Nombre moyen d'épis par m^2 de la parcelle BLÉ.....	78
Figure 54 : Rendement moyen [$kg.m^{-2}$] de la parcelle ÉPEAUTRE.	79
Figure 55 : Rendement moyen [$kg.m^{-2}$] de la parcelle BLÉ.	80

Liste des tableaux

Tableau 1 : Opérations culturales et cultures qui se sont succédé sur la parcelle ÉPEAUTRE ces 5 dernières années	22
Tableau 2 : Opérations culturales et cultures qui se sont succédé sur la parcelle BLÉ ces 5 dernières années	25
Tableau 3 : Critères pour l'attribution des classes USDA.....	35
Tableau 4 : Taux de décomposition moyen $k [-]$ de la parcelle ÉPEAUTRE.....	46
Tableau 5 : Taux de stabilisation moyen $S [-]$ de la parcelle ÉPEAUTRE	46
Tableau 6 : Taux de décomposition moyen $k [-]$ de la parcelle BLÉ.....	47
Tableau 7 : Taux de stabilisation moyen $S [-]$ de la parcelle BLÉ	47
Tableau 8 : Nombre moyen de cabanes apparues pour la parcelle ÉPEAUTRE.....	49
Tableau 9 : Nombre moyen de turricules apparues pour la parcelle ÉPEAUTRE	49
Tableau 10 : Nombre moyen de cabanes apparues pour la parcelle BLÉ.....	51
Tableau 11 : Nombre moyen de turricules apparues pour la parcelle BLÉ	51
Tableau 12 : Nombre moyen de vers de terre récoltés pour la parcelle ÉPEAUTRE	53
Tableau 13 : Nombre moyen de vers de terre récoltés pour la parcelle BLÉ	54
Tableau 14 : Pression moyenne exercée par unité de surface [Mpa] à la profondeur de 20-30 cm pour la parcelle ÉPEAUTRE.....	55
Tableau 15 : Pression moyenne exercée par unité de surface [Mpa] à la profondeur de 20-30 cm pour la parcelle BLÉ	56
Tableau 16 : Score VESS moyen de la parcelle ÉPEAUTRE.....	57
Tableau 17 : Score VESS moyen des traitements de la parcelle BLÉ	58
Tableau 18 : Classes USDA moyennes de la parcelle ÉPEAUTRE	59
Tableau 19 : Classes USDA moyennes de la parcelle ÉPEAUTRE (test de Wilcoxon).....	60
Tableau 20 : Classes USDA moyennes de la parcelle BLÉ	60
Tableau 21 : Conductivité hydraulique à saturation moyenne $K_s [m.s^{-1}]$ de la parcelle ÉPEAUTRE	61
Tableau 22 : Moyennes et écarts-types de la conductivité hydraulique à saturation $K_s [m.s^{-1}]$ de la parcelle ÉPEAUTRE	62
Tableau 23 : Conductivité hydraulique à saturation moyenne $K_s [m.s^{-1}]$ de la parcelle BLÉ	62
Tableau 24 : Moyennes et écarts-types de la conductivité hydraulique à saturation $K_s [m.s^{-1}]$ de la parcelle BLÉ	63
Tableau 25 : Taux moyens de carbone organique stable [g/100g ms] de la parcelle ÉPEAUTRE.....	64
Tableau 26 : Taux moyens de carbone organique labile [g/100g ms] de la parcelle ÉPEAUTRE.....	64
Tableau 27 : Taux moyen de carbone organique stable [g/100g ms] de la parcelle BLÉ	65
Tableau 28 : Taux moyen de carbone organique labile [g/100g ms] de la parcelle BLÉ .	66

Tableau 29 : Nombre moyen d'adventices de la parcelle ÉPEAUTRE au 16/03/21.....	67
Tableau 30 : Nombre moyen d'adventices de la parcelle ÉPEAUTRE au 13/04/21.....	67
Tableau 31 : Nombre moyen d'adventices de la parcelle BLÉ au 16/03/21.....	68
Tableau 32 : Nombre moyen d'adventices de la parcelle BLÉ au 13/04/21.....	68
Tableau 33 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 22/03/21 mesuré <i>via</i> la méthode du cadre et ce pour la parcelle ÉPEAUTRE (cadre).....	70
Tableau 34 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 08/04/21 mesuré <i>via</i> la méthode du cadre et ce pour la parcelle ÉPEAUTRE	70
Tableau 35 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 26/04/21 mesuré <i>via</i> la méthode du cadre et ce pour la parcelle ÉPEAUTRE	70
Tableau 36 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 22/03/21 mesuré <i>via</i> la méthode Canopéo et ce pour la parcelle ÉPEAUTRE.....	70
Tableau 37 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 08/04/21 mesuré <i>via</i> la méthode Canopéo et ce pour la parcelle ÉPEAUTRE.....	71
Tableau 38 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 26/04/21 mesuré <i>via</i> la méthode Canopéo et ce pour la parcelle ÉPEAUTRE.....	71
Tableau 39 : Corrélation entre les méthodes au 22/03/21 pour la parcelle ÉPEAUTRE .	72
Tableau 40 : Corrélation entre les méthodes au 08/04/21 pour la parcelle ÉPEAUTRE .	72
Tableau 41 : Corrélation entre les méthodes au 26/04/21 pour la parcelle ÉPEAUTRE .	72
Tableau 42 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 22/03/21 mesuré <i>via</i> la méthode du Cadre et ce pour la parcelle BLÉ.....	73
Tableau 43 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 08/04/21 mesuré <i>via</i> la méthode du Cadre et ce pour la parcelle BLÉ.....	74
Tableau 44 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 26/04/21 mesuré <i>via</i> la méthode du Cadre et ce pour la parcelle BLÉ.....	74
Tableau 45 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 22/03/21 mesuré <i>via</i> la méthode Canopéo et ce pour la parcelle BLÉ.....	75
Tableau 46 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 08/04/21 mesuré <i>via</i> la méthode Canopéo et ce pour la parcelle BLÉ.....	75
Tableau 47 : Pourcentage moyen de couverture foliaire au 26/04/21 mesuré <i>via</i> la méthode Canopéo et ce pour la parcelle BLÉ.....	75
Tableau 48 : Résumé des résultats de couverture foliaire pour la parcelle BLÉ.....	76
Tableau 49 : Corrélation entre les méthodes au 22/03/21 pour la parcelle BLÉ	76
Tableau 50 : Corrélation entre les méthodes au 08/04/21 pour la parcelle BLÉ	76
Tableau 51 : Corrélation entre les méthodes au 26/04/21 pour la parcelle BLÉ	77
Tableau 52 : Nombre moyen d'épis par m ² de la parcelle ÉPEAUTRE.....	77
Tableau 53 : Nombre moyen d'épis par m ² de la parcelle BLÉ	78
Tableau 54 : Rendement moyen [kg.m ⁻²] de la parcelle ÉPEAUTRE	79
Tableau 55 : Rendement moyen [kg.m ⁻²] de la parcelle BLÉ	80

Introduction

Les systèmes agricoles actuels font face à des enjeux de taille : changements climatiques, augmentation de la population, érosion des sols, perte de matière organique, perte de biodiversité ou encore viabilité des exploitations. Ces enjeux incitent à évoluer vers des systèmes à la fois plus productifs et plus durables afin d'assurer une sécurité alimentaire tout en préservant l'environnement. Dans cette optique, les systèmes conventionnels incluant le labour sont notamment remis en question. L'agriculture de conservation dont l'un des principes majeurs est la perturbation minimale du sol, est proposée comme l'une des alternatives possibles pour atteindre ces objectifs.

C'est dans ce contexte que ce travail s'insère. En effet, ce mémoire a pour objectif d'étudier l'impact du travail du sol sur les paramètres clés de cultures de céréales tel que le rendement mais également sur certains paramètres physiques, chimiques et biologiques du sol, fondamentaux pour une gestion durable de celui-ci. L'objectif est également d'évaluer l'effet de l'adoption de pratiques culturales sans labour sur le court et le long terme.

Ce travail est divisé en quatre parties. Tout d'abord, l'« Etat de l'art » permet de replacer le sujet d'étude dans un contexte plus global. On y retrouve notamment l'évolution de l'agriculture au cours du temps, les principes de l'agriculture conventionnelle et de conservation ainsi qu'une synthèse des connaissances actuelles quant à l'impact du travail du sol sur l'implantation des cultures de céréales ainsi que sur plusieurs services écosystémiques fournis par le sol.

La deuxième partie intitulée « Matériels et méthodes » présente les parcelles étudiées et leurs caractéristiques. Cette section regroupe également l'ensemble des méthodes et techniques utilisées en vue d'évaluer l'impact du travail du sol sur les paramètres étudiés.

Ensuite, la partie « Résultats » synthétise l'ensemble des résultats obtenus pour chacune des parcelles ainsi que leurs significativités.

Enfin, la partie « Discussion » comprend l'interprétation et la discussion des résultats par rapport à la littérature ainsi que la critique des méthodes utilisées.

Ce travail se clôture par un point « Conclusion » résumant les informations clés de ce mémoire.

1. Etat de l'art

1.1 Evolution de l'agriculture et du travail du sol au cours du temps

1.1.1 Origine et expansion de l'agriculture

L'histoire de l'agriculture débute il y a dix mille ans environ, soit au début du Néolithique. A cette époque, les hommes sont principalement des chasseurs-cueilleurs nomades. Néanmoins, quelques communautés d'Asie et d'Amérique très éloignées les unes des autres ont commencé à cultiver et élever plantes et animaux de manière progressive, se transformant ainsi en communautés d'agriculteurs sédentaires. Les régions où ce phénomène s'est produit sont appelées « foyers d'origine de l'agriculture » et vont constituer les points de départ de l'expansion de l'agriculture sur les différents continents. L'origine de cette expansion qui a duré des millénaires est liée à l'augmentation de la population dans chacun des foyers d'origine. En effet, ces communautés, mieux nourries que les autres se sont progressivement agrandies, conduisant à une exploitation totale des terres disponibles à cet endroit. Ainsi, une partie de la population a migré vers d'autres régions fertiles proches, entraînant au fil du temps et des générations une expansion des pratiques dans des zones de plus en plus éloignées du foyer d'origine. Etant donné que les outils de travail du sol et de désherbage ne sont pas disponibles à cette époque, les premières cultures se sont donc établies sur des terres déjà fertilisées et défrichées naturellement (par exemple les zones de crue de rivières) ou artificiellement (proximité des habitations qui reçoivent les déchets domestiques) (Bertin, 2020b ; Mazoyer et *al.*, 2021).

1.1.2 Le système de l'abattis-brûlis

Au cours du temps, l'apparition d'outils tels que la hache ont permis l'exploitation de formations boisées et dans ce cas la technique de « l'abattis-brûlis » était pratiquée. Cette technique consiste à abattre et brûler la végétation présente sur une certaine zone, permettant ainsi une fertilisation du sol juste avant l'implantation de cultures. Les zones défrichées et brûlées peuvent accueillir des cultures durant quelques années et ensuite une jachère forestière est instaurée pendant une vingtaine d'années afin de permettre une restauration de la fertilité sur cette zone. Ainsi, de nouvelles parcelles sont défrichées chaque année afin d'assurer une sécurité alimentaire et un retour de fertilité suffisant dans les parcelles précédemment exploitées. Ce système de culture a été pratiqué dans de nombreuses régions boisées du monde, permettant une croissance démographique importante. Cependant cette population croissante devant être nourrie, la technique de l'abattis-brûlis s'est fortement intensifiée avec des défrichages de plus en plus importants et

une réduction de la jachère forestière ce qui a inévitablement conduit à une déforestation progressive. S'en est suivie une crise écologique et alimentaire qui a exigé l'émergence de nouveaux systèmes de cultures, très différenciés selon les régions. Néanmoins, la mise en place de ces nouveaux systèmes post-forestiers s'est faite de manière très lente car elle a nécessité le développement de nouveaux outils, de nouveaux modes de renouvellement de la fertilité et de défrichement (Bertin, 2020b ; Mazoyer et *al.*, 2021).

1.1.3 Système associant culture et élevage à l'Antiquité

En Europe antique, la surexploitation des forêts *via* le système d'abattis-brûlis a entraîné une dégradation de celles-ci, les forêts ont donc été converties en pâturages permanents (*saltus*). Les cultures quant à elles ont été rassemblées dans les zones basses bénéficiant d'un alluvionnement (*ager*). De cette manière, un nouveau système dit « à jachère et parcage animal » a émergé, celui-ci associe donc culture et élevage. Les terres cultivées étaient consacrées aux céréales en alternance avec une friche herbeuse (la jachère) formant ainsi une rotation biennale. Afin d'assurer un renouvellement de la fertilité, le bétail pâturait le jour dans les zones herbeuses et était parqué la nuit dans la jachère afin que celle-ci reçoive les déjections. Ce système a pu voir le jour grâce à l'apparition de nouveaux outils permettant de défricher la jachère herbeuse tel que l'araire, la houe et la bêche mais aussi grâce à un nouveau mode de renouvellement de la fertilité permis par le bétail. L'araire, outil à traction animale, apparaît comme l'un des premiers outils de travail du sol efficace qui permet de scarifier le sol de manière superficielle sans le retourner, éliminant les mauvaises herbes de manière grossière.

Malgré l'apparition de nouveaux outils permettant un travail du sol superficiel et l'élaboration de nouveaux systèmes agraires, l'Antiquité n'est pas une époque prospère d'un point de vue alimentaire en raison des faibles rendements et de la faible productivité du travail agricole. En effet, le système à jachère et parcage animal n'est en réalité pas plus productif que le système d'abattis-brûlis. Ainsi, cette période s'est traduite par des guerres quasi-permanentes, de l'esclavage, des périodes de disettes et famines ainsi qu'une stagnation de la population européenne (Bertin, 2020b ; Mazoyer et *al.*, 2021).

1.1.4 Les innovations du Moyen-Âge

Au Moyen-Âge, trois innovations majeures et complémentaires vont faire leur apparition, permettant le passage vers un nouveau système agricole : le système à jachère et stabulation. Ces innovations sont la faux, la charrue et l'amélioration des moyens de transport. L'apparition de ces outils est à mettre en lien avec l'essor de la métallurgie vers l'an 1000, permettant la fabrication d'outils de bonne qualité. Ainsi, la faux va permettre la récolte du foin, autorisant ainsi l'augmentation du troupeau dont le nombre était jusqu'alors limité par

la disponibilité en ressources herbeuses l'hiver (cas des régions tempérées froides). Des granges et étables vont donc faire leur apparition pour accueillir le bétail et le stockage du foin pour l'hiver. Grâce à l'amélioration des transports, ce foin peut être transporté efficacement et le fumier issu de l'étable peut être conduit vers les jachères. Ensuite la charrue, outil plus lourd tiré par des animaux, sert à enfouir ce fumier de manière efficace mais joue également un rôle de désherbage. En effet, la charrue, contrairement à l'araire, permet un travail du sol plus profond et un retournement de celui-ci, ainsi le labour fait son apparition. Les jachères mieux fumées et ensemencées permettent une augmentation des rendements céréaliers. Les effets fertilisants prolongés du fumier permettent la culture de céréales de printemps l'année suivant la céréale d'hiver, il y a donc un passage à une rotation triennale. A nouveau, les rendements croissants ainsi que l'abondance de produits animaux permettent une hausse de la population. Aussi, l'augmentation de la productivité du travail grâce aux outils permet le dégagement d'un surplus permettant ainsi à une partie de la population de se consacrer à des activités non agricoles. Tout cela a permis un essor artisanal, urbain ou encore culturel et de nouvelles classes sociales ont fait leur apparition.

Cependant, au XIII^{ème} siècle l'histoire se répète avec les premiers signes de surpeuplement et donc de surexploitation de l'écosystème cultivé. Il y a une augmentation des proportions de cultures par rapport aux herbages, fragilisant ainsi l'équilibre du système. Une cascade de conséquences s'en suivent : les troupeaux sont réduits, la disponibilité en fumier diminue, les rendements en céréales chutent. La population affaiblie devient la proie d'épidémies ravageuses, notamment la peste noire au milieu du XIV^{ème} siècle (Virgili, 2015 ; Mazoyer et *al.*, 2021) qui décime la population. Des guerres ont également éclaté, n'améliorant pas la situation de l'époque. Finalement la situation se calme dans la seconde moitié du XV^{ème} siècle où la population se reconstruit progressivement.

L'histoire des systèmes agraires au cours du temps permet de mettre en lumière un facteur crucial de tout système agraire : le maintien de la fertilité. Si un système ne parvient pas à maintenir un niveau de fertilité suffisant pour les productions, celui-ci est voué à disparaître (Bertin, 2020b).

1.1.5 La mise en culture des jachères

Dans le but d'augmenter les productions, la jachère a progressivement été remplacée par des cultures permettant à la fois une restauration de la fertilité et une lutte contre les adventices (tel que des légumineuses par exemple) (Bertin, 2020b). Ce nouveau système sans jachère est apparu à partir du XV^{ème} siècle mais des freins juridiques, économiques et sociaux ont fortement ralenti son développement, contrairement aux systèmes précédents où les limitations étaient plutôt d'ordre techniques. Le principal obstacle juridique étant le droit de vaine pâture. Ce droit autorisait tout propriétaire de bétail à faire pâturer son cheptel sur les

jachères d'autrui, les jachères étaient donc un bien commun. Il a donc fallu du temps pour déconstruire ce système et aboutir au développement de la propriété privée. De cette manière, de nouvelles rotations ont fait leur apparition, rendant les systèmes beaucoup plus complexes avec l'introduction de nouvelles cultures. Le calendrier agricole devenant surchargé, de nouvelles machines font leur apparition comme la batteuse ou la faucheuse mécanique. D'un point de vue du travail du sol, la charrue reste le principal outil de désherbage et d'enfouissement du fumier, elle subit des améliorations au cours du temps mais reste l'outil le plus efficace.

Ce système sans jachère permet une amélioration de l'alimentation et les surplus importants permettent de nourrir une population non-agricole en croissance. Cela a sans nul doute permis de soutenir les activités industrielles en forte hausse à cette époque (Bertin, 2020b, Mazoyer *et al.*, 2021).

1.1.6 Révolutions industrielles et impact sur l'agriculture

C'est au XIX^{ème} siècle que la première révolution industrielle a lieu avec l'invention de la machine à vapeur et par conséquent l'amélioration des transports. Cette innovation va permettre d'assurer l'approvisionnement en engrais et amendements ainsi que la commercialisation des surplus dans d'autres régions. Mais elle va également être la cause d'un exode rural et d'une première crise de surproduction.

Ensuite au XX^{ème} siècle, la motorisation fait son apparition ouvrant la porte vers une deuxième révolution industrielle. Ainsi, la traction animale est remplacée par des tracteurs et par la suite d'autres machines sont motorisées comme la moissonneuse-batteuse ou la faneuse. Ces machines vont permettre d'augmenter considérablement la superficie exploitable par agriculteur. Ainsi la productivité du travail est amplement améliorée. La productivité du sol se voit également améliorée avec le développement de la chimie agricole (pesticides, engrais) et l'amélioration génétique, c'est la révolution verte.

Les révolutions industrielles permettant l'accès aux engrais et le remplacement de la traction animale par les tracteurs, le bétail ne paraît plus indispensable ni pour le renouvellement de la fertilité ni pour les travaux en champs. Ainsi culture et élevage ne vont plus se faire de manière complémentaire. On assiste à une spécialisation des régions en certains produits agricoles avec des régions spécialisées dans les cultures et d'autres spécialisées dans l'élevage (Bertin, 2020b).

Ce système issu de la révolution verte est encore à la base de nombreuses pratiques agricoles actuelles. Cependant ce système est remis en question depuis plusieurs années et de nombreuses alternatives émergent pour s'affranchir notamment des intrants de synthèse ou du labour, comme on va le voir plus en détail dans la suite de ce travail.

1.2 Le travail du sol en agriculture conventionnelle

1.2.1 Définition et itinéraire classique en agriculture conventionnelle

Le travail du sol peut être défini comme « travail permettant d'obtenir un état du sol favorable à la mise en place des cultures et à leur développement racinaire. Il permet l'entretien du sol et la réorganisation de sa structure en vue d'accueillir une nouvelle culture dans les meilleures conditions agronomiques et économiques » (Angonin, s.d).

Les techniques de travail du sol sont nombreuses et sont généralement classées selon la profondeur de travail (sous-solage, travail profond et superficiel) (AgroParisTech, 2012).

Un exemple des différentes opérations classiquement réalisées pour la mise en place de céréales en système conventionnel est présenté à la figure 1.

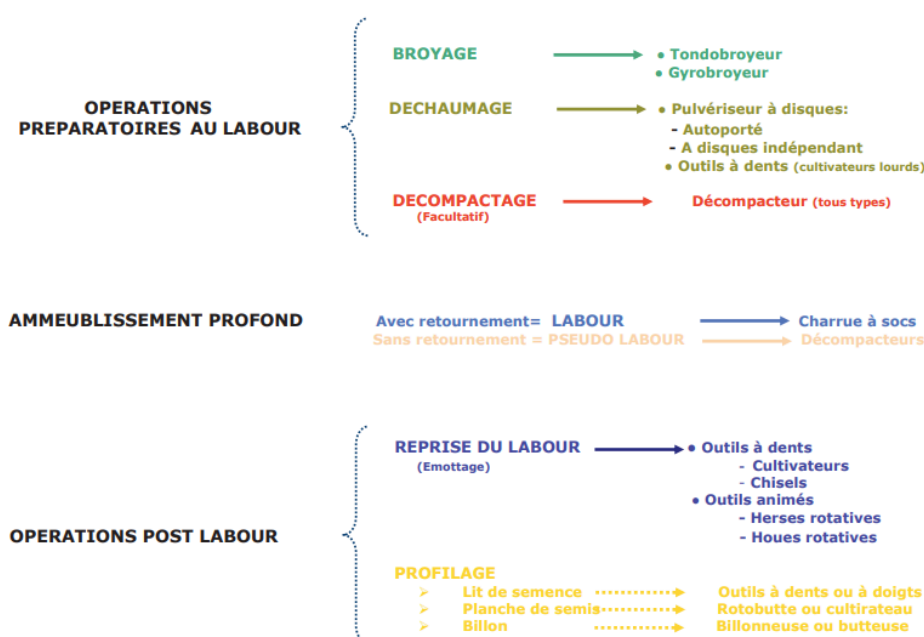


Figure 1 : Exemple de travaux du sol réalisés pour l'implantation de céréales en agriculture conventionnelle.

Source : Angonin, s.d

Dans le cas où un couvert a été mis en place, un broyage de celui-ci est réalisé afin de faciliter sa dégradation. Le déchaumage est un travail superficiel du sol qui sert à arracher et enfouir les chaumes d'une précédente culture, généralement des céréales ou maïs. Le décompactage quant à lui est un travail profond du sol, qui a pour but de l'ameubler ou de détruire une semelle de labour¹ par exemple. Vient ensuite le labour, travail du sol central en agriculture conventionnelle. Il est réalisé à l'aide d'une charrue à socs et entraîne un retournement de l'horizon travaillé. Ses principaux rôles sont l'enfouissement des amendements et résidus de culture, la destruction des adventices et repousses ainsi que l'ameublissement de l'horizon

¹ Couche compacte de sol résultant du travail du sol

travaillé (Bertin, 2020a). Le labour étant l'un des éléments principaux de cette étude, il sera présenté de manière plus approfondie au point suivant. Les opérations qui succèdent au labour permettent de travailler le sol plus finement dans le but d'obtenir un lit de semences favorable à la germination et levée de la culture (AgroParisTech, 2012).

Il est cependant important de noter que les travaux du sol doivent être adaptés selon l'état général de la parcelle, le précédent cultural, la culture à planter ou encore en fonction des possibles risques phytosanitaires. Par exemple, à la suite d'une culture de betteraves le sol est généralement propre et meuble, un travail du sol superficiel est alors suffisant (Bertin, 2020a ; Livre Blanc Céréales, 2017).

1.2.2 Le labour plus en détails

Le labour est une technique de travail du sol apparue au Moyen-Âge et qui est encore largement utilisée aujourd'hui en agriculture conventionnelle. Les outils ont bien évidemment évolué depuis cette époque et actuellement le labour est classiquement réalisé à l'aide d'une charrue à socs réversibles (Figure 2) dont la profondeur de travail est généralement de 20 à 30 cm. La charrue réversible permet la réalisation d'un labour à plat, c'est-à-dire un labour où la terre est toujours versée du même côté peu importe le sens d'avancement. Le côté de retournement est généralement inversé d'une année à l'autre (Biielders, 2020).

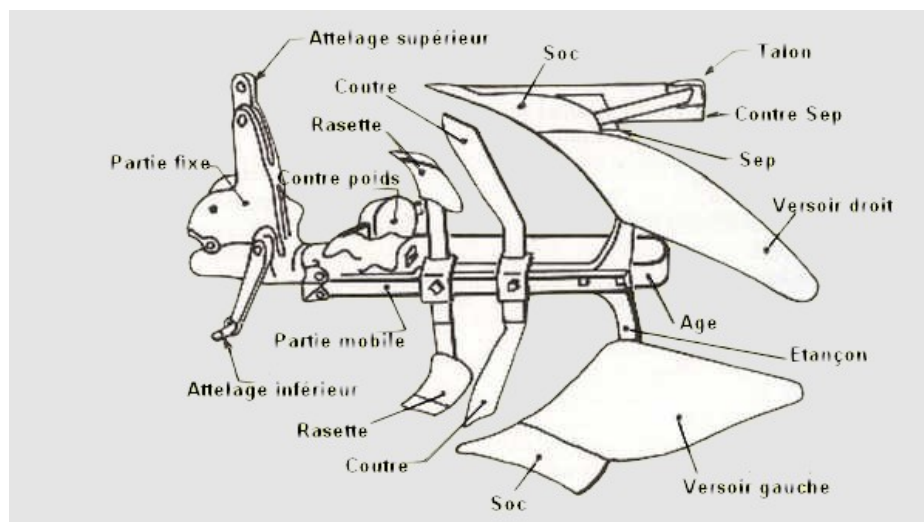


Figure 2 : Schéma représentant une charrue à socs réversibles et l'ensemble de ses composantes.

Source : Le Gall P. (2016)

Le principe de fonctionnement du labour est le suivant (Figure 3) : Le soc coupe le sol de manière horizontale, le coutre coupe le sol de manière verticale et ensuite le versoir retourne le sol découpé. La rasette, pièce présente avant le coutre et le soc, est destinée à enfouir une bande de terre superficielle dans le fond du sillon afin d'éviter les repousses d'adventices qui

s'y trouvent. De cette manière, on obtient des bandes constituées de sol retourné et exemptes d'adventices.

Mouvement de la terre au cours du labour

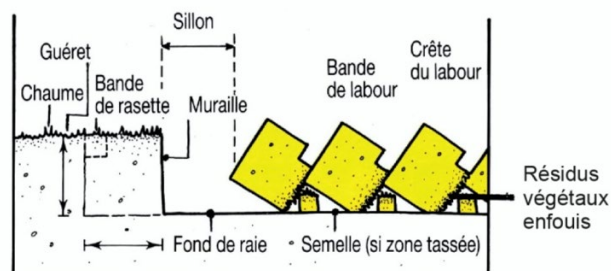


Figure 3 : Représentation du mouvement de la terre au cours du labour.

Source : Arvalis, 2020.

Chaque technique de travail du sol a inévitablement un impact sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Mais, en raison du retournement des horizons, le labour est considéré comme la technique de travail du sol qui impacte le plus ces propriétés. On peut notamment citer l'impact sur la structure du sol, l'activité biologique de la micro- et macrofaune du sol ou encore la modification de la distribution du carbone (AgroParisTech, 2012). Ces thématiques sont décrites plus en détail au point 1.4.

Le labour reste tout de même largement utilisé en raison de ses nombreux avantages tels que l'ameublissement en vue de la préparation du lit de semence, l'enfouissement complet des adventices, résidus de cultures et amendements, le développement d'une structure des couches inférieures dû au retournement du sol, l'exposition du sol aux effets bénéfiques du gel sur la structure, le mélange des nutriments dans tout le profil ou encore la réduction des risques de maladies des cultures (Soane et al., 2012 ; Duquet, 2017).

1.2.3 La remise en question du labour

Dans le contexte du changement climatique et de la croissance de la population mondiale, les systèmes agricoles font face à un challenge de taille : assurer une sécurité alimentaire tout en renforçant la durabilité de l'agriculture. Dans cette optique, les systèmes conventionnels intensifs² sont remis en question et ceci inclut entre autres la pratique du labour. Le phénomène du « Dust Bowl » ayant eu lieu dans les années 30 aux Etats-Unis est à l'origine des préoccupations concernant la conservation des sols et l'incidence du labour. L'une des causes avancées pour expliquer ce phénomène est l'agriculture intensive (incluant le labour, généralement sans apport de matière organique) pratiquée à l'époque. En effet, celle-ci a entraîné une dégradation de la qualité des sols traduite par une diminution du carbone, une perte de stabilité, le tout ayant conduit à une érosion massive des sols de nombreuses régions

² Système visant la maximisation des rendements *via* l'usage d'intrants.

agricoles du pays. C'est ce phénomène qui a incité le développement d'approches sans labour en vue d'améliorer l'état général des sols (Pittelkow et al., 2015).

Le phénomène du Dust Bowl a donc permis de remettre en question la pratique du labour et illustre l'un de ses inconvénients majeurs : l'augmentation des risques d'érosion dû à une réduction de la matière organique en surface. A court terme, le labour accélère la dégradation de la matière organique qui est bénéfique pour la croissance des plantes. Cependant, à long terme cette minéralisation accrue entraîne des pertes de matière organique néfaste pour le sol (Skaalsveen et al., 2019). D'autres contraintes dues au labour ont été mises en évidence dont les principales sont : la réduction de la perméabilité des sols dû à une forte compaction en profondeur, la perturbation de la macrofaune et plus particulièrement les vers de terre ou encore l'impact négatif à long terme sur l'activité microbienne.

C'est donc l'ensemble de ces contraintes qui ont encouragé à repenser le système agricole en place et qui ont abouti au développement d'un ensemble de techniques plus durables et plus favorables au sol tel que l'agriculture de conservation.

1.3 L'agriculture de conservation

1.3.1 Principes

Les préoccupations concernant l'érosion des sols aux Etats-Unis dans les années 30 sont donc à l'origine du développement d'une agriculture se voulant plus respectueuse du sol et plus durable. Il y a eu une prise de conscience envers le fait que le sol n'est pas un support de production inerte mais bien un lieu de vie, de biodiversité qu'il faut traiter comme tel (Waligora, 2019). De là s'est développé l'agriculture de conservation (AC) qui se base sur trois principes majeurs : la perturbation minimale du sol, la rotation des cultures ainsi que la couverture permanente du sol par l'intermédiaire notamment de cultures de couvertures (Giller et al., 2015; Pittelkow et al., 2015).

L'expansion de l'AC dans les autres parties du monde ne s'est cependant faite que plusieurs dizaines d'années plus tard, dans les années 90, grâce à la combinaison de plusieurs facteurs facilitant son usage tels que la disponibilité en herbicides efficaces, le développement de plantes résistantes ou encore l'amélioration des technologies de semis-direct et de non-labour. Depuis une quinzaine d'années, l'AC fait l'objet d'un engouement croissant et est vivement soutenue par la Food and Agriculture Organization des Nations Unies (FAO) (Giller et al., 2015). Selon Giller et al. (2015), les raisons de son succès grandissant résident dans la combinaison de plusieurs éléments. Tout d'abord, il y a une conviction que la perturbation du sol n'est pas durable, que cela entraîne sa dégradation, réduit le stock de carbone et peut conduire à une érosion hydrique et éolienne. L'AC est alors vue comme une solution à la

problématique d'érosion des sols. Deuxièmement, le non-labour combiné aux autres principes de l'AC améliore la « santé du sol » qui peut se traduire par une augmentation des rendements selon Kassam et *al.* (2014) mais en réalité l'impact du non-labour et de l'AC sur le rendement est plus nuancé comme le montre Pittelkow et *al.* (2015), on y reviendra plus en détail par la suite. Troisièmement, l'appellation « agriculture de conservation » est interprétée comme représentant une agriculture durable, à faibles intrants et favorisant la biodiversité. Cette idée est cependant à nuancer également dû à l'utilisation importante d'herbicides en AC (Bajwa, 2014). Enfin, les similitudes de l'AC par rapport à un système naturel, notamment au travers de la couverture continue du sol peut également permettre d'expliquer l'attrait de l'AC ces dernières années.

Il est cependant important de souligner que l'AC regroupe une grande diversité de pratiques, approches et conceptions différentes qui peuvent parfois porter à confusion. Ainsi sous le terme AC sont notamment regroupées les techniques de non-labour, zéro labour, labour minimum, labour réduit ou semis direct. Les techniques culturales simplifiées (TCS)³ sont également considérées comme faisant partie de l'AC (Wacker et al, 2018). La diversité des pratiques de l'AC est présentée à l'annexe 1.

1.3.2 Le non-labour plus en détails

Le passage d'un système conventionnel vers des techniques culturales sans labour, en combinaison aux autres principes de l'AC présente de nombreux avantages pour le sol. Comme déjà évoqué, le non-labour permet de réduire les risques d'érosion grâce à l'amélioration de la structure du sol. L'abandon du labour est bénéfique à l'activité biologique de la micro- et macrofaune de sol mais améliore également la capacité de rétention et d'infiltration de l'eau. De plus, les coûts de production peuvent être réduits et la rentabilité augmentée en raison de l'énergie et travail épargné par l'arrêt du labour. Il y a également une contribution potentielle du non-labour dans l'amélioration des services écosystémiques fournis par le sol tels que la séquestration du carbone ou la réduction des émissions de gaz à effets de serres. Cependant ces bénéfices ne seraient pas aussi largement observés qu'on le pensait auparavant (Pittelkow et al., 2015). L'incidence du labour et de son abandon sur les services écosystémiques du sol sont présentés plus en détail au point 1.4. En ce qui concerne l'influence du non-labour sur la productivité des cultures, aucun consensus n'existe quant à une augmentation, réduction ou maintien des rendements en comparaison aux systèmes conventionnels. Pittelkow et *al.* (2015) montrent qu'en réalité les résultats dépendent fortement de la culture étudiée, du climat ou encore de la durée de la conversion en non-labour. Une période de transition est généralement observée lors de la conversion d'un système conventionnel à un système sans labour caractérisée par une baisse de rendement,

³ Techniques regroupant l'ensemble des itinéraires de travail du sol sans retournement de ce dernier (Wacker et al. 2018).

toutes cultures confondues, mais qui tend à s'améliorer après 5 ans ou plus. Cependant, la durée de cette transition est variable d'une étude à l'autre (Pittelkow et al., 2015).

L'abandon du labour présente néanmoins plusieurs aspects négatifs. Parmi ceux-ci, on peut notamment citer les problèmes d'implantation des cultures en situation très humide ou très sèche, les risques de compaction en surface, la stratification des nutriments, les difficultés d'incorporation du fumier ou encore le risque accru de maladies transmises par le sol. En effet, certains pathogènes (notamment ceux responsables de la septoriose et fusariose des épis) présentent la capacité de survivre sur les résidus de culture. Dès lors, le labour est considéré comme une méthode de lutte efficace contre ces pathogènes et son abandon peut entraîner une recrudescence de ce type de maladie. Le couplage du non-labour avec les autres principes de l'AC permettent de limiter ce risque.

Cependant la préoccupation majeure lors du passage d'un système conventionnel vers un système sans labour est la gestion des adventices. En effet, le rôle principal du labour est le désherbage et dans le cas où celui-ci est abandonné, il est nécessaire de trouver des alternatives efficaces pour lutter contre ces adventices. Bajwa (2014) montre que les difficultés de gestion des adventices en AC est l'une des raisons majeures de la réticence des agriculteurs à l'égard de son adoption. Il présente également que le non-labour et l'AC de manière plus générale affecte la population d'adventices en terme de densité et de distribution des espèces. L'alternative de lutte actuelle la plus efficace contre les adventices est l'utilisation d'herbicides chimiques et c'est cette méthode qui est généralement utilisée en AC, avec des taux d'application semblables aux systèmes conventionnels (Bajwa, 2014). Comme évoqué précédemment, cette méthode de lutte, bien que la plus facile, est contradictoire aux valeurs portées par l'AC. Les effets des herbicides chimiques sur l'environnement sont non négligeables en raison de leur persistance dans les sols. Ils peuvent contaminer les eaux souterraines et impacter négativement la population microbienne de la rhizosphère (Bajwa, 2014). De plus, le développement de résistances aux herbicides, dues à l'application fréquente des mêmes substances actives représente un problème majeur pour l'ensemble des cultivateurs mais plus particulièrement pour ceux pratiquant l'AC dû à leur forte dépendance aux herbicides chimiques. A cet égard, Bajwa (2014) propose une gestion intégrée des adventices par l'utilisation de différentes méthodes de lutte qui combinées permettent d'agir efficacement contre les adventices (Figure 4). Parmi celles-ci on retrouve notamment le désherbage mécanique, les bioherbicides ou encore les cultures de couverture. Il est important de noter qu'éliminer totalement les herbicides dans la lutte contre les adventices est complexe mais les méthodes de lutte intégrée permettent de réduire considérablement les quantités nécessaires. Evidemment, l'utilisation massive d'herbicides comme seule méthode de lutte est loin d'être une généralité en AC et il faut rappeler que les couverts jouent également un rôle dans la gestion des adventices. Waligora (2019) explique que les herbicides chimiques et plus particulièrement le glyphosate ont été une aubaine, un pilier pour la simplification du travail du sol mais qu'au cours des dernières années, leur

utilisation a été considérablement réduite grâce aux meilleures connaissances concernant les couverts mais aussi grâce à la lutte intégrée.

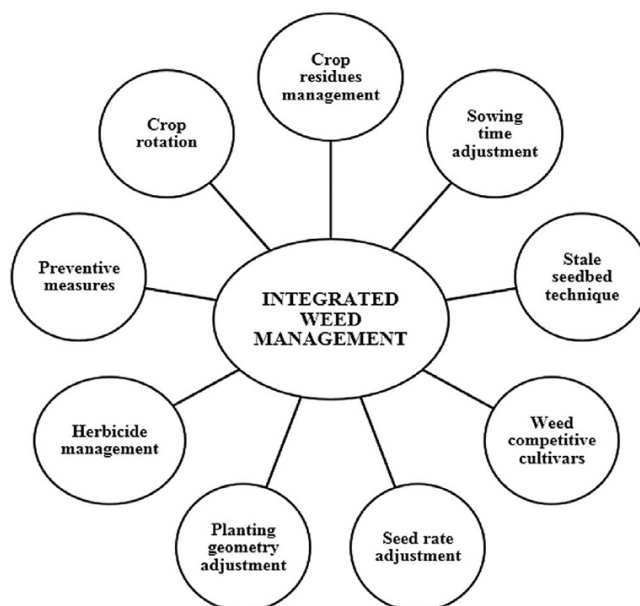


Figure 4 : Composants pour une gestion intégrée des adventices en AC

Source : Bajwa, 2014.

Il a été mentionné précédemment que l'AC présente un gain de temps car le travail nécessaire pour la préparation du sol est réduite. Néanmoins, les difficultés de gestion des adventices peuvent entraîner un travail plus important pour le désherbage comparé à un système conventionnel (Bajwa, 2014).

1.3.3 Implantation de céréales en non-labour

L'implantation de céréales en non-labour dépend du précédent cultural. Dans le cas où un couvert est en place, le semis peut se faire au sein de celui-ci. Lorsque le précédent est une culture de betterave ou de pomme de terre, comme c'est le cas des parcelles étudiées dans le cadre de ce mémoire, la préparation du sol peut se limiter à la couche superficielle *via* un déchaumage ou chisel par exemple (Livre Blanc Céréales, 2017).

Pittelkow et *al.* (2015) montrent que les rendements en culture de blé sont très peu impactés sous système non labouré installé à long terme. Après la période de transition au cours de laquelle une diminution de rendement peut être observée, ceux-ci progressent ensuite et atteignent des taux semblables à ceux observés en agriculture conventionnelle. Les raisons avancées pour expliquer la baisse de rendement lors de la période de transition sont que les effets bénéfiques de la réduction du travail du sol sur sa structure prennent un certain temps à se développer et tardent donc à se traduire sur le rendement. De plus, le manque de connaissances dans les premières années suivant cette transition peut également jouer un rôle dans la diminution des rendements (Soane et *al.*, 2012).

1.4 Les services écosystémiques fournis par le sol et impact du travail du sol sur ceux-ci

Les services écosystémiques sont définis comme étant les biens et services que les hommes peuvent tirer des écosystèmes, directement ou indirectement, pour assurer leur bien-être (nourriture, qualité de l'eau, paysages, etc.) (Sirami C and *al.*, 2016). Une notion allant de pair avec le concept des services écosystémiques est la notion de « capital naturel », défini comme étant un stock de matière et d'information contenu dans un écosystème. Ainsi, le sol est considéré comme un capital naturel caractérisé par ses stocks de matière et de biodiversité mais aussi par les flux qu'il génère et qui permettent la fourniture d'un certain nombre de services répondant à des besoins humains (Walter et al., 2015). Les services écosystémiques sont regroupés en quatre catégories : les services d'approvisionnement, les services de régulation, les services culturels et les services d'auto-entretien. Les services de régulation sont l'ensemble des services obtenus à partir des processus de régulation des écosystèmes, comme la régulation climatique, les processus de régulation de l'eau, la purification de l'eau ou la régulation des maladies. Les services de régulation sont également des processus qui canalisent certains phénomènes naturels et qui ont un impact positif sur le bien-être humain comme par exemple la protection contre les catastrophes naturelles, l'atténuation des pollutions de l'eau et de l'air, etc. (Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

C'est cette catégorie de services qui est analysée plus en détail dans le cadre de ce mémoire et plus particulièrement l'impact du travail du sol sur certains de ces services.

1.4.1 Services écosystémiques fournis par les vers de terre

Les vers de terre contribuent à plusieurs services écosystémiques notamment *via* leurs rôles dans la formation du sol, la structure du sol, la régulation de l'eau, l'aération des couches de sol plus profondes ou encore le cycle des nutriments. Ils sont considérés comme des « ingénieurs de l'écosystème » en raison de leur large impact sur la structure du sol (Blouin et al., 2013). Les vers de terre peuvent être classés en trois catégories écologiques principales pouvant contribuer de manière différente aux processus écologiques et donc aux services écosystémiques. Les espèces épigées vivent à la surface du sol, au sein de la litière et produisent des turricules (déjections) affectant la rugosité et la distribution des macropores du sol. Ils contribuent de manière limitée au mélange des couches organiques et minérales en se nourrissant de la litière. Les espèces anéciques forment des galeries verticales profondes bénéfiques pour l'infiltration d'eau. Ils incorporent la litière de la surface vers les couches de sol plus profondes mais transportent aussi des matières minérales des profondeurs vers la surface par l'intermédiaire de leurs turricules. Enfin, les espèces endogées réalisent des galeries horizontales temporaires et fortement ramifiées ainsi que de nombreuses turricules.

Ils consomment principalement des matières minérales du sol mélangées à des matières organiques à différents stades de décomposition (Blouin et al., 2013; Eisenhauer, 2010).

Le processus de formation des sols est un processus lent dépendant notamment des conditions climatiques et de la nature de la roche mère. Ce mécanisme implique la dégradation de matériaux primaires ainsi que l'incorporation de matière organique. Les vers de terre contribuent à ce processus *via* les turricules qu'ils produisent ainsi qu'au mélange du sol qu'ils sont capables d'opérer. Plusieurs études montrent que la quantité de sol ramenée à la surface par les vers de terre sous forme de turricules peut atteindre $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ce qui équivaut à une épaisseur de sol d'environ $0,4 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$. Une autre contribution importante des vers de terre est l'enfouissement de la matière organique en profondeur ainsi que le transfert de particules de sol en surface (Blouin et al., 2013).

L'agencement des particules du sol et des espaces interstitiels associés donne lieu à la structure du sol. Elle peut être influencée notamment par le taux de matière organique, le travail du sol mais aussi par l'activité des vers de terre. Leur impact sur la structure du sol réside ici aussi dans leur capacité d'enfouissement de la matière organique et la formation de turricules (Blouin et al., 2013).

Grâce aux nombreuses galeries qu'ils produisent, les vers de terre contribuent également à une meilleure porosité du sol, améliorant ainsi la capacité d'infiltration d'eau mais aussi l'aération des couches profondes de sol. Ceci peut se traduire par une réduction des risques de ruissellement et donc d'érosion (Fockedey et Belin, 2021).

Le travail du sol peut impacter négativement la population de vers de terre. Van Capelle et al. (2012) montrent que l'abondance, la biomasse et la diversité des espèces de vers de terre sont significativement améliorées dans les systèmes à faible intensité de travail du sol. L'augmentation de l'abondance et biomasse peuvent s'expliquer par la combinaison de plusieurs facteurs tels que la réduction des blessures dues aux outils, une moindre exposition aux prédateurs à la surface du sol ou encore l'augmentation de la disponibilité en matière organique qui constitue une source de nourriture idéale pour les vers de terre. L'abondance de chacun des groupes écologiques peut se voir impactée par l'intensité du travail du sol. Les espèces anéciques et endogées sont favorisées dans les systèmes sans labour. Par contre, plusieurs études montrent que les épigés ne semblent pas être impactés par le travail du sol. Ainsi, chaque groupe écologique est affecté différemment pour un même type de travail du sol mais les systèmes en non-labour sont les systèmes de gestion qui fournissent les meilleures conditions pour les vers de terre, optimisant ainsi les services qu'ils prodiguent (van Capelle et al., 2012). Selon Soane et al. (2012), la formation de turricules sous la surface du sol contribue à une plus grande stabilité des agrégats dans les sols sans labour.

Il est cependant important de noter que le travail du sol n'est pas la seule composante influençant les populations de vers de terre. En effet, les études montrent l'interaction de plusieurs facteurs tels que la disponibilité en matière organique, la texture du sol, la saison, le pH ou encore l'occupation du sol (culture, prairie, forêts, etc.) (van Capelle et al., 2012 ; Fockedey et Belin, 2021).

1.4.2 Matière organique du sol

La matière organique du sol se compose d'organismes vivants, de débris végétaux et animaux ainsi que des composés à différents stades de décomposition. La matière organique joue un rôle fondamental dans le stockage des éléments nutritifs disponibles pour les plantes *via* la capacité d'échange cationique (CEC). Elle est également une source d'énergie pour les différents organismes du sol, assurant ainsi un maintien de l'activité biologique. La matière organique contribue également à l'amélioration des propriétés physiques du sol en favorisant l'agrégation et ainsi bénéfique à la stabilité structurale du sol. L'ensemble des fonctions remplies par la matière organique du sol sont visibles à la figure 5. Elle représente également le réservoir de carbone le plus important (Lefèvre, 2015).



Figure 5 : Fonctions remplies par la matière organique du sol

Source : Lefèvre, 2015

La dynamique de décomposition de la matière organique est fonction de ses flux entrant qui sont principalement la litière végétale et ses flux sortant qui sont la minéralisation ainsi que les pertes par lixiviation et ruissellement (Lefèvre, 2015).

La litière, aussi appelée matière organique fraîche (MOF) peut subir une minéralisation par les microorganismes du sol et aboutir à des composés dissous et gaz, c'est une décomposition qui est qualifiée de rapide. La MOF peut également subir une humification, c'est-à-dire un ensemble de transformations physiques et biochimiques qui conduisent à la formation de l'humus. Cette transformation est plus lente que le processus de minéralisation (Figure 6). Il y

a donc une hétérogénéité de temps de résidence de la matière organique du sol avec une décomposition rapide *via* la minéralisation et une décomposition plus lente *via* l'humification. Cette différence de vitesse de dégradation permet de distinguer deux fractions dans la matière organique du sol : la matière organique stable, soit celle se dégradant de manière lente et la matière organique labile, soit la fraction se dégradant rapidement (Lefèvre, 2015).

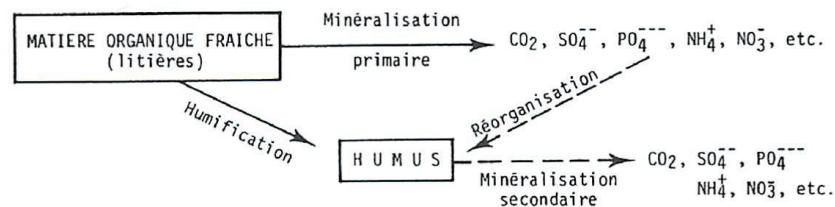


Figure 6 : Processus de décomposition de la matière organique fraîche (MOF)

Source : Lefèvre, 2015

La décomposition de la matière organique est un bon indicateur de la qualité⁴ des sols et représente un service écosystémique fondamental pour les écosystèmes cultivés (Houben et al., 2018).

Les effets du labour sur la matière organique du sol sont bien étudiés. Le labour entraîne une destruction des agrégats du sol et expose le carbone organique à la décomposition microbienne, conduisant à la libération de CO₂. A court terme, le labour accélère la dégradation de la matière organique qui est bénéfique pour la croissance des plantes. Cependant, à long terme cette minéralisation accrue entraîne des pertes de matière organique néfaste pour le sol (Skaalsveen et al., 2019). La matière organique conférant cohérence et stabilité aux agrégats du sol, sa dégradation n'est donc pas bénéfique à ce point de vue. Le labour permet une répartition uniforme du carbone organique dans tout le profil. Dans le cas de systèmes en non-labour on observe une stratification de ce carbone organique avec une concentration plus importante en surface (0-20 cm de sol) et une concentration plus faible en profondeur (Blanco-Canqui and Wortmann, 2020).

⁴ Capacité d'un type de sol spécifique à fonctionner efficacement en favorisant la survie des plantes et des animaux sans menacer la qualité de l'environnement (Houben et al., 2018).

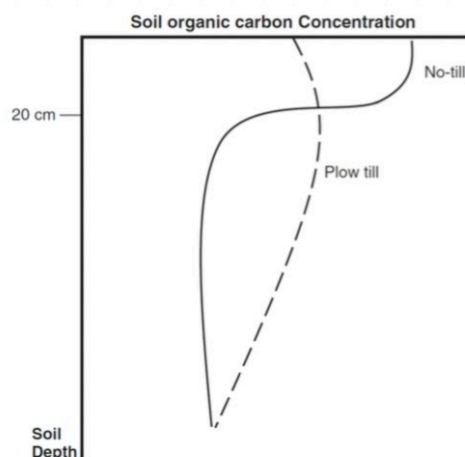


Figure 7 : Schéma de la distribution du carbone organique en fonction de la profondeur en système labouré (Plow till) et non-labouré (No-till)
Source : Bertin, 2020b.

La pratique du labour est associée à une réduction du carbone organique du sol mais ceci est encore sujet à débat en raison de l'influence du type de sol, méthode de travail du sol ou encore la profondeur de la mesure. Les systèmes en non-labour tendent à augmenter le carbone organique du sol mais uniquement en surface, aboutissant plutôt à une modification de la distribution du carbone selon la profondeur, comme le présente la figure 7 (Haddaway, 2016). Cela peut se traduire par une meilleure stabilité des agrégats en surface dans ces systèmes (Busari et al., 2015).

Par contre, les modifications des taux de carbone organique lors d'une conversion d'un système conventionnel vers un système sans labour sont moins étudiées. Van Wesemael et al. (2019), dans leur étude de la dynamique de la matière organique selon le travail du sol, montrent que le taux de carbone organique labile est sensible aux changements de pratiques et observent une augmentation de celui-ci pour un sol en non-labour depuis 2008, comparé à un sol sous gestion conventionnelle. Selon eux, le changement de taux de carbone organique labile serait visible environ 5 ans après le changement de pratique.

1.4.3 L'eau dans le sol

Deux propriétés hydrauliques importantes du sol sont la capacité de rétention ainsi que la conductivité hydraulique. La capacité de rétention représente la capacité du sol à stocker et retenir une certaine quantité d'eau tandis que la conductivité hydraulique représente le débit d'eau pouvant s'infiltrer au sein du sol par unité de temps. Ce sont des éléments clés dans la détermination du mouvement de l'eau dans les sols mais aussi pour évaluer son accessibilité pour les plantes. Ces propriétés hydrauliques jouent un rôle dans le service écosystémique d'atténuation des inondations et peut permettre de limiter l'impact d'événements climatiques extrêmes. Par exemple, lors de fortes pluies, l'excès d'eau ne pouvant pas s'infiltrer dans le sol dû à une saturation ou une faible conductivité hydraulique du sol s'écoule

en surface sous forme de ruissellement et peut emporter avec elle nutriments et particules de sol, conduisant à une érosion hydrique (Skaalsveen et al., 2019). L'amélioration des propriétés hydriques du sol peut donc permettre de réduire ces risques.

Un certain nombre de facteurs influencent les propriétés d'infiltration et de rétention de l'eau dans les sols. On peut citer notamment le type de sol, le climat, la structure du sol, la compaction du sol, la présence de fissures ou encore la porosité. Mais l'un des facteurs les plus importants est le type de pratique culturale opérée. Sithole et *al.*, (2019) montrent que les systèmes sans labour et l'AC de manière plus générale améliorent les propriétés hydrauliques du sol. Cela s'explique par une meilleure structure du sol mais également par l'augmentation de la porosité du sol *via* la plus forte activité de la macrofaune (notamment les vers de terres) en système non labouré. Néanmoins, les effets du travail du sol sur la capacité de rétention et infiltration d'eau dans le sol ne font pas consensus et sont très variables d'une étude à l'autre (Skaalsveen et al., 2019).

1.5 Objectifs

L'augmentation de la population mondiale couplée aux changements climatiques présents et futurs incitent les systèmes agricoles actuels à évoluer vers des systèmes à la fois plus productifs et plus durables afin d'assurer une sécurité alimentaire et la préservation de l'environnement. Dans cette optique, les systèmes conventionnels incluant le labour sont notamment remis en question. L'agriculture de conservation dont l'un des principes majeurs est la perturbation minimale du sol, est proposée comme l'une des alternatives possibles pour atteindre ces objectifs.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire qui a pour objectif d'évaluer l'impact du travail du sol sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques du système sol-plante en culture d'épeautre et de blé. L'objectif est également d'évaluer l'effet de l'adoption de pratiques culturales sans labour sur le court et le long terme. Pour ce faire, deux parcelles, contenant pour l'une du blé et pour l'autre de l'épeautre sont étudiées. Ces deux parcelles présentent chacune trois modalités de travail du sol différentes : non-labour depuis 2006, labour et non-labour depuis 2018.

Les paramètres étudiés concernent d'une part la culture avec le tallage utile, le rendement, le nombre et la diversité d'adventices ainsi que l'évolution de la couverture foliaire. D'autre part, plusieurs paramètres du sol ont été évalués : les paramètres physiques tels que la compaction du sol, la stabilité des agrégats, la structure du sol et l'infiltration d'eau. Les paramètres biologiques comme l'activité de la macrofaune ainsi que la dégradation de la matière organique. Enfin, le taux de carbone organique stable et labile a été évalué en tant que paramètre chimique du sol. Le but étant donc d'évaluer s'il existe un effet du travail du sol sur ces paramètres.

2. Matériels et méthodes

2.1 Parcelles étudiées et caractéristiques

Dans le cadre de ce mémoire, deux parcelles situées à Vieusart dans la commune de Chaumont-Gistoux sont étudiées. Elles appartiennent au centre Alphonse de Marbaix, ferme universitaire de l'UCLouvain. Ces deux parcelles présentent une texture de type limoneuse. Au moment de l'étude, des cultures distinctes étaient en place sur chaque parcelle : pour l'une du blé et pour l'autre de l'épeautre. Afin d'éviter toute confusion dans la suite de cet ouvrage, les parcelles seront nommées par leur culture en place, soit la parcelle « BLÉ » et la parcelle « ÉPEAUTRE ».

Afin de comprendre le choix de ces parcelles, il est utile d'évoquer leur histoire : les parcelles BLÉ et ÉPEAUTRE actuelles sont constituées de sous-parcelles ayant été regroupées respectivement en 2020 et 2019 pour devenir chacune une terre d'une culture homogène. Sur la figure 8, les zones encadrées en vert appartenaient initialement à Monsieur Braibant, un agriculteur de la région qui y pratiquait le non-labour depuis 2006. Ces zones ont ensuite été reprises par la ferme de Marbaix qui poursuit ce non-labour. Ensuite, les zones encadrées en rouge sur la figure 8 sont des zones converties en non-labour en 2018. Enfin, deux bandes de 20 mètres environ (en bleu sur la figure 8) continuent d'être labourées suivant les pratiques conventionnelles dans chacune des parcelles.

Ces deux parcelles ont donc été choisies car elles sont composées chacune de trois modalités de travail du sol différentes (appelé par la suite « traitements ») : une zone en non-labour depuis 2006 (NL06), une zone en non-labour depuis 2018 (NL18) et une zone en labour.

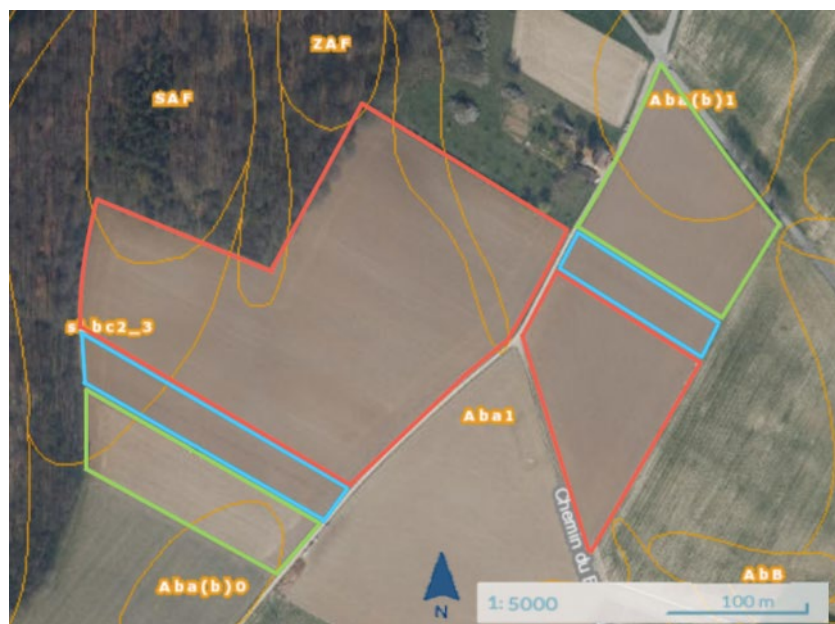


Figure 8 : Représentation des différents traitements au sein des parcelles BLÉ et ÉPEAUTRE, respectivement vers la gauche et la droite de la figure. En vert : non labour depuis 2006, en bleu : labour et en rouge : non labour depuis 2018.

Source image : SPW, 2020.

L'implantation d'une culture pouvant dans certains cas avoir un impact non négligeable sur le sol, il semble judicieux de retracer ici les différentes opérations culturales ayant été pratiquées ainsi que les différentes cultures qui se sont succédé sur chacune des deux parcelles étudiées au cours des 5 dernières années (Tableaux 1 et 2).

Tableau 1 : Opérations culturales et cultures qui se sont succédé sur la parcelle ÉPEAUTRE ces 5 dernières années

Parcelle ÉPEAUTRE				
Traitement actuel	Année culturale	Culture en place	Date	Travaux réalisés
NL06	2017	Maïs ensilage	19.04.17	Destruction mécanique du CIPAN (disc roller)
			02.05.17	Travail du sol au vibroculteur (17 cm de profondeur) + herse rotative (8 cm)
				Fertilisation N27 400 kg/ha, soit 108 kg/ha d'azote
				Semis essai maïs (0,90 ha, variété SY ALTITUDE 95.000 gr/ha)
			15.05.17	Fin semis maïs (0,60 ha, variété SY MADRAS 95.000 gr/ha)
			02.06.17	Essai désherbage 0,90 ha : Callisto 0,8 L/ha Monsoon active 1L/ha
				0,60ha : Successor 600 1L/ha Caloris 1,1L/ha Samson 600D 0,4 L/ha
L NL18	2017	Maïs ensilage	19.09.17	Récolte
			06.04.17	Labour
			20.04.17	Préparation du sol à la herse rotative (8 cm)
				Semis maïs (variété RIVALDINIO 95.000 gr/ha)
			28.04.17	Fertilisation N27 400 kg/ha, soit 108 kg/ha d'azote
			30.05.17	Désherbage Laudis 1,75 L/ha Aspect T 1,6 L/ha
			19.09.17	Récolte
NL06	2018	Froment hiver	19.10.17	ESSAI GREENOTEC & REGENACTERRE Préparation du sol au chisel (15 cm) Semis direct avec semoir Horsh pronto (variété Dorset 162 kg/ha) Pas d'informations supplémentaires
				Récolte
			07.18	Récolte
L NL18	2018	Maïs ensilage	04.18	ESSAI CIPF Destruction du couvert <i>via</i> glyphosate 1,5 L/ha Labour + passage herse rotative (8 cm) Pas d'informations supplémentaires
			09.18	Récolte

NL06	2019	Escourgeon	15.09.18	Passage 2x chisel (15 cm) + rotative semoir (12 cm) Variété Tonic 130 kg/ha
			10.10.18	Traitement culture (herbicides)
			26.02.19	Fertilisation (nitrate d'ammonium 250 kg/ha, 165 U/ha)
			28.03.19	Traitement culture (régulateurs de croissance) Fertilisation (nitrate d'ammonium 350 kg/ha, 165 U/ha)
			29.03.19	Amendement TMS 100 kg/ha (engrais minéral)
			24.04.19	Traitement culture (fongicides)
			07.19	Récolte
		Couvert	13.08.19	Déchaumage Semis couvert multi-espèces (avoine, lin oléagineux, féverole, tournesol, niger, vesce, moutarde)
L NL18	2019	Froment	20.10.18	Labour de la zone labour + passage 2x chisel (15 cm) + rotative semoir (12 cm) Variété Smart
			26.02.19	Fertilisation N27 200 kg/ha, soit 54 kg/ha d'azote
			27.02.19	Traitement culture (herbicides)
			15.03.19	Amendement TMS 100 kg/ha
			28.03.19	Fertilisation N27 225 kg/ha, soit 60,75 kg/ha d'azote Traitement culture (raccourcisseurs)
			24.04.19	Traitement culture
			05.05.19	Traitement culture (fongicides)
			07.05.19	Fertilisation N27 220 kg/ha, soit 54 kg/ha d'azote
			20.05.19	Traitement culture (fongicides) Fertilisation Epsotop 1,5 kg/ha
			03.06.19	Traitement culture (fongicides) Fertilisation Epsotop 1,5 kg/ha
			08.19	Récolte
		Couvert	13.08.19	Déchaumage Semis couvert multi-espèces (avoine, lin oléagineux, pois fourrager, féverole, tournesol, niger, moutarde)
NL06 L NL18	2020	PDT	22.01.20	Destruction du couvert par broyage
			22.03.20	Traitement avant implantation (triple superphosphate) Glyphosate 1,5 L/ha pour destruction du couvert
			18.04.20	Fertilisation N30 620 L/ha
			20.04.20	Préparation du sol au vibroculteur (17 cm) + herse rotative (8 cm) + Labour de la zone labour Plantation des PDT variété Innovator 3333,33 kg/ha
			04.05.20	Traitement culture (herbicides)
			26.05.20	Traitement culture (fongicide)

			02.06.20	Traitement culture (fongicide)
			09.06.20	Traitement culture (fongicide)
			16.06.20	Traitement culture (fongicides, insecticide) Fertilisation (EPSO Microtop 10 kg/ha)
			28.06.20	Traitement culture (fertilisation + fongicides) Fertilisation (EPSO Microtop 10 kg/ha)
			09.07.20	Traitement culture (fongicides) Fertilisation (EPSO Microtop 10 kg/ha)
			20.07.20	Traitement culture (fongicides) Fertilisation (EPSO Microtop 5 kg/ha)
			27.07.20	Traitement culture (fongicides)
			28.07.20	Traitement culture (régulateur de croissance)
			06.08.20	Traitement culture (fongicides)
			16.08.20	Traitement culture (fongicides)
			24.08.20	Traitement culture (fongicides)
			01.09.20	Traitement culture (fongicide)
			12.09.20	Traitement culture (fongicide + défanant)
			05.10.20	Récolte
NL06 L NL18	2021	Epeautre	10.10.20	Labour de la zone labour + Passage 2x chisel (15 cm) Semis direct avec semoir Horsh pronto Variété Vif
			03.03.21	Fertilisation N27 244 kg/ha, soit 65,88 kg/ha d'azote
			08.03.21	Fertilisation TMS 100 kg/ha
			09.04.21	Fertilisation N27 255 kg/ha, soit 68,85 kg/ha d'azote
			29.05.21	Traitement culture (fongicides)
			25.08.21	Récolte

Tableau 2 : Opérations culturales et cultures qui se sont succédé sur la parcelle BLÉ ces 5 dernières années

Parcelle BLÉ				
Traitement actuel	Année culturale	Culture en place	Date	Travaux réalisés
L NL18	2017	Escourgeon	22.08.16	Déchaumage + sous-solage
			19.09.16	Labour
			20.09.16	Passage rotative-semoir Variété Tonic 120 kg/ha
			06.10.16	Traitement culture (herbicides)
			14.03.17	Fertilisation (nitrate d'ammonium 190 kg/ha)
			06.04.17	Fertilisation (nitrate d'ammonium 200 kg/ha)
			07.04.17	Traitement culture (fongicides) + raccourcisseurs
			02.05.17	Fertilisation (nitrate d'ammonium 240 kg/ha)
			09.05.17	Traitement culture (fongicides)
			05.07.17	Récolte
			10.07.17	Application de chaux (CaCO3 900 kg/ha)
			11.07.17	Déchaumage + sous-solage
		Couvert	19.07.17	Deuxième déchaumage
			20.07.17	Semis couvert SIE ⁵
			03.18	Destruction du couvert par broyage + glyphosate 1,5 L/ha
NL06	2017	Epeautre	31.10.16	Déchaumage + semis-direct Variété Cosmos (190 kg/ha)
			14.03.17	Fertilisation (nitrate d'ammonium 190 kg/ha)
			15.03.17	Traitement culture (herbicides)
			07.04.17	Traitement culture (raccourcisseurs)
			11.04.17	Fertilisation (nitrate d'ammonium 190 kg/ha)
			24.05.17	Fertilisation (nitrate d'ammonium 200 kg/ha)
			01.06.17	Traitement culture (fongicides)
			31.07.17	Récolte
			21.08.17	Déchaumage + sous-solage
			08.08.17	Déchaumage disc-roller
			13.09.17	Déchaumage disc-roller
		Couvert	16.10.17	Semis couvert hivernal (féveroles variété Tundra)
			19.03.18	Fertilisation KCl 40% 800 kg/ha
			21.03.18	Labour
			27.03.18	Fertilisation Triple 45 220 kg/ha
			28.04.18	Fertilisation azote liquide 574 L/ha
			05.05.18	Préparation du sol au chisel (10 cm) + herse rotative (20 cm)
			06.05.18	Plantation PDT variété Innovator Traitement culture (fongicide)
			18.05.18	Traitement culture (herbicides)
			31.05.18	Traitement culture (fongicides)

⁵ Surface d'Intérêt Ecologique

L NL18	2018	PDT	07.06.18	Traitement culture (fongicides)
			13.06.18	Traitement culture (fongicides) Fertilisation (Epso Microtop 10 kg/ha)
			24.06.18	Traitement culture (fongicides) Fertilisation (Epso Microtop 10 kg/ha)
			08.07.18	Traitement culture (fongicides) Fertilisation (Epso Microtop 10 kg/ha)
			03.08.18	Traitement culture (fongicides) Fertilisation (Epso Microtop 10kg/ha)
			12.08.18	Traitement culture (fongicides)
			22.08.18	Traitement culture (fongicides)
			30.08.18	Traitement culture (fongicides)
			06.09.18	Traitement culture (fongicides)
			14.09.18	Traitement culture (fongicides) + défanant
			12.10.18	Récolte
NL06	2018	Maïs	03.18	Destruction du couvert <i>via</i> glyphosate 1,5 L/ha ESSAI CIPF MAÏS NON LABOUR
			04.18	Passage 2x chisel (15 cm) + herse rotative (10 cm) Pas d'informations supplémentaire
			09.18	Récolte
NL06 L NL18	2019	Froment	20.10.18	Labour de la zone labour Passage décompacteur (40 cm) + herse rotative (12 cm) Semis avec semoir Nodet Variété Smart 164 kg/ha pour partie NL06 Gleam 150 kg/ha pour parties L + NL18
			26.02.19	Fertilisation N27 200kg/ha, soit 54 kg/ha d'azote
			27.02.19	Traitement culture (herbicides)
			15.03.19	Fertilisation TMS 100 kg/ha
			28.03.19	Fertilisation N27 225 kg/ha, soit 60,75 kg/ha d'azote + raccourcisseurs
			05.05.19	Traitement culture (fongicides)
			07.05.19	Fertilisation N27 220kg/ha, soit 59,4 kg/ha d'azote
			20.05.19	Traitement culture (fongicides)
			03.06.19	Traitement culture (fongicides) Fertilisation Epsotop
			08.19	Récolte
			29.08.19	Déchaumage Semis couvert multi-espèces (avoine, lin oléagineux, pois fourrager, féverole, tournesol, niger, moutarde, trèfle d'Alexandrie, vesce, phacélie)
			23.08.19	Fertilisation Chlorure PDT 40-6-4 1000 kg/ha Triple superphosphate 220 kg/ha
			22.01.20	Destruction du couvert par broyage

NL06 L NL18	2020	Betteraves	30.03.20	Fertilisation Unrean 30N 482 L/ha Destruction du couvert <i>via</i> glyphosate 1,5 L/ha
			01.04.20	Préparation du sol : Vibroculteur + herse rotative + Labour de la zone labour
			02.04.20	Semis variété Smart Jiska
			25.04.20	Traitement culture (herbicides)
			27.04.20	Traitement culture (insecticides)
			07.05.20	Traitement culture (insecticides)
			20.05.20	Traitement culture (herbicides)
			22.05.20	Traitement culture (herbicides + insecticides)
			29.05.20	Fertilisation Epso Microtop 12,5 kg/ha
			09.06.20	Fertilisation Epso Combitop 5 kg/ha Microtop 10 kg/ha Traitement culture (insecticides)
			19.07.20	Traitement culture (insecticides + fongicides)
			03.08.20	Traitement culture (fongicides)
			27.08.20	Traitement culture (fongicides)
			17.09.20	Traitement culture (fongicides)
			17.11.20	Récolte
NL06 L NL18	2021	Blé	18.11.20	Labour de la zone labour Passage 2x chisel dans les zones NL06 et NL18 Semis avec semoir Horsh pronto Variété Dorset pour NL06 Winse pour L Smart pour NL18
			03.03.21	Fertilisation N27 244 kg/ha, soit 65,88 kg/ha d'azote
			08.03.21	Fertilisation TMS 100 kg/ha
			30.03.21	Traitement culture (herbicides)
			09.04.21	Fertilisation N27 255 kg/ha, soit 68,85 kg/ha d'azote
			10.05.21	Traitement culture (fongicides)
			20.05.21	Fertilisation N27 150 kg/ha, soit 40,5 kg/ha d'azote
			29.05.21	Traitement culture (fongicides)
			25.08.21	Récolte

2.2 Plan expérimental

Pour chaque traitement des parcelles BLÉ et ÉPEAUTRE, les différentes mesures décrites au point suivant sont réalisées au sein de trois bandes de 5 mètres de large sur 100 mètres de long environ. La première est placée au centre du traitement labour, utilisé comme référence. Ensuite, les deux autres bandes de mesures propres aux traitements NL06 et NL18 sont placées à environ 20 mètres de part et d'autre de la bande de référence et ce en évitant les traces de passage des machines agricoles.

Au sein d'une bande, les différentes mesures sont généralement répétées cinq fois (= cinq placettes). Dans le cas de la pénétrométrie et de la méthode USDA (voir plus loin), le nombre de répétitions a été augmenté afin d'être en accord avec les protocoles de référence. Les différentes mesures sont disposées de manière aléatoire à l'intérieur de chaque placette, sur toute la bande tout en veillant à éviter la perturbation d'une mesure sur une autre. Une représentation de la disposition des différentes placettes au sein de la bande de mesure se trouve à l'annexe 2.

2.3 Mesures réalisées

2.3.1 Méthodes permettant d'évaluer l'activité biologique

Tea bag Index

La méthode du « tea bag index » (TBI) est une méthode développée par Keuskamp et *al.* (2013) et qui a pour but d'évaluer le taux de décomposition k et de stabilisation S de la matière organique dans le sol de manière simple, standardisée et peu coûteuse. Elle consiste à enfouir dans le sol deux types de sachet de thés différents (thé vert et thé rooibos de la marque Lipton) dans leur sachet de nylon, faisant office de litière végétale pendant une durée d'environ 90 jours. On mesure ensuite la perte de masse après la période d'enfouissement (Keuskamp et al., 2013).

Pour rappel, la matière organique fraîche (ou litière) peut subir une dégradation rapide, à savoir la minéralisation, orchestrée par différents microorganismes du sol et aboutir à des composés dissous et des gaz (principalement du CO_2). Cette matière organique fraîche peut également subir une humification c'est-à-dire une transformation lente de la matière organique qui conduit à la formation de l'humus. La fraction de la matière organique se décomposant de manière lente est appelée matière organique stable tandis que la fraction rapidement dégradable est dite matière organique labile (Lefèvre, 2015).

Ainsi, le facteur de stabilisation S mesuré grâce à la méthode TBI est un indicateur du maintien de la matière organique stable dans le sol. Le facteur de décomposition k reflète quant à lui la dynamique de la matière organique à court terme (Keuskamp et al., 2013).

L'utilisation des deux types de thé permet d'estimer en une seule période de mesure à la fois le taux de décomposition k et le facteur de stabilisation S . En effet, ces deux types de thé étant de compositions différentes, ceux-ci ont des taux de décomposition différents : le thé rooibos se décompose plus lentement que le thé vert. Ainsi, après un temps t d'enfouissement, les matières labiles présentes dans le thé rooibos continuent de se décomposer alors que celles présentes dans le thé vert sont entièrement altérées.

Une première équation permet de lier le poids du thé rooibos après la période d'incubation $W(t)$ au taux de décomposition k :

$$W(t) = a_r e^{-kt} + (1 - a_r)$$

Avec

$a_r = H_r(1 - S)$ La fraction décomposable du thé rooibos,

$H_r = 0,552$ La fraction hydrolysable du thé rooibos,

t le temps d'incubation [jours],

$(1 - a)$ la fraction récalcitrante de la litière,

En ce qui concerne le facteur de stabilisation S , celui-ci est défini comme :

$$S = 1 - \frac{a_g}{H_g}$$

Avec

$a_g = 1 - \frac{\text{poids final thé vert}}{\text{poids initial thé vert}}$ La fraction décomposable du thé vert

$H_g = 0,842$ La fraction hydrolysable du thé vert

Sur base des conseils du CRA-W et de Greenotec qui emploient tous les deux le TBI, notamment dans le cadre du projet européen Interreg « TRANSAÉ », quelques modifications ont été apportées par rapport au protocole d'origine. Ces modifications portent sur le nombre de sachets utilisés par parcelle et sur la définition d'un protocole d'enfouissement plus précis. En effet, le protocole proposé par Keuskamp et *al.* ne recommande pas de nombre particulier de sachets de thé par parcelle ou par hectares. Le CRA-W, quant à lui, utilise 12 sachets de chaque type par parcelle. Dans le cadre de cette étude, il a été décidé d'utiliser 20 sachets de chaque type de thé vert et rooibos pour chacun des traitements analysés. L'augmentation du nombre de sachets par rapport au CRA-W peut permettre d'apporter une information quant au nombre de sachets nécessaire à la mise en évidence d'une différence entre les parcelles ayant un travail du sol différent.

La période d'expérimentation est idéale de mars à juin car elle permet de cibler les conditions pédoclimatiques les plus favorables pour la dégradation de la matière organique (ESA, 2017). En pratique, les sachets ont été enfouis le 14 mars 2021 et retirés entre le 23 et le 25 juin 2021, soit 102 jours d'enfouissement.

Avant leur enfouissement, chaque sachet est préalablement numéroté et pesé à l'aide d'une balance de précision (0,001 g). Dans le but d'obtenir le poids des contenants avant enfouissement ainsi que le taux d'humidité moyen du thé, le poids de chaque constituant de cinq sachets (soit le sac vide, la ficelle et l'étiquette) a été pesé. Le poids sec du thé seul issu de ces cinq sachets est également pesé après un minimum de 48h en étuve à 70°C.

Sur le terrain, les sachets de thé sont répartis en cinq placettes par traitement, soit quatre sachets de chaque type par placette. Ces placettes sont disposées en ligne au centre de la bande de mesures avec une distance de 20 mètres entre chacune d'elles (Annexe 2).

Au sein d'une placette, les sachets sont enfouis en diagonale par rapport aux lignes de semis et distants de 40 cm (Figure 9). L'enfouissement proprement dit a été réalisé selon un protocole précis développé par le CRA-W qui consiste à donner un premier coup de bêche dans un sens, un deuxième perpendiculairement au premier, d'ensuite soulever cette motte et d'insérer le sachet de thé dans la fissure créée à une profondeur d'environ cinq centimètres (Figure 10). Cette méthode permet de limiter la perturbation du sol lors de l'enfouissement des sachets. Un drapeau est ensuite disposé à l'emplacement du premier et du dernier sachet de thé.

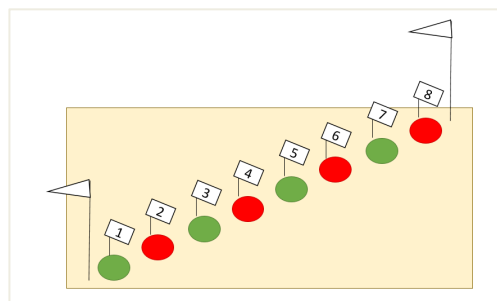


Figure 9 : Schéma représentatif de la disposition des sachets de thé au sein d'une placette
Source : CRA-W

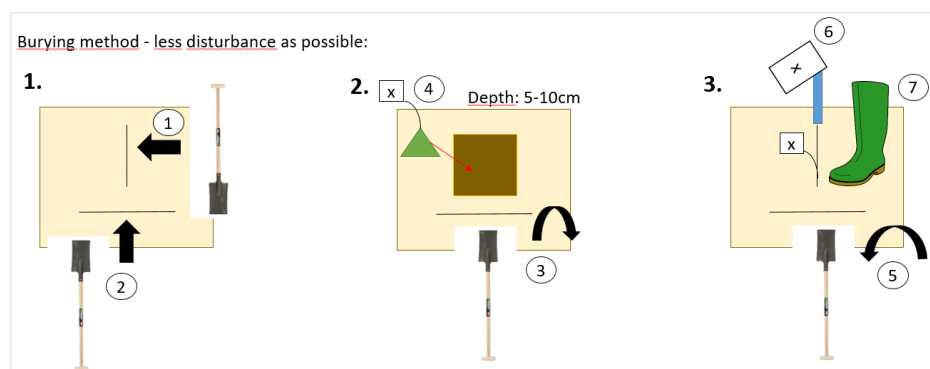


Figure 10 : Schéma représentatif de la méthode d'enfouissement des sachets de thé développée par le CRA-W. Le point 1 représente le premier coup de bêche appliqué dans un sens ainsi que le deuxième appliqué perpendiculairement au premier. Le point 2 illustre le soulèvement de la motte créée et l'insertion du sachet de thé dans la fissure créée, à une profondeur d'environ 5 cm en laissant ficelle et étiquette à la surface. Le point 3 présente la manière de replacer la motte à sa place initiale c'est-à-dire à l'aide de son pied. Il faut ensuite disposer un drapeau à l'emplacement du sachet de thé.

Source : CRA-W

Après 102 jours sous terre, les sachets de thé ont été récupérés et disposés en étuve à 70°C pendant 48 heures. Une fois sec, le contenu des sachets a été pesé après avoir ôté racines et terres non désirées.

Paniers à vers de terre

Les paniers à vers de terre sont des dispositifs élaborés par l'Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT, Université de Rennes) qui permettent de mesurer l'activité de ceux-ci sur une durée de quatre à six mois. Pour ce faire, des paniers en grillage de dimension 30x50x10 cm et de maille d'environ 10 mm sont fabriqués puis disposés en champs sur une surface plane et préalablement désherbée. Cinquante grammes de paille coupée en segments de cinq centimètres sont ensuite introduits dans chaque panier et répartis de façon homogène sur toute la surface. L'activité des vers de terre est ensuite mesurée en observant la présence de cabanes et turricules ainsi que la variation du recouvrement du sol par la paille. Les paniers sont observés tous les 15 jours et des fiches de suivi (Annexe 3) sont remplies en y référant chacune des cabanes et turricules apparues ou disparues au cours du temps ainsi que l'évolution du recouvrement du sol par la paille. Les classe de recouvrement de sol proposées dans le protocole développé par l'OPVT sont visible à la figure 11.

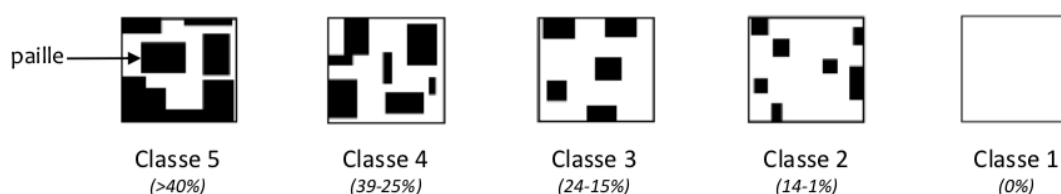


Figure 11 : Classe de recouvrement du sol par la paille proposée par l'OPVT.

Source : OPVT, 2015 - Université de Rennes

Dans le cadre de ce mémoire, quatre paniers espacés chacun de 20 mètres sont disposés dans chacun des traitements (NL18, Labour et NL06) des deux parcelles étudiées. Un panier témoin par parcelle est également placé dans le traitement labour pour les deux parcelles. Ce panier témoin est recouvert d'une tulle à petite maille (2 mm environ) qui empêche ainsi les vers de terre d'avoir accès à la paille.

Le protocole développé par l'OPVT préconise des observations entre octobre et mars afin de mesurer l'activité automnale et printanière. Pour cette étude cependant, les paniers ont été placés le 18 mars 2021 et les observations ont été réalisées jusqu'au 11 août 2021.

Méthode moutarde

Le protocole moutarde est une méthode également développée par l'OPVT de l'Université de Rennes visant à évaluer la densité et la diversité des vers de terre à un endroit donné. Le protocole consiste à arroser d'un mélange d'eau et de moutarde (300 grammes de moutarde AMORA® fine et forte pour 10 litres d'eau) à deux reprises une surface de 1 m² où la végétation a été préalablement coupée au plus court. La moutarde étant irritante pour les vers de terre, ceux-ci remontent progressivement à la surface. Ils sont récoltés pendant 15 minutes et disposés dans des bacs contenant un fond d'eau afin de les débarrasser des traces de moutarde. Ensuite, un deuxième arrosage est effectué sur cette même surface d'1 m², suivi à nouveau de 15 minutes de ramassage des vers de terre. La dernière étape consiste à compter et identifier tous les individus récoltés à l'aide d'une clé d'identification permettant de classer chaque individu dans un des quatre groupes fonctionnels (Annexe 4).

Le protocole suggère une application entre janvier et avril soit la période d'activité maximale des vers de terre. Les zones de prélèvements doivent se situer sur une surface plane, homogène d'un point de vue sol et végétation et représentative de la parcelle. Dans le cadre de ce mémoire, cinq répétitions espacées de 20 mètres sont réalisées dans chaque traitement des deux parcelles étudiées. Les mesures ont été effectuées entre le 21 et le 24 avril 2021.

2.3.2 Résistance à la pénétration

Dans le but d'évaluer la compaction du sol, des mesures de pénétrométrie sont réalisées au sein de chaque traitement étudié. Pour obtenir cette donnée, un pénétromètre Penetrologger Eijkelkamp® (Pays-Bas), comme celui présenté à la figure 12, a été utilisé. Il s'agit d'un pénétromètre digital qui mesure la résistance du sol à la pénétration par unité de surface, exprimé en Méga Pascal (MPa) (Eijkelkamp Agrisearch Equipment, s.d). La mesure consiste à enfoncer la tige métallique du pénétromètre verticalement et à vitesse constante dans le sol jusqu'à une profondeur d'environ 80 cm. Les données de résistance en fonction de la profondeur sont enregistrées dans la mémoire de l'appareil et celles-ci peuvent ensuite être extraites en reliant le pénétromètre à un ordinateur muni du logiciel Eijkelkamp® PenetroViewer.

La résistance à la pénétration étant dépendante de plusieurs facteurs tels que l'humidité, le contenu en matière organique ou encore la structure du sol, la mesure peut donc présenter une grande variabilité spatiale. Afin d'obtenir des valeurs représentatives de chaque parcelle, il est donc indispensable d'effectuer un nombre suffisant de répétitions. Campbell & O'Sullivan (1991) recommandent d'effectuer dix mesures par parcelle (Eijkelkamp Agrisearch Equipment, s.d). Dans le cadre de cette étude, les mesures sont réparties en cinq placettes pour chaque traitement étudié et dix mesures de résistance à la pénétration sont réalisées au sein de chacune de ces cinq placettes, soit un total de 50 mesures par traitement. Ces cinq

placettes sont réparties en quinconce dans la bande de mesure et chacune d'elles sont espacées de 20 mètres (Annexe 2).



Figure 12 : Illustration du pénétromètre digital utilisé pour la mesure de pénétration
Sources : Forestry Suppliers, 2022 et Rutgers et al. (2009)

2.3.3 Stabilité du sol via la méthode VESS

La méthode VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) est un test développé par Ball et al. (2007) dont le but est d'évaluer la qualité structurale d'un sol donné. Cette méthode consiste à extraire un bloc de sol à l'aide d'une bêche et d'identifier ensuite les couches ayant des structures différentes. Grâce à une clé développée par Guimarães et al., (2011) (Annexe 5) un score est attribué à chacune des couches en examinant notamment la taille et l'apparence des agrégats, la porosité ou encore la présence de racines. Un score global est ensuite attribué au bloc en multipliant le score de chaque couche par son épaisseur. Ce produit est ensuite divisé par l'épaisseur totale du bloc. Chaque bloc est ainsi noté sur une échelle de 1 à 5 où le score de 1 est synonyme de bonne qualité structurale tandis que le score de 5 désigne une pauvre qualité structurale. Dans le cas d'un score de 5, un changement de gestion est recommandé afin d'améliorer la structure du sol (Ball et al., 2007).

Pour évaluer la structure du sol des différents traitements étudiés dans le cadre de ce mémoire, la méthode VESS décrite ci-dessus a été appliquée en cinq endroits dans chacun des traitements. Afin de faciliter l'évaluation visuelle, une application téléphone a été développée par Polla et al. dont la dernière version date de 2019. Elle se base sur les travaux de Ball et al., (2007) et Guimarães et al., (2011). Initialement, cette application devait être utilisée pour déterminer les différents scores mais elle a rapidement été abandonnée dû à un message d'erreur récurrent. Le protocole et la clé présents dans l'annexe 5 ont donc été utilisés pour établir les différents scores.

2.3.4 Stabilité des agrégats *via* la méthode USDA

La stabilité des agrégats peut être évaluée grâce à la méthode USDA. Le protocole suivi est celui présenté dans la partie « Kit sol » du projet Prosensols (Prosensols, 2012). Cette méthode consiste à immerger des agrégats dans l'eau et d'observer leur comportement après un certain temps d'immersion.

Pour ce faire, neuf agrégats sont prélevés de manière aléatoire dans la couche superficielle du sol de chacun des traitements étudiés (soit entre 0 et 1,5 cm de profondeur). Après séchage des agrégats à l'air libre, ceux-ci sont disposés sur un filtre (Figure 13) et plongés dans un bac d'eau distillée pendant 5 minutes. Dans le cas où moins de 50 % de l'échantillon est désagrégé, une étape supplémentaire est effectuée où cinq cycles d'immersion sont réalisés sur l'agrégat en question. La stabilité des agrégats est évaluée sur base d'un système de classe présenté au tableau 3. Le protocole initial catégorise les agrégats en six classes différentes mais sur base des réflexions de Nicolas Biot (2020) ainsi que celles de Aline Fockeday et Xavier Belin (2021), deux classes supplémentaires ont été ajoutées (classes 7 et 8) afin de distinguer de manière plus précise le comportement des agrégats dans l'eau. Plus la classe d'un agrégat est élevée, meilleure est sa stabilité.



Figure 13 : Filtre en PVC utilisé pour l'immersion des agrégats dans l'eau, méthode USDA.
Source : Prosensols, 2012.

Tableau 3 : Critères pour l'attribution des classes USDA.
Source : Fockeday et Belin, 2021

Classes	Critères
0	Sol trop instable pour récolter un agrégat (tout passe à travers le filtre)
1	50% de l'échantillon désagrégé en moins de 5 secondes après immersion
2	50% de l'échantillon désagrégé entre 5 à 30 secondes après immersion
3	50% de l'échantillon désagrégé entre 30 secondes à 5 minutes après immersion OU il reste 10 à 25% de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion
4	Il reste 10 à 25% de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion
5	Il reste 25 à 50% de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion
6	Il reste 50 à 75% de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion
7	Il reste 75 à 90% de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion
8	Il reste plus de 90% de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion

2.3.5 Infiltration d'eau

L'infiltration d'eau est mesurée dans les différents traitements étudiés grâce à un infiltromètre simple anneau (Figure 14). Cet appareil permet de mesurer le débit d'eau en fonction du temps dans un sol saturé, ce qui permet de déduire les propriétés de conductivité hydraulique à saturation. Pour ce faire, on applique une charge hydrostatique constante sur une surface connue de sol (Biielders et Javaux, 2019).

Le protocole qui a été suivi est celui décrit par le TP 8 : conductivité hydraulique à saturation, méthode Simple Anneau du cours LBRES2103 - Physique du sol appliquée à l'agronomie et l'environnement à l'UCLouvain (Biielders et Javaux, 2019).

Le dispositif est composé d'un anneau de diamètre de 15 cm que l'on enfonce dans le sol à une profondeur de 5 cm environ. Sur cet anneau est posé l'infiltromètre constitué d'un réservoir gradué de 6,7 cm de diamètre. Le dispositif forme ainsi un réservoir dit de Mariotte (Figure 14). C'est grâce à ce principe qu'une charge hydrostatique constante peut être appliquée. Le réservoir est donc rempli d'eau qu'on laisse s'écouler jusqu'à l'apparition d'une lame d'eau de 5 cm environ dans l'anneau enfoncé dans le sol. Une fois cette lame stable, le niveau d'eau dans le réservoir est mesuré toutes les 5 minutes jusqu'à $t = 20$ minutes ensuite la mesure est prise toutes les deux minutes jusqu'à $t = 30$ minutes.

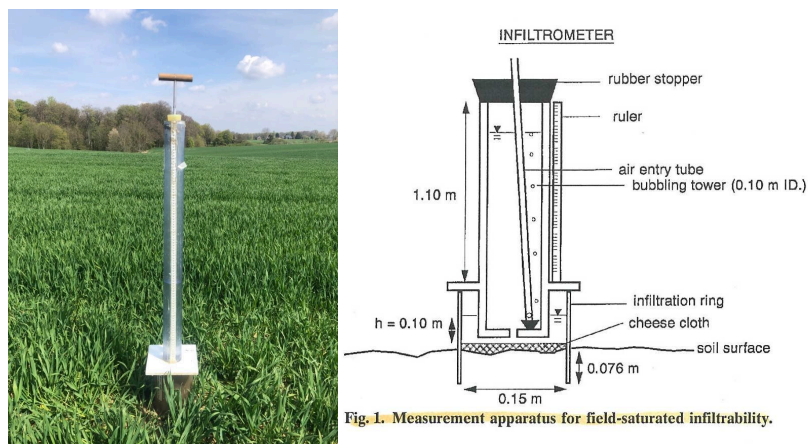


Figure 14 : Photographie et schéma de l'infiltromètre simple anneau utilisé en vue de mesurer la conductivité hydraulique à saturation

Source du schéma : Biielders et Javaux, 2019

La conductivité hydraulique à saturation K_s , exprimé en m.s^{-1} , peut ensuite être calculée via la formule suivante :

$$K_s = \frac{G Q}{aH + \pi a^2 G + \frac{a}{\alpha}}$$

Où Q est le débit d'eau [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$], H est la charge hydrostatique, c'est-à-dire la hauteur d'eau dans l'anneau [m], a est le rayon de l'anneau d'infiltration [m], α est le paramètre de l'équation de Gardner (1958) [m^{-1}] qui décrit la conductivité hydraulique K du sol

$$K(h) = K_s \exp(\alpha h)$$

Avec h , l'état de succion du sol [m]

Et enfin, G est un paramètre de forme sans dimension qui peut être approximé par la formule suivante

$$G = 0,316 \frac{d}{a} + 0,184$$

Avec d la profondeur d'enfoncement de l'anneau dans le sol [m].

Afin de faciliter la rapidité de l'expérience et d'empêcher de devoir répéter les mesures pour calculer les inconnues de l'équation de Reynolds et Elrick (1990), le paramètre α a été fixé en faisant l'hypothèse que la courbe de conductivité hydraulique a une forme exponentielle et que le sol n'est initialement pas trop proche de la saturation. Le paramètre α a donc été posé comme égal à 12 cm^{-1} (Biot, 2020). Cette valeur de α correspond assez bien aux sols limoneux et sablo-limoneux (Biielders, 2009).

2.3.6 Taux de carbone organique stable et labile

Les taux de carbone organique stable et labile du sol étant de bons indicateurs de la qualité, la quantité et la structure de la matière organique, ils ont été dosés pour chacun des traitements étudiés. La méthodologie utilisée pour ce dosage a été développée par une équipe de chercheurs wallons et détaillée dans le rapport final du projet Carbiosol (Chartin *and al.*, 2019).

Pour chaque traitement, cinq prélèvements composites sont effectués. Ces prélèvements composites formés à partir de trois sondages sont réalisés à l'aide d'une tarière sur 20 cm de profondeur. Leur répartition au sein de la bande de mesure des différents traitements est visible à l'annexe 2. Les échantillons sont ensuite séchés à l'air libre puis tamisés à 2 mm.

La suite de la démarche en vue du dosage du carbone organique consiste à prélever 10 g de ce sol tamisé et de le mélanger à 100 ml d'eau distillée dans une bouteille hermétique disposée dans un agitateur durant 15 min à 250 rpm. La solution obtenue est ensuite fractionnée par tamisage humide à 50 μm puis à 20 μm et le filtrat obtenu est disposé dans des barquettes préalablement étiquetées et pesées. Le tout est ensuite placé en étuve à 60°C. Les refus des tamis de 50 et 20 μm sont également récupérés dans des barquettes et placés à l'étuve. Après séchage complet, les barquettes contenant les sols sont pesées et les sols tamisés à 20 μm sont ensuite récupérés dans des piluliers.

La teneur en carbone organique de la fraction 0-20 μm ainsi que celle des sols tamisés à 2 mm est analysée à l'aide d'un analyseur élémentaire organique de type vario MAX CN. (Elementar®, France). Pour ce faire, environ 1000 mg de sol sont utilisés. Le protocole suivi

précise de doser le carbone total ainsi que le carbone inorganique dans le cas où un test à l'HCl se révèle positif afin d'en déduire le carbone organique par soustraction du carbone inorganique (carbonates) au carbone total. Dans notre cas, un test HCl a été effectué et s'est révélé négatif ce qui permet de faire l'hypothèse que le carbone présent dans les différents sols prélevés se présente exclusivement ou presque exclusivement sous la forme de carbone organique. Ainsi l'analyse des sols tamisés à 2 mm permet d'obtenir la teneur en carbone organique total (COT) tandis que l'analyse des sols tamisés à 20 µm permet de connaître la teneur en carbone organique de la fraction fine, ce qui représente la fraction de carbone organique stable du sol. Cette teneur doit ensuite être rapportée à la masse totale de l'échantillon :

$$C \leq 20 \mu\text{m} = c_{<20} \cdot p_{<20}$$

Avec $c_{<20}$ la teneur en carbone mesurée dans la fraction 0-20 µm, et $p_{<20}$ la proportion massique en particules < à 20 µm dans l'échantillon total de sol (chiffre allant de 0 à 1).

Les taux de carbone organique stable et labile peuvent être reliés au COT de la manière suivante :

$$\text{COT} = C \leq 20 \mu\text{m} + C > 20 \mu\text{m}$$

Où $C \leq 20 \mu\text{m}$ représente donc le taux de carbone organique stable et $C > 20 \mu\text{m}$ le taux carbone organique labile du sol. De cette manière, la teneur en carbone organique labile peut être déduit grâce au COT et au $C \leq 20 \mu\text{m}$ analysés. Les valeurs obtenues sont exprimées en g/100 g ms ou en % C ms.

2.3.7 Relevé d'adventices

Un comptage ainsi qu'une identification d'adventices ont également été réalisés dans chacun des traitements des parcelles BLÉ et ÉPEAUTRE. Ces mesures ont été effectuées à deux reprises : le 16 mars 2021 ainsi que le 13 avril 2021. Il aurait été intéressant d'effectuer ces relevés sur une plus longue période mais cela n'a pas pu être possible en raison de l'application d'herbicides. Cinq répétitions espacées de 20 m ont été réalisées au sein de chacun des traitements (Annexe 2). Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un cadre de 1 m². Le nombre, l'espèce ainsi que le stade phénologique de chaque adventice ont également été recensés. Il est important de noter ici que, hormis le travail du sol, les méthodes de lutte contre les adventices sont identiques dans chacun des traitements étudiés.

2.3.8 Couverture foliaire

Des mesures de couverture foliaire ont été menées à trois reprises dans chacun des traitements aux dates du 22 mars, 8 avril et 26 avril 2021. Au sein d'un traitement, le relevé a été réalisé en cinq endroits, répartis en quinconce dans la bande de mesure (Annexe 2). Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un cadre quadrillé (Figure 15) ainsi qu'avec l'application Canopéo (Soil Physics Research Group, 2021). Pour la méthode Canopéo, trois prises de mesure pour chacune des répétitions ont été effectuées et la moyenne de celles-ci a été utilisée comme résultat final.

Le but est d'évaluer si cette application indique des résultats suffisamment proches de ceux obtenus grâce au cadre qui est une méthode fiable – mais plus lourde – pour estimer la couverture foliaire. Dans le cas où les résultats s'avèrent concluants, l'application peut être utilisée comme seul moyen d'estimation de la couverture foliaire, réduisant ainsi considérablement le temps nécessaire pour cette mesure.

L'approche du cadre quadrillé consiste à compter le nombre de carrés étant au moins à moitié rempli par la végétation et ramener ensuite ce nombre au nombre total de carré du quadrillage afin d'obtenir un pourcentage de couverture. En ce qui concerne l'application Canopéo, celle-ci fonctionne sur base de prises de photos de végétation à une hauteur d'environ un demi-mètre. Ensuite chaque pixel vert de cette photo est converti en un pixel blanc et le reste est converti en noir permettant l'estimation du pourcentage de couverture foliaire. Le processus de transformation des photos est visible à la figure 16.



Figure 15 : Cadre quadrillé utilisé pour la mesure de couverture foliaire

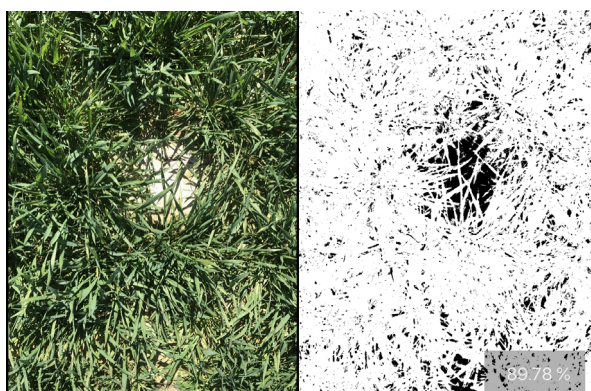


Figure 16 : Exemple du fonctionnement de l'application Canopéo. À gauche la photo avant traitement et à droite la photo après traitement par l'application et estimation du pourcentage de couverture

2.3.9 Tallage utile

Le tallage utile représente le nombre d'épis présents sur un mètre carré. Cette mesure a été réalisée en cinq endroits dans chacun des traitements étudiés et ce à la date du 23 juillet 2021. Toutes les répétitions sont espacées de 20 m et leur disposition au sein de la bande de mesure est visible à l'annexe 2.

2.3.10 Rendement

Le rendement a été estimé en réalisant cinq échantillonnages dans la bande de mesure de chacun des traitements à la date du 25 août 2021. Pour chacun des échantillons, la récolte s'est faite en une bande de 5 m de long sur 4 m de large, soit une surface de 20 m² environ (plan de récolte visible à l'annexe 6). Cette disposition a été choisie afin d'éviter les zones où des mesures destructives pour la culture ont été effectuées (teabags, test moutarde et paniers à vers de terre). Ces bandes ont été récoltées à l'aide d'une moissonneuse à essais dont la barre de coupe est de 1,95 m (Figure 17). Les grains récoltés sur chaque placette ont ensuite été pesés et la surface exacte récoltée a été mesurée. Afin de déterminer le taux d'humidité des grains à la récolte, un échantillon d'environ 1 kg a été prélevé, pesé directement après la récolte et ensuite pesé après séchage en étuve.



Figure 17 : Moissonneuse à essai utilisée pour l'évaluation du rendement

2.4 Analyses statistiques

L'analyse statistique et la présentation des données de ce mémoire ont été réalisées à l'aide du logiciel Rstudio et du logiciel Microsoft Excel. Ces analyses et interprétations se basent sur le cours de biométrie (LBIRA2101) des professeurs Xavier Draye et Bernadette Govaerts (UCLouvain). Pour l'ensemble des méthodes évaluées, les résultats des parcelles ÉPEAUTRE et BLÉ sont analysés de manière distincte.

2.4.1 Moyennes, écart-types et erreurs standards

Pour chaque mesure, les moyennes, écart-types et erreurs standards sont évaluées sur base des formules suivantes :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad ; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad ; \quad ES = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Avec

- μ la valeur moyenne des résultats
- n le nombre d'observations
- x_i la valeur obtenue pour la mesure i
- σ l'écart-type lié à la moyenne
- ES l'erreur standard liée à la moyenne

2.4.2 Analyse de la variance et comparaison des moyennes

ANOVA 1

Une analyse de la variance à un critère de classification (ANOVA 1) peut être effectuée sur un jeu de données uniquement si les trois hypothèses suivantes sont vérifiées :

- Indépendance des observations : Le protocole expérimental est tel que les observations peuvent être considérées comme indépendantes
- Normalité des résidus : les résidus doivent suivre une loi normale. Cette hypothèse peut être vérifiée notamment par le test de Shapiro-Wilk
- Homoscédasticité : les variances doivent être considérées comme homogènes. Cette hypothèse peut être vérifiée par le test de Levene

Dans le cas où ces hypothèses sont vérifiées, il est supposé que les observations suivent le modèle linéaire probabiliste suivant :

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad \text{avec} \quad \sum \alpha_i = 0$$

Avec

- Y_{ij} la variable quantitative étudiée
- μ_i la moyenne des valeurs de la méthode évaluée pour le niveau i du facteur
- ε_{ij} l'écart résiduel entre l'observation j et la moyenne i , avec $\varepsilon_{ij} \sim iN(0, \sigma^2)$
- α_i l'effet du niveau i du facteur

Dans le cas où ces hypothèses ne sont pas vérifiées, il est possible d'effectuer des transformations logarithmique ou racine carrée sur les données afin qu'elles correspondent aux critères nécessaires à la réalisation de l'ANOVA.

Un test de Fisher (ou test F) réalisé sur base de ce modèle permet de vérifier l'égalité des moyennes des différents niveaux du facteur étudié. L'hypothèse nulle (H_0) de ce test est :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$$

Lorsque le résultat de ce test présente une p-valeur inférieure au seuil de 0,05 fixé, cette hypothèse nulle peut être rejetée, signifiant qu'au moins une des moyennes est significativement différente des autres

Dans le cadre de ce mémoire, les analyses ANOVA 1 ont été réalisées sur base du modèle linéaire employant le type de traitement comme facteur. Ce facteur comporte trois niveaux : NL06, Labour et NL18.

Test de Tukey

Lorsque le résultat du test de Fisher indique une p-valeur inférieure à 0,05 cela signifie qu'au moins une moyenne est significativement différente des autres mais ce test ne permet pas d'évaluer quels sont les niveaux du facteur étudié qui diffèrent entre eux. Le test de Tukey compare deux à deux les moyennes des niveaux du facteur. Dans ce cas, l'hypothèse nulle (H_0) de ce test est la suivante :

$$H_0 : \mu_i = \mu_j$$

A nouveau, lorsque le résultat de ce test présente une p-valeur inférieure au seuil de 0,05 fixé, cette hypothèse nulle peut être rejetée, signifiant que les moyennes des niveaux i et j sont significativement différentes.

2.4.3 Analyse non-paramétrique

Certaines données de ce travail ne vérifient pas les hypothèses nécessaires à la réalisation d'une ANOVA 1 et ce malgré les transformations opérées. Dans ce cas, il existe des alternatives non-paramétriques à l'ANOVA 1 et au test de Tukey. Dans le cadre de ce mémoire, le test de Kruskal-Wallis (équivalent à l'ANOVA 1) ainsi que le test de Wilcoxon (équivalent au test de Tukey) ont été utilisés comme alternative.

2.4.4 Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation de Pearson permet d'évaluer la force ainsi que le sens (positif ou négatif) de la corrélation linéaire qui peut exister entre deux variables quantitatives X et Y. Ce coefficient $r(X,Y)$ se calcule de la manière suivante :

$$r(X,Y) = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{avec} \quad Cov(X,Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{X_i - \bar{X}}{Y_i - \bar{Y}}$$

Avec $\bar{X}$ et $\bar{Y}$ les valeurs moyennes des variables X et Y.

Un test statistique permet également d'évaluer si cette corrélation est significative ou non *via* l'hypothèse nulle (H_0) suivante :

$$H_0 : r(X,Y) = 0$$

Une p-valeur inférieure au seuil de 0,05 indique qu'il existe une corrélation significative entre les variables X et Y.

3. Résultats

3.1 Méthodes permettant d'évaluer l'activité biologique

3.1.1 Tea bag index

Parcelle ÉPEAUTRE

Les taux de décomposition moyens k (Figure 18) et de stabilisation S (Figure 19) et les erreurs standard qui y sont liées ont été calculés. Les hypothèses de normalité des données et d'homogénéité des variances sont remplies pour chacun des deux facteurs. Des analyses de type ANOVA 1 sur base d'un modèle linéaire employant le type de traitement comme facteur ont donc été effectuées.

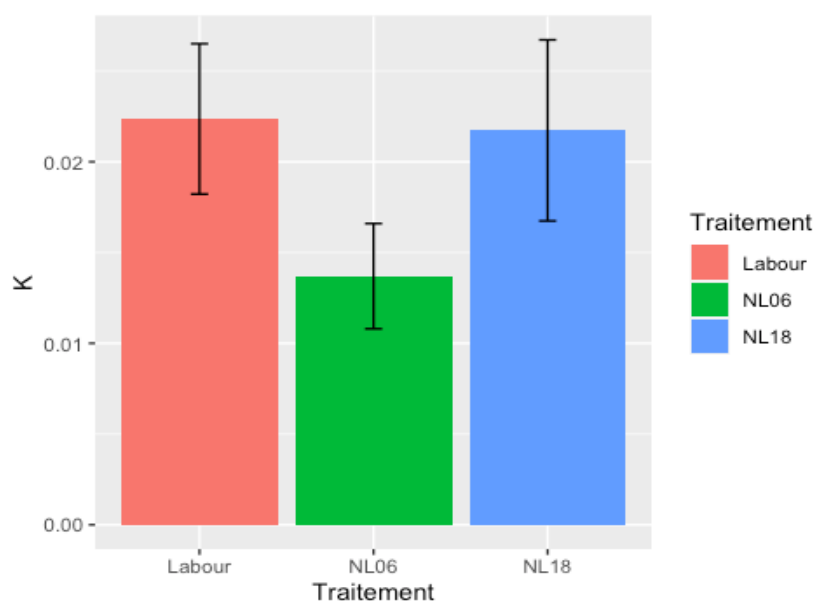


Figure 18 : Taux de décomposition moyen k [-] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE.

Pour le facteur k , les résultats du test F de l'ANOVA 1 indiquent qu'au moins deux moyennes sont significativement différentes l'une de l'autre. Le test de Tukey (Tableau 4) révèle que les traitements Labour et NL18 présentent un facteur k significativement supérieur à celui du traitement NL06. Les traitements NL18 et Labour quant à eux ne diffèrent pas significativement l'un de l'autre au regard du taux de décomposition k .

Tableau 4 : Résultats du test de Tukey pour le taux de décomposition moyen k [-] pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p -valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	-0.008666	-0.01532	-0.002008	0.008327
NL18-Labour	-0.0006327	-0.007562	0.006297	0.9729
NL18-NL06	0.008033	0.002066	0.014	0.006245

Pour le taux de stabilisation S (Figure 19), les résultats du test F de l'ANOVA 1 (Tableau 5) indiquent une p -valeur supérieure à 0,05 signalant que les taux de stabilisation moyens S pour chacun des traitements ne peuvent être considérés comme significativement différents.

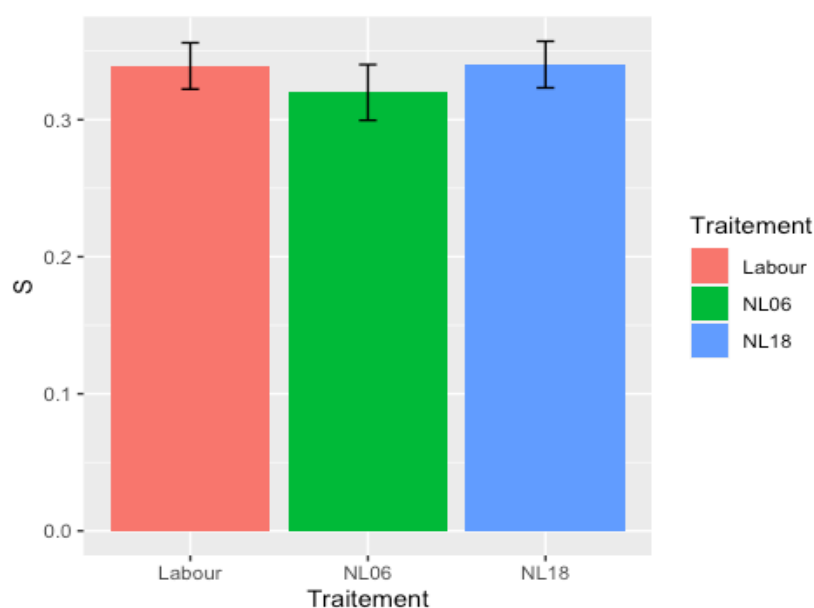


Figure 19 : Taux de stabilisation moyen S [-] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE.

Tableau 5 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le taux de stabilisation moyen S [-] des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p -valeur (colonne « $Pr(>F)$ ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	0.004435	0.002217	1.729	0.1879
Residuals	50	0.06411	0.001282	NA	NA

Parcelle BLÉ

Les taux de décomposition moyens k et les erreurs standards pour chacun des traitements sont présentés à la figure 20. L'hypothèse de normalité des données n'est pas remplie pour le taux de décomposition k , une transformation logarithmique a donc été effectuée et s'est avérée concluante.

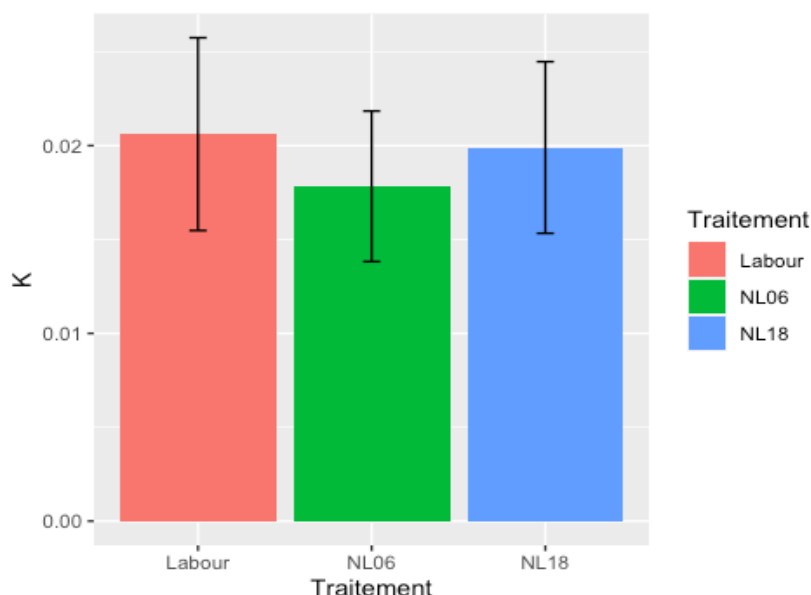


Figure 20 : Taux de décomposition moyen k [-] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ.

Le test F de l'ANOVA 1 (Tableau 6) montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements en ce qui concerne le taux de décomposition k pour la parcelle BLÉ.

Tableau 6 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le taux de décomposition moyen k [-] de la parcelle BLÉ. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	0.04463	0.02232	0.7949	0.4582
Residuals	43	1.207	0.02808	NA	NA

Quant au taux de stabilisation S (Figure 21), le résultat du test F (Tableau 7) indique que les taux de stabilisation moyens S des traitements Labour, NL06 et NL18 ne peuvent être considérés comme différents.

Tableau 7 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le taux de stabilisation moyen S [-] de la parcelle BLÉ. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	0.004659	0.00233	1.465	0.2409
Residuals	50	0.07952	0.00159	NA	NA

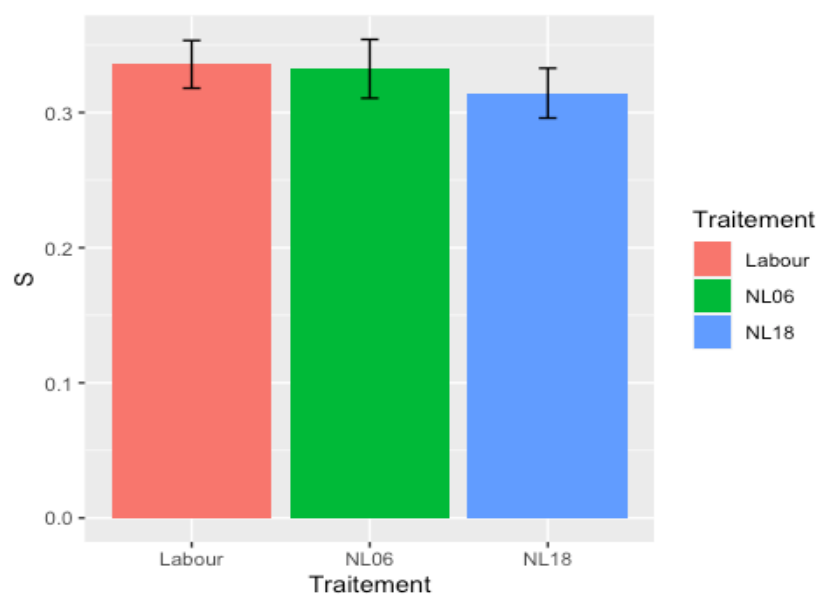


Figure 21 : Taux de stabilisation moyen S [-] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ.

3.1.2 Paniers à vers de terre

Parcelle ÉPEAUTRE

Les hypothèses de normalité et homosédasticité des variances sont respectées. Le test F (ANOVA 1) montre que le nombre moyen de cabanes à vers de terre (Figure 22) ne diffèrent pas significativement entre les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE (Tableau 8).

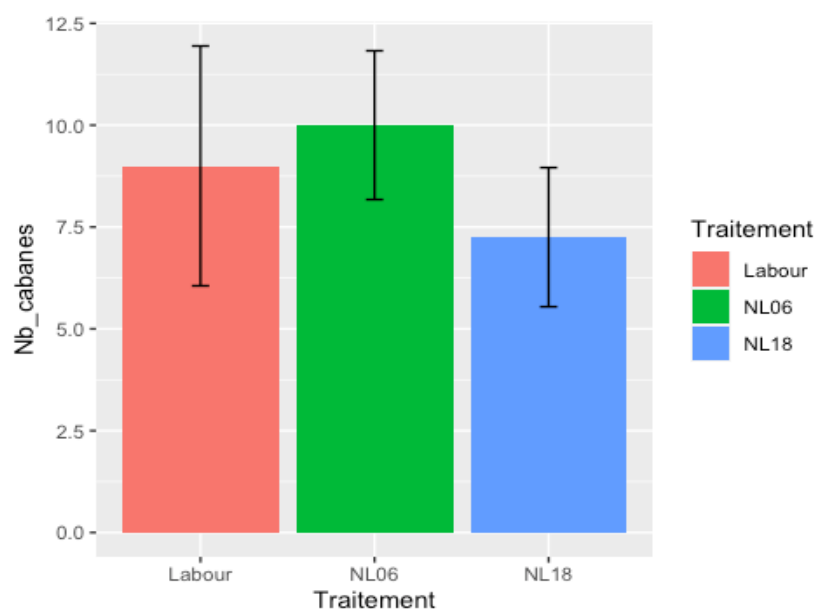


Figure 22 : Nombre moyen de cabanes apparues sur une période de 5 mois et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE.

Tableau 8 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le nombre moyen de cabanes apparues sur une période de 5 mois au sein des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	15.5	7.75	1.559	0.2623
Residuals	9	44.75	4.972	NA	NA

Le nombre moyen de turricules apparues sur une période de 5 mois dans chacun des traitements est visible à la figure 23. Le résultat du test F (ANOVA 1) indique que le facteur traitement n'est pas significatif (Tableau 9).

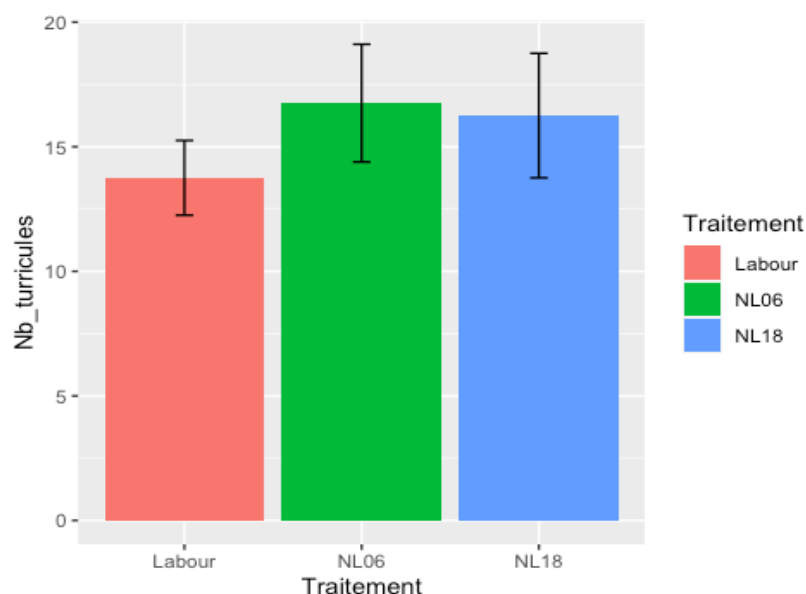


Figure 23 : Nombre moyen de turricules apparues sur une période de 5 mois et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE.

Tableau 9 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le nombre moyen de turricules apparues sur une période de 5 mois au sein des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	20.67	10.33	2.201	0.1666
Residuals	9	42.25	4.694	NA	NA

En plus des données du nombre de cabanes et turricules, la variation du recouvrement du sol par la paille a également été mesurée. La figure 24 illustre l'évolution de ce recouvrement sur les 5 mois d'observations. Le recouvrement moyen du sol est semblable pour les traitements Labour et NL18. Celui-ci semble par contre diminuer de manière plus importante pour le traitement NL06.

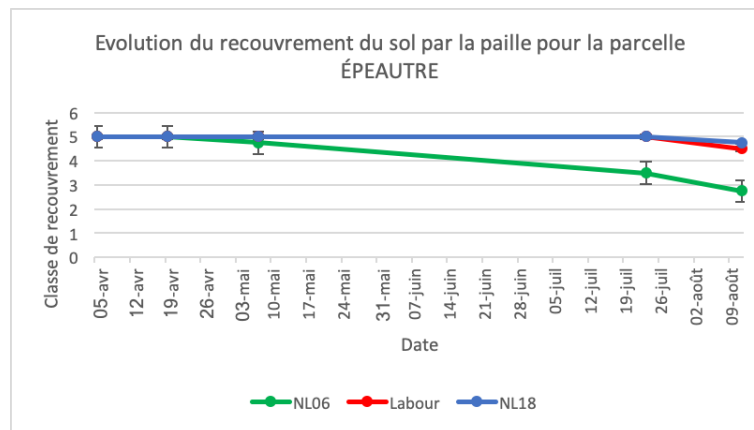


Figure 24 : Evolution du recouvrement moyen du sol par la paille sur les 5 mois d'observation pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE. Chaque classe correspondant à une gamme de % de surface occupée par la paille : Classe 1 = 0%, classe 2 = 1-14%, classe 3 = 15-24%, classe 4 = 25-39%, classe 5 = 40-100%.

En résumé, les analyses statistiques réalisées sur les données de la parcelle ÉPEAUTRE montrent qu'il n'existe pas de différence significative entre les traitements en ce qui concerne le nombre de cabanes et turricules apparues sur la période d'observation.

Parcelle BLÉ

Le nombre moyen de cabanes apparues sur 5 mois (Figure 25) ne présente pas de différence significative entre les traitements selon le test F (Tableau 10).

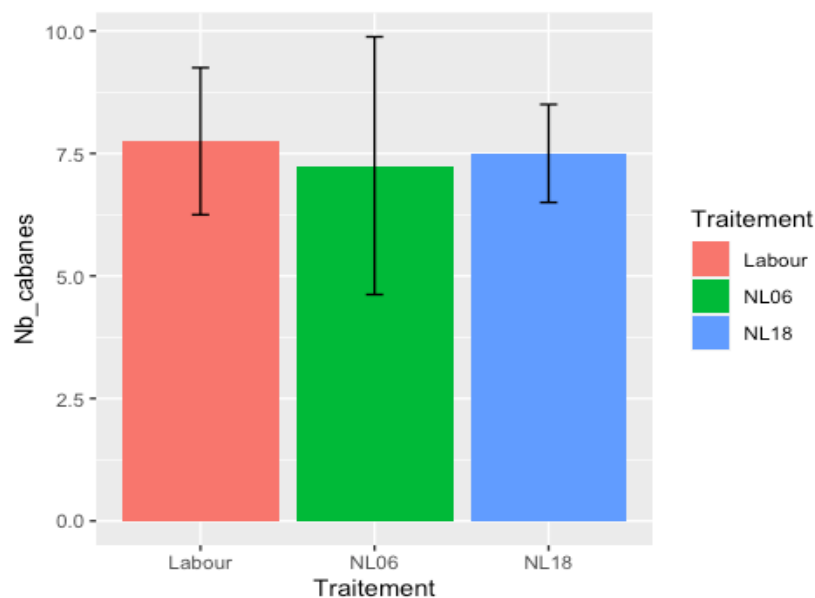


Figure 25 : Nombre moyen de cabanes apparues sur une période de 5 mois et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ.

Tableau 10 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le nombre moyen de cabanes apparues sur une période de 5 mois au sein des traitements de la parcelle BLÉ. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	0.5	0.25	0.07377	0.9294
Residuals	9	30.5	3.389	NA	NA

Les données moyennes et erreurs standards concernant le nombre de turricules apparues dans les traitements de la parcelle BLÉ sont présentées à la figure 26.

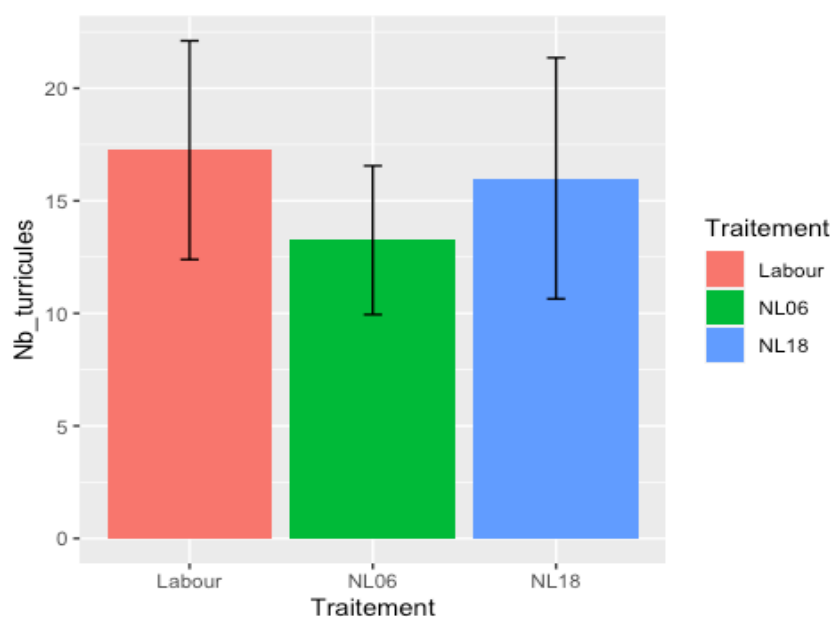


Figure 26 : Nombre moyen de turricules apparues sur une période de 5 mois et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ.

Le résultat du test F de l'ANOVA 1 (Tableau 11) indique ici aussi que le nombre moyen de cabanes et turricules apparues sur la période d'observation n'est pas significativement différent entre les traitements.

Tableau 11 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le nombre moyen de turricules apparues sur une période de 5 mois au sein des traitements de la parcelle BLÉ. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	33.5	16.75	0.7955	0.4807
Residuals	9	189.5	21.06	NA	NA

Le recouvrement du sol par la paille a également été mesuré dans la parcelle BLÉ. Son évolution (Figure 27) moyenne ne semble pas varier entre les traitements.

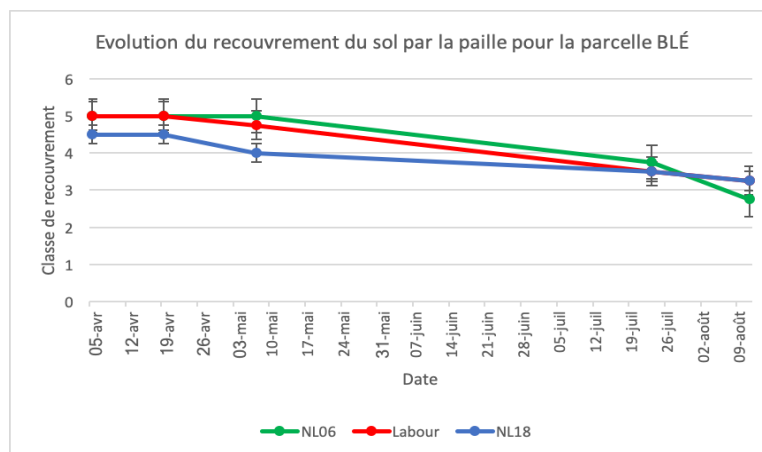


Figure 27 : Evolution du recouvrement moyen du sol par la paille sur les 5 mois d'observation pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ. Chaque classe correspondant à une gamme de % de surface occupée par la paille : Classe 1 = 0%, classe 2 = 1-14%, classe 3 = 15-24%, classe 4 = 25-39%, classe 5 = 40-100%.

En résumé, les analyses statistiques effectuées sur les données issues de la méthode des paniers à vers de terre ont révélé ici aussi qu'il n'existe pas de différence significative entre les traitements de la parcelle BLÉ en ce qui concerne le nombre de cabanes et turricules apparues sur la période d'observation.

3.1.3 Méthode moutarde

Parcelle ÉPEAUTRE

La figure 28 présente le nombre moyen de vers de terre récoltés en fonction des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE.

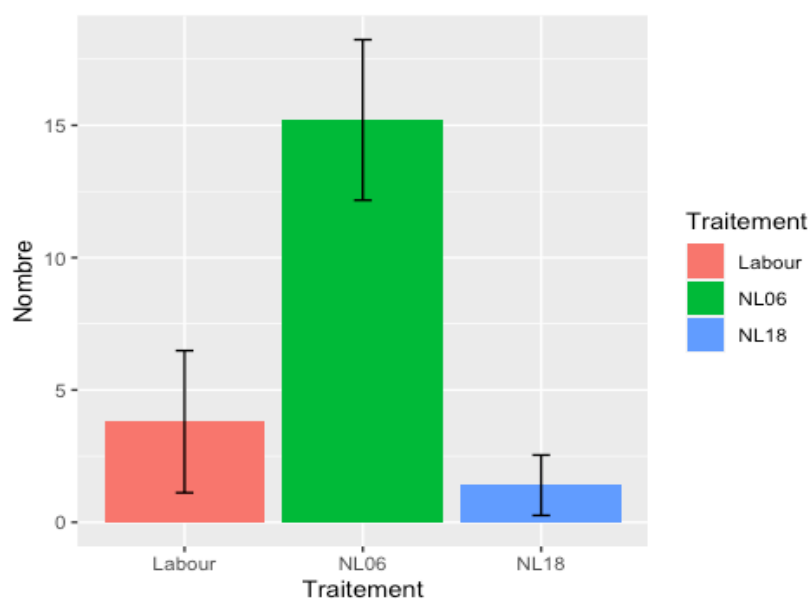


Figure 28 : Nombre moyen de vers de terre récoltés via la méthode moutarde et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE

L'hypothèse de normalité n'étant pas respectée, une transformation logarithmique a été effectuée et s'est avérée concluante. Le test F indique qu'au moins deux moyennes sont

significativement différentes l'une de l'autre. Le test de Tukey (Tableau 12) précise que le traitement NL06 est significativement supérieur aux traitements Labour et NL18. Les traitements Labour et NL18 ne sont quant à eux pas significativement différents l'un de l'autre.

Tableau 12 : Résultats du test de Tukey pour le nombre moyen de vers de terre récoltés via la méthode moutarde pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	0.6937	0.2735	1.114	0.002544
NL18-Labour	-0.2871	-0.7328	0.1586	0.2345
NL18-NL06	-0.9808	-1.426	-0.5351	0.0002617

Lors de la réalisation de la méthode moutarde, un classement des vers de terre récoltés a également été effectué. La figure 29 illustre le nombre moyen de vers de terre dans chacun des groupes fonctionnels en fonction du traitement. Les vers de terre de type épigé et endogé semblent plus représentés dans le traitement NL06 comparativement aux traitements Labour et NL18.

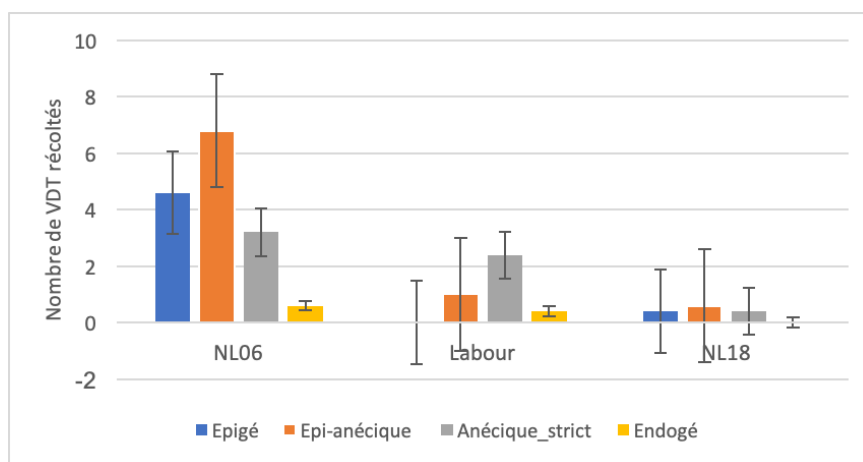


Figure 29 : Nombre moyen de vers de terre dans chacun des groupes fonctionnels en fonction des traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE.

Parcelle BLÉ

La figure 30 illustre le nombre moyen de vers de terre récoltés via la méthode moutarde en fonction des traitements de la parcelle BLÉ. Le test F de l'ANOVA 1 permet d'affirmer que le facteur traitement est significatif. Un test de Tukey a donc été réalisé, permettant de préciser que le traitement NL06 présente un nombre moyen de vers de terre significativement supérieur au traitement Labour (Tableau 13). Cependant, les traitements Labour et NL18 ainsi que les traitements NL06 et NL18 ne sont pas significativement différents entre eux selon le test de Tukey.

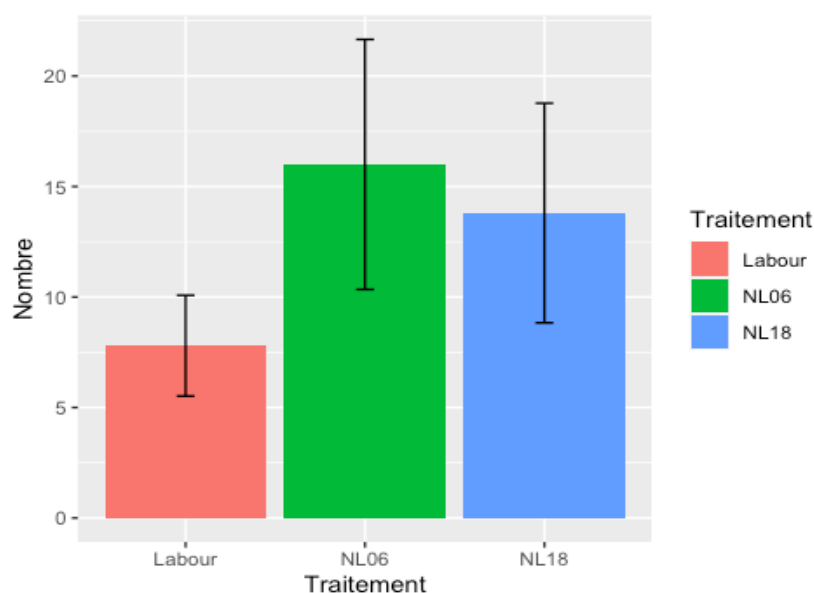


Figure 30 : Nombre moyen de vers de terre récoltés via la méthode moutarde et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ.

Tableau 13 : Résultats du test de Tukey pour le nombre moyen de vers de terre récoltés via la méthode moutarde pour les traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	8.2	0.5356	15.86	0.03595
NL18-Labour	6	-1.664	13.66	0.134
NL18-NL06	-2.2	-9.864	5.464	0.7302

Tout comme la parcelle ÉPEAUTRE, un classement des vers de terre récoltés a été effectué pour la parcelle BLÉ. La figure 31 illustre le nombre moyen de vers de terre dans chacun des groupes fonctionnels en fonction du traitement. Les vers de terre de type Epi-anécique sont fortement représentés dans chacun des traitements mais aucune différence entre les traitements ne se dégage.

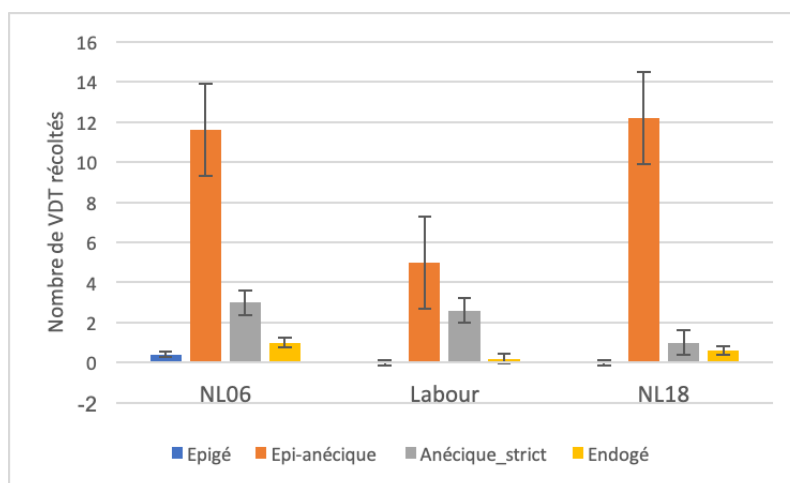


Figure 31 : Nombre moyen de vers de terre dans chacun des groupes fonctionnels en fonction des traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ

3.2 Résistance à la pénétration

Parcelle ÉPEAUTRE

Les résultats des mesures de pénétrométrie pour chacun des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE sont visibles à la figure 32.

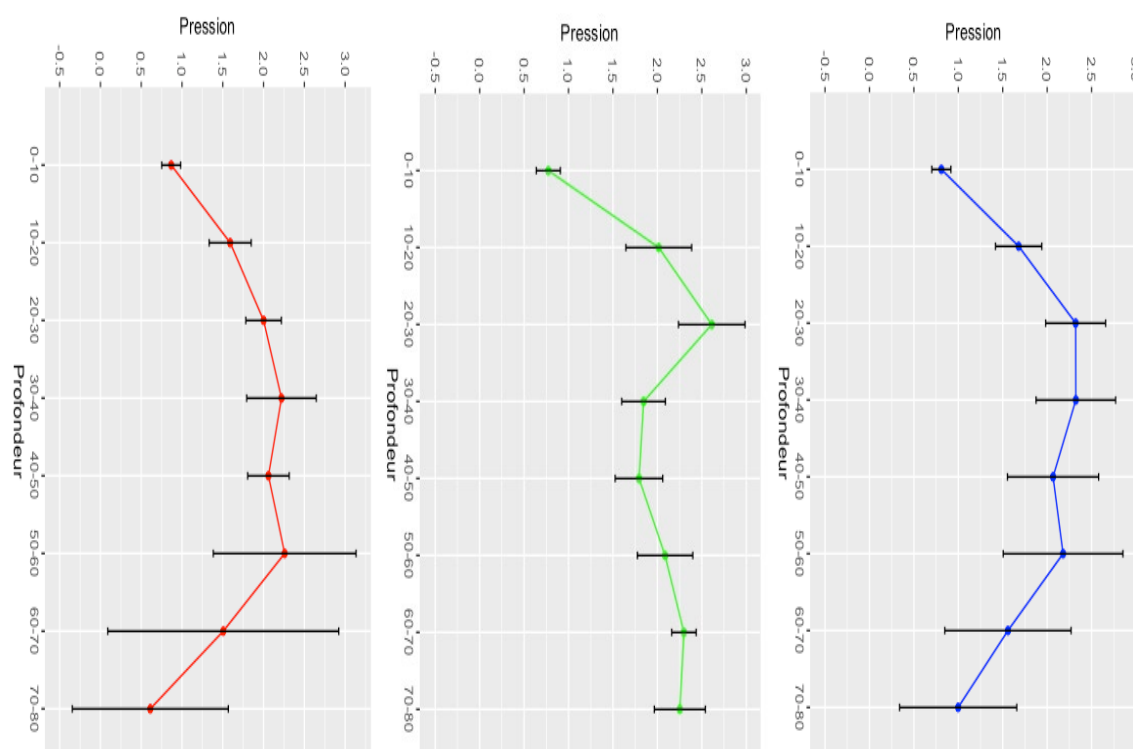


Figure 32 : Pression moyenne exercée par unité de surface [Mpa] en fonction de la profondeur et erreur standard pour les traitements Labour (rouge), NL06 (vert) et NL18 (bleu) de la parcelle ÉPEAUTRE.

Les hypothèses nécessaires à la réalisation de l'ANOVA 1 sont remplies. Le test F appliqué aux différentes profondeurs indique que le facteur traitement est significatif à la profondeur de 20-30 cm. Les résultats du test de Tukey (Tableau 14) indiquent que le traitement NL06 présente une pression moyenne significativement supérieure au traitement Labour à la profondeur de 20-30 cm. Par contre, aucune différence significative entre les traitements n'a pu être mise en évidence aux autres gammes de profondeur.

Tableau 14 : Résultats du test de Tukey pour la pression moyenne exercée par unité de surface [Mpa] à la profondeur de 20-30 cm pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	0.6118	0.07695	1.147	0.02527
NL18-Labour	0.3202	-0.2147	0.8551	0.2842
NL18-NL06	-0.2916	-0.8265	0.2433	0.3459

Parcelle BLÉ

Les pressions moyennes exercées en fonction de la profondeur pour chacun des traitements de la parcelle BLÉ sont visibles à la figure 33. Le résultat du test de Kruskal-Wallis indique que le facteur traitement est significatif à la gamme de profondeur de 20-30 cm. Les résultats du test de Wilcoxon (Tableau 15) indiquent ici aussi que le traitement NL06 présente une pression moyenne significativement supérieure au traitement Labour à la profondeur de 20-30 cm. Par contre, aucune différence significative entre les traitements n'a pu être mise en évidence aux autres gammes de profondeur.

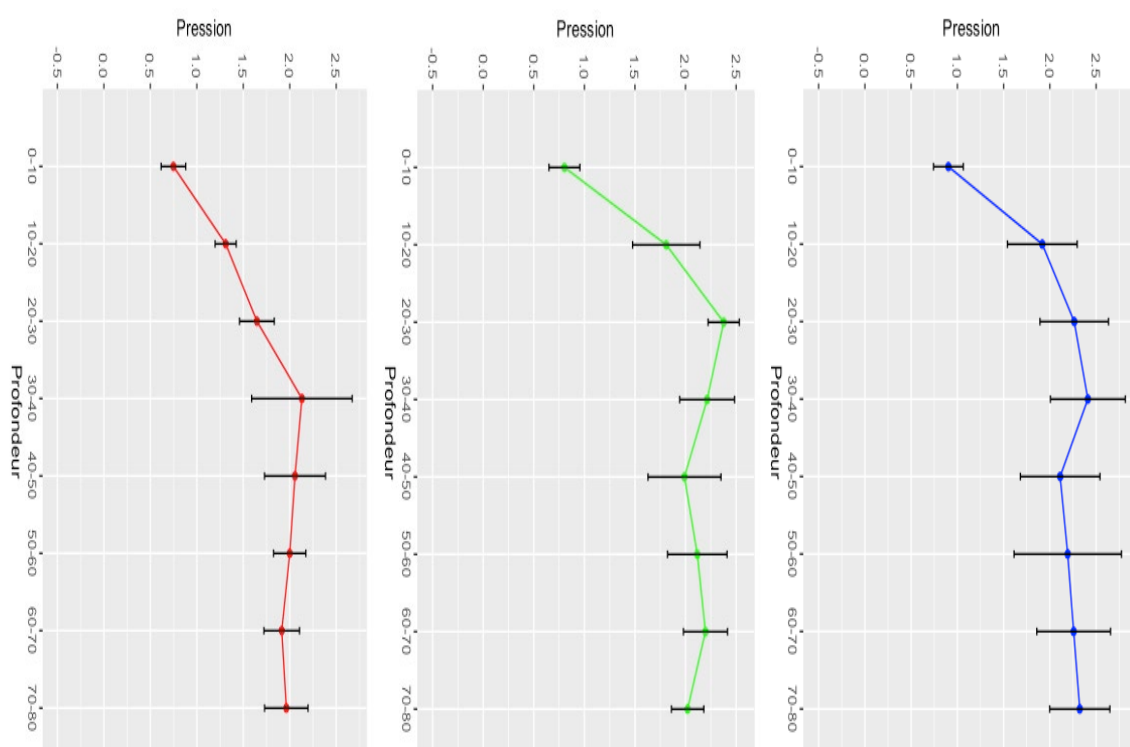


Figure 33 : Pression moyenne exercée par unité de surface [Mpa] en fonction de la profondeur et erreur standard pour les traitements Labour (rouge), NL06 (vert) et NL18 (bleu) de la parcelle BLÉ.

Tableau 15 : Résultats du test de Wilcoxon pour la pression moyenne exercée par unité de surface [Mpa] à la profondeur de 20-30 cm pour les traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	0.27	0.02891	0.5111	0.02384
NL18-Labour	0.2145	-0.02662	0.4556	0.09237
NL18-NL06	-0.05553	-0.2966	0.1856	0.8501

3.3 Stabilité du sol *via* la méthode VESS

Parcelle ÉPEAUTRE

La méthode VESS permet d'obtenir un score indicatif de la qualité structurale du sol analysé. Les scores moyens pour chacun des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE sont visibles à la figure 34. Les hypothèses de normalité des données et d'homogénéité des variances ayant été respectées, un test F (ANOVA 1) a été réalisé et celui-ci montre que les scores moyens sont significativement différents entre les traitements. Les résultats du test de Tukey (Tableau 16) indiquent que le traitement NL06 présente un score VESS moyen significativement supérieur à celui du traitement NL18. Par contre, les traitements NL06 et Labour ainsi que les traitements NL18 et Labour ne diffèrent pas significativement les uns des autres selon le test de Tukey.

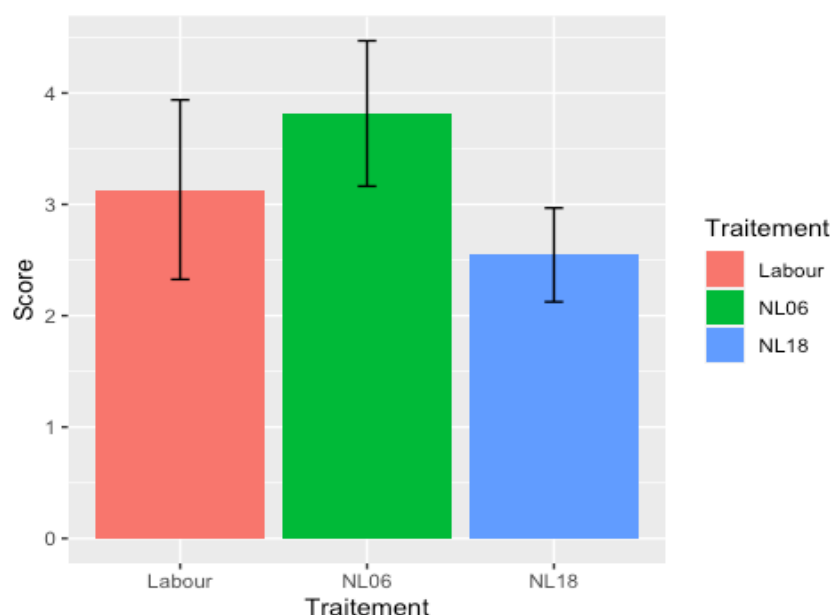


Figure 34 : Score VESS moyen et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE. Un score de 1 est synonyme de bonne qualité structurale tandis qu'un score de 5 désigne une pauvre qualité structurale.

Tableau 16 : Résultats du test de Tukey pour le score VESS moyen des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	0.684	-0.194	1.562	0.1362
NL18-Labour	-0.586	-1.464	0.292	0.2173
NL18-NL06	-1.27	-2.148	-0.392	0.005947

Parcelle BLÉ

La figure 35 présente les scores VESS moyen pour les traitements de la parcelle BLÉ. Les analyses statistiques sur ces résultats permettent de montrer qu'il existe une différence significative entre les traitements selon le test F de l'ANOVA 1. Le test de Tukey (Tableau 17) révèle que le traitement Labour présente un score VESS moyen significativement supérieur à celui du traitement NL06. Les traitements NL18 et Labour ne présentent par contre pas de différence significative. En ce qui concerne les traitements NL06 et NL18, l'hypothèse d'égalité des moyennes ne peut être rejetée vu la p-valeur supérieure à 0,05 mais celle-ci est toutefois à peine plus élevée que le seuil de 0,05 fixé, soulignant la présence d'une tendance.

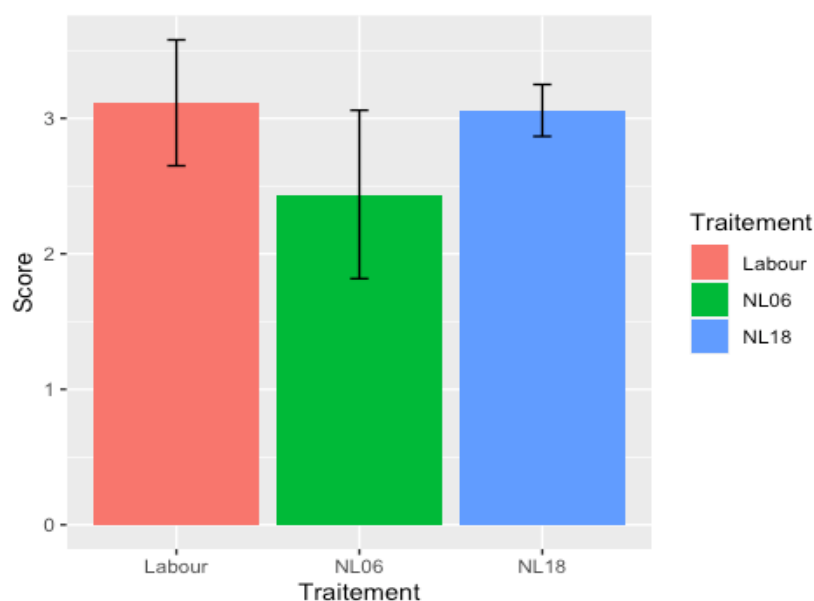


Figure 35 : Score VESS moyen et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ. Un score de 1 est synonyme de bonne qualité structurale tandis qu'un score de 5 désigne une pauvre qualité structurale.

Tableau 17 : Résultats du test de Tukey pour le score VESS moyen des traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	-0.676	-1.303	-0.04918	0.03452
NL18-Labour	-0.056	-0.6828	0.5708	0.9692
NL18-NL06	0.62	-0.006821	1.247	0.05262

3.4 Stabilité des agrégats *via* la méthode USDA

Parcelle ÉPEAUTRE

La méthode USDA permet de caractériser la stabilité d'agrégats *via* un système de classes. Les résultats de cette méthode pour chacun des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE sont visibles à la figure 36. Pour ces données, l'hypothèse de normalité des données n'est pas respectée et aucune des transformations possibles n'a pu améliorer cette caractéristique. Un test de Kruskal-Wallis a été effectué et indique (Tableau 18) qu'au moins deux traitements présentent des classes USDA moyennes différentes. Cependant, le test de Wilcoxon (Tableau 19) présente des résultats contradictoires par rapport à celui du test de Kruskal-Wallis puisque l'ensemble des comparaisons paires sont non significatives. Une raison possible à cette incohérence est que le test de Kruskal-Wallis est un test moins puissant que son homologue paramétrique (le test F de l'ANOVA 1). L'interprétation graphique montre tout d'abord que les traitements NL06 et Labour ne sont pas significativement différents l'un de l'autre. Ensuite le traitement NL18 présente une classe USDA significativement inférieure aux deux autres traitements.

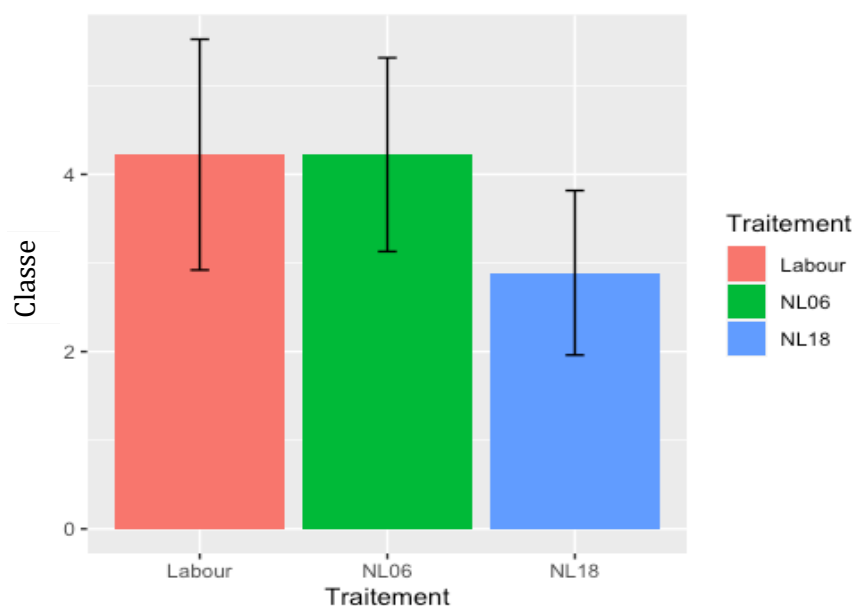


Figure 36 : Classe USDA moyenne et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE. Plus la classe est élevée et meilleure est la qualité structurale des agrégats.

Tableau 18 : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les classes USDA moyennes des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « p ») inférieure à 0,05 indique qu'au moins deux traitements présentent des moyennes différentes.

	n	statistic	df	p	method
Classe	27	7.052	2	0.0294	Kruskal-Wallis

Tableau 19 : Résultats du test de Wilcoxon pour les classes USDA moyennes des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative

group1	group2	n1	n2	statistic	p	p.adj	p.adj.signif
Labour	NL06	9	9	40	1	1	ns
Labour	NL18	9	9	65	0.023	0.068	ns
NL06	NL18	9	9	65.5	0.024	0.071	ns

Parcelle BLÉ

Les résultats de la méthode USDA pour les traitements de la parcelle BLÉ sont présentés à la figure 37. L'hypothèse de normalité n'étant pas respectée malgré les transformations logarithmique ou racine carrée opérées, un test de Kruskal-Wallis a été réalisé. Le résultat de ce test a pu mettre en évidence qu'il existe au moins deux moyennes significativement différentes. Le test de Wilcoxon (Tableau 20) montre que le traitement NL06 présente une classe USDA moyenne significativement supérieure au traitement Labour. Les traitements NL18 et Labour ainsi que les traitements NL18 et NL06 ne présentent par contre pas des classes USDA moyennes significativement différentes.

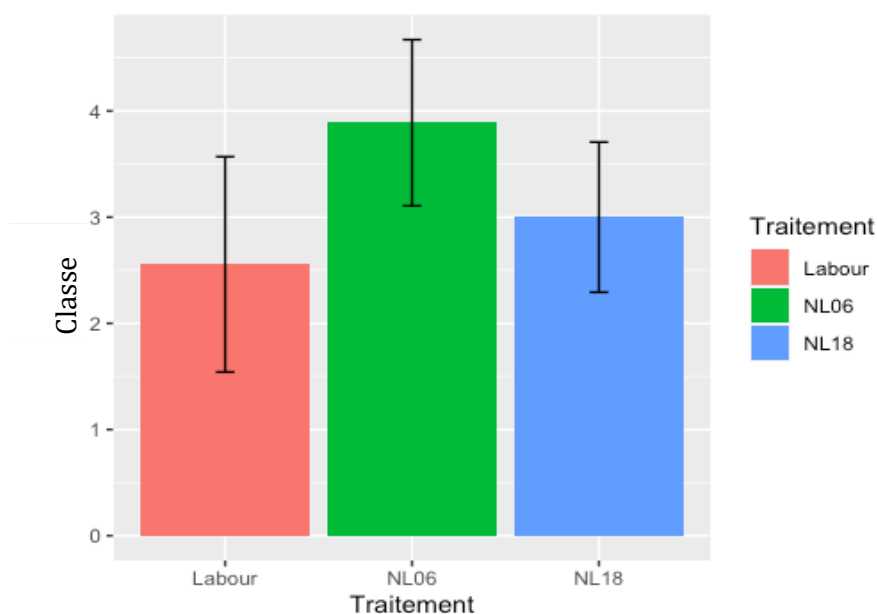


Figure 37 : Classe USDA moyenne et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ. Plus la classe est élevée et meilleure est la qualité structurale des agrégats.

Tableau 20 : Résultats du test de Wilcoxon pour les classes USDA moyennes des traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative

group1	group2	n1	n2	statistic	p	p.adj	p.adj.signif
Labour	NL06	9	9	13	0.014	0.04	*
Labour	NL18	9	9	29	0.305	0.915	ns
NL06	NL18	9	9	63.5	0.034	0.101	ns

3.5 Infiltration d'eau

Parcelle ÉPEAUTRE

Les mesures d'infiltration d'eau réalisées dans chacun des traitements permettent d'obtenir la conductivité hydraulique à saturation K_s [$m.s^{-1}$], indicateur de l'infiltration d'eau dans le sol. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 38. Les données de conductivité hydraulique à saturation K_s ne suivant pas une relation normale, une transformation logarithmique a été effectuée et s'est avérée concluante. De cette manière un test F (ANOVA 1) a pu être réalisé afin d'évaluer et révèle que le facteur traitement n'est pas significatif, signifiant que les conductivités hydrauliques moyennes ne peuvent pas être considérées comme différentes entre les traitements (Tableau 21).

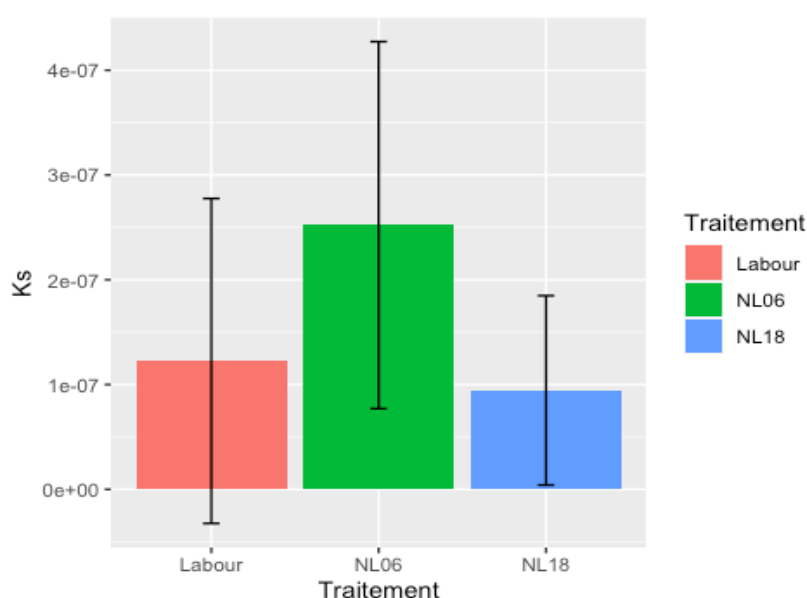


Figure 38 : Conductivité hydraulique à saturation moyenne K_s [$m.s^{-1}$] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE.

Tableau 21 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour la conductivité hydraulique à saturation moyenne K_s [$m.s^{-1}$] pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	0.9667	0.4833	1.076	0.3718
Residuals	12	5.392	0.4494	NA	NA

Il semble important de noter ici la très grande variabilité de la mesure d'infiltration, les écarts-types sont du même ordre de grandeur que les moyennes. Les valeurs précises des écarts-types sont présentées au tableau 22.

Tableau 22 : Moyennes et écarts-types de la conductivité hydraulique à saturation K_s [$m.s^{-1}$] pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE

	N	Moyenne	Ecart-Type
Labour	5	1.225e-07	1.551e-07
NL06	5	2.522e-07	1.751e-07
NL18	5	9.448e-08	9.039e-08

Parcelle BLÉ

La figure 39 illustre les résultats de la conductivités hydrauliques à saturation moyenne pour les traitements de la parcelle BLÉ. L'hypothèse de normalité nécessaire à la réalisation de l'ANOVA 1 n'étant pas vérifiée, une transformation logarithmique a été réalisée sur les données et a été considérée comme satisfaisante. Le test F (Tableau 23) montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements.

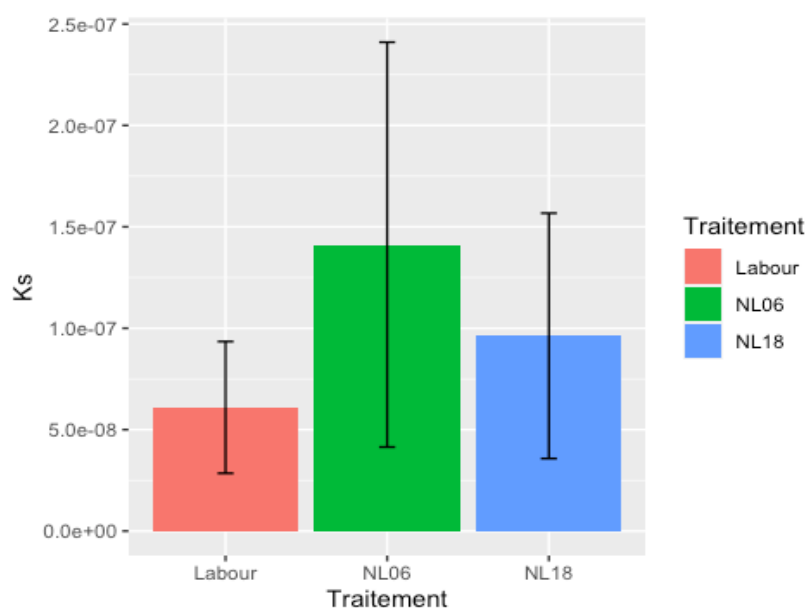


Figure 39 : Conductivité hydraulique à saturation moyenne K_s [$m.s^{-1}$] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ.

Tableau 23 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour la conductivité hydraulique à saturation moyenne K_s [$m.s^{-1}$] pour les traitements de la parcelle BLÉ. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	0.3208	0.1604	1.414	0.281
Residuals	12	1.361	0.1134	NA	NA

La variabilité de la mesure d'infiltration est une fois de plus à souligner. Le tableau 24 présente les moyennes et écarts-types de la conductivité hydraulique à saturation K_s pour chacun des traitements de la parcelle BLÉ.

Tableau 24 : Moyennes et écarts-types de la conductivité hydraulique à saturation K_s [$m.s^{-1}$] pour les traitements de la parcelle BLÉ.

	N	Moyenne	Ecart-Type
Labour	5	6.097e-08	3.248e-08
NL06	5	1.412e-07	9.98e-08
NL18	5	9.623e-08	6.047e-08

Malgré les différences non significatives mises en évidence par les analyses statistiques et la forte variabilité de la mesure, la tendance dégagée par les moyennes est nette et cohérente entre les deux parcelles : le traitement NL06 présente une conductivité hydraulique à saturation plus importante comparé aux traitements Labour et NL18.

3.6 Taux de carbone organique stable et labile

Parcelle ÉPEAUTRE

La figure 40 expose les résultats issus de l'analyse du taux de carbone organique stable pour chacun des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. L'hypothèse de normalité des données n'est pas respectée pour le taux de carbone organique stable et aucune transformation ne permet d'améliorer cette caractéristique. Une analyse de type non paramétrique a été réalisée et le résultat du test de Kruskal-Wallis (Tableau 25) indique qu'il n'existe pas de différence significative entre les traitements au regard du taux moyen de carbone organique stable.

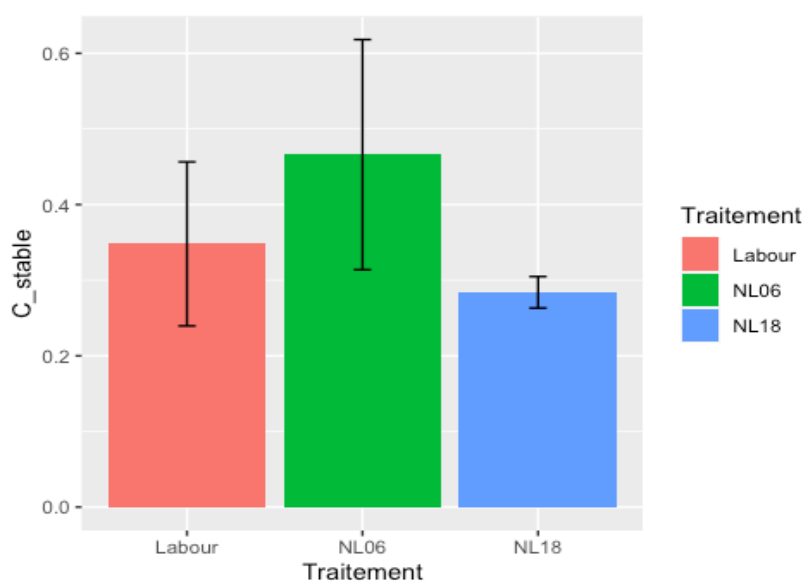


Figure 40 : Taux moyen de carbone organique stable [g/100g ms] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE.

Tableau 25 : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les taux moyens de carbone organique stable [g/100g ms] des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « p ») inférieure à 0,05 indique qu'au moins deux traitements présentent des moyennes différentes.

	n	statistic	df	p	method
C stable	15	4.2	2	0.122	Kruskal-Wallis

En ce qui concerne le taux de carbone organique labile, les valeurs moyennes et erreurs standards sont présentées à la figure 41. Ici aussi, les hypothèses nécessaires à l'ANOVA 1 ne sont pas remplies. Le test de Kruskal-Wallis réalisé (Tableau 26) permet de mettre en évidence qu'il n'existe pas de différence significative entre les taux moyens de carbone organique stable des différents traitements de la parcelle ÉPEAUTRE.

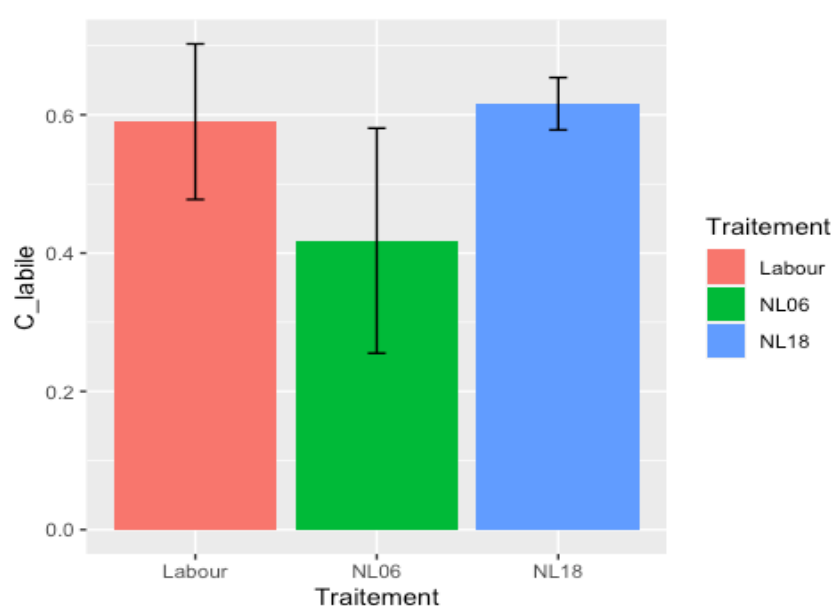


Figure 41 : Taux moyen de carbone organique labile [g/100g ms] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE.

Tableau 26 : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les taux moyens de carbone organique labile [g/100g ms] des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « p ») inférieure à 0,05 indique qu'au moins deux traitements présentent des moyennes différentes.

	n	statistic	df	p	method
C labile	15	3.634	2	0.162	Kruskal-Wallis

En résumé, aucune différence significative n'a pu être mise en évidence à la fois pour le taux de carbone organique stable et pour le taux de carbone organique labile des différents traitements de la parcelle ÉPEAUTRE.

Parcelle BLÉ

Les résultats du dosage du carbone organique stable pour les différents traitements de la parcelle BLÉ sont présentés à la figure 42. Un test F (ANOVA 1) a été effectué (Tableau 27) et celui-ci montre que le facteur traitement n'est pas significatif. Autrement dit, il n'y a pas de différence significative entre les traitements de la parcelle BLÉ en ce qui concerne le taux moyen de carbone organique stable.

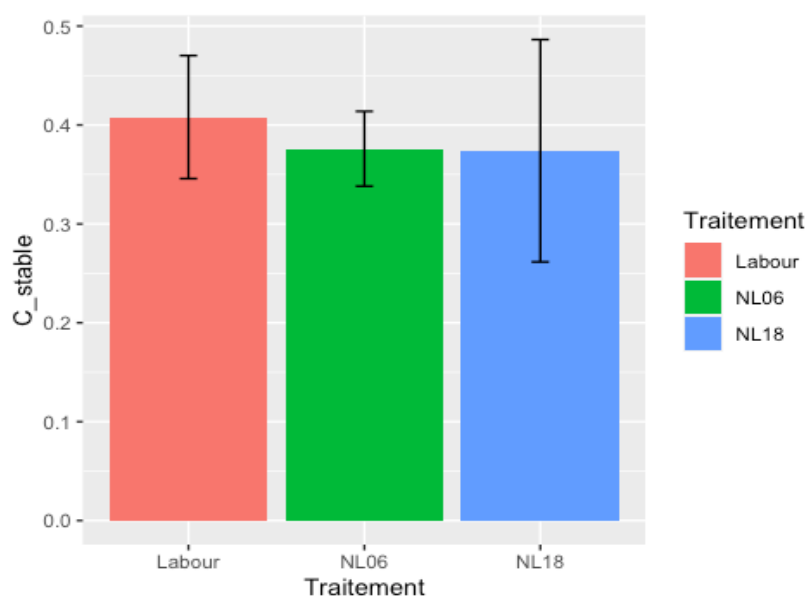


Figure 42 : Taux moyen de carbone organique stable [g/100g ms] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ.

Tableau 27 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le taux moyen de carbone organique stable [g/100g ms] pour les traitements de la parcelle BLÉ. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	0.00364	0.00182	0.3045	0.743
Residuals	12	0.07172	0.005977	NA	NA

Le taux de carbone organique labile de la parcelle BLÉ (Figure 43) ne présente pas de différence significative entre les traitements selon le test F de l'ANOVA 1 (Tableau 28).

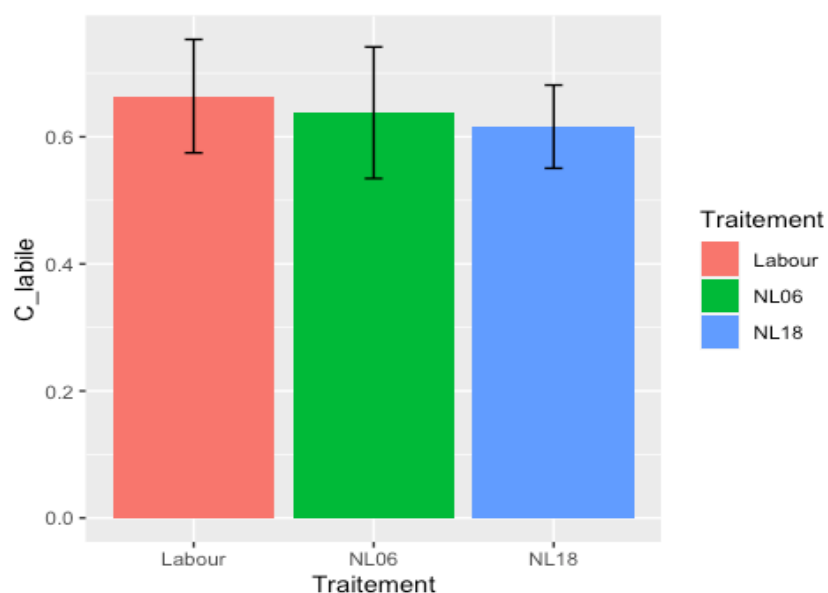


Figure 43 : Taux moyen de carbone organique labile [g/100g ms] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ.

Tableau 28 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le taux moyen de carbone organique labile [g/100g ms] pour les traitements de la parcelle BLÉ. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	0.005773	0.002887	0.3768	0.6939
Residuals	12	0.09192	0.00766	NA	NA

En résumé, tout comme pour le cas de la parcelle ÉPEAUTRE, les analyses statistiques mettent en évidence qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements de la parcelle BLÉ au regard du taux de carbone organique stable et labile.

3.7 Relevé d'adventices

Les relevés d'adventices ont été réalisés à deux dates différentes : le 16/03/21 et le 13/04/21. La présentation des résultats ainsi que les analyses statistiques ont été effectuées de manière distincte pour ces deux dates et ce pour les deux parcelles étudiées.

Parcelle ÉPEAUTRE

Le nombre moyen d'adventices recensées dans chacun des traitements pour les deux dates d'observation est présenté aux figures 44 et 45. Les hypothèses relatives à l'analyse de type ANOVA 1 ont été vérifiées pour les deux dates et les résultats du test F indiquent que le facteur traitement est significatif. Un test de Tukey a été réalisé et les résultats s'avèrent semblables pour le relevé du 16/03/21 (Tableau 29) et pour celui du 13/04/21 (Tableau 30) : le traitement NL06 présente un nombre d'adventices significativement supérieur au traitement Labour. Par

ailleurs, les traitements NL18 et Labour ainsi que les traitements NL18 et NL06 ne présentent pas de différence significative en termes de nombre moyen d'adventices.

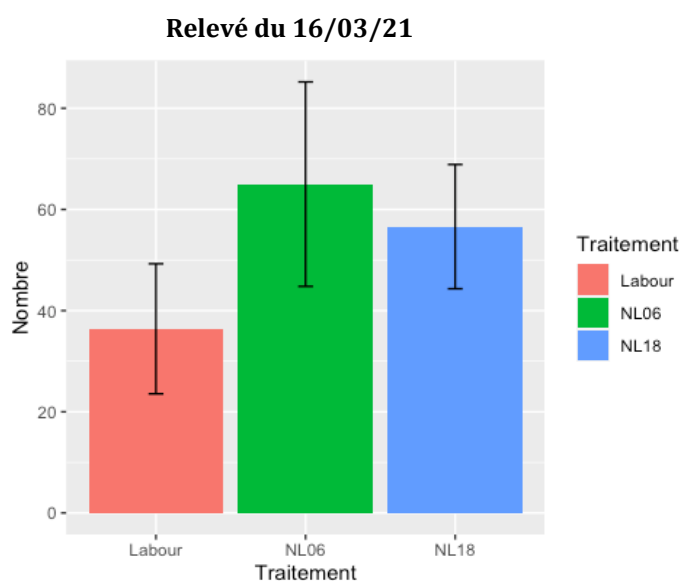


Figure 44 : Nombre moyen d'adventices et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE à la date du 16/03/21.

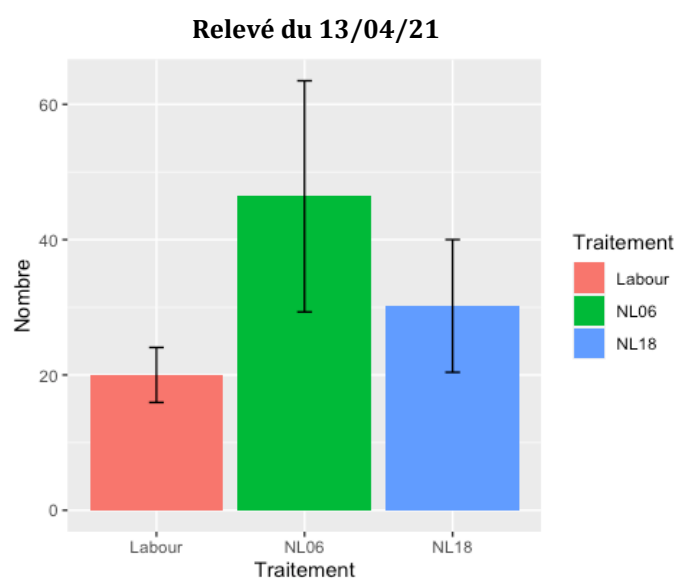


Figure 45 : Nombre moyen d'adventices et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE à la date du 13/04/21.

Tableau 29 : Résultats du test de Tukey pour le nombre moyen d'adventices des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE à la date du 16/03/21. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	28.6	2.377	54.82	0.03257
NL18-Labour	20.2	-6.023	46.42	0.1415
NL18-NL06	-8.4	-34.62	17.82	0.6777

Tableau 30 : Résultats du test de Tukey pour le nombre moyen d'adventices des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE à la date du 13/04/21. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	26.4	6.807	45.99	0.009531
NL18-Labour	10.2	-9.393	29.79	0.377
NL18-NL06	-16.2	-35.79	3.393	0.1105

Parcelle BLÉ

Les figures 46 et 47 présentent les résultats des relevés d'adventices aux deux dates d'observation pour chacun des traitements de la parcelle BLÉ.

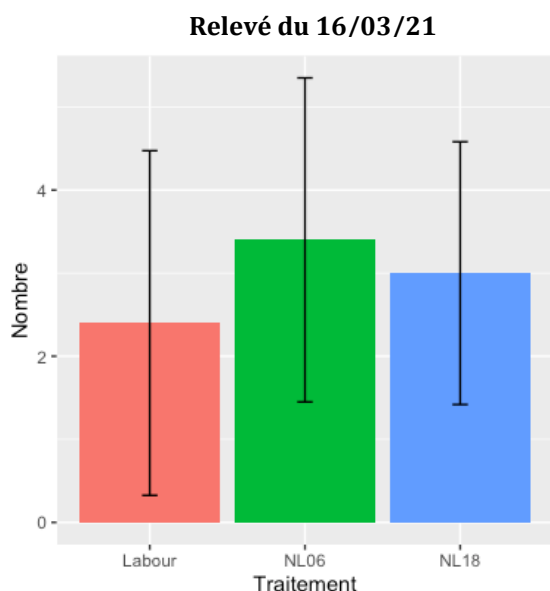


Figure 47 : Nombre moyen d'adventices et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ à la date du 16/03/21.

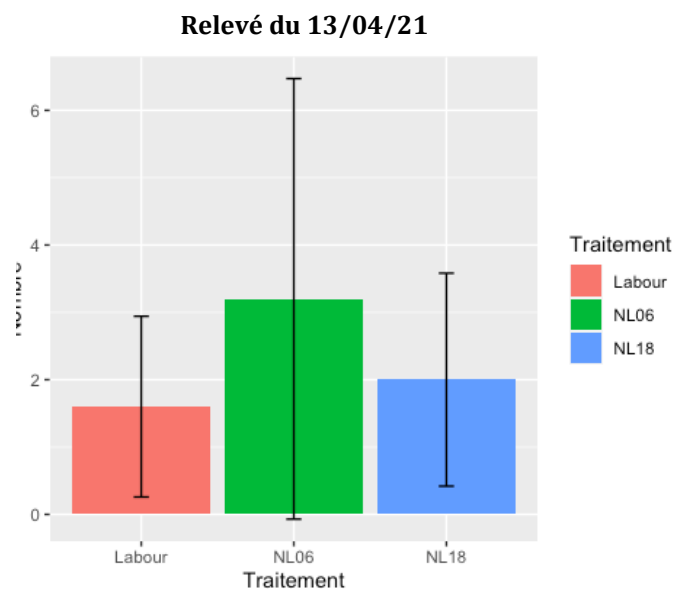


Figure 46 : Nombre moyen d'adventices et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ à la date du 13/04/21

Pour les données de cette parcelle, les hypothèses de normalité n'ont pas pu être établies. Dès lors, une analyse de type non paramétrique a été réalisée. Le résultat de ce test indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements, que ce soit pour l'observation du 16/03/21 (Tableau 31) ou celle du 13/04/21 (Tableau 32).

Tableau 31 : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le nombre moyen d'adventices des traitements de la parcelle BLÉ à la date du 16/03/21. Une p-valeur (colonne « p ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes.

n	statistic	df	p	method
15	0.9473	2	0.623	Kruskal-Wallis

Tableau 32 : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le nombre moyen d'adventices des traitements de la parcelle BLÉ à la date du 13/04/21. Une p-valeur (colonne « p ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes.

n	statistic	df	p	method
15	0.649	2	0.723	Kruskal-Wallis

3.8 Couverture foliaire

Les relevés de couverture foliaire ont été réalisés à trois dates distinctes : le 22/03/21, le 08/04/21 et le 26/04/21. L'analyse statistique de ces données a été faite de manière séparée pour les différentes dates d'observation. De plus, deux méthodes de mesure ont été testées (cadre et application Canopéo), les résultats de ces deux méthodes sont présentés et analysés de manière distincte également.

Parcelle ÉPEAUTRE

L'évolution de la couverture foliaire au cours du temps est présentée aux figures 48 et 49, chaque figure correspondant à une méthode de mesure différente. Aux faibles couvertures foliaires, l'application Canopéo semble surestimer le pourcentage de couverture par rapport à la méthode du cadre.

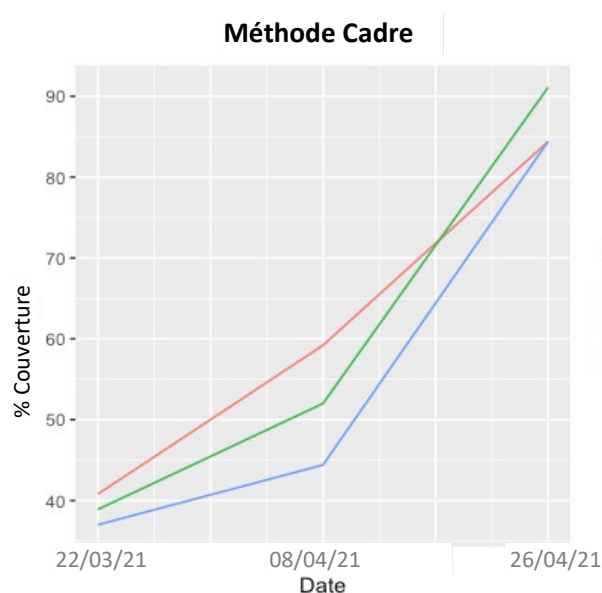


Figure 49 : Evolution de la couverture foliaire moyenne entre le 22/03/21 et le 26/04/21 pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE. Méthode de mesure : Cadre.

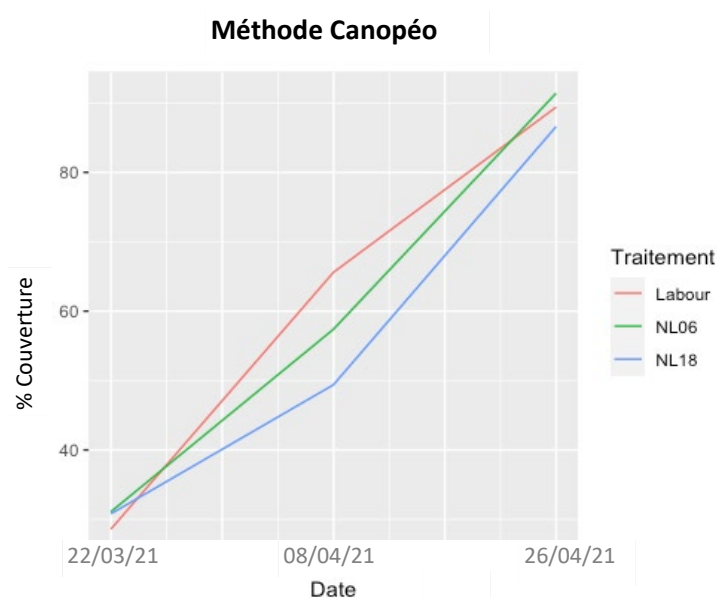


Figure 49 : Evolution de la couverture foliaire moyenne entre le 22/03/21 et le 26/04/21 pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE. Méthode de mesure : App Canopéo.

Analyses statistiques pour la méthode du cadre

Les données issues des observations du 22/03/21 et 08/04/21 remplissent les hypothèses nécessaires à la réalisation de l'analyse de type ANOVA 1. Les résultats du test F indiquent que la couverture foliaire moyenne ne présente pas de différence significative entre les traitements aux dates du 22/03/21 (Tableau 33) et 08/04/21 (Tableau 34). Il semble tout de même important de souligner que la p-valeur obtenue à la date du 08/04/21 est faible, soulignant la présence d'une tendance même si celle-ci se trouve au-dessus du seuil de 0,05 fixé.

Tableau 33 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au **22/03/21** mesuré via la méthode du **cadre** et ce pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	36.1	18.05	0.567	0.5817
Residuals	12	382	31.83	NA	NA

Tableau 34 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au **08/04/21** mesuré via la méthode du **cadre** et ce pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	547.7	273.9	3.409	0.06724
Residuals	12	964	80.33	NA	NA

En ce qui concerne les observations réalisées à la date du 26/04/21, celles-ci ne respectent pas les hypothèses nécessaires à l'analyse ANOVA 1 et aucune transformation ne permet d'améliorer cette caractéristique. L'analyse de type non-paramétrique (Tableau 35) indique qu'il n'existe pas non plus de différence significative entre les traitements en termes de couverture foliaire moyenne à la date du 26/04/21.

Tableau 35 : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au **26/04/21** mesuré via la méthode du **cadre** et ce pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « p ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent être considérées comme différentes

n	statistic	df	p	method
15	3.691	2	0.158	Kruskal-Wallis

Analyses statistiques pour la méthode Canopéo

Seules les observations à la date du 22/03/21 vérifient les hypothèses de l'ANOVA 1. Le résultat du test F pour cette date (Tableau 36) montre que le facteur traitement est non significatif.

Tableau 36 : Résultats du test F de l'ANOVA 1 pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au **22/03/21** mesuré via la méthode **Canopéo** et ce pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « Pr(>F) ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	2	18.63	9.317	0.3061	0.7419
Residuals	12	365.2	30.43	NA	NA

Les données du 08/04/21 et du 26/04/21 ont quant à elles été soumises à une analyse non paramétrique étant donné que les hypothèses de normalité n'ont pu être vérifiées. Le résultat

du test de Kruskal-Wallis renseigne que les couvertures foliaires ne sont pas non plus significativement différentes entre les traitements lors de la deuxième (Tableau 37) et troisième (Tableau 38) observation.

*Tableau 37 : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au 08/04/21 mesuré via la méthode **Canopéo** et ce pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « p ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes*

n	statistic	df	p	method
15	3.985	2	0.136	Kruskal-Wallis

*Tableau 38 : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au 26/04/21 mesuré via la méthode **Canopéo** et ce pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Une p-valeur (colonne « p ») supérieure à 0,05 indique que les moyennes des différents traitements ne peuvent pas être considérées comme différentes*

n	statistic	df	p	method
15	4.534	2	0.104	Kruskal-Wallis

En résumé, les analyses statistiques réalisées sur les observations aux trois dates différentes montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE en termes de couverture foliaire. Cette conclusion est identique pour les deux méthodes employées.

Analyse de la corrélation entre la méthode du cadre et celle de l'application Canopéo

Afin d'évaluer si les deux méthodes de mesure indiquent des couvertures foliaires semblables, un test de corrélation a été effectué pour chacune des dates d'observation à l'aide du test de Pearson. Ce test évalue d'une part s'il existe une corrélation entre les deux méthodes (corrélation si p-valeur inférieure à 0,05) et évalue d'autre part la force de cette corrélation grâce au coefficient de corrélation. Plus la corrélation est forte et plus ce coefficient est élevé, avec une valeur maximale de 1 pour une corrélation parfaite. De plus, le coefficient de détermination (R^2) a également été calculé. Celui-ci indique la part de la variance qui peut être expliquée par la relation entre les deux méthodes de mesure.

Les résultats de ce test pour les observations du 22/03/21 (Tableau 39), 08/04/21 (Tableau 40) et du 26/04/21 (Tableau 41) montrent que les deux méthodes sont positivement corrélées entre elles pour la parcelle ÉPEAUTRE. Lorsque la couverture foliaire est faible (soit à l'observation du 22/03/21), le coefficient de corrélation est de 61% et celui-ci augmente avec l'augmentation de la couverture foliaire et atteint jusqu'à 94% pour la dernière observation. Cela signifie donc que lorsque la couverture foliaire est faible, les différences entre les méthodes de mesure sont plus importantes qu'à des couvertures foliaires plus élevées. Mais ces deux méthodes restent tout de même positivement corrélées entre elles. Le coefficient de détermination montre que lorsque la couverture foliaire est faible, seul 37% de la variance

d'une méthode est expliquée par l'autre. Ce coefficient atteint 88% lorsque la couverture foliaire est la plus importante.

Tableau 39 : Résultats du test de Pearson pour évaluer la corrélation entre la méthode du cadre et celle de l'application Canopéo à la date du **22/03/21** pour la parcelle ÉPEAUTRE. Une corrélation existe si la p-valeur est inférieure à 0,05. Le coefficient de corrélation (colonne « cor ») renseigne sur la force de cette corrélation avec une valeur maximale de 1 pour une corrélation linéaire parfaite. Le coefficient de détermination (R^2) indique la part de variance expliquée par la relation entre les deux méthodes.

Test statistic	df	p-valeur	Alternative hypothesis	cor	R^2
2.801	13	0.01501 *	two.sided	0.6135	0,3764

Tableau 40 : Résultats du test de Pearson pour évaluer la corrélation entre la méthode du cadre et celle de l'application Canopéo à la date du **08/04/21** pour la parcelle ÉPEAUTRE. Une corrélation existe si la p-valeur est inférieure à 0,05. Le coefficient de corrélation (colonne « cor ») renseigne sur la force de cette corrélation avec une valeur maximale de 1 pour une corrélation linéaire parfaite. Le coefficient de détermination (R^2) indique la part de variance expliquée par la relation entre les deux méthodes.

Test statistic	df	p-valeur	Alternative hypothesis	cor	R^2
4.292	13	0.0008759 ***	two.sided	0.7657	0,5863

Tableau 41 : Résultats du test de Pearson pour évaluer la corrélation entre la méthode du cadre et celle de l'application Canopéo à la date du **26/04/21** pour la parcelle ÉPEAUTRE. Une corrélation existe si la p-valeur est inférieure à 0,05. Le coefficient de corrélation (colonne « cor ») renseigne sur la force de cette corrélation avec une valeur maximale de 1 pour une corrélation linéaire parfaite. Le coefficient de détermination (R^2) indique la part de variance expliquée par la relation entre les deux méthodes.

Test statistic	df	p-valeur	Alternative hypothesis	cor	R^2
10.09	13	1.629e-07 ***	two.sided	0.9416	0,8866

Parcelle BLÉ

Les figures 50 et 51 présentent l'évolution de la couverture foliaire moyenne des trois traitements de la parcelle BLÉ selon les deux méthodes de mesures. Ici aussi, l'application Canopéo semble surestimer le pourcentage de couverture lorsque la couverture foliaire réelle est faible.

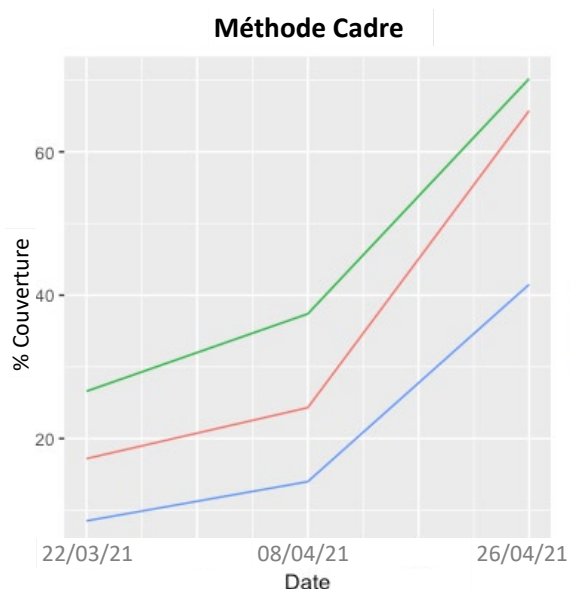


Figure 51 : Evolution de la couverture foliaire moyenne entre le 22/03/21 et le 26/04/21 pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ. Méthode de mesure : Cadre

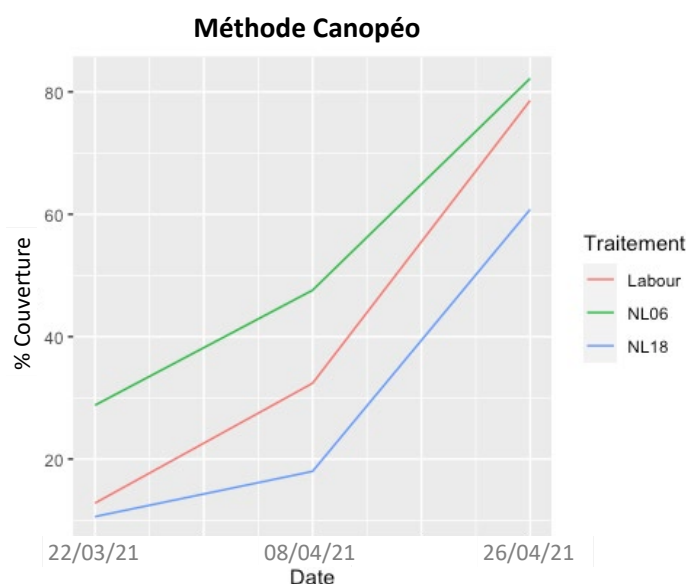


Figure 51 : Evolution de la couverture foliaire moyenne entre le 22/03/21 et le 26/04/21 pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ. Méthode de mesure : App Canopéo

Analyses statistiques pour la méthode du cadre

La normalité des données a été vérifiée pour les observations du 22/03/21 et du 08/04/21. Un test F (ANOVA 1) a donc été réalisé sur ces données. Les p-valeur très faibles pour les deux dates d'observations (respectivement de 0,00044 pour la date du 22/03/21 et de 0,0034 pour la date du 08/04/21) indiquent que le facteur traitement est significatif. Un test de Tukey a donc été entrepris et les résultats indiquent, pour les observations du 22/03/21, le traitement NL06 présente la couverture foliaire moyenne la plus élevée, suivi du traitement Labour puis du traitement NL18 (Tableau 42). Pour les observations du 08/04/21, seuls les traitements NL18 et Labour ne présentent pas de différence significative entre eux. Le traitement NL06 est significativement supérieur au traitement Labour ainsi qu'au traitement NL18 selon le test de Tukey (Tableau 43).

Tableau 42 : Résultats du test de Tukey pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au 22/03/21 mesuré via la méthode du Cadre et ce pour les traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	9.4	0.7949	18.01	0.03231
NL18-Labour	-8.68	-17.29	-0.07491	0.048
NL18-NL06	-18.08	-26.69	-9.475	0.0003135

Tableau 43 : Résultats du test de Tukey pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au **08/04/21** mesuré via la méthode du **Cadre** et ce pour les traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	13.08	-1.297	27.46	0.07599
NL18-Labour	-10.32	-24.7	4.057	0.1768
NL18-NL06	-23.4	-37.78	-9.023	0.002546

En ce qui concerne la dernière observation de couverture foliaire (26/04/21), les hypothèses de normalité n'ont pas pu être vérifiées et ce malgré les transformations opérées. Dès lors, une analyse non paramétrique a été réalisée. Le test de Kruskal-Wallis indique que le facteur traitement est significatif avec une p-valeur de 0,0177. La comparaison des traitements deux à deux *via* le test de Wilcoxon montre que le traitement NL06 est significativement supérieur au traitement NL18 en termes de couverture foliaire à la date du 26/04/21 (Tableau 44). Par contre, les traitements NL06 et Labour ainsi que les traitements NL18 et Labour ne présentent pas de différence significative entre eux en ce qui concerne la couverture foliaire au 26/04/21.

Tableau 44 : Résultats du test de Wilcoxon pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au **26/04/21** mesuré via la méthode du **Cadre** et ce pour les traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique qu'au moins deux traitements présentent des moyennes différentes.

group1	group2	n1	n2	statistic	p	p.adj	p.adj.signif
Labour	NL06	5	5	9	0.53	1	ns
Labour	NL18	5	5	22.5	0.046	0.138	ns
NL06	NL18	5	5	25	0.008	0.024	*

Analyses statistiques pour la méthode Canopéo

Les résultats de couverture foliaire issus de la première observation (22/03/21) ne répondant pas aux hypothèses nécessaires à la réalisation de l'analyse de type ANOVA 1 et ce malgré les transformations réalisées, un test de Kruskal-Wallis a été effectué. Le facteur traitement a été considéré comme significatif avec une p-valeur de 0,00657. La comparaison des traitements deux à deux (Tableau 45) indique qu'il existe une différence significative entre les traitements NL06 et Labour ainsi qu'entre les traitements NL06 et NL18 d'un point de vue de pourcentage de couverture foliaire. En ce qui concerne les traitements NL18 et Labour, ceux-ci ne présentent pas de différence significative au 22/03/21.

Tableau 45 : Résultats du test de Wilcoxon pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au **22/03/21** mesuré via la méthode **Canopéo** et ce pour les traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique qu'au moins deux traitements présentent des moyennes différentes.

group1	group2	n1	n2	statistic	p	p.adj	p.adj.signif
Labour	NL06	5	5	0	0.008	0.024	*
Labour	NL18	5	5	18	0.29	0.87	ns
NL06	NL18	5	5	25	0.012	0.036	*

A la date du 08/04/21, les données ont été analysées à l'aide d'une ANOVA 1 vu les hypothèses de normalités satisfaites. Le facteur traitement est significatif selon le test F. La comparaison des couvertures foliaires moyennes montre que les trois traitements sont chacun significativement différents des autres avec une différence plus importante entre les traitements NL06 et NL18 (Tableau 46).

Tableau 46 : Résultats du test de Tukey pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au **08/04/21** mesuré via la méthode **Canopéo** et ce pour les traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	15.2	3.009	27.39	0.01543
NL18-Labour	-14.4	-26.59	-2.209	0.02113
NL18-NL06	-29.6	-41.79	-17.41	8.337e-05

Ensuite, les observations réalisées à la date du 26/04/21 ont été analysée avec une méthode de type non paramétrique vu les hypothèses de normalité non rencontrées. Le résultat du test de Kruskal-Wallis indique que le facteur traitement est significatif. Un test de Wilcoxon a été réalisé afin de comparer deux à deux la couverture foliaire moyenne des différents traitements. Les résultats (Tableau 47) indiquent une différence significative entre les traitements Labour et NL18 ainsi qu'entre les traitements NL06 et NL18 pour l'observation du 26/04/21.

Tableau 47 : Résultats du test de Wilcoxon pour le pourcentage moyen de couverture foliaire au **26/04/21** mesuré via la méthode **Canopéo** et ce pour les traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique qu'au moins deux traitements présentent des moyennes différentes.

group1	group2	n1	n2	statistic	p	p.adj	p.adj.signif
Labour	NL06	5	5	6.5	0.243	0.729	ns
Labour	NL18	5	5	25	0.012	0.036	*
NL06	NL18	5	5	25	0.011	0.033	*

En résumé, les résultats des observations de couverture foliaire pour la parcelle BLÉ divergent en fonction de la méthode employée et de la date d'observation. Le tableau Tableau 48 résume les différences significatives décelées selon la date et la méthode employée.

Tableau 48 : Résumé des résultats issus des différentes analyses statistiques réalisées pour la parcelle BLÉ en fonction de la date d'observation et de la méthode de mesure employée.

Date	Méthode	Traitements significatifs
22/03/21	Cadre	NL06-NL18
	Canopéo	NL06-NL18 Labour-NL06
08/04/21	Cadre	TOUS
	Canopéo	TOUS
26/04/21	Cadre	NL06-NL18
	Canopéo	NL06-NL18 Labour-NL18

Analyse de la corrélation entre la méthode du cadre et celle de l'application Canopéo

Tout comme pour la parcelle ÉPEAUTRE, la corrélation entre la méthode du cadre et celle de l'application Canopéo a été évaluée grâce au test de Pearson.

Les résultats de ce test pour les observations du 22/03/21 (Tableau 49), 08/04/21 (Tableau 50) et du 26/04/21 (Tableau 51) montrent que les deux méthodes sont positivement corrélées entre elles pour la parcelle BLÉ. De plus, le coefficient de corrélation élevé indique une corrélation forte entre les deux méthodes. Ici, la faible couverture foliaire lors des observations semble moins impacter le coefficient de corrélation, contrairement à la parcelle ÉPEAUTRE. En ce qui concerne le coefficient de détermination, celui-ci indique que lorsque la couverture foliaire est faible, 72% de la variance d'une méthode est expliquée par l'autre. Ce coefficient atteint 94% lorsque la couverture foliaire est la plus importante.

Tableau 49 : Résultats du test de Pearson pour évaluer la corrélation entre la méthode du cadre et celle de l'application Canopéo à la date du **22/03/21** pour la parcelle BLÉ. Une corrélation existe si la p-valeur est inférieure à 0,05. Le coefficient de corrélation (colonne « cor ») renseigne sur la force de cette corrélation avec une valeur maximale de 1 pour une corrélation linéaire parfaite. Le coefficient de détermination (R^2) indique la part de variance expliquée par la relation entre les deux méthodes.

Test statistic	df	p-valeur	Alternative hypothesis	cor	R^2
5.759	13	6.615e-05 ***	two.sided	0.8476	0,7184

Tableau 50 : Résultats du test de Pearson pour évaluer la corrélation entre la méthode du cadre et celle de l'application Canopéo à la date du **08/04/21** pour la parcelle BLÉ. Une corrélation existe si la p-valeur est inférieure à 0,05. Le coefficient de corrélation (colonne « cor ») renseigne sur la force de cette corrélation avec une valeur maximale de 1 pour une corrélation linéaire parfaite. Le coefficient de détermination (R^2) indique la part de variance expliquée par la relation entre les deux méthodes.

Test statistic	df	p-valeur	Alternative hypothesis	cor	R^2
9.226	13	4.543e-07 ***	two.sided	0.9314	0,8675

Tableau 51 : Résultats du test de Pearson pour évaluer la corrélation entre la méthode du cadre et celle de l'application Canopéo à la date du **26/04/21** pour la parcelle BLÉ. Une corrélation existe si la p-valeur est inférieure à 0,05. Le coefficient de corrélation (colonne « cor ») renseigne sur la force de cette corrélation avec une valeur maximale de 1 pour une corrélation linéaire parfaite. Le coefficient de détermination (R^2) indique la part de variance expliquée par la relation entre les deux méthodes.

Test statistic	df	p-valeur	Alternative hypothesis	cor	R^2
14.63	13	1.881e-09 ***	two.sided	0.9709	0,9426

3.9 Tallage utile

Parcelle ÉPEAUTRE

Le nombre moyen d'épis au mètre carré en fonction des traitements est visible à la figure 52. Le test F (ANOVA 1) permet d'affirmer qu'il existe une différence significative entre les traitements. Les résultats du test de Tukey (Tableau 52) montrent que les traitements Labour présente un nombre moyen d'épis par mètre carré significativement supérieur au traitement NL06. Les traitements NL18 et Labour ainsi que les traitements NL18 et NL06 ne sont quant à eux pas différents d'un point de vue statistique.

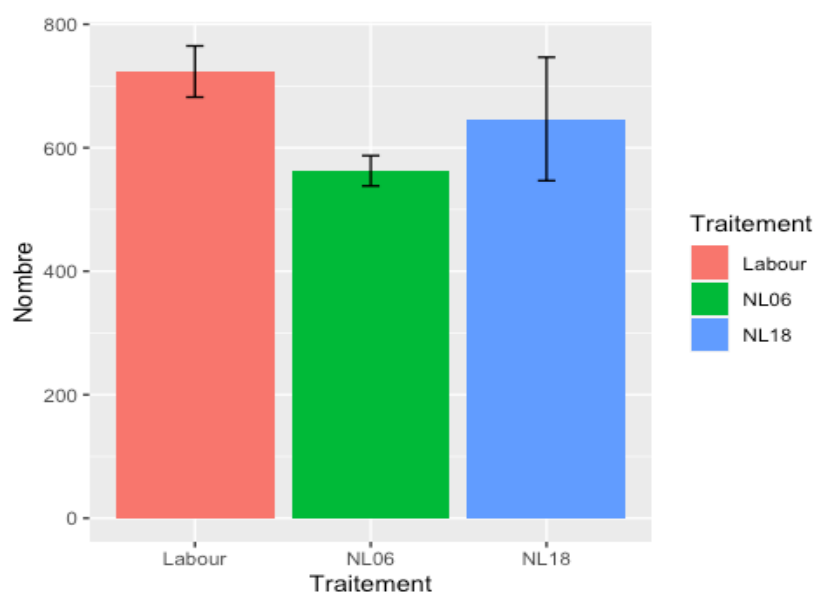


Figure 52 : Nombre moyen d'épis par m² et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE.

Tableau 52 : Résultats du test de Tukey pour le nombre moyen d'épis par m² pour les traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	-160.8	-268.9	-52.73	0.004892
NL18-Labour	-76.8	-184.9	31.27	0.1822
NL18-NL06	84	-24.07	192.1	0.1373

Parcelle BLÉ

La figure 53 présente le nombre d'épis moyen par mètre carré pour les traitements de la parcelle BLÉ. Le résultat du test F montre que le facteur traitement est ici aussi significatif. Le tableau 53 présente les résultats du test de Tukey et ceux-ci indiquent d'une part que le traitement Labour est significativement supérieur au traitement NL06. D'autre part, le traitement NL18 présente un tallage utile significativement supérieur au traitement NL06. Les traitements NL18 et Labour ne diffèrent pas statistiquement l'un de l'autre.

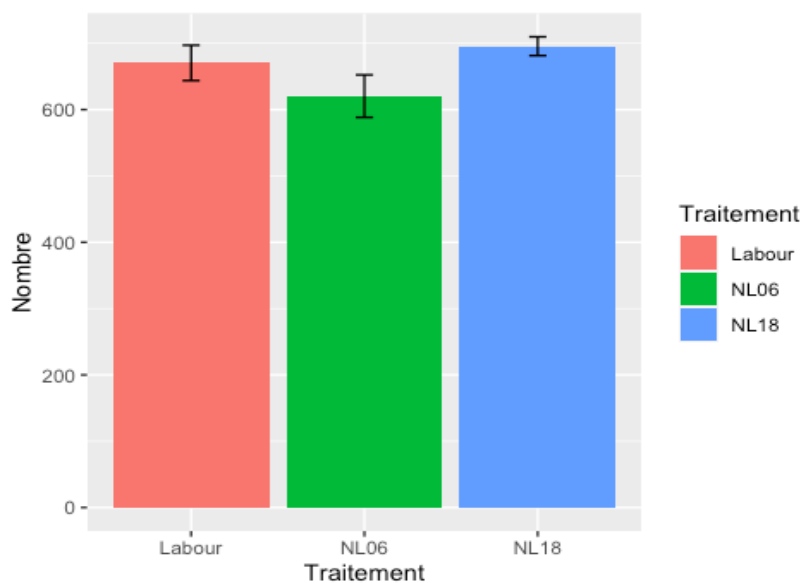


Figure 53 : Nombre moyen d'épis par m² et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ.

Tableau 53 : Résultats du test de Tukey pour le nombre moyen d'épis par m² pour les traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	-50	-92.91	-7.088	0.02282
NL18-Labour	25.2	-17.71	68.11	0.2967
NL18-NL06	75.2	32.29	118.1	0.001438

3.10 Rendement

Parcelle ÉPEAUTRE

Le rendement moyen de chacun des traitements, exprimé en kg.m^{-2} sont présentés à la figure 54. Les hypothèses nécessaires à la réalisation d'une ANOVA 1 n'étant pas rencontrées, un test de Kruskal-Wallis a été réalisé. Avec une p-valeur de 0,014, la conclusion de ce test est que les rendements moyens de chaque traitement ne peuvent être considérées comme égaux. Le tableau 54 présente les résultats du test de Wilcoxon et ceux-ci indiquent que le traitement NL06 présente un rendement significativement supérieur au traitement NL18. Les traitements labour et NL06 ainsi que les traitements Labour et NL18 ne présentent quant à eux aucune différence significative au regard du rendement moyen.

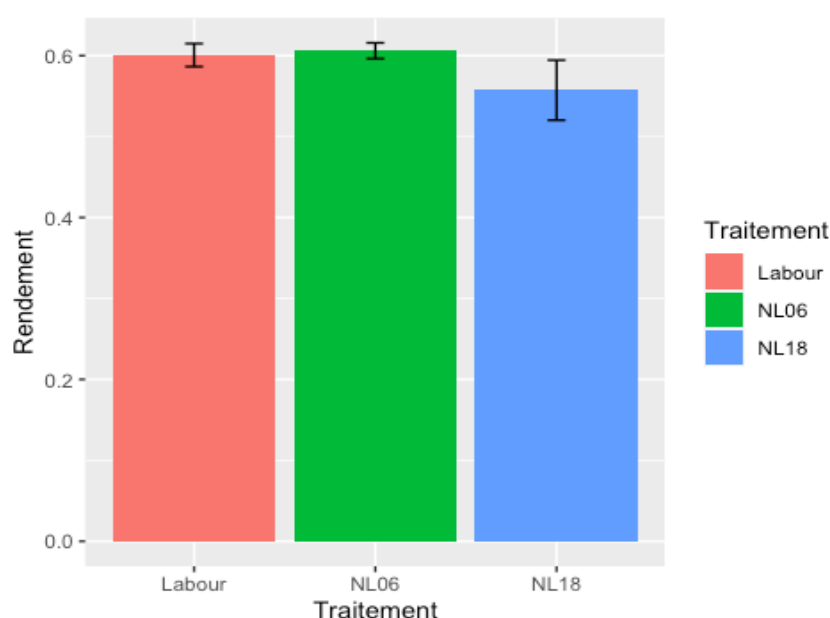


Figure 54 : Rendement moyen [kg.m^{-2}] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle ÉPEAUTRE.

Tableau 54 : Résultats du test de Wilcoxon pour le rendement moyen [kg.m^{-2}] des traitements de la parcelle ÉPEAUTRE. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique que les traitements sont significativement différents.

group1	group2	n1	n2	statistic	p	p.adj	p.adj.signif
Labour	NL06	5	5	8	0.421	1	ns
Labour	NL18	5	5	23	0.032	0.095	ns
NL06	NL18	5	5	25	0.008	0.024	*

Parcelle BLÉ

La figure 55 présente les rendements moyens pour chacun des traitements de la parcelle BLÉ. Pour ces données, un test F (ANOVA 1) a été réalisé étant donné les hypothèses respectées. Il s'avère que le facteur traitement est significatif selon ce test. Le test de Tukey met en évidence (Tableau 55) que les traitements Labour et NL06 présentent des rendements significativement supérieurs au traitements NL18. Il n'y a par contre pas de différence significative entre les traitements NL06 et Labour en termes de rendement moyen.

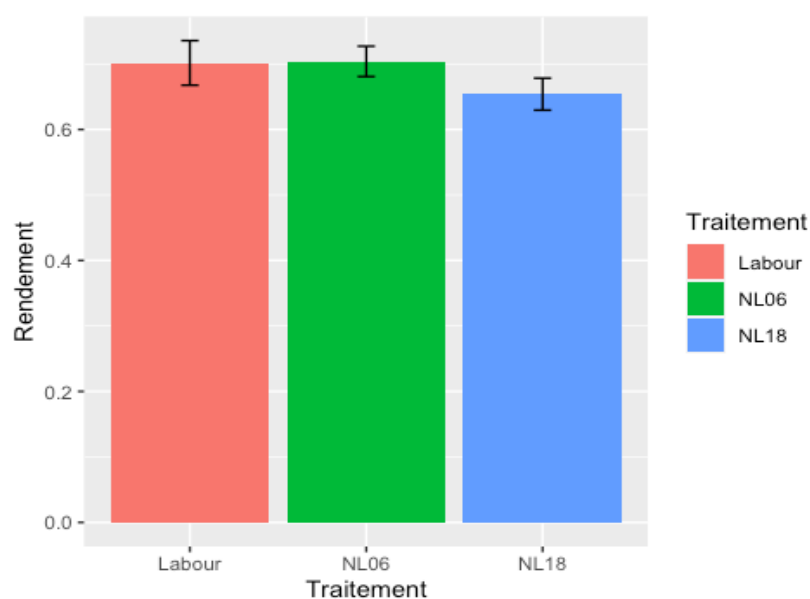


Figure 55 : Rendement moyen [kg.m⁻²] et erreur standard pour les traitements Labour, NL06 et NL18 de la parcelle BLÉ.

Tableau 55 : Résultats du test de Tukey pour le rendement moyen [kg.m⁻²] pour les traitements de la parcelle BLÉ. Les moyennes des traitements sont comparées 2 à 2. Une p-valeur (colonne « p adj ») inférieure à 0,05 indique une différence significative.

	diff	lwr	upr	p adj
NL06-Labour	0.002376	-0.04425	0.049	0.9899
NL18-Labour	-0.04762	-0.09425	-0.000999	0.04521
NL18-NL06	-0.05	-0.09662	-0.003375	0.03553

4. Discussion

4.1 Méthodes permettant d'évaluer l'activité biologique

4.1.1 Tea bag Index

Pour la parcelle ÉPEAUTRE, les résultats de la méthode TBI montrent que les traitements Labour et NL18 présentent un facteur k significativement supérieur à celui du traitement NL06. Les traitements NL18 et Labour quant à eux ne diffèrent pas significativement l'un de l'autre. Par contre, le taux de stabilisation S ne diffère pas significativement entre les traitements. Pour la parcelle BLÉ, aucune différence significative entre les traitements n'a pu être mise en évidence tant pour le facteur k que pour le facteur S . Cependant, les moyennes du taux de décomposition k montrent tout de même des tendances semblables à la parcelle ÉPEAUTRE avec un k plus élevé pour les traitements Labour et NL18 comparé au traitement NL06.

Le taux de décomposition k peut être interprété comme la capacité du sol à minéraliser la matière organique stable (soit un déstockage). Le taux de stabilisation S traduit quant à lui la capacité du sol à humifier la matière organique labile (soit un stockage) (Chambre d'Agriculture Yonne, 2019). De cette manière, les résultats obtenus montrent que le traitement NL06 présente une faible capacité de minéralisation comparé aux traitements Labour et NL18 qui présentent une capacité de minéralisation plus élevée. Les résultats obtenus sur le taux de stabilisation S ne permettent par contre pas de différencier les traitements en termes de capacité d'humification.

Les valeurs obtenues dans le cadre de ce mémoire varient entre 0,014 et 0,022 pour le taux de décomposition k et entre 0,314 et 0,340 pour le taux de stabilisation S , toutes parcelles confondues. Une précédente étude menée sur sol limoneux en 2021 a conduit à des valeurs similaires avec un taux de décomposition k entre 0,015 et 0,032 et un taux de stabilisation S de 0,263 à 0,380 (Fockedey et Belin, 2021). Ceci permet de considérer nos résultats comme vraisemblables.

La méthode TBI semble être sensible au type de travail du sol. Son application dans cette étude montre que la pratique du non-labour tend à réduire la minéralisation. Aucune conclusion ne peut par contre être tirée concernant la capacité d'humification (taux S). Une étude menée par Houben et al., (2018) sur l'impact d'une conversion en non-labour sur la décomposition de la matière organique présente des conclusions similaires : la méthode TBI est sensible aux changements du travail du sol.

L'avantage de cette méthode est qu'elle est peu coûteuse et facile à mettre en place. Il semble judicieux de poursuivre son utilisation dans des études futures afin d'identifier plus précisément l'impact du travail du sol sur la dégradation de la matière organique.

4.1.2 Paniers à vers de terre

Les résultats obtenus sur les deux parcelles ne montrent pas de différence entre les modalités de travail du sol puisque le nombre moyen de cabanes et turricules ne sont pas significativement différents entre les traitements. Le recouvrement du sol par la paille semble plus faible pour le traitement NL06 pour les deux parcelles mais la tendance n'est pas nette.

Cependant, les valeurs obtenues sont en accord avec les résultats de Fockedey et Belin (2021), ayant également utilisé ce protocole dans le cadre de leur mémoire. Malheureusement le manque de références pour cette méthode limite fortement les possibilités de comparaison.

Malgré ces résultats, les indicateurs utilisés s'avèrent pertinents pour démontrer l'activité des vers de terre au sein d'une parcelle mais cette méthode ne semble pas suffisamment sensible aux différences de travail du sol.

Bien qu'intéressante, cette méthode est critiquable à plusieurs niveaux : tout d'abord il faut rappeler que ce protocole est initialement destiné aux particuliers, un usage à grande échelle n'est donc pas l'objectif principal de l'OPVT. Ensuite, comme mentionné plus haut, le manque de données de référence limite fortement les comparaisons et interprétations. Par ailleurs, l'identification des cabanes et turricules est dans certains cas subjective. Certaines turricules ont pu ne pas être recensées dû à la paille les recouvrant. Enfin, les cinq classes de recouvrement du sol par la paille ne sont pas suffisamment précises, surtout pour les surfaces élevées (classe 5 = surface supérieure à 40%).

4.1.3 Méthode moutarde

Les résultats de la méthode moutarde montrent que le traitement NL06 possède un nombre moyen de vers de terre/m² significativement supérieur à celui du traitement Labour, dans les deux parcelles. Les analyses statistiques ont également révélé que les traitements Labour et NL18 ne sont significativement différents l'un de l'autre dans aucune parcelle. En ce qui concerne la différence entre les traitements NL06 et NL18, les résultats sont moins clairs car, bien que le nombre de vers de terre en NL06 soit supérieur à celui du NL18 dans les deux parcelles, cette différence n'est significative que pour la parcelle ÉPEAUTRE.

Les valeurs obtenues avec cette méthode oscillent entre 1,4 et 15,2 vers de terre/m² toutes parcelles confondues. Une étude menée en 2005 par Reeleder et al., (2006) montre des valeurs similaires, permettant de confirmer les données obtenues ici. Dans cette étude,

l'évaluation de l'impact du travail du sol sur la population de vers de terre est notamment étudiée. Les auteurs démontrent l'impact négatif du labour sur la population de vers de terre et l'augmentation de celle-ci lorsqu'un non-labour est en place. Cette tendance semble se présenter aussi dans le cadre de ce mémoire : la densité de vers de terre est plus importante lorsqu'un non-labour est installé à long terme. L'évolution de la population de vers de terre en période de transition d'un labour à un non-labour n'est cependant pas claire ici, avec des résultats contradictoires entre parcelles. Cependant, la pratique d'un non-labour semble être favorable aux populations de vers de terre à long terme.

La méthode moutarde semble donc intéressante pour évaluer la population de vers de terre en fonction du travail du sol. L'avantage de cette méthode est qu'elle est très peu destructive pour le sol, contrairement à un test bêche⁶. Elle est également très facile à mettre en place. La solution moutarde est suffisamment irritante pour faire remonter les vers de terre à la surface. Cependant il serait intéressant d'évaluer dans quelle mesure les vers de terre sont capables de se déplacer de manière horizontale dans le sol et non de manière verticale, afin de fuir cette solution irritante. En effet, une certaine quantité de vers de terre pourrait ne pas être comptabilisée en raison de cette « fuite horizontale » plutôt que verticale, conduisant alors à une sous-estimation des populations de lombrics.

4.2 Résistance à la pénétration

La consultation de plusieurs études similaires (Biot, 2020 ; Matheise, 2020 ; Moraes et al., 2014) permet de confirmer que nos valeurs de pénétrométrie, variant entre 1,639 MPa et 2,048 MPa, sont cohérentes. Les recherches réalisées par Moraes et al. (2014), notamment sur l'impact de différents niveaux de travail du sol sur la résistance à la pénétration, montrent une compaction plus élevée à la profondeur de 0-10 cm pour les traitements en non-labour comparés aux traitements labour. Ensuite pour les profondeurs 10-20 cm et 20-30 cm, une compaction plus importante est observée pour les traitements labour comparés aux traitements en non-labour, démontrant ainsi la présence d'une semelle de labour. D'autres études parlent d'une compaction sur une plus large gamme de profondeurs pour les traitements en non-labour (5-30 cm selon Soane et al., 2012).

Pour les parcelles ÉPEAUTRE et BLÉ étudiées dans le cadre de ce mémoire, les résultats de la mesure de pénétrométrie indiquent que le traitement NL06 présente une résistance à la pénétration significativement plus élevée que le traitement Labour à la classe de profondeur de 20-30 cm. Moraes et al., (2014) indiquent cependant que, malgré cette compaction, les systèmes non-labourés présentent de bonnes propriétés physiques en raison de leurs nombreux pores biologiques et racines.

⁶ Test visant à extraire plusieurs blocs de sol et de les trier pour en récupérer les vers de terre.

La mesure de pénétrométrie est influencée par plusieurs facteurs tels que l'humidité du sol, la texture du sol, la profondeur, la densité apparente ou encore les pratiques culturales (M. Yasin et al., 1993). L'humidité du sol, facteur influençant particulièrement la mesure de résistance à la pénétration, n'a pas été évaluée lors des mesures. Il s'agit donc de rester vigilant quant à l'interprétation des résultats. Les pratiques culturales pourraient être l'une des raisons pour laquelle les différences de compaction entre traitements sont peu marquées. En effet, les parcelles étudiées accueillent périodiquement des couverts végétaux multi-espèces dont certaines plantes qui les composent présentent la capacité de développer un système racinaire pivotant et profond, pouvant contribuer à la destruction de la semelle de labour. Il est à noter aussi que la parcelle BLÉ a subi en 2018 un décompactage d'une profondeur de 40 cm, qui peut aussi expliquer en partie ces résultats.

Il est à noter aussi que, pour des résultats optimaux, le pénétromètre digital doit être enfoncé à vitesse constante dans le sol. Or, cela s'est révélé complexe de maintenir cette vitesse constante lors des mesures, même si aucune donnée n'a été rejetée. Ce dernier point pourrait expliquer en partie la forte variabilité des résultats et ce malgré le nombre élevé de répétitions effectuées par traitement.

4.3 Stabilité du sol *via* la méthode VESS

Pour rappel, la méthode VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) permet d'évaluer la qualité structurale d'un sol donné en lui attribuant un score variant de 1 à 5. Un score de 1 est synonyme de bonne qualité structurale tandis qu'un score de 5 désigne une pauvre qualité structurale.

Les résultats obtenus sont contradictoires entre parcelles avec, du côté de la parcelle ÉPEAUTRE un score VESS pour le traitement NL06 significativement supérieur au traitement NL18. Du côté de la parcelle BLÉ, le traitement Labour montre un score VESS significativement supérieur au traitement NL06 et le traitement NL18 tend vers un score supérieur à celui du traitement NL06, même si cette tendance n'est pas significative.

Cette contradiction entre parcelles peut s'expliquer par le fait que les premières applications de la méthode VESS ont été réalisées pour le traitement NL06 de la parcelle ÉPEAUTRE. Le manque d'expérience pour cette méthode a certainement entraîné une surestimation du score VESS moyen pour ce traitement. Dès lors, il semble judicieux d'éviter de tirer des conclusions sur base du score VESS moyen du traitement NL06 de la parcelle ÉPEAUTRE.

Askari et al., (2013) dans leur étude de la méthode VESS sous différentes pratiques agricoles montrent que les systèmes conventionnels obtiennent en moyenne un score de 2,29 tandis que les systèmes pratiquant un travail du sol minimum obtiennent un score de 1,95. Dans le cas de ce mémoire, la parcelle BLÉ obtient des scores de 2,44 pour le traitement NL06, 3,06 pour le traitement NL18 et 3,11 pour le traitement Labour. Les scores sont donc plus élevés que ceux présentés par Askari et al. (2013) mais la tendance est cependant semblable : le

labour impacte négativement la qualité structurale du sol, traduit par un score VESS plus élevé comparativement à un système sans labour. Les recherches réalisées par Askari et *al.* mettent donc en évidence que la méthode VESS est capable de différencier les effets de différents travaux du sol sur la qualité structurale. Les mêmes conclusions peuvent être établies à la suite des résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire.

Cependant, les premières applications de la méthode VESS n'ayant pas abouti à des résultats fiables dû au manque d'expérience, il serait approprié d'effectuer à l'avenir quelques essais préliminaires avant les échantillonnages sur les parcelles d'intérêt. Cela pourrait certainement permettre d'éviter des erreurs comme celle obtenue ici. Une autre possibilité serait le suivi d'une courte formation comme suggéré par Biot (2020) et Emmet-Booth (2018).

Un autre point à souligner concernant cette méthode est la subjectivité du score VESS attribué. En effet, les scores de chacune des couches sont attribués selon l'apparence visuelle de plusieurs facteurs tels que la porosité, la friabilité ou encore la taille et forme des agrégats. Le score moyen d'un bloc peut donc varier en fonction de l'expérimentateur. Il paraît donc important que l'ensemble des mesures soient réalisées par une seule et même personne, ce qui a été le cas dans cette étude.

La méthode VESS, simple à mettre en place et de plus en plus utilisée, s'avère donc une méthode intéressante pour évaluer l'impact d'un labour ou d'un non-labour sur la qualité structurale du sol et a montré des résultats encourageants.

4.4 Stabilité des agrégats *via* la méthode USDA

La méthode USDA évalue la stabilité des agrégats *via* un système de classes allant de 1 à 8. Plus la classe est élevée, meilleure est la stabilité des agrégats.

L'évaluation de cette stabilité dans les deux parcelles étudiées ne montre pas une tendance nette entre les traitements. En effet, dans le cas de la parcelle BLÉ, le traitement NL06 présente des agrégats plus stables (score de 3,8) que le traitement Labour (score de 2,5) mais dans le cas de la parcelle ÉPEAUTRE, ces deux traitements présentent un score USDA moyen identique (score de 4,2).

Dans son mémoire, Nicolas Biot (2020) a également utilisé cette méthode et met en évidence une différence de score USDA entre les prairies (score de 6) et les champs cultivés étudiés (score de 4,5), indiquant que la méthode peut permettre de différencier systèmes cultivés et non-cultivés. L'étude de Roger-Estrade et al., (2011) sur l'effet de l'adoption de techniques culturales sans labour sur l'état physique du sol indique que le non-labour n'améliore pas l'état physique du sol de manière systématique et que l'effet n'est pas toujours constant dû aux variations inter- et intra-annuelles. Ils soulignent également l'importance du type

d'itinéraire de préparation du sol et du système de culture. Comme l'indiquent les tableaux récapitulatifs présents dans la partie « Matériels et Méthodes », les cultures qui se sont succédé sur les parcelles BLÉ et ÉPEAUTRE sont différentes ; cependant les travaux du sol réalisés sont semblables. Des cultures plus néfastes pour le sol tels que la pomme de terre ou la betterave ont été cultivées dans chacune des parcelles. Dès lors, l'hypothèse de l'impact négatif d'une culture n'est pas soutenable pour expliquer les différences de résultats entre parcelles. La méthode USDA, se basant sur une appréciation visuelle de la réaction d'un agrégat dans l'eau, reste tout de même assez subjective et les résultats peuvent donc varier selon l'expérimentateur. Le résultat élevé du traitement Labour de la parcelle ÉPEAUTRE peut donc en partie s'expliquer par une observation erronée, ayant abouti à une surestimation de la classe de stabilité.

Amézketa, (1999), dans sa revue sur la stabilité des agrégats, indique qu'un labour du sol affecte la stabilité des agrégats dû à son influence notamment sur l'activité microbienne ou sur la redistribution de la matière organique dans le sol. Le labour détruit les agrégats et expose la matière organique à la décomposition microbienne. Tout cela entraîne une diminution de stabilité des agrégats. D'un autre côté, cette même étude indique que l'absence de labour a un effet stabilisateur important sur la macro-agrégation.

En ce qui concerne l'effet d'un non-labour récent, aucune tendance ne se dégage des résultats obtenus ici et aucune littérature à ce sujet ne permet d'apporter d'informations plus précises.

Il semble important de souligner qu'expliquer des différences de stabilité d'agrégats uniquement sur base du facteur « travail du sol » est assez restrictif. En effet, de nombreux autres facteurs peuvent influencer les propriétés physiques du sol tels que la teneur en matière organique, le climat ou des facteurs biologiques (Amézketa, 1999). Il est donc crucial de ne pas perdre de vue l'influence de ces facteurs et l'interaction entre tout ceux-ci sur la stabilité des agrégats. Cependant, dans le cadre de ce travail, les parcelles et traitements étudiées sont conduits de manière semblable avec pour seule différence majeure le travail du sol.

4.5 Infiltration d'eau

L'infiltration d'eau a été évaluée au travers de la conductivité hydraulique à saturation K_s [$m.s^{-1}$]. Les analyses statistiques réalisées sur cet indicateur ne mettent en évidence aucune différence significative entre les traitements des parcelles étudiées. Néanmoins, une tendance commune se dégage des résultats moyens : les traitements NL06 présentent un K_s plus élevé que les traitements Labour et NL18. L'étude réalisée par Sithole et *al.*, (2019) décrit que la réduction des perturbations du sol permet d'améliorer l'infiltration d'eau. L'une des explications avancées est qu'en système non-labouré, la microfaune tend à être plus

importante qu'en système conventionnel. Celle-ci jouant un rôle important dans la porosité et l'aération du sol, l'infiltration d'eau se voit considérablement améliorée. Cette étude a ainsi mis en évidence l'augmentation de l'infiltration d'eau en non-labour, en comparaison à un système conventionnel. Les tendances observées dans le cadre de ce mémoire, bien que non significatives semblent aller dans cette même direction.

Il faut cependant souligner que la méthode de l'infiltromètre simple anneau utilisée ici présente une grande variabilité des résultats. En 2020, Nicolas Biot a également souligné cette variabilité importante à la fois au niveau des placettes et des parcelles. C'est certainement l'explication la plus plausible permettant d'expliquer l'absence de significativité au sein des résultats. L'augmentation du nombre de répétitions par traitement aurait peut-être pu aider à mettre un effet en évidence mais vu le temps nécessaire à la réalisation de ces mesures, il a été décidé de se limiter à cinq répétitions. Le coût en temps couplé à une variabilité importante avertit sur la nécessité de trouver d'autres méthodes d'évaluation de l'infiltration d'eau plus fiables.

4.6 Taux de carbone organique stable et labile

Le dosage du carbone organique stable et labile dans les parcelles ÉPEAUTRE et BLÉ ne permet pas de mettre en évidence une tendance selon le travail du sol en place. En effet, aucune différence significative n'a été constatée entre les différents traitements étudiés. Les valeurs obtenues varient entre 0,284 et 0,466 g/100 g ms pour le carbone organique stable et entre 0,418 et 0,664 g/100 g ms pour le carbone organique labile. Van Wesemael et al., (2019) présentent des taux similaires en systèmes cultivés ce qui indique que les valeurs obtenues ici sont crédibles.

Néanmoins, les résultats obtenus ne sont pas ceux attendus sur base des travaux de Van Wesemael et al. (2019), particulièrement pour le taux de carbone organique labile. En effet, ces auteurs montrent que le taux de carbone organique labile est sensible aux changements de pratiques et observent une augmentation de celui-ci pour un sol en non-labour depuis 2008, comparé à un sol sous gestion conventionnelle. Selon eux, le changement de taux de carbone organique labile serait visible environ cinq ans après le changement de pratique. Ils montrent également que le taux de carbone organique stable est quant à lui semblable d'une pratique à l'autre. Dès lors, il était attendu qu'un taux de carbone organique labile plus élevé soit observé dans les traitements NL06 comparés aux traitements Labour. Les causes de tels résultats ne sont pas claires. Certaines études montrent des différences de taux de carbone organique entre des systèmes labourés et non-labourés à certaines profondeurs seulement (Cookson et al., 2008; Sithole et al., 2019). Peut-être aurait-il fallu effectuer des prélèvements à différentes profondeurs et en doser le carbone organique stable et labile pour observer cette différence entre système labouré et non-labouré.

Cette méthode, bien que coûteuse en temps, semble prometteuse pour mettre en évidence l'impact d'un changement de pratiques sur le carbone organique du sol et sur l'évolution de sa teneur stable et labile au cours du temps. Il serait intéressant d'évaluer son évolution au cours du temps sur un sol en conversion vers le non-labour.

4.7 Relevé d'adventices

Les résultats des relevés d'adventices montrent une tendance nette et attendue dans les deux parcelles étudiées : le traitement NL06 présente un nombre moyen d'adventices plus élevé que le traitement NL18, lui-même présentant un nombre moyen plus élevé que le traitement Labour. Pourtant, les trois traitements étudiés présentent une méthode de lutte contre les adventices identiques.

Ces résultats soulignent le rôle majeur du labour dans la lutte contre les adventices mais également les difficultés de gestion de celles-ci lors d'une conversion vers un non-labour. L'alternative principalement utilisée dans la lutte contre les adventices en non-labour réside dans l'application d'herbicides dont l'impact environnemental est non négligeable. Vu les effets positifs du non-labour dont témoigne ce mémoire et la littérature présentée jusqu'ici, il semble que l'utilisation de ces herbicides comme solution principale de lutte contre les adventices est contradictoire. D'autres solutions existent et il semble intéressant d'en évaluer leur efficacité pour une lutte contre les adventices plus en adéquation avec les intentions du non-labour.

4.8 Couverture foliaire

Le but de cette mesure était double : déterminer l'impact du travail du sol sur l'évolution de la couverture foliaire et évaluer l'efficacité de l'application Canopéo pour potentiellement la substituer à la méthode du cadre.

En ce qui concerne l'évolution de la couverture foliaire en fonction des traitements, les résultats divergent entre les parcelles. La parcelle ÉPEAUTRE ne présente aucune différence significative entre ses traitements mais une tendance se profile tout de même : le traitement Labour semble couvrir le sol de manière plus rapide par rapport aux deux autres traitements mais cet écart s'estompe par la suite puisqu'au dernier relevé, les couvertures foliaires sont proches. La parcelle BLÉ présente quant à elle des différences significatives entre les traitements. Au premier relevé, le traitement NL06 montre un pourcentage de recouvrement significativement supérieur au Labour, lui-même significativement supérieur au traitement NL18. Par la suite, seul le traitement NL06 est significativement supérieur au NL18. Ces résultats mettent en évidence un développement plus difficile du blé en cas de non-labour

récent. Il est toutefois nécessaire de poursuivre ces observations afin d'évaluer si cette tendance se confirme ou non.

Ensuite, la corrélation entre l'application Canopéo et la méthode du cadre a été évaluée. L'analyse montre une corrélation positive et significative entre les deux méthodes. Cependant, les coefficients de détermination, variant de 37 à 89 % pour la parcelle ÉPEAUTRE et entre 72 et 94 % pour la parcelle BLÉ, montrent que lorsque la couverture foliaire est faible, la variabilité d'une méthode est peu expliquée par l'autre. Cela s'améliore néanmoins lorsque la couverture foliaire est plus élevée. Pour les mesures de terrain, un coefficient de détermination de 90 % ou plus est intéressant (Bertin, 2022), sous cette valeur les variations entre les deux méthodes sont trop importantes et ne permettent pas de confirmer le remplacement d'une méthode par l'autre.

La première analyse, basée sur les coefficients de corrélation, était favorable à l'application Canopéo. Cependant, les résultats découlant de l'analyse des coefficients de détermination remettent en question le remplacement de la méthode du cadre par l'application Canopéo. En effet, dans la majorité des cas, ceux-ci présentent des valeurs inférieures à 90 %, indiquant qu'une part trop importante de la variance n'est pas expliquée par la relation entre les deux méthodes et est donc due à des facteurs non contrôlés. Dès lors, les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire indiquent que la méthode du cadre, bien que plus coûteuse en temps, semble rester la meilleure méthode d'estimation de la couverture foliaire. Elle reste néanmoins discutable car elle se base sur une observation visuelle subjective. En effet, la mesure de couverture foliaire *via* cette méthode s'effectue en comptant le nombre de carrés au moins à moitié rempli par la végétation. Cette appréciation visuelle peut varier selon l'expérimentateur et peut donc aboutir à des résultats différents.

L'application Canopéo ne semble donc pas suffisamment performante que pour être utilisée comme seule méthode de mesure de la couverture foliaire dans le cadre d'études rigoureuses comme celle-ci. Néanmoins, de par sa facilité d'utilisation et sa rapidité, elle s'avère être une méthode intéressante par exemple pour les agriculteurs qui désirent obtenir une information approximative sur la couverture foliaire de leurs cultures. Il serait tout de même intéressant de poursuivre la comparaison entre ces deux méthodes avant de fermer la porte à la méthode Canopéo.

4.9 Tallage utile

En résumé, les résultats obtenus pour le tallage utile montrent que le traitement Labour présente un nombre moyen d'épis/m² significativement supérieur au traitement NL06 pour les deux parcelles. De plus, le traitement NL18 de la parcelle BLÉ montre un nombre moyen significativement supérieur à celui du traitement NL06. Les valeurs moyennes obtenues pour la parcelle ÉPEAUTRE varient entre 562 et 723 épis/m². Pour la parcelle BLÉ les valeurs se

situent entre 620 et 695 épis/m². Ces résultats sont légèrement supérieurs aux données de références (de 400 à 600 épis/m² en général) (BASF, 2019) mais restent tout de même acceptables.

Ces résultats montrent que le labour est favorable au paramètre « nombre d'épis/m² » comparé à un non-labour installé à long terme mais aucune référence n'a été trouvée à ce sujet pour confirmer ou infirmer cette tendance. Pour rappel, le rendement final de céréales est la résultante de 3 composantes principales : le nombre d'épis/m², le nombre de grains/épi et le poids des grains (Dorval, 2015). Il semble donc intéressant de mettre en lien les résultats du tallage utile avec ceux du poids des grains/m² (appelé « rendement » dans ce travail), cela est donc discuté au point suivant.

4.10 Rendement

Pour la parcelle ÉPEAUTRE, l'évaluation du rendement montre que les traitements NL06 et Labour présentent un rendement moyen semblable. Par contre, seul le traitement NL18 est considéré comme significativement inférieur au traitement NL06 en termes de rendement. Pour la parcelle BLÉ, les tendances sont les mêmes : les traitements NL06 et Labour présentent un rendement proche l'un de l'autre et le traitement NL18 possède le rendement moyen le plus faible.

Les valeurs obtenues, qui oscillent entre 0,55 et 0,70 kg/m², sont en accord avec celles présentent dans la littérature (de 0,6 à 0,8kg/m² selon GBM, 2021).

Comme évoqué au point précédent, le tallage utile (soit le nombre d'épis/m²) et le poids des grains (appelé « rendement » dans ce travail) sont des composantes principales du rendement final en céréales. Cependant, les résultats obtenus pour le tallage utile en fonction des traitements diffèrent de ceux obtenus pour le rendement. Une hypothèse avancée pour expliquer cette différence est le phénomène de compensation. En effet, en cas de conditions défavorables pouvant induire une diminution du tallage, les céréales ont la capacité d'augmenter le nombre de grains par épis en compensation de cette réduction du tallage (FSOV, 2018). Ainsi, un nombre d'épis/m² faible, compensé par un nombre de grains plus important peut conduire à des poids des grains/m² comparables.

Les tendances découlant des résultats du rendement sont qu'à court terme, un non-labour induit une réduction du rendement par rapport à un système conventionnel. Mais les résultats des traitements NL06 montrent qu'à long terme le non-labour atteint des rendements similaires à ceux d'un système conventionnel. Selon Pittelkow et *al.* (2015), la durée du non-labour est un facteur influant le rendement des céréales de manière significative. Ils montrent que lors de la période de transition d'un système conventionnel vers un système en non-

labour, le rendement tend à diminuer mais celui-ci atteint ensuite des valeurs similaires à un système conventionnel à partir de 5 ans de conversion (pour climat humide). Les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire montrent cette tendance également. Il est cependant important de noter que ces conclusions ne sont pas à généraliser. En effet, Pittelkow et *al.* (2015), montrent que le rendement en non-labour dépend fortement du contexte. En fonction notamment des cultures en places et du climat, les tendances peuvent s'inverser.

Toujours est-il que les résultats obtenus en céréales démontrent qu'à long terme, le rendement en non-labour est similaire à celui obtenu en système conventionnel. Le facteur rendement étant l'un des plus importants pour les agriculteurs, cela semble être un argument clé pour ceux qui désirent entamer une conversion vers un système sans labour.

Conclusion

Les enjeux actuels tels que le changement climatique, l'augmentation de la population, l'érosion des sols, la perte de matière organique, la perte de biodiversité ou encore la viabilité des exploitations incitent les systèmes agricoles actuels à évoluer vers des systèmes plus productifs et plus durables. Ceci dans le but d'assurer à la fois une sécurité alimentaire et la préservation de l'environnement. Dans cette optique, les systèmes conventionnels incluant le labour sont remis en question en raison notamment de l'impact négatif du labour sur plusieurs paramètres du sol. L'agriculture de conservation dont l'un des principes majeurs est la perturbation minimale du sol, est proposée comme l'une des alternatives possibles pour atteindre ces objectifs de durabilité et productivité.

C'est dans la volonté de documenter la problématique du labour et l'effet d'une conversion vers un système sans labour que ce travail est né. En effet, il a pour objectif d'étudier l'impact du travail du sol sur plusieurs paramètres clés en culture de céréales tels que le rendement, le tallage utile, la densité d'adventices et l'évolution de la couverture foliaire. Ce travail vise également à évaluer l'effet du travail du sol sur plusieurs paramètres physiques, chimiques et biologiques du sol tels que la décomposition de la matière organique, l'activité et densité des vers de terre, la compaction, la qualité structurale, la stabilité des agrégats, l'infiltration d'eau ainsi que le taux de carbone organique stable et labile.

Les résultats montrent que le non-labour installé à long terme (traitement NL06) est favorable à plusieurs paramètres du sol. Tout d'abord, en ce qui concerne la dégradation de la matière organique, il a été observé que la pratique du non-labour tend à réduire la minéralisation comparée au labour, indiquant que le non-labour peut permettre de limiter les pertes de matière organique par minéralisation. Ensuite, la densité de vers de terre est favorisée lorsqu'un non-labour est installé à long terme. Les résultats ont également montré une amélioration de la structure du sol lors de l'arrêt de la pratique du labour. En ce qui concerne l'infiltration d'eau, aucune différence significative n'a pu être mise en évidence mais une tendance se dégage tout de même : la pratique du non-labour tend à améliorer l'infiltration d'eau dans le sol, comparé à une pratique conventionnelle.

Le système sans labour installé à long terme s'est par contre révélé préjudiciable pour plusieurs paramètres. En effet, les mesures de résistance à la pénétration indiquent que les traitements en non-labour conduisent à une compaction à la profondeur de 20-30 cm en comparaison au labour. Le deuxième paramètre impacté négativement par le non-labour est la densité d'adventices qui s'avère plus importante qu'en système labouré. Ce résultat souligne les difficultés de gestion des adventices en non-labour.

Ensuite, plusieurs paramètres étudiés n'ont pas présenté de différences entre les systèmes labouré et non-labouré installé à long terme. C'est le cas des mesures de l'activité des vers de terre, du taux de carbone organique stable et labile ainsi que celles du rendement. En ce qui concerne ce dernier, les résultats indiquent que le non-labour installé depuis 2006 atteint des rendements similaires à ceux du système conventionnel. Ce résultat semble important car il démontre qu'à long terme, l'adoption de techniques culturales sans labour ne portent pas atteinte au rendement.

En ce qui concerne l'effet du non-labour installé à court terme (traitement NL18), les résultats sont moins clairs. L'une des raisons avancées est que lors de la période de transition d'un système conventionnel vers un système sans labour, les effets bénéfiques de la réduction du travail du sol prennent un certain temps à se développer et tardent donc à se traduire sur les paramètres étudiés (Soane et al., 2012). Plusieurs tendances se dégagent tout de même : d'une part le blé présente des difficultés de développement sur le traitement NL18, mis en évidence par les mesures de couverture foliaire. Ceci doit néanmoins être confirmé par des observations supplémentaires. D'autre part, le traitement NL18 engendre une baisse de rendement due à la transition de systèmes mais cette tendance s'estompe habituellement sur le long terme comme présenté plus haut.

En conclusion, les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire indiquent que le travail du sol impacte à la fois les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. De plus, le blé et l'épeautre se sont avérés sensibles aux différentes pratiques de travail du sol étudiées. Ce mémoire a permis de mettre en évidence les nombreux bénéfices apportés par le non-labour mais souligne également certaines difficultés notamment celle de la gestion des adventices ainsi que la variabilité des résultats lors de la période de transition d'un système conventionnel vers un système sans labour.

Références bibliographiques

- AgroParisTech, 2012. « Travail du sol ». En ligne sur <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/SIAFEEAGRONOMIE9cea/document/mac hinisme/techniques/tc-tsol.htm>. Consulté le 26/12/21
- Amézketa, E., 1999. Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14, 83–151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08
- Angonin B. s.d. "Rôles, objectifs du travail du sol et modes d'actions des outils". En ligne sur <https://www.province-sud.nc/sites/default/files/PPAP-Docs/MACHINISME/R%C3%B4les%2C%20objectifs%20du%20travail%20du%20sol%20et%20modes%20d'actions%20des%20outils.pdf>. Consulté le 26/12/21
- Arvalis, 2020. "Bien régler sa charrue". En ligne sur <https://www.arvalis-infos.fr/bien-regler-sa-charrue-@/view-25804-arvarticle.html>. Consulté le 02/01/22.
- Askari, M.S., Cui, J., Holden, N.M., 2013. The visual evaluation of soil structure under arable management. *Soil and Tillage Research* 134, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.06.004>
- Bajwa, A.A., 2014. Sustainable weed management in conservation agriculture. *Crop Protection* 65, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.07.014>
- Ball, B.C., Batey, T., Munkholm, L.J., 2007. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use & Management* 23, 329–337. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x>
- BASF, 2019. *Les composantes du rendement du blé*. En ligne sur https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/implantation_du_ble/les_composantes_du_rendement_du_ble/. Consulté le 10/12/21
- Bertin P., 2020a. LBRAI2106 - Cours de Phytotechnie, UCLouvain.
- Bertin P., 2020b. Diapositives du cours LBIRA2109 : Systèmes agraires [WWW Document]. URL <https://moodleucl.uclouvain.be/course/search.php?search=syst%C3%A8mes+agraires> (accessed 4.4.19).
- Bertin P., 2022. Communication personnelle.
- Biielders, C., 2009. Mesure de l'infiltration au moyen d'un infiltromètre à charge constante. *Prosensoil : Protégeons nos sols*.
- Biielders C., Javaux, M., 2019. LBRES2103 - Physique du sol appliquée à l'agronomie et l'environnement [WWW Document]. URL <https://moodleucl.uclouvain.be/course/view.php?id=7103> (accessed 4.10.20).
- Biielders C., 2020. LBRAI2106 - Cours de Phytotechnie, UCLouvain
- Biot, Nicolas. *Comparaison de méthodes d'évaluation de la fourniture du service écosystémique de la stabilité structurale sur des sols limoneux et limono-sableux en Belgique*. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, 2020. Prom. : Bertin, Pierre ; Leveau, Lola. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:25112>
- Blanco-Canqui, H., Wortmann, C.S., 2020. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. *Soil and Tillage Research* 198, 104534. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104534>

- Blouin, M., Hodson, M.E., Delgado, E.A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K.R., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J.E., Cluzeau, D., Brun, J.-J., 2013. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science* 64, 161–182. <https://doi.org/10.1111/ejss.12025>
- Busari, M.A., Kukal, S.S., Kaur, A., Bhatt, R., Dulazi, A.A., 2015. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research* 3, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002>
- Chambre d'agriculture Yonne, 2019. "Présentation de l'Opération « Tea-Bag ». En ligne sur <https://www.terresinovia.fr/documents/20126/896350/Colloque+fertilite%C5%BD-Presentation-teabag-CA89-Duchenes.pdf/db17c645-39a7-6758-f408-284eb547fd3b?t=1558944930002>. Consulté le 20/10/21
- Chartin, C., Vincent, Q., Van Wesemael, B., & Carnol, M. (2019). *Développement d'indicateurs de la qualité biologique et du carbone organique du sol pour l'évaluation de l'état des sols en Wallonie : Valorisation des acquis et transfert vers les utilisateurs (CARBIOSOL 5)* (p. 205). https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/252863/1/CARBIOSOL-5_Rapport-final_290319.pdf
- Cookson, W.R., Murphy, D.V., Roper, M.M., 2008. Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 763–777. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.10.011>
- Dorval, I., 2015. Effet du cultivar et de la densité de semis sur la productivité et la qualité des grains de l'épeautre de printemps et d'automne 116.
- Duquef S. 2017. "Faut-il encore labourer ?". En ligne sur <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/faut-il-encore-labourer-217-124164.html>. Consulté le 26/12/21.
- Eijkelpamp Agrisearch Equipment, s.d. Penetrologger, Manuel d'utilisation 40.
- Eisenhauer, N., 2010. The action of an animal ecosystem engineer: Identification of the main mechanisms of earthworm impacts on soil microarthropods. *Pedobiologia* 53, 343–352. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2010.04.003>
- Emmet-Booth (2018) : Emmet-Booth, J.P., Bondi, G., Fenton, O., Forristal, P.D., Jeuken, E., Creamer, R.E., Holden, N.M., 2018. GrassVESS: a modification of the visual evaluation of soil structure method for grasslands. *Soil Use and Management* 37–47. [https://doi.org/10.1111/sum.12396@10.1111/\(ISSN\)14752743.celebrating-bsss-anniversary](https://doi.org/10.1111/sum.12396@10.1111/(ISSN)14752743.celebrating-bsss-anniversary)
- ESA. (2017). Fiche capacité de dégradation des résidus : le LEVA-bag. Ecole Supérieure d'Agricultures Angers Loire. <https://www.groupe-esa.com/wp-content/uploads/2017/09/fiche-indicateur-levabag.pdf>
- Fockedey, Aline ; Belin, Xavier ; *Etude de l'impact des pratiques agricoles sur les services écosystémiques à travers une recherche participative dans la région limoneuse et sablo-limoneuse du Brabant-Wallon*. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, 2021. Prom. : Leveau, Lola ; Bertin, Pierre. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:32053>
- FSOV, 2018. "Plasticité des composantes de rendement des céréales à paille". En ligne sur <https://www.fsov.org/uploads/2019/3/fsov-2018-r-plastix-ble-orge-resume.pdf>. Consulté le 10/12/21.
- GBM (Groupe Banque mondiale), 2021. "Rendements des céréales". En ligne sur

<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/AG.YLD.CREL.KG>. Consulté le 20/12/21.

- Giller, K.E., Andersson, J.A., Corbeels, M., Kirkegaard, J., Mortensen, D., Erenstein, O., Vanlauwe, B., 2015. Beyond conservation agriculture. *Frontiers in Plant Science* 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00870>
- Guimarães, R.M.L., Ball, B.C., Tormena, C.A., 2011. Improvements in the visual evaluation of soil structure: Visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management* no-no. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x>
- Haddaway, N.R., 2016. How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review protocol 8.
- Houben, D., Faucon, M.-P., Mercadal, A.-M., 2018. Response of Organic Matter Decomposition to No-Tillage Adoption Evaluated by the Tea Bag Technique. *Soil Syst.* 2, 42. <https://doi.org/10.3390/soilsystems2030042>
- Kassam, A., Friedrich, T., Shaxson, F., Bartz, H., Mello, I., Kienzle, J., Pretty, J., 2014. The spread of Conservation Agriculture: policy and institutional support for adoption and uptake. *Field Actions Science Reports* 13.
- Keuskamp, J.A., Dingemans, B.J.J., Lehtinen, T., Sarneel, J.M., Hefting, M.M., 2013. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods Ecol Evol* 4, 1070–1075. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>
- Lefèvre, R., 2015. Matière organique stable du sol : dynamique et mécanismes de (dé)stabilisation 145.
- Le Gall P., 2016. "Réglages d'une charrue et les différences." En ligne sur : <https://www.motoculture-jardin.com/images/motoculteur/charrue.jpg>. Consulté le 05/01/22.
- Livre Blanc Céréales, 2017. "La préparation du sol avant le semis". En ligne sur <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/semis/preparation-du-sol/>. Consulté le 21/12/21
- MAZOYER M., Laurence ROUDART, 2021. « AGRICULTURE - Histoire des agricultures jusqu'au XIXe siècle », *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 25 novembre 2021. URL : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/agriculture-histoire-des-agricultures-jusqu-au-xixe-siecle/>
- M. Yasin, R. D. Grisso, L. L. Bashford, A. J. Jones, L. N. Mielke, 1993. Normalizing Cone Resistance Values by Covariance Analysis. *Transactions of the ASAE* 36, 1267–1270. <https://doi.org/10.13031/2013.28458>
- Moraes, M.T. de, Debiasi, H., Carlesso, R., Franchini, J.C., Silva, V.R. da, 2014. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 38, 288–298. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>
- Patrignani, A., Ochsner, T.E. (2015). Canopeo : A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agronomy Journal* 107:2312-2320
- Pittelkow, C.M., Linquist, B.A., Lundy, M.E., Liang, X., van Groenigen, K.J., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., van Kessel, C., 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research* 183, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>
- Prosensol, 2012. Projet INTERREG "PROSENSOLS" [WWW Document]. URL <http://www.paysdescollines.be/brochures-sol.html?lang=fr> (accessed 4.16.20).
- Reeleder, R.D., Miller, J.J., Ball Coelho, B.R., Roy, R.C., 2006. Impacts of tillage, cover crop, and

- nitrogen on populations of earthworms, microarthropods, and soil fungi in a cultivated fragile soil. *Applied Soil Ecology* 33, 243–257. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.10.006>
- Roger-Estrade, J., Labreuche, J., Richard, G., 2011. Effects of no-ploughing methods on soil physical properties: Consequences on soil erosion in a temperate climate. *Cahiers Agricultures* 20, 186–193. <https://doi.org/10.1684/agr.2011.0490>
- Sirami C and *al.* 2016. Services écosystémiques dans les agroécosystèmes : Définition. [Dictionnaire d'Agroécologie](https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/services-ecosystemiques-dans-les-agroecosystemes/), <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/services-ecosystemiques-dans-les-agroecosystemes/>
- Sithole, N.J., Magwaza, L.S., Thibaud, G.R., 2019. Long-term impact of no-till conservation agriculture and N-fertilizer on soil aggregate stability, infiltration and distribution of C in different size fractions. *Soil and Tillage Research* 190, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.004>
- Skaalsveen, K., Ingram, J., Clarke, L.E., 2019. The effect of no-till farming on the soil functions of water purification and retention in north-western Europe: A literature review. *Soil and Tillage Research* 189, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.004>
- 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>
- SPW, 2020. *Carte numérique des sols de Wallonie*. En ligne sur <http://geoportail.wallonie.be/WalOnMap>. Consulté le 10/04/21.
- van Capelle, C., Schrader, S., Brunotte, J., 2012. Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota – A review with a focus on German data. *European Journal of Soil Biology* 50, 165–181. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.02.005>
- van Wesemael, B., Chartin, C., Wiesmeier, M., von Lützow, M., Hobley, E., Carnol, M., Krüger, I., Champion, M., Roisin, C., Hennart, S., & Kögel-Knabner, I. (2019). An indicator for organic matter dynamics in temperate agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 274, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.01.005>
- Virgili Antoni, 2015. Rapide et fatale : comment la Peste Noire a dévasté l'Europe au 14ème siècle. En ligne sur <https://www.nationalgeographic.fr/histoire/2020/04/rapide-et-fatale-comment-la-peste-noire-devaste-leurope-au-14e-siecle> .Consulté le 02/11/21.
- Krüger, I., Champion, M., Roisin, C., Hennart, S., Kögel-Knabner, I., 2019. An indicator for organic matter dynamics in temperate agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 274, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.01.005>
- Waligora C. 2019. *"L'agriculture de conservation, qu'est-ce que c'est ?"* En ligne sur <https://www.greenotec.be/medias/files/presentation-de-l-ac-mai-2019-grand-public-c-waligora.pdf>. Consulté le 2/01/22.
- Wacker et al. 2018. *Techniques culturales simplifiées : Définition*. [Dictionnaire d'Agroécologie](https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/techniques-culturales-simplifiees/), <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/techniques-culturales-simplifiees/>
- Walter, C., Bispo, A., Chenu, C., Langlais, A., Schwartz, C., 2015. Les services écosystémiques des sols: du concept à sa valorisation 19.

Annexes

Annexe 1 : Diversité des pratiques de l'agriculture de conservation

Source : Giller et al., (2015)

TABLE 1 | Conservation Agriculture takes many forms across the globe related to farm size and intensity of input use.

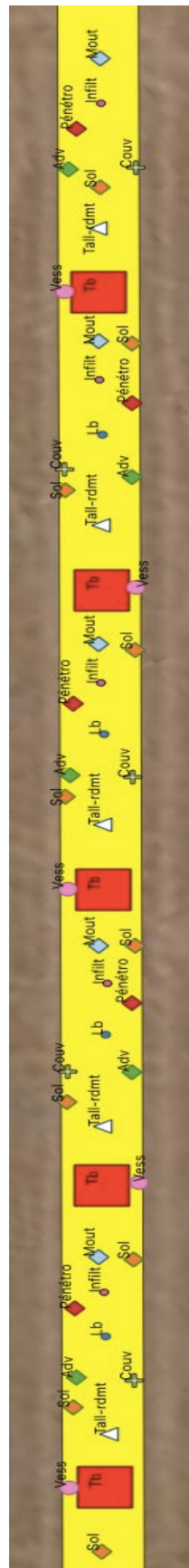
Type	Region (examples)	Tillage	Mulch	Rotation	Farm type	Input	Main issues	References
Direct planting with hand tools	Sub-humid Sub-Saharan Africa (West, East, and southern Africa)	None—use of pointed stick to plant (dibbling)	Little to no mulch of crop residues	Maize predominant—some legumes	Smallholder mixed crop-livestock farms (<3 ha)	Low level of fertilization No/limited use of herbicides	+ water conservation and erosion control if mulch present – limited biomass, CR trade-off (feed) – labor savings conditional on herbicides – rotation is limited – yield increase conditional on fertilizer	Thierfelder et al., 2014
Planting basins (conservation farming)	Semi-arid southern Africa	Localized hoeing to make planting pits		Maize/sorghum/pearl millet predominant—some legumes				Twomlow et al., 2008; Mazvimu and Twomlow, 2009
Animal driven reduced tillage	Sub-humid southern Africa	Use of ripper or subsoiler to make planting furrows		Maize predominant—some legumes	Smallholder mixed crop-livestock farms (2–5 ha)			Thierfelder et al., 2014
Animal driven no-tillage	Subtropical southern Brazil	Use of direct seeder for planting directly through mulch into soil	Mulch of crop residues and cover crops	Maize, soybean and beans followed by winter wheat, black oats, rye, or leguminous cover crop	Medium-sized mixed crop-livestock farms (20–50 ha)	Medium level of fertilization and use of herbicides	+ control of soil erosion + longer period available for planting crops + cover crops, if inputs available – soil compaction – invading weed species	Bolliger et al., 2006
Tractor-operated no/reduced tillage (small-medium scale)	NW Indo-Gangetic Plains (India/Pakistan)	Use of no-till tractor-mounted direct seeder (locally manufactured)	Partial mulch of crop residues	Wheat crop only (in irrigated wheat-based double crop systems, e.g., rice-wheat)	Mixed crop-livestock farms (<20 ha)	Irrigation, fertilization and use of herbicides	+ reduced costs (tractor time and fuel costs) + yield effect (enhanced timeliness) – crop residue use and handling	Erenstein and Laxmi, 2008
	West Asia-North Africa (dry Mediterranean climate)		Limited mulch of crop residues	Wheat, barley, legumes (lentil, chickpea)	Mechanized mixed crop-livestock (sheep) farms (<200 ha)	Medium use of fertilizer and herbicides	+ water conservation + (wind) erosion control + increased grain yields if early sowing + fuel savings – CR trade-off (feed) – reduced seedling vigor in cereals – invading weed species	Kassam et al., 2012
Tractor operated reduced tillage (medium scale)	North-west Europe (cool temperate climate)	Some superficial soil tillage before direct seeding	Mulch of crop residues	Fodder and grain maize, wheat, barley, and cruciferous cover crops, ryegrass	Mechanized medium-scale (arable) farms (30–300 ha)	Intensive use of fertilizer and herbicides	+ control of erosion and run-off + allows earlier seeding of autumn-sown crop + fuel savings – delayed planting of spring-sown crops – topsoil compaction – increased costs with herbicides – (grass) weed problems – drainage and soil aeration problems, especially in wet season – unsuitable for incorporation of solid animal manures	Carnell, 1985; Soane et al., 2012

(Continued)

TABLE 1 | Continued

Type	Region (examples)	Tillage	Mulch	Rotation	Farm type	Input	Main issues	References
Tractor operated direct seeding (large scale)	Australian wheat belt (subtropical and Mediterranean climate)	Use of no-till tractor-mounted direct seeder (large tractor implements)	Mulch of crop residues	Cereal-legumes (oilseed)	Mechanized large scale farms and enterprises (1000–10,000 ha)	Reliance on herbicides and fertilizer	+ reduced input costs, timeliness + erosion control, water capture – herbicide resistance – limited rotation due to greater profitability of cereals – acidification, requiring lime incorporations	Llewellyn et al., 2012; Kirkegaard et al., 2014a
	North-America (Canada and the mid-west)			Maize-soybean	Mechanized large scale farms (<500 ha)		– herbicide resistance – limited crop diversity	Hansen et al., 2015
	Cerrado region, Brazil (tropical sub-humid climate)				Mechanized large scale farms and enterprise (500–5000 ha)		+ erosion control + fuel savings + possibility to grow two crops per year – herbicide resistance – soil compaction	Bolliger et al., 2006

Annexe 2 : Représentation de la disposition des différentes mesures au sein d'une bande de mesure



Annexe 3 : Fiche de suivi des paniers à vers de terre

Source : OPVT, 2015 – Fiche de suivi des paniers à vers de terre. Université de Rennes



Paniers à Vers de Terre

Suivi du panier 1

1 / 4

Informations parcelle
 Exploitation _____
 Observateur _____

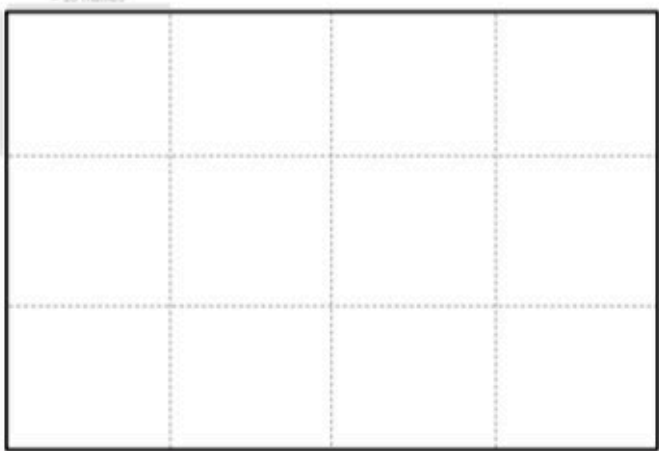
Commune _____
 Parcelle _____

Dates
 Mise en place ____ / ____ / 20____
 Fin de protocole ____ / ____ / 20____

Schéma à compléter lors de chaque observation – Le résultat final est important.

= 10 mailles

= 8 mailles



Légende

Cabanes

☐ Nouvelle

☒ Déjà observée

☒ Disparue

Turricules

X Nouveau

☒ Déjà observé

☒ Disparu

Commentaires

Tableau des observations

Classes de recouvrement

5
 4
 3
 2
 1

Date du relevé	Code photo ou numéro	Nb de nouvelles cabanes, nouveaux turricules observés		Nb de cabanes, turricules précédemment observés		Nb de cabanes, turricules disparus depuis le dernier relevé		Recouvrement de la paille (cocher la case)				
		☐	X	☒	☒	☒	☒					
T 0 mois												
T 0,5 mois												
T 1 mois												
T 1,5 mois												
T 2 mois												
T 2,5 mois												
T 3 mois												
T 3,5 mois												
T 4 mois												
T 4,5 mois												
T 5 mois												
T 5,5 mois												
T 6 mois												

Reprendre une nouvelle fiche si vous manquez de place pour vos observations – refaire le schéma sur la nouvelle fiche de suivi.

Récapitulatif à 4 mois
à compléter même si le protocole continu

Cabanes

Nombre de ☐ : _____

Nombre de ☒ : _____

Nombre de ☒ : _____

Paille

Classe de recouvrement _____

Turricules

Nombre de X : _____

Nombre de ☒ : _____

Nombre de ☒ : _____

Récapitulatif de fin (date ____ / ____ / 20____)

Cabanes

Nombre de ☐ : _____

Nombre de ☒ : _____

Nombre de ☒ : _____

Paille

Classe de recouvrement _____

Turricules

Nombre de X : _____

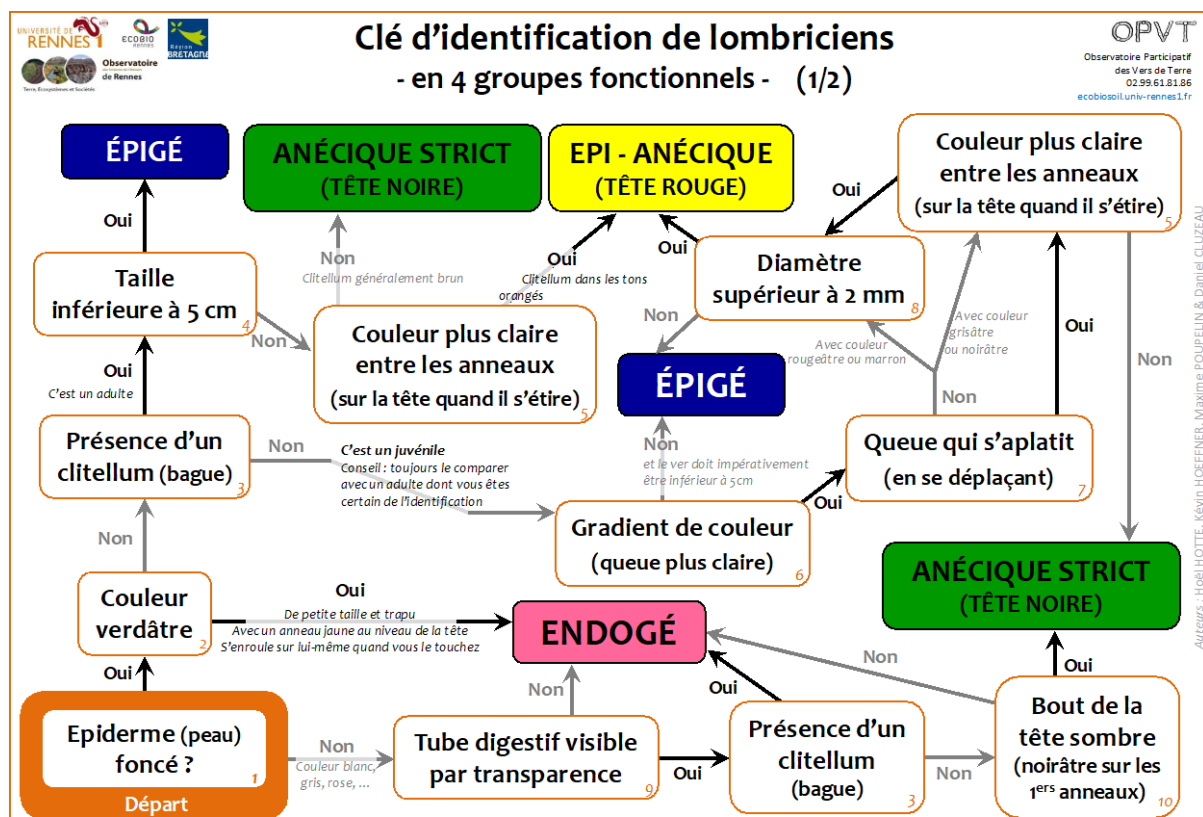
Nombre de ☒ : _____

Nombre de ☒ : _____

Saisir et transférer ces données sur : ecobiosol.univ-rennes1.fr

Annexe 4 : Clé d'identification des lombriciens en 4 groupes fonctionnels

Source : OPVT, 2015 - Clé d'identification de lombriciens en 4 groupes fonctionnels. Université de Rennes



Toute utilisation de ce document devra faire état de la référence suivante : OPVT, 2015 - Clé d'identification de lombriciens en 4 groupes fonctionnels. Université de Rennes 1/CNRS - OSUR - UMR Ecobio



Toute utilisation de ce document devra faire état de la référence suivante : OPVT, 2015 - Clé d'identification de lombriciens en 4 groupes fonctionnels. Université de Rennes 1/CNRS - OSUR - UMR Ecobio

Annexe 5 : Protocole et clé permettant d'établir le score VESS

Source : Guimarães et al., 2011. Improvements in the visual evaluation of soil structure. Soil Use and Management.

Visual Evaluation of Soil Structure

Soil structure affects root penetration, water availability to plants and soil aeration. This simple, quick test assesses soil structure based on the appearance and feel of a block of soil dug out with a spade. The scale of the test ranges from Sq1, good structure, to Sq5, poor structure.



Equipment

Garden spade approx. 20 cm wide, 22-25 cm long.
Optional: light-coloured plastic sheet, sack or tray ~50 x 80 cm, small knife, digital camera.

When to sample:

Any time of year, but preferably when the soil is moist.
If the soil is too dry or too wet it is difficult to obtain a representative sample.
Roots are best seen in an established crop or for some months after harvest.

Where to sample:

Select an area of uniform crop or soil colour or an area where you suspect there may be a problem. Within this area, plan a grid to look at the soil at 10, preferably more, spots. On small experimental plots, it may be necessary to restrict the number to 3 or 5 per plot.



Brude Bell, SRUC (bruce.bell@sruc.ac.uk),
Rachel Guimarães, University of Maringá, Brazil (rachelg@uem.br),
Tom Bailey, Independent Consultant (2033@tombatey.fs.com) and
Lars Munkholm, University of Aarhus, Denmark (Lars.Munkholm@agrsci.dk)

Method of assessment:

Step	Option	Procedure
Block extraction and examination		
1. Extract soil block	Loose soil	Remove a block of soil ~15 cm thick directly to the full depth of the spade and place spade plus soil onto the sheet, tray or the ground
	Firm soil	Dig out a hole slightly wider and deeper than the spade leaving one side of the hole undisturbed. On the undisturbed side, cut down each side of the block with the spade and remove the block as above.
2. Examine soil block	Uniform structure	Remove any compacted soil or debris from around the block.
	Two or more horizontal layers of differing structure	Estimate the depth of each layer and prepare to assign scores to each separately.

Block break-up

3. Break up block (take a photograph - optional)	Measure block length and look for layers. Gently manipulate the block using both hands to reveal any cohesive layers or clumps of aggregates. If possible separate the soil into natural aggregates and man-made clods. Clods are large, hard, cohesive and rounded aggregates.
4. Break up of major aggregates to confirm score	Break larger pieces apart and fragment it until a piece of aggregate of 1.5 - 2.0 cm. Look to their shape, porosity, roots and easily of break up. Clods can be broken into non-porous aggregates with angular corners and are indicative of poor structure and higher score.

Soil scoring

5. Assign score	Match the soil to the pictures category by category to determine which fits best.
6. Confirm score from	Factors increasing score:
	Block extraction Difficulty in extracting the soil block
	Aggregate shape and size Larger, more angular, less porous, presence of large worm holes
	Roots Clustering, thickening and deflections
	Anaerobism Pockets or layers of grey soil, smelling of sulphur and presence of ferrous ions
7. Calculate block scores for two or more layers of differing structure	Aggregate fragmentation Break up larger aggregates ~ 1.5 - 2.0 cm of diameter fragments to reveal their type
	Multiply the score of each layer by its thickness and divide the product by the overall depth, e.g. for a 25 cm block with 10 cm depth of loose soil (Sq1) over a more compact (Sq3) layer at 10-25 cm depth, the block score is $(1 \times 10/25 + 3 \times 15/25) = Sq2.2$

Scoring: Scores may fit between Sq categories if they have the properties of both.

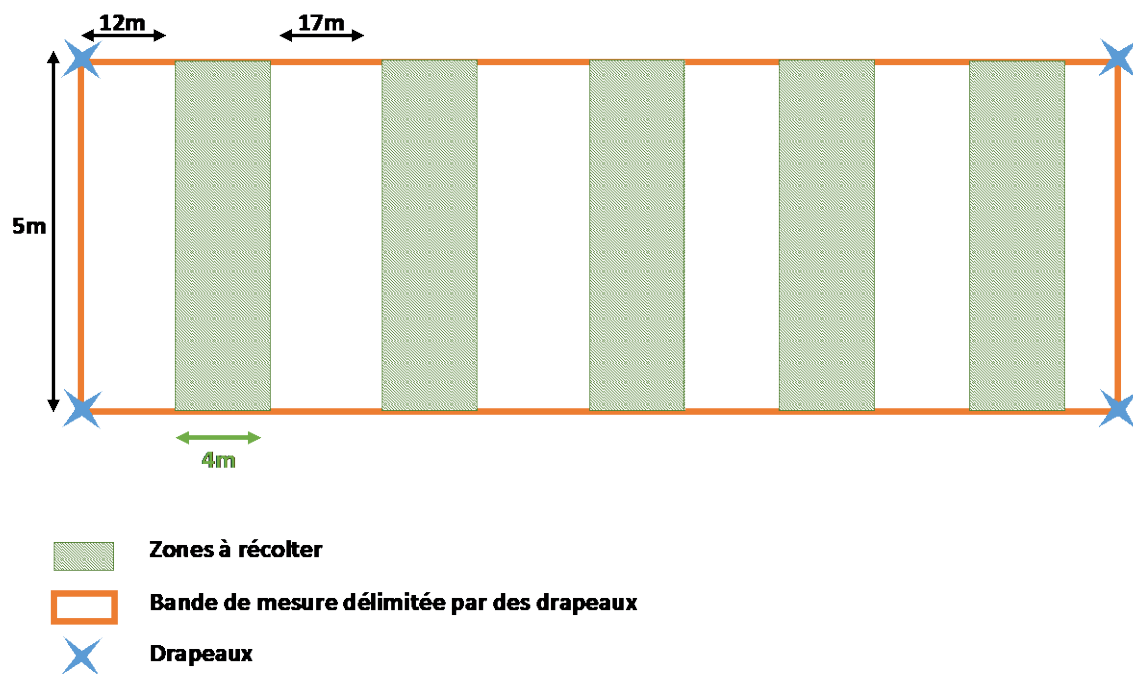
Scores of 1-3 are usually acceptable whereas scores of 4 or 5 require a change of management.

16 Oct 2012

Structure quality	Size and appearance of aggregates	Visible porosity and Roots	Appearance after break-up: various soils	Appearance after break-up: same soil different tillage	Distinguishing feature	Appearance and description of natural or reduced fragment of ~ 1.5 cm diameter	
Sq1 Friable Aggregates readily crumble with fingers	Mostly < 6 mm after crumbling	Highly porous Roots throughout the soil			 Fine aggregates	 The action of breaking the block is enough to reveal them. Large aggregates are composed of smaller ones, held by roots.	0
Sq2 Intact Aggregates easy to break with one hand	A mixture of porous, rounded aggregates from 2mm - 7 cm. No clods present	Most aggregates are porous Roots throughout the soil			 High aggregate porosity	 Aggregates when obtained are rounded, very fragile, crumble very easily and are highly porous.	5
Sq3 Firm Most aggregates break with one hand	A mixture of porous aggregates from 2mm -10 cm; less than 30% are <1 cm. Some angular, non-porous aggregates (clods) may be present	Macropores and cracks present. Porosity and roots both within aggregates.			 Low aggregate porosity	 Aggregate fragments are fairly easy to obtain. They have few visible pores and are rounded. Roots usually grow through the aggregates.	10
Sq4 Compact Requires considerable effort to break aggregates with one hand	Mostly large > 10 cm and sub-angular non-porous; horizontal/platy also possible; less than 30% are <7 cm	Few macropores and cracks All roots are clustered in macropores and around aggregates			 Distinct macropores	 Aggregate fragments are easy to obtain when soil is wet, in cube shapes which are very sharp-edged and show cracks internally.	15
Sq5 Very compact Difficult to break up	Mostly large > 10 cm, very few < 7 cm, angular and non-porous	Very low porosity. Macropores may be present. May contain anaerobic zones. Few roots, if any, and restricted to cracks			 Grey-blue colour	 Aggregate fragments are easy to obtain when soil is wet, although considerable force may be needed. No pores or cracks are visible usually.	cm

Annexe 6 : Plan de récolte au sein de chaque traitement

Plan de récolte au sein des bandes d'observation



Impact du travail du sol sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques du système sol-plante en culture d'épeautre et blé

Présenté par Aurélie Dechef

Dans le contexte du changement climatique et de la croissance de la population mondiale, les systèmes agricoles actuels font face à un challenge de taille : assurer une sécurité alimentaire tout en renforçant la durabilité de l'agriculture. Dans cette optique, les systèmes conventionnels intensifs sont remis en question et ceci inclut entre autres la pratique du labour.

L'objectif de ce mémoire est d'évaluer l'impact du travail du sol sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques du système sol-plante en culture d'épeautre et de blé. L'objectif est également d'évaluer l'effet de l'adoption de pratiques culturales sans labour sur le court et le long terme. Pour ce faire, deux parcelles, contenant pour l'une du blé et pour l'autre de l'épeautre sont étudiées. Ces deux parcelles présentent chacune trois modalités de travail du sol différentes : non-labour depuis 2006, non-labour depuis 2018 et labour. Les paramètres étudiés sont l'activité biologique, la compaction du sol, la structure du sol, la stabilité des agrégats, l'infiltration d'eau, le taux de carbone organique stable et labile, les adventices, la couverture foliaire, le tallage utile et enfin le rendement.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire indiquent que le travail du sol impacte à la fois les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. De plus, le blé et l'épeautre se montrent sensibles aux différentes pratiques de travail du sol étudiées. Ce mémoire a permis de mettre en évidence les nombreux bénéfices apportés par le non-labour mais souligne également certaines difficultés notamment celle de la gestion des adventices ainsi que la variabilité des résultats lors de la période de transition d'un système conventionnel vers un système sans labour.