

Faculté des bioingénieurs

Impact de l'agriculture de conservation et de la transition depuis une agriculture conventionnelle sur la qualité des sols

Auteur : Maxime Vancayzeele

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

Lecteurs : Pr Mathieu Javaux (UCLouvain/ELI/ELIE)

Dr Briec Hardy (CRA-W)

Année Académique : 2022 - 2023

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Bioingénieur : Sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

Durant la conception de ce mémoire et principalement la phase expérimentale, beaucoup de personnes m'ont apporté leur aide et leur soutien je tiens à tous les remercier.

Je remercie tout d'abord toutes les personnes m'ayant apporté leur aide pour mes mesures en champ : Maman, Nico, Louis et Nikis. Cela n'a pas toujours été une partie de plaisir, principalement lorsqu'il pleuvait ou lorsqu'il gelait, mais je pouvais compter sur eux

Je remercie également le personnel du CRA-W qui m'ont apporté leur aide tant d'un point de vue théorique que pratique et qui étaient à l'écoute pour mes questions : Morgan, Brieuc et Frédéric.

Je tiens également à remercier le personnel de L'UCL, Sébastien et Arnaud qui m'ont aidé pour les mesures en laboratoire.

Évidemment je tiens à remercier mon promoteur Charles Bielders pour son aide et son expertise tout au long de ce mémoire.

Je remercie également Brieuc Hardy et Mathieu Javaux qui ont accepté de remplir le rôle de lecteurs pour ce mémoire.

Finalement je tiens à remercier tout ceux qui m'ont apporté leur aide de près ou de loin et principalement leur soutien. Je remercie donc tous mes amis et ma famille qui étaient présents pour moi.

Un remerciement spécial va pour mes parents, Laurent et Katty qui m'ont soutenu et encouragé tout le long de mes études me permettant d'arriver ainsi à la fin de mon parcours.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte	1
2	État de l’art	2
2.1	Systèmes de cultures	2
2.1.1	Agriculture conventionnelle	2
2.1.2	Agriculture de conservation	5
2.1.3	Transition de l’agriculture conventionnelle vers l’agriculture de conservation	7
2.2	Indicateurs de qualité du sol	8
2.2.1	Indicateurs biologiques	8
2.2.2	Indicateurs chimiques	9
2.2.3	Indicateurs physiques	11
2.2.3.1	Infiltration	12
2.2.3.2	Stabilité du sol	13
2.2.3.3	Rétention d’eau	15
3	Objectifs	18
4	Matériels et méthodes	19
4.1	Présentation des parcelles	19
4.2	Paniers à vers de terre	21
4.3	Analyses chimiques	23
4.4	Infiltrométrie	25
4.5	Slake test	27
4.6	Courbe de rétention d’eau	29
4.7	Analyse des résultats	33
5	Résultats et discussion	34
5.1	Corrélations entre les indicateurs	34
5.2	Densité apparente du sol	36
5.3	Propriétés biologiques	36
5.4	Propriétés chimiques	39
5.4.1	Carbone organique	39
5.4.2	Azote	41
5.5	Infiltrométrie	44
5.6	Slake test	46
5.6.1	Tmax	47
5.6.2	Wend	49
5.6.3	SI30	51
5.6.4	Résumé des effets du QST	54
5.7	Courbe de rétention	55

5.7.1	θ_s	55
5.7.2	α	57
5.7.3	n	58
5.7.4	θ_r	59
5.7.5	θ_{CC}	59
5.7.6	θ_{PF}	60
5.7.7	Réserve utile en eau	62
6	Conclusions	64
7	Bibliographie	67
8	Annexes	72

Abréviations

AC : Agriculture de conservation

Aconv : Agriculture conventionnelle

CC : Capacité au champ

CHP : Casseroles à haute pression

CRAW : Centre de Recherche Agricole Wallon

FAO : Food and Agricultural Organisation

MO : Matière organique

ONU : Organisation des Nations Unies

PFP : Point de flétrissement permanent

QST : QuantiSlakeTest

SYCI : Systèmes de Cultures Innovants

RUE : Réserve utile en eau

VDT : Vers de terre

Table des figures

1	Illustration de l'effet splash (Zulkifli et al., 2017)	4
2	Effets du "Dust Bowl" Source : https://www.life.com/	5
3	Exemple de semis direct (https://www.paysan-breton.fr/)	6
4	Exemple de rotation de cultures (https://agriculture-de-conservation.com/)	7
5	Effet des VDT sur le sol (Knowles et al.,2016)	9
6	Illustration du cycle de l'azote dans le sol (https://www.schoolmouv.fr/)	11
7	Illustration du taux d'infiltration en fonction du système de culture (Basche et Delonge, 2019)	12
8	illustration de l'effet de compaction (https://www.cultivar.fr)	13
9	Exemple de courbe de rétention (Biielders C. et Javaux M., 2022, Physique du sol appliquée à l'agronomie et l'environnement. Transparent du cours. Université catholique de Louvain)	16
10	Plan de l'essais SYCI (www.cra.wallonie.be)	19
11	Ligne du temps des interventions- année culturale 2022	21
12	Exemple de résultats de cabanes (en orange) et de turricules (en jaune)(OPVT)	22
13	Dispositif expérimental, parcelle 27 ;Janvier 2022	22
14	Illustration de la sonde utilisée pour récolter les échantillons	23
15	Influence de la compaction du sol sur le calcul de stock (Wendt hauser, 2013)	24
16	Dispositif expérimental pour l'infiltration- Infiltromètre à simple anneau	25
17	illustration de l'écoulement 2D et 3D dans un infiltromètre à simple anneau- Source : C. Biielders, non publié	26
18	Illustration des indicateurs dérivés du QST (Vanwindekens et Hardy, 2022)	28
19	Dispositif expérimental slake-test (Vanwindekens et Hardy,2022)	29
20	Fonctionnement du dispositif Hyprop (https://www.hyprop.co.za/)	30
21	Dispositif expérimental des CHP	31
22	exemple de mesures hyprop et CHP	33
23	Exemple de courbe de rétention- Parcelle 27	33
24	Densité apparente des échantillons en fonction du système et de la culture.	36
25	Précipitations mesurées par la station de Ligny- Source : https://hydrometrie.wallonie.be/	38
26	Effet de la profondeur sur la concentration en carbone organique en fonction du système	39
27	Stock de carbone organique en fonction du système sur les 30 premiers centimètres	40
28	Effet de la profondeur sur la concentration en azote en fonction du système	41
29	Teneur en azote en fonction de la profondeur et du système (à gauche) ou de la culture (à droite)	42
30	Stock d'azote en fonction du système sur les 30 premiers centimètres	43
31	Taux d'infiltration de l'eau en fonction du système toutes dates confondues	44
32	Graphique de la corrélation entre le taux d'infiltration et la densité apparente du sol Coefficient de corrélation :-0,74	45

33	Graphique de la corrélation entre le taux d'infiltration et l'activité des VDT Coefficient de corrélation : -0,38	45
34	Résultats de la campagne B (à gauche) ou C (à droite) des QST en fonction du système	46
35	Résultats de l'indicateur Tmax en fonction du système et de la culture pour les campagne B et C après transformation de variable : log	48
36	Graphique de la corrélation entre la densité apparente du sol et Tmax Coefficient de corrélation : 0,54	49
37	Résultats pour Wend en fonction du système et de la culture	50
38	Graphique de la corrélation entre la teneur en carbone organique et Wend Coef- ficient de corrélation : 0,77	51
39	Résultats pour SI30 en fonction du système et de la culture après transformation de variable : racine carrée	52
40	Influence de la campagne sur SI30 en fonction du système et de la culture . . .	53
41	Résultats pour θ_s en fonction du système et de la culture (juin 2022)	55
42	Densité apparente pour les échantillons utilisés pour mesurer la courbe de ré- tention d'eau en fonction du système	56
43	Graphique de la corrélation entre la densité et la teneur en eau à saturation Coefficient de corrélation : -0,68	57
44	Résultats pour α en fonction du système après transformation de variables : log	58
45	Résultats pour n en fonction du système et de la culture	59
46	Résultats de θ_{CC} en fonction du système (cm^3/cm^3)	60
47	Résultats pour θ_{PF} en fonction du système et de la culture (cm^3/cm^3)	61
48	Graphique de la corrélation entre la teneur en carbone organique et la teneur en eau au point de flétrissement permanent Coefficient de corrélation : 0,4	62
49	Résultats pour RUE en fonction du système et de la culture	63
50	Interventions sur les parcelles en lin conventionnel	73
51	Interventions sur les parcelles en lin conventionnel	74
52	Interventions sur les parcelles en froment conventionnel	75
53	Interventions sur les parcelles en froment conventionnel	76
54	Interventions sur les parcelles en froment conservation	77
55	Interventions sur les parcelles en froment conservation	78
56	Interventions sur les parcelles en lin conservation	79
57	Interventions sur les parcelles en lin conservation	80
58	Stocks de carbone en fonction de la méthode Wendts pour 4000 T/ha de sol et de la méthode IPCC pour les 30 premiers centimètres de sol	81
59	Stocks d'azote en fonction de la méthode Wendts pour 4000 T/ha de sol et de la méthode IPCC pour les 30 premiers centimètres de sol	81
60	Dispositif expérimental slake-test	82
61	Balances Hyprop	83
62	Résultat slake test parcelle 2 campagne B	84
63	Résultat slake test parcelle 2 campagne C	84
64	Résultat slake test parcelle 3 campagne B	85

65	Résultat slake test parcelle 3 campagne C	85
66	Résultat slake test parcelle 14 campagne B	86
67	Résultat slake test parcelle 14 campagne C	86
68	Résultat slake test parcelle 17 campagne B	87
69	Résultat slake test parcelle 17 campagne C	87
70	Résultat slake test parcelle 27 campagne B	88
71	Résultat slake test parcelle 27 campagne C	88
72	Résultat slake test parcelle 28 campagne B	89
73	Résultat slake test parcelle 28 campagne C	89
74	Résultat slake test parcelle 38 campagne B	90
75	Résultat slake test parcelle 38 campagne C	90
76	Résultat slake test parcelle 41 campagne B	91
77	Résultat slake test parcelle 41 campagne C	91
78	Résultat slake test parcelle 56 campagne B	92
79	Résultat slake test parcelle 56 campagne C	92
80	Résultat slake test parcelle 60 campagne B	93
81	Résultat slake test parcelle 60 campagne C	93
82	Résultat slake test parcelle 62 campagne B	94
83	Résultat slake test parcelle 62 campagne C	94
84	Résultat slake test parcelle 66 campagne B	95
85	Résultat slake test parcelle 66 campagne C	95
86	Résultats S _{lmax} en fonction de la campagne, du système et de la culture après transformations de variables : log	96
87	Résultats S _{l60} en fonction du système et de la culture après transformation de variables : racine carrée	96
88	Effet de la campagne sur S _{l60} en fonction du système et de la culture après transformation de variables : racine carrée	97
89	Résultats pour T ₂₅ en fonction du système et de la culture après transformation de variables : racine carrée	97
90	Influence de la campagne sur T ₂₅ après transformation : racine carrée	98
91	Résultats pour T ₅₀ en fonction du système et de la culture	98
92	Influence de la campagne sur T ₅₀	99
93	Résultats pour T ₇₅ en fonction du système et de la culture	99
94	Influence de la campagne sur T ₇₅	100

Liste des tableaux

1	Résultats des coefficients de corrélations entre les indicateurs	35
2	Résultats de l'anova pour les turricules de VDT	36
3	Densité de turricules observés [-] entre le 11/02/2022 et le 27/06/2022 en fonction du système de culture et de la culture en place	37
4	Résultats de l'ANOVA pour la teneur en carbone	39
5	Résultats de l'ANOVA pour le stock de carbone	40

6	Résultats de l'ANOVA de la teneur en azote	41
7	Résultats de l'ANOVA du stock d'azote	42
8	Résultats de l'ANOVA pour K_s	44
9	Résultats de l'ANOVA pour $\log(T_{\max})$ pour les campagne B et C	47
10	Résultats bruts pour $T_{\max}$ (sec)	48
11	Résultats de l'ANOVA pour W_{end}	50
12	Résultats de l'ANOVA pour racine carrée(SI_{30})	51
13	Résultats de l'ANOVA pour $\log(\alpha)$	57
14	Résultats de l'ANOVA pour θ_{PF}	60
15	Résultats de l'ANOVA pour RUE	62
16	Parcelles étudiées au sein de la plateforme SYCI	72
17	Résultats pour les cations échangeables, le pH et le rapport C/N	83

1 Introduction

1.1 Contexte

Les premières traces d'agriculture datent du néolithique, lorsque les hommes abandonnèrent progressivement leurs techniques de chasseurs-cueilleurs pour domestiquer les plantes et les animaux et ainsi créer ce qu'on appellera la culture et l'élevage. Ce système évoluera lentement durant des milliers d'années en suivant les avancées scientifiques de leur temps. On notera par exemple l'apparition du labour en 3000 avant Jésus Christ en Mésopotamie (Hillel, 1998). Cependant, quelques évolutions importantes ont permis d'augmenter encore et toujours les rendements avec, par exemple, la naissance de l'abattis-brûlis, le système de jachères ou l'évolution de l'outillage avec notamment l'apparition de la charrue associée à l'attelage pour utiliser la force du bétail.

La population ne cessant de croître, les rendements se doivent d'augmenter également. La révolution industrielle permettra la motorisation, allégeant ainsi la charge de travail et permettant la spécialisation de culture grâce à l'exportation et l'importation. En effet, l'import-export permet aux agriculteurs de se spécialiser dans la culture la plus adaptée à leur climat et leurs parcelles. Le surplus est exporté et les cultures plus rentables dans d'autres régions sont importées de ces dernières. Elle permet aussi l'apparition des premiers engrais chimiques pour augmenter la fertilité des terres.

Mais cette hausse constante de rendement n'est pas sans conséquence. En effet, le sol n'est pas une ressource inépuisable. Ce système de culture plus intensif à cause d'un travail du sol plus conséquent et un manque de couverture épuise le sol de ses nutriments et l'expose donc à la dégradation de la fertilité (dans le cas où aucun fertilisant chimique ne remplace ce qui a été prélevé) et à l'érosion. Malgré tout, la population continue de croître, il est donc indispensable de protéger nos sols pour permettre aux générations futures de se nourrir également. Il faut donc trouver un compromis entre rendements et préservation du sol.

C'est ainsi que naît la Food and Agriculture Organization (FAO) en 1945, une organisation de l'Organisation des Nations Unies (ONU) ayant pour but de se poser la question "comment nourrir la population en 2050 ?" (FAO, 2022). Selon la FAO, en 40 ans, le monde a perdu un tiers de ses terres arables. L'organisation introduit alors un nouveau système de culture basé cette fois-ci sur le principe de conservation et la régénération de nos sols, l'agriculture de conservation. Le but n'est plus cette fois d'augmenter le rendement au maximum mais de cultiver sans épuiser le sol. L'agriculture de conservation permet de prévenir la perte de terres arables mais également de régénérer les terres dégradées.

Un problème fait alors son apparition : la transition entre un système conventionnel et un système de conservation n'est pas aisée. En effet, en plus de devoir changer de pratiques culturales et donc d'apprendre une nouvelle façon de cultiver et d'investir dans de nouveaux engins, le sol étant résilient, il faut plusieurs années pour que la structure du sol puisse faire cette transition. Plusieurs raisons expliquent le temps de transition. D'abord au niveau de la structure. Elle diffère

d'un système à l'autre mais la transition ne se fait pas d'une culture à l'autre. La structure change au fil des cultures et des événements météorologiques. Tout cela nécessite du temps. De plus l'activité biologique du sol est également importante. Les populations de vers de terre (VDT) et de micro-organisme mettent aussi du temps à revenir. Les premières années sont donc moins riches en activité biologique.

2 État de l'art

2.1 Systèmes de cultures

2.1.1 Agriculture conventionnelle

L'utilisation des terres agricoles en Belgique et dans toute l'Europe est au coeur de nombreuses études actuelles concernant les effets de ces cultures sur le sol. L'agriculture conventionnelle est le système de culture qui s'est développé durant des siècles et qui a été adapté avec nos connaissances scientifiques. Le but de l'agriculture conventionnelle est de maximiser la production de la culture pour un minimum de surface ou de travail et donc un coût le plus bas possible. L'objectif est donc la production et la rentabilité sans prendre en compte le caractère durable de l'agriculture (Murua, et Laajimi, 1995). Ce système est principalement utilisé dans les pays industrialisés car il nécessite certaines technologies inaccessibles dans les pays en développement. En Belgique, 674 300 ha de cultures sont cultivés en agriculture conventionnelle, ce qui en fait le système le plus utilisé dans notre pays (FAO,2017).

Afin de maximiser les rendements, plusieurs techniques peuvent être utilisées. Premièrement, les agriculteurs vont vouloir favoriser des cultures qui se conservent dans le temps et qui sont faciles à transporter pour permettre l'exportation. Ensuite, certaines fermes conventionnelles privilégient la culture d'une seule variété. En évitant la diversification, l'objectif est de simplifier le travail et le rendre plus efficient. Cela permet d'acquérir des engins spécialisés et ainsi augmenter les surfaces d'exploitation. Il va de soi que lorsque l'on s'oriente vers une agriculture conventionnelle de ce genre, les apports de nutriments externes sont indispensables pour la croissance des plantes. Ces cultivateurs ont donc recours à des fertilisateurs et des engrais chimiques. Un des principes les plus importants de l'agriculture conventionnelle est le recours à la technique du labour. Le labour consiste à retourner le sol au moyen d'une charrue sur une profondeur variable allant jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres. Le labour offre certains avantages à la culture (Hobbs et al., 2008).

-Le labour est une opération de travail du sol qui permet d'alléger et ouvrir le sol. Cette action permet indirectement de créer un environnement propice pour la graine à une certaine profondeur pour lui offrir un sol humide et adapté à la germination. Un sol trop compact peut être un obstacle à la croissance de la culture rendant plus difficile la croissance des racines. Le fait d'alléger le sol via le labour contre cet effet.

-Le fait de retourner le sol permet de tuer les adventices qui auraient pu pousser pendant la

culture précédente ou pendant l'inter-culture en les enfouissant dans le sol. Cela permet à la graine de pousser sans compétition durant les premières étapes de la culture et donc d'améliorer le rendement et d'éviter les herbicides.

-Les résidus de culture peuvent être enfouis dans le sol. Cela permet de faciliter le semis car ces résidus peuvent créer des problèmes lors du semis en créant des bourrages dans les engins.

-Il permet d'incorporer les amendements dans le sol. Certains nutriments peuvent être perdus dans l'atmosphère par volatilisation s'ils ne sont pas enfouis dans le sol. L'enfouissement de ces amendements permet donc de limiter les doses apportées sur le champ.

-Il peut également avoir un rôle dans la prévention des maladies et les nuisances de certains insectes. En détruisant les habitats des insectes et en créant un environnement moins propice à la propagation des maladies (notamment par l'enfouissement des résidus de culture) (Yarham, 1975).

Malgré tous ces avantages, l'Aconv (Agriculture conventionnelle) est aujourd'hui remise en question à cause de son caractère intensif qui épuise les sols et donc non durable (FAO, 2016). En effet, l'AConv n'a pas que des avantages.

Premièrement, les avantages du labour ont un coût important sur la qualité et la conservation de nos sols qui remet en question sa durabilité. En effet, le sol est connu pour remplir de nombreuses fonctions écosystémiques en plus de nous nourrir. Une de ces fonctions principales est que le sol constitue un habitat pour de nombreuses espèces. On qualifie le sol de vivant. Parmi ces espèces, l'une des plus importantes est sans aucun doute le VDT. Ces animaux peu appréciés du grand public sont, au contraire, adorés des agriculteurs. Ils permettent de retourner le sol en offrant un service similaire au labour mais non agressif et naturel. En retournant la terre pour se nourrir, ils recyclent les nutriments du sol et permettent une meilleure infiltration grâce à leurs galeries. Ils peuvent également améliorer la structure du sol en mélangeant la matière organique avec le sol (Swaby, 1950). Ce-faisant, ils améliorent la structure du sol et participent à la diminution de l'érosion (Darwin, 1892). Le problème est que le labour induit une diminution de la quantité de VDT dans le sol (Briones Schmidt, 2017). Cette pratique peut directement tuer ou blesser les VDT par action mécanique en les découpant ou les écrasant avec la charrue. En retournant le sol, il les expose également à la dessiccation et aux prédateurs. De plus, leurs tunnels sont détruits et leur nourriture enfouie en profondeurs (Briones et Schmidt, 2017).

En outre, le labour détruit la structure du sol en diminuant la quantité de matière organique dans les horizons de surface. La MO (matière organique) peut être conservée et protégée au sein d'agrégats. Le labour détruit ces agrégats ce qui expose la MO à la minéralisation, diminuant ainsi la teneur en MO du champ. La MO contribue également à la formation de ces agrégats, notamment via l'activité microbienne liée à la dégradation de la MO qui est un des processus les plus importants pour la formation de micro-agrégats (Williams & Pettecrew, 2009). Ces agré-

gats offrent une meilleure résistance à l'érosion. En effet, on peut discerner différentes sortes d'agrégats : les macro-agrégats et les micro-agrégats. Les macro-agrégats, plus grands et plus lourds ne peuvent pas être emportés par érosion hydrique ou éolienne. Pour être emportés, ils doivent se désagréger en micro-agrégats, plus légers ou en particules individuelles. Le détachement de ces particules demande une plus grande quantité d'énergie que le déplacement en lui-même, protégeant ainsi l'exportation de matière en dehors du champ par érosion (Vršič, 2011 ; Williams & Peticrew, 2009). Si les particules emportées par l'eau restent sur le champ elle peuvent également colmater les pores et participer à la formation d'une croûte de battance.

Mais le labour n'est pas la seule technique remise en question pour l'agriculture conventionnelle. Le manque de couverture est également problématique. Un manque de couverture expose un sol nu durant certaines périodes (après labour, inters-cultures,...). Un sol nu sera plus exposé au vent car les plantes ne sont pas là pour couper ce vent. Le sol sera donc plus exposé à l'érosion éolienne. De plus, les agrégats sont directement exposés aux gouttes de pluies et donc à l'effet "splash" (figure 1). De nouveau, l'absence de plante empêche ces dernières de protéger le sol. Les feuilles et les tiges des plantes servent de parapluie qui vont capter les gouttes d'eau. L'effet splash a pour conséquence de détruire les agrégats et exposer ainsi le sol à une plus grande susceptibilité à l'érosion hydrique et éolienne.

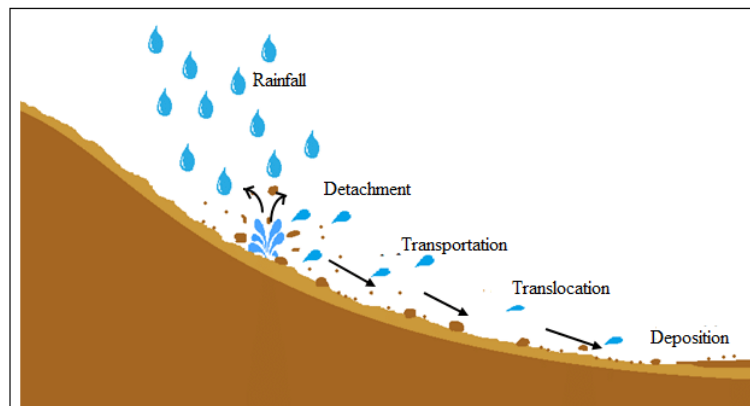


FIGURE 1 – Illustration de l'effet splash (Zulkifli et al., 2017)

En effet, l'effet splash est lié à l'énergie cinétique de la goutte au moment de l'impact avec le sol. Elle est dépendante de sa masse et de sa vitesse (Fu et al., 2017). Cette énergie contenue dans la goutte peut être absorbée par les plantes, grâce à leurs tiges ou leurs feuilles, avant de toucher le sol. L'effet "splash" est donc dissipé en même temps que cette énergie. Cet effet a également pour conséquence de colmater les pores du sol pour constituer ce que l'on appelle une croûte de battance. Les sédiments détachés des agrégats par la pluie sont plus petits et s'infiltreront dans les pores et vont boucher ces derniers créant ainsi une couche imperméable qui va diminuer l'infiltration et donc augmenter l'érosion hydrique (Ma et al., 2022).

De plus, en faisant obstacle au ruissellement, la couverture végétale a également pour rôle de ralentir les écoulements en faisant obstacle à l'eau ce qui la fait changer de trajectoire et perdre de l'énergie. La force de cisaillement qui permet de décrocher le sol et d'emporter les sédiments est donc diminuée. Les plantes peuvent donc absorber l'énergie des gouttes de pluie et du ruissellement et donc diminuer l'érosion.

Le dernier aspect négatif de l'Aconv est la spécialisation de cultures c'est-à-dire cultiver une faible diversité de culture, voire une seule, pour être plus spécifique en équipements et connaissances pour le type de culture choisi. Le but, en évitant de faire des rotations, est de diminuer la charge de travail de l'agriculteur et d'investir dans du matériel plus spécifique. Mais en réalisant ce genre de cultures, beaucoup d'avantages sont perdus. Ces inconvénients sont notamment une perte de fertilité forçant les agriculteurs à apporter des fertilisants sur leurs sols pour permettre la croissance de la culture. En plus d'épuiser le sol, le fait de planter chaque année la même culture sur la même parcelle permet le pullulement de ravageurs, ce qui pousse les agriculteurs à augmenter leurs doses d'herbicides et de pesticides. Cela a une influence sur la qualité des récoltes et sur l'environnement. Plus de produits épandus sur le champ signifie plus de produits dans les nappes et les rivières, augmentant ainsi la pollution de l'eau.



FIGURE 2 – Effets du "Dust Bowl" Source :<https://www.life.com/>

Les effets délétères de l'Aconv ont pu être observés dans les années 1930 durant l'évènement que l'on appellera le "Dust Bowl", ces effets sont visibles à la figure 2. Il s'agit d'un désastre durant lequel des milliers d'hectares de terre cultivées aux États-Unis ont été balayées par le vent, causant une érosion éolienne sans précédent. Cette mésaventure a été causée par l'utilisation abusive du labour qui a dégradé les terres arables en exposant beaucoup trop les sols. Le "Dust Bowl" a servi d'alarme à la communauté scientifique qui a commencé à se poser des questions sur une agriculture plus durable avant la création de la FAO. Les chercheurs ont commencé à chercher des solutions pour cultiver le sol tout en le régénérant et le conservant. C'est de cette réflexion qu'est née l'AC.

2.1.2 Agriculture de conservation

L'agriculture de conservation, comme son nom l'indique, est un système de culture dont le but est de préserver les propriétés du sol. L'objectif est donc de cultiver sans épuiser le sol. En effet, ce dernier est une ressource limitée qu'il faut préserver car il est indispensable pour notre

société. L'AC se base sur 3 principes (FAO, 2016) :

- Un travail du sol minimal. En AC, le sol n'est pas labouré. D'autres techniques peuvent être utilisées pour préparer le sol au semis. Le semis en AC se fait généralement par semis direct (FAO, 2016).

L'équipement en semis direct va enfouir la graine en pénétrant la surface du sol et en déposant la graine dans cette fente ainsi créée. En plus de contrer les inconvénients du labour cités précédemment, le semis direct offre d'autres avantages. En effet, le but de ce semis étant de conserver une certaine couverture sur le sol, il offre une résistance contre l'érosion en évitant d'avoir un sol nu. Cette pratique est donc directement en lien avec la couverture permanente du sol. De plus l'absence de labour permet à la pédofaune de prospérer, la destruction de leur habitat n'étant plus une menace (Briones & Schmidt, 2017). En réalité, cet aspect de l'AC est assez controversé. Bien que la définition de la FAO parle de semis direct, certaines études considèrent que certaines pratiques diminuant le travail du sol sans forcément avoir recours au semis direct sont tout de même considérées comme des cultures en AC (Giller et al., 2015).



FIGURE 3 – Exemple de semis direct (<https://www.paysan-breton.fr/>)

- Une couverture permanente du sol. La couverture du sol peut prendre plusieurs formes. Simplement laisser les résidus de la récolte précédente ou bien planter une culture de couverture qui aura pour but de protéger le sol pendant les périodes de jachères, mobiliser et recycler les nutriments et améliorer la structure du sol en décompactant le sol (Blanco-Canqui et al., 2012). La culture de couverture doit être choisie en fonction de la plantation qui suivra cette couverture. Le but de cette décision est d'offrir une certaine symbiose entre la culture de couverture et celle qui sera semée ensuite. Si cette symbiose est bien maîtrisée, la couverture empêchera la croissance d'adventices et stimulera la croissance de la culture qui sera semée dans ce couvert.

Un autre rôle de la couverture du sol est d'empêcher les nutriments de se faire lixivier par les pluies durant l'inter-culture. En effet, les racines des couverts végétaux permettront d'immobiliser les nutriments présents dans le champ les empêchant ainsi d'être perdus dans la nappe phréatique. Cela permet également de prévenir la pollution des nappes phréatiques.

Une couverture peut se faire par une seule espèce ou bien un mélange de différentes espèces qui agiront en symbiose pour améliorer les bénéfices du couvert.

Il est communément accepté qu'une bonne couverture est une couverture qui pousse vite pour permettre de protéger le sol le plus vite, le plus efficacement possible et qui est également facile à détruire dans le cas où la couverture pourrait avoir une certaine concurrence avec le semis suivant. De plus, le couvert permet également d'améliorer l'activité microbienne (Koudahe et al., 2022). Le couvert permet également de protéger le sol de l'exposition au soleil et crée une couche d'isolation. Cela permet de réduire la température du sol et donc conserver une certaine humidité sous le couvert et permettre donc d'avoir un sol plus humide (Salem, 2015).

-La diversité des espèces. Toutes les espèces de cultures ont des besoins différents. Certaines plantes auront besoin de plus d'azote mais moins de potassium par exemple. L'objectif est donc de faire des rotations avec des plantes qui sont complémentaires dans le but de permettre aux micro-organismes du sol de régénérer les stocks de nutriments qui auraient été réduits durant la culture précédente. Cette technique permet donc de limiter les amendements à apporter sur le champ. Un autre avantage est le fait que les plantes ont des profondeurs racinaires différentes. En alternant des cultures avec des racines plus ou moins profondes, on permet d'alimenter le sol en matière organique sur toutes les profondeurs du sol et ainsi permettre aux micro-organismes, dont l'activité fournit aux plantes des nutriments essentiels à leur croissance, de se nourrir. Cela permet également d'aérer le sol. Une rotation variée de cultures permet aussi de prévenir les maladies et les problèmes dus aux ravageurs. La rotation de cultures est donc à associer avec la culture permanente du sol et donc les cultures de couverture. La différence de longueurs racinaires permet également un meilleur réseau d'infiltration dans le sol en créant ainsi des macropores (Hobbs et al., 2008).

En réalité certains des aspects de l'agriculture de conservation comme la rotation de culture ou la mise en place de cultures de couverture peuvent également prendre place en Aconv. Le terme d'AC ne sera utilisé que pour les parcelles qui remplissent tous les critères imposés par la FAO.

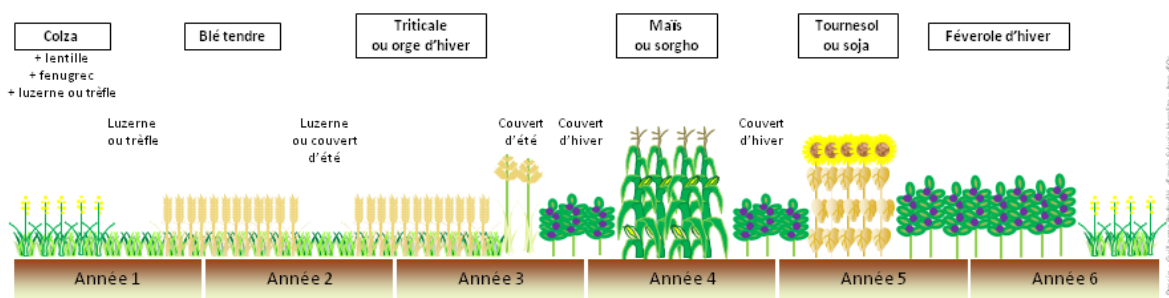


FIGURE 4 – Exemple de rotation de cultures (<https://agriculture-de-conservation.com/>)

2.1.3 Transition de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture de conservation

Une certaine transition de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture de conservation est en cours dans le but de protéger et conserver nos sols. Mais cette transition est loin de faire l'unanimité. En Belgique, en 2017, 674 300 ha de cultures sont cultivés en agriculture conventionnelle contre 92 000 ha en agriculture de conservation (FAO, 2017). L'Aconv est largement plus utilisée que l'AC. Ces chiffres montrent que l'AC présente également certains inconvénients majeurs. L'une des principales raisons de cette différence est la difficulté de la transition entre une Aconv et une AC. En effet, l'Aconv a été, pendant des milliers d'années, le système le plus rentable. L'AC étant une pratique relativement opposée, il est évident que beaucoup de bouleversements doivent être faits tant au niveau du travail de l'agriculteur que dans l'investissement des engins nécessaires. Il est intéressant d'observer que ces techniques de conservation se répandent plus vite dans les pays qui ne profitent pas de subventions. Il est donc évident qu'une certaine transition doit également avoir lieu au niveau politique. De plus, une fois

que l'agriculteur a décidé d'opter pour cette transition plus durable, les changements ne sont pas instantanés. Le sol étant résilient, il faut des années pour que ces changements s'opèrent dans la structure du sol mais également pour que les populations constituant la pédofaune réinvestissent le champ. Cette transition peut prendre entre 5 et 7 ans (Hobbs et al., 2008). Toutes ces raisons couplées au fait que l'AC est plus énergivore et chronophage poussent les agriculteurs à rester *conservateurs* en refusant cette transition. Les fermiers ont donc besoin d'un coup de pouce pour engager cette transition.

La transition entre l'Aconv et l'AC consiste à ce que la parcelle obtienne les avantages de l'AC au fur et à mesure des années. Durant les premières années, les avantages de l'AC ne sont pas aussi présents qu'après cette période de transition. Étant donné que les avantages de l'Aconv ne sont plus présents non plus, il en résulte des premières années avec une moins bonne structure et donc de moins bons rendements. L'une des contraintes principales au début de la transition est la compaction du sol due à l'absence de labour. Cette compaction a pour effet de diminuer l'infiltration, et rendre la pénétration des racines plus difficiles (Chen et al., 2005).

Au fur et à mesure de la transition, les avantages de l'AC commencent à être plus efficaces ce qui fait que le champ aura des agrégats de plus en plus stables et une plus grande concentration en matière organique associée à cette stabilité (Six et al., 2000a). De plus la stabilité des agrégats permet également de lutter contre la compaction (Chen et al., 2005). Plus la transition est ancienne, plus l'infiltration sera grande, ce qui causera donc moins d'érosion (Salem, 2015). Grâce aux résidus de cultures et aux cultures de couverture, le sol est également plus humide et moins sujet aux gradients de température car le couvert permet une isolation et une protection contre l'évaporation. Malgré tout, l'AC a également un sol ayant une plus grande densité même après cette transition, ce qui résulte une plus grande difficulté pour les racines de pousser (Afzalnia, 2014). Mais cet effet peut être contré par la macroporosité du sol plus importante en AC, notamment grâce aux VDT. Concernant la porosité du sol, la macroporosité du sol en AC après quelques années de transition est équivalente à celle de l'Aconv et la dépasse ensuite (VandenBygaart et al., 1999). En plus de la plus grande activité des VDT, le labour bien qu'il allège le sol, détruit ces pores. Les pores présents en AC créés par les VDT ou les racines peuvent quant à eux rester plusieurs années. Ce qui explique également pourquoi la porosité augmente au fil des années en AC (Bruussaard et al., 1994).

2.2 Indicateurs de qualité du sol

2.2.1 Indicateurs biologiques

Comme dit précédemment, le sol est vivant. Parmi les êtres qui composent le sol, nous retrouvons les micro-organismes permettant l'assimilation de certains nutriments indispensables pour les plantes et participant ainsi à la chimie du sol. Nous retrouvons également des animaux ayant une grande importance pour la structure physique du sol comme les vers de terre. Un sol en bonne santé peut contenir jusqu'à un milliard de micro-organismes par gramme et 4 tonnes de VDT par hectare (Bourguignon et Bourguignon, 2015). Cela indique l'importance de la vie dans nos sols. Darwin a dit dans son dernier livre que la charrue est l'une

des plus vieilles et précieuses inventions de l'homme, mais longtemps avant qu'elle existe, le sol était déjà labouré régulièrement par les vers de terre et il l'est toujours. Les VDT sont parmi les organismes les plus importants du sol. Ils jouent un rôle sur la porosité du sol permettant l'infiltration et l'aération de ce dernier. Ils interviennent également dans le cycle des nutriments et dans la croissance des plantes. Or, comme dit précédemment, l'AC détruit les colonies de VDT et perd donc cette fonction écosystémique qu'ils remplissent. Il est donc logique de retrouver de plus grandes quantités de ces VDT en AC (Boström, 1995).

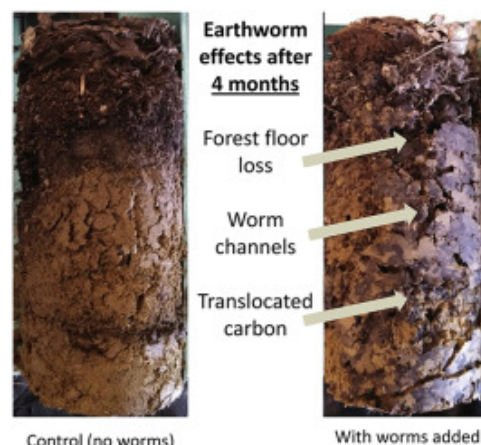


FIGURE 5 – Effet des VDT sur le sol (Knowles et al., 2016)

En plus de perturber l'habitat des VDT, le labour peut avoir lieu durant une période d'inactivité. Durant cette période, les VDT entrent dans un état de dormance durant lequel ils s'enfouissent plus en profondeur dans le sol et deviennent inactifs. Si le labour a lieu durant cette période, les VDT sont incapables de replonger dans le sol, ce qui les expose aux prédateurs, diminuant drastiquement leurs chances de survie. Bien que l'AC n'ait pas recours au labour, le déchaumage, lui, peut s'effectuer. Ce travail superficiel du sol est moins agressif que le labour mais il peut également nuire aux populations de VDT de la même façon que le labour mais sur une plus petite profondeur. Ce qui fait que le déchaumage sera également nocif pour les populations de VDT mais moins que le labour.

De plus, le non labour n'est pas le seul aspect permettant la prospérité des VDT. En effet, le fait de laisser les résidus sur le champ après récolte offre une protection au sol contre l'évaporation. Un milieu plus humide étant plus propice pour les VDT, cela affecte leur survie. En plus de conserver l'humidité, les restes de cultures constituent une source de nourriture rendant le milieu encore plus hospitalier pour ces animaux (Curry, 2004). Évidemment, les VDT ne sont pas les seuls habitants du sol, il existe de nombreuses espèces d'insectes, de champignons et de bactéries qui agissent également sur le sol à différents niveaux. De plus certains remplissent des rôles que les VDT ne remplissent pas eux mêmes. Certains organismes réduisent les invasions des nuisibles. Les carabes par exemple s'attaquent aux limaces, les empêchant de se nourrir de nos cultures. Les interactions entre ces différents organismes sont également importantes.

2.2.2 Indicateurs chimiques

Les 2 éléments les plus importants dans le sol pour la croissance de la plante et la survie des organismes vivants dans le sol sont le carbone et l'azote. L'azote étant un élément limitant pour la production végétale, il faut qu'il soit présent en suffisance dans le sol pour ne pas épuiser les réserves. Pour libérer suffisamment d'azote, il faut un rapport C/N optimal pour l'activité microbienne (compris entre 15 et 30). Si ce rapport est maintenu dans cette gamme, les micro-organismes du sol permettront la décomposition de l'humus et ainsi la libération de l'azote nécessaire à la croissance de la plante.

Pour comparer les effets de l'AC et de l'Aconv, il faut comparer les éléments chimiques à différents niveaux. Pour le carbone, la communauté scientifique semble globalement s'accorder sur le fait que les sols en AC permettent de stocker plus de carbone que l'Aconv (Powlson et al., 2011a).

Pour le carbone, le labour ou le semis direct ne semble pas avoir une grande importance. On observera un gradient en fonction de la profondeur du sol avec un horizon de surface plus riche en carbone qu'en profondeur en AC. Alors que cette répartition semble plus homogène en Aconv. Néanmoins le stock total semble ne pas différer avec ou sans le labour.

Par contre un des principes de l'AC semble avoir son importance, les cultures de couverture. En effet le fait de garder une culture permanente sur le sol aura différents effets sur le stock de carbone. Le fait de laisser les résidus de culture sur le champs permet la restitution de ce carbone organique.

Concernant l'azote, tout comme pour le carbone, on observe un gradient de la teneur en fonction de la profondeur pour le semis direct. Malgré tout le stock reste globalement le même entre le labour et le non labour. La différence de stock mesurée vient donc, tout comme pour le carbone, de la restitution de résidus de cultures et de la présence d'une culture permanente. Cela peut être dû à différents processus.

Premièrement, les racines des cultures de couverture vont permettre de capter l'azote en diminuant ainsi la perte par lixiviation de ce dernier (Blanco-Canqui et al., 2012). De plus, tout comme pour le carbone, la restitution des résidus des cultures différentes permet un apport d'azote plus ou moins conséquent en fonction de la culture restituée. La perte gazeuse ammoniacale due à la décomposition des résidus qui ne sont pas enfouis dans le sol induit néanmoins une légère perte en azote contenue dans les résidus de culture (Webb et al., 2010). Tous ces effets associés ont pour conséquence d'augmenter globalement le stock d'azote en AC. (Constantin et al., 2005)

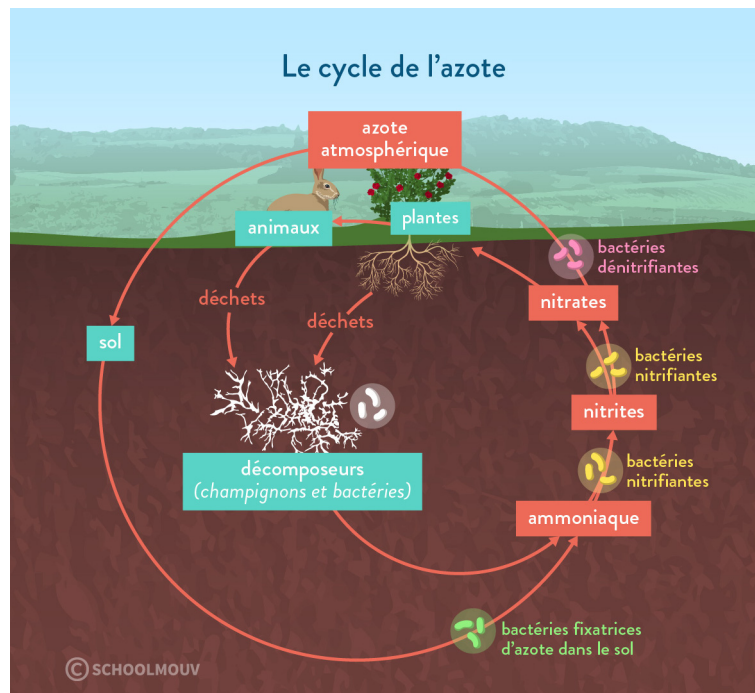


FIGURE 6 – Illustration du cycle de l'azote dans le sol (<https://www.schoolmouv.fr/>)

La figure 6 représente le cycle de l'azote avec ses différentes étapes. Premièrement, l'azote peut être capté de 2 façons différentes. Soit directement depuis l'atmosphère grâce à des bactéries fixatrices d'azote qui vont donc transformer l'azote atmosphérique (N_2) en ammoniaque (NH_3) (Herridge et al., 2008). Soit par décomposition de la matière organique par les VDT, les bactéries ou encore les champignons. Ces derniers vont transformer l'azote organique en ammoniaque. Ensuite cet ammoniaque sera transformé en nitrite puis en nitrate toujours par des bactéries par nitrification (Webb et al., 2010). Ce nitrate pourra enfin être assimilé par la plante. Ce cycle montre l'importance de la vie dans le sol.

Même si on observe pas de différence importante entre labour et semis direct, il est important de noter que les agrégats qui sont plus présents en AC, étant donné que le labour détruit les agrégats en Aconv, permettent une protection physique de la matière organique au sein de ces derniers. Ce qui permet également de limiter les pertes en azote et en carbone organique (Balesdent et al., 2000).

Bien que ce ne soit pas le sujet de cette étude, il est important de noter que le carbone est un élément participant fortement au dérèglement climatique étant donné qu'il peut agir comme gaz à effet de serre sous forme de méthane (CH_4) ou de dioxyde de carbone (CO_2). Le fait de stocker plus de ces éléments dans nos champs offrirait une solution au dérèglement climatique.

2.2.3 Indicateurs physiques

Les caractéristiques physiques d'un sol ont un rôle très important pour permettre aux cultures de pousser dans les meilleures conditions possibles. Tout d'abord, le sol sert de support à la plante, ce qui signifie que ce dernier doit être suffisamment meuble pour permettre aux racines de se développer. La densité du sol est importante pour d'autres raisons. En effet, un sol meuble et donc moins compact permettra une bonne croissance à la plante. Mais un sol trop meuble peut

signifier l'absence de cohésion et de structure dans ce sol et ainsi être plus facilement exposé à l'érosion hydrique et éolienne. S'il est trop compact, par contre, en plus de rendre la croissance moins facile pour la plante, le sol sera plus exposé au ruissellement. En effet un sol trop compact possédera moins de pores et aura donc une infiltration plus faible, causant des ruissellements, ce qui peut également mener à l'érosion hydrique. Cette dernière remarque souligne l'importance des pores dans la structure du sol. Ces derniers permettent des connexions dans le sol permettant l'infiltration de l'eau. Ces pores sont principalement formés par les organismes vivants dans le sol comme les VDT ou encore par les racines des plantes. Ces différents aspects de la structure du sol seront détaillés dans les rubriques suivantes.

2.2.3.1 Infiltration Comme dit précédemment, l'infiltration est un des aspects majeurs du sol. Une bonne infiltration limite l'érosion et constitue une lutte contre les inondations en diminuant les volumes d'eau ruisselés. L'infiltration est un processus qui permet la migration de l'eau depuis la surface du sol jusqu'à la nappe phréatique sous-jacente via les pores. Les résultats concernant l'infiltration en agriculture de conservation diffèrent d'une étude à l'autre principalement en fonction de la période durant laquelle l'AC est mise en place. En effet, la transition existant entre l'Aconv et l'AC induit une variabilité dans les études qui sont faites entre des parcelles en AC depuis longtemps et donc bien établies ou des parcelles qui sont passées en AC depuis peu et qui sont donc en pleine période de transition. La figure 7 représente les différents taux d'infiltration selon l'étude de Basche et Delonge. Leurs résultats démontrent aucune différence significative entre le labour et le non labour (Basche et Delonge, 2019).

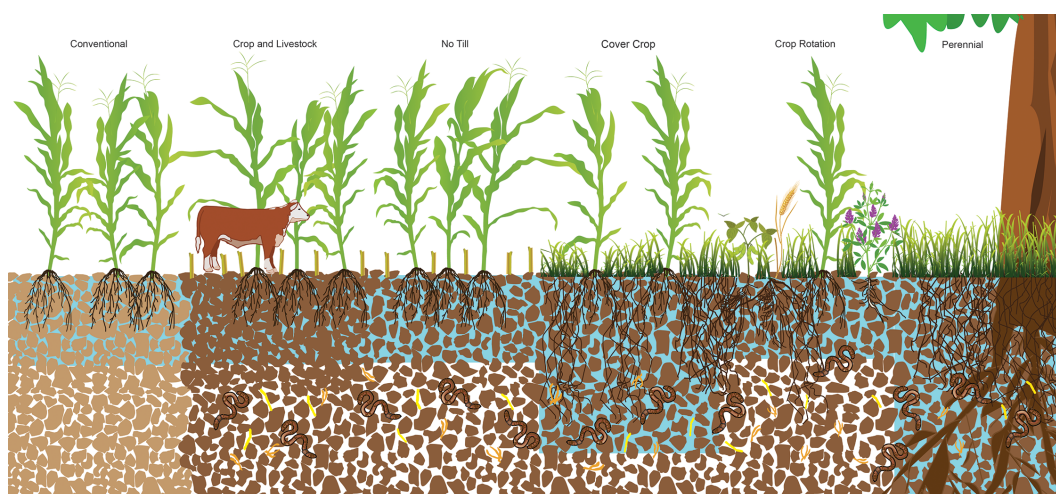


FIGURE 7 – Illustration du taux d'infiltration en fonction du système de culture (Basche et Delonge, 2019)

Basche et Delonge observent par contre une différence au niveau de la culture de couverture qui, elle, permet une meilleure infiltration. Selon d'autres études (Afzalnia, 2014 ; Peigné et al., 2009 ; Bruussaard et al., 1994 ; Bescansa, 2006), le non labour permet une meilleure infiltration après une période d'adaptation. Plusieurs effets peuvent expliquer ces différences en fonction du temps (Sartori et al., 2022). D'abord, l'un des éléments les plus importants pour l'infiltration est le compactage du sol dû aux passages répétés des engins sur le champ. Cette compaction est plus importante en conventionnel car il y a, généralement, plus de passage et le labour induit également une semelle de labour. Cette semelle est une couche compacte en dessous de la

profondeur à laquelle le champ est labouré diminuant ainsi l'infiltration. De plus la pédofaune, permettant une meilleure porosité grâce à leur activité, plus présente en AC qu'en Aconv, ne réapparaît pas non plus d'une saison à une autre ; il faut une certaine période d'adaptation. Ces raisons expliquent les différences présentes d'une étude à l'autre.

Selon d'autres études (Afzalnia, 2014 ; Peigné et al., 2009 ; Bruussaard et al., 1994 ; Bescansa, 2006) , le labour a son importance dans l'infiltration du sol. La compaction des sols en AC en début de transition, à cause du non labour, induit une baisse de la porosité du sol diminuant ainsi l'infiltration (Afzalnia, 2014). Mais cette porosité s'améliore au fur et à mesure de la transition, notamment via l'activité des VDT permettant la création de macropores (Afzalnia, 2014). L'activité des VDT en début de transition n'a pas assez d'influence pour contrer l'impact de la compaction (Peigné et al., 2009). De plus, les pores créés par les VDT et les racines sont conservés d'une année à l'autre étant donné que l'absence de labour leur permet de rester en place. Il est donc logique que cette porosité augmente avec les années (Bruussaard et al., 1994). L'influence de l'AC sur l'infiltration dépend donc du stade de la transition dans laquelle se trouve le champ. L'un des principaux rôles de l'infiltration est d'alimenter le sol en eau pour ensuite être utilisé pour les cultures (Bescansa, 2006). L'eau est un élément essentiel à la croissance des plantes. Une meilleure infiltration permettra donc un meilleur stock d'eau initial et donc un sol plus humide. Cela est directement en lien avec les courbes de rétention et l'eau disponible.

2.2.3.2 Stabilité du sol Cet indicateur a pour objectif de mesurer la cohésion du sol. Une bonne cohésion est importante pour résister à l'érosion. Plusieurs mécanismes peuvent affecter la cohésion du sol. Premièrement, un sol plus compact résistera mieux à la dégradation car la compacité augmente la cohésion du sol. Le labour ayant pour objectif de décompacter le sol, un champ en semis direct résistera mieux qu'un sol labouré. En plus de décompacter le sol, le labour induira une rupture de liens entre les racines et le sol. Ces liens permettent une résistance supplémentaire (Balesdents et al., 2000).

Sur le champ, lorsque le sol est exposé à la sécheresse puis rapidement humidifié soit par la pluie, soit par irrigation, les éléments instables vont se désagréger et former des petits agrégats ou particules. Lorsque le sol est humidifié, des bulles d'air sont piégées au sein des pores ce qui augmente la pression au sein de ces derniers et peut faire perdre leur stabilité aux agrégats. Les particules ainsi détachées des agrégats peuvent boucher les pores en créant une croûte. Cette croûte va diminuer l'infiltration et donc avoir une influence sur la capacité du champs à stocker de l'eau pour constituer la réserve utile en eau (RU). Ce processus n'est possible que en surface du sol car les couches plus profondes ne sont pas touchées par des sécheresses suivies d'une rapide réhumidification (Tisdall et al., 1982).



FIGURE 8 – illustration de l'effet de compaction (<https://www.cultivar.fr>)

Le fait d'avoir une culture permanente et un non labour permettant les liens organo-minéraux ainsi qu'une meilleure activité biologique sont toutes des raisons expliquant que la cohésion d'un sol en AC est meilleure qu'en Aconv. Malgré tout, le passage fréquent des engins induisent une certaine compaction au sol, principalement en Aconv, car le travail du sol nécessite plus de passage. La compaction du sol est généralement mauvaise pour ce dernier. si le sol est trop compact (difficulté de croissance, faible infiltration,...). En AC, sur le long terme, la capacité des racines à pénétrer le sol dépend de la persistance des pores des années précédentes et donc de la capacité du sol à résister à la compaction (Bruussaard et al., 1994). Dans ce cas-ci l'Aconv aura une bonne résistance à la désagrégation dans les traces de roulages. Cet indicateur est donc à analyser avec précaution car la compaction n'est pas forcément un allié sur le champ au contraire. Bien qu'une partie de la cohésion soit liée à la compaction, il ne s'agit pas de la même chose. La compaction sera directement liée à la densité du sol. Un sol plus compact sera plus dense alors que la cohésion peut être liée à d'autres facteurs tels que la présence de racines. La compaction est un plus gros problème en AC qu'en Aconv, car en Aconv, le problème peut être corrigé par le labour, ce qui n'est pas le cas de l'AC qui peut subir les dégâts liés à la compaction sur du long terme.

En plus de la compaction du sol, certains éléments participent à la cohésion du sol. Ces éléments peuvent être séparés en trois parties en fonction du temps de résidence dans le sol. Les éléments temporaires, les transitoires et les persistants (Tisdal et al., 1982). Les persistants sont principalement composés d'humus associé à des ions métalliques. la teneur en carbone étant plus élevée en AC, on s'attend à ce que ces liants soient plus présents en AC.

Les liants temporaires sont principalement composés de racines et d'hyphes et peuvent persister dans le sol pendant plusieurs mois voir même années. Ils vont agir sur les macro-agrégats. Les racines agissent sur l'alignement des feuillets d'argiles qui sont mis de manière parallèles. Ce mécanisme est dû à la croissance des racines qui réarrangent les argiles mais également au fait que la plante en absorbant de l'eau, assèche la zone proche de cette dernière permettant également le réalignement des feuillets (Allison, 1968). De plus, les racines peuvent également influencer les éléments transitoires, qui seront présentés après, en fournissant de la matière organique et un support à la population microbienne (Clarke, 1967). Elles peuvent également fournir de la nourriture aux animaux tels que les vers de terre dont l'activité permet également d'augmenter la cohésion du sol en mélangeant le sol avec la matière organique humifiée (Swaby, 1950).

Les hyphes ont un rôle moins important que les racines (Tisdal et al., 1982) mais leur associations aux racines permettent d'améliorer les résultats des racines. Les hyphes permettent donc également de stabiliser les macro-agrégats avec les racines. Un meilleur réseau racinaire permettra donc de stabiliser les macro-agrégats. L'absence de labour en AC permet de conserver les hyphes et les racines des cultures précédentes ce qui permet d'avoir un meilleur réseau et donc une meilleure stabilité qu'en Aconv ou ces liens sont détruits par le labour.

Finalement, les éléments transitoires sont principalement composés de matières organiques

fraîches qui a été décomposé par des micro-organismes. Le groupe le plus important est celui des polysaccharides. Ces particules vont permettre de stabiliser le sol en agissant sur les micro-agrégats. Les micro-agrégats sont formés lorsque les macro-agrégats sont détruits formant donc de plus petits agrégats (Tisdal et al., 1982). L'activité des micro-organismes et donc des polysaccharides est dépendante de la concentration en MO. Cette MO est plus présente en AC notamment grâce aux résidus de cultures qui permettent donc l'activité des micro-organismes mais également des VDT.

Il est également intéressant de voir les éléments qui consistent à la fabrication de ces agrégats. La stabilité des agrégats et la formation des agrégats sont deux processus liés mais différents. Les facteurs principaux influençant la formation d'agrégats sont la taille des particules du sol et leur orientation. Les processus influençant la formation de ces agrégats sont les successions de gels et dégels, les changements de températures ou encore la croissance des plantes et l'activité des VDT (Allison, 1968).

2.2.3.3 Rétention d'eau La rétention en eau d'un sol est cruciale pour la culture de la plante. On qualifie de RUE la quantité d'eau contenue entre la capacité au champ (CC) et le point de flétrissement permanent (PF). La CC correspond à la teneur en eau volumique d'un sol ayant été saturé en eau puis réessuyé pendant 48h. Cela correspond à un pF de 2 à 2.5. Le PF quant à lui représente la teneur en eau volumique retenue dans les pores pour laquelle la plante subit des dommages dus aux flétrissements considérés comme irréversibles. Ce point se trouve à pF 4.2. Cette capacité de rétention de l'eau est directement fonction de la structure et de la texture du sol.

La porosité joue un grand rôle dans la rétention de l'eau. Les plus grands pores sont appelés macro-pores. Ils constituent les pores qui vont se vider en premiers et sont généralement formés par les racines ou les VDT. La plupart d'entre eux se vident trop vite et ne participent pas à la rétention de l'eau. Malgré tout certains peuvent y contribuer en fonction de la tortuosité du sol. Si c'est le cas, ils contribuent principalement à la CC. Les micro-pores sont les plus petits pores contenus dans le sol. Au contraire des macro-pores, ce sont les plus difficiles à vider. L'eau utile dans le sol est mobilisée par capillarité dans les pores grâce à la tension superficielle de l'eau.

Mais toute l'eau présente dans le sol n'est pas mobile. Une fois les pores vidés et en général, le PFP dépassé, il restera de l'eau dans le sol sous forme d'eau adsorbée indisponible pour la plante.

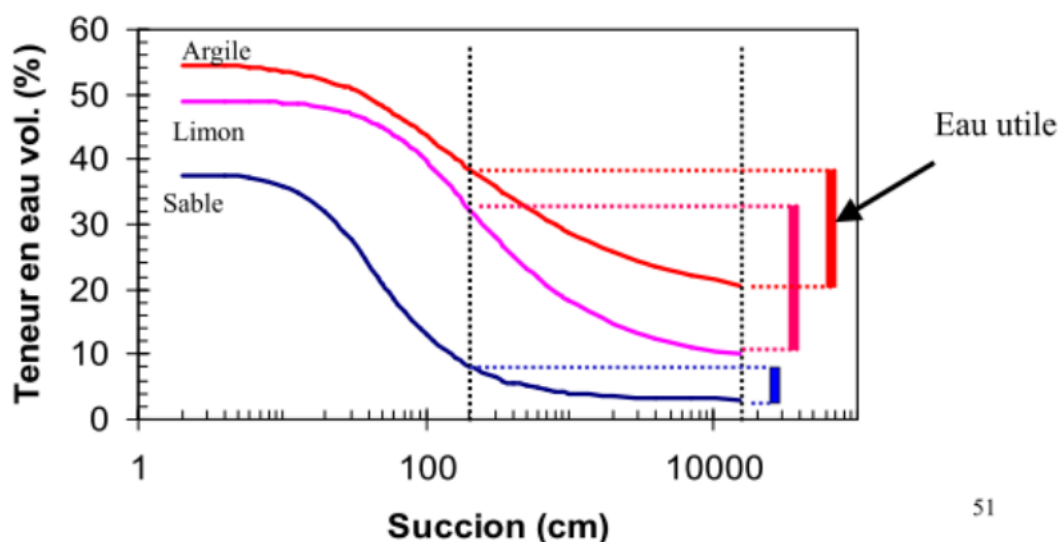


FIGURE 9 – Exemple de courbe de rétention (Biielders C. et Javaux M., 2022, Physique du sol appliquée à l’agronomie et l’environnement. Transparent du cours. Université catholique de Louvain)

la figure 9 montre un exemple de courbe de rétention pour trois différents types de sol, argileux, limoneux et sableux ainsi que leur RUE associée. Les textures ne sont pas importante dans le cadre de ce mémoire mais ce graphique (figure 9) permet de comprendre la courbe de rétention d’eau et est utilisé à titre d’exemple. Le sol sableux possède la plus petite RUE des trois types de sol car il possède principalement des grands pores qui se vident très vite. Cela s’observe également à la pente de la courbe qui est plus élevée que pour les autres sol. Le sol argileux possède le plus grand volume d’eau car sa porosité est plus importante. la texture des argiles leur permet également de stocker des molécules d’eau entre leurs feuillets. Nous appelons ces argiles des argiles gonflantes. Malgré la porosité du sol argileux, c’est le sol limoneux qui possède la plus grande RUE. En effet, la plupart des pores du sol argileux sont trop petits pour permettre une extraction de l’eau par les racines des plantes, elle n’est donc pas accessible pour les cultures et ne consiste donc pas à la RUE.

Les cultures de couverture et les résidus de cultures influence le bilan hydrique et donc la rétention d’eau du sol. En effet les résidus de cultures agissent comme un isolant à la surface du sol. Cela permet premièrement de baisser la température du sol en servant de protection contre le soleil. L’exposition au soleil et les températures plus faibles permettent de réduire l’évaporation de l’eau dans le sol. Cela permet de garder l’humidité du sol et ainsi préserver l’eau pour permettre de créer un environnement plus propice à la croissance des plantes (Salem, 2015). Par contre les mesures se faisant en laboratoire et les échantillons étant prélevés du champ sans le couvert, ce résultat ne pourra pas être observé durant les mesures.

Une bonne infiltration est un élément majeur pour la teneur en eau dans le sol (Bescansa, 2006). Ce processus permet de recharger les nappes phréatiques mais également les pores du sol qui participeront à la rétention d’eau. Pour avoir une bonne RUE il faut donc également une bonne infiltration. Si la surface du sol ne permet pas à l’eau de s’infiltrer, à cause d’une croûte de battance par exemple, les pores sous-jacents ne pourront pas être remplis et donc participer

à la RUE. Cette eau sera perdue par ruissellement ou évaporation.

La taille et la répartition des pores influencent donc la rétention d'eau. En AC, la compacité du sol diminue la porosité mais la présence des racines d'anciennes cultures ainsi que l'activité biologique permettent de reconstituer ces pores. Les premières années de l'AC, la compacité n'est pas suffisamment compensée par les 2 autres processus (VandenBygaart et al., 1999). La capacité du sol à retenir l'eau dépend donc du stade de transition dans lequel se trouve les parcelles. Durant les premières années, la rétention d'eau sera donc plus faible en AC qu'en Aconv mais elle sera meilleure une fois la transition terminée. L'infiltration étant également influencée par le stade de transition, la recharge de la RUE sera également influencée par le stade de transition.

3 Objectifs

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'impact du changement de système d'une culture conventionnelle vers une agriculture de conservation ainsi que les différences pouvant exister entre ces deux systèmes. Pour évaluer cet impact, des indicateurs seront mesurés pour permettre de quantifier les différences entre ces deux systèmes :

-Des indicateurs chimiques permettant d'observer les effets du système sur les teneurs en MO et en nutriments. L'objectif des indicateurs chimiques est d'analyser la fertilité du champ via les nutriments, le pH, la capacité d'échange cationique et le rapport C/N. Les teneurs en carbone et azote sont principalement importantes pour nourrir les organismes vivants dans le sol en plus des plantes.

-Des indicateurs biologiques via l'activité des VDT dans le sol. La vie dans le sol a un rôle important. Les organismes remplissent certains services écosystémiques qui permettent d'améliorer la qualité des sols.

-Des indicateurs physiques qui se décomposent en trois différentes catégories :

-La résistance du sol via l'action de l'eau pour évaluer la cohésion du sol. Cette mesure s'appelle un slake-test. Cela permet de mesurer la capacité du sol à résister à l'érosion et donc sa susceptibilité à être dégradé.

-L'infiltration de l'eau dans le sol pour évaluer la conductivité hydraulique à saturation. Une meilleure infiltration permettra de nouveau de réduire les risques liés à l'érosion. De plus une meilleure infiltration permet d'améliorer le bilan hydrique de la parcelle et donc potentiellement limiter le stress hydriques.

-La rétention d'eau permettant d'évaluer la capacité du sol à conserver des stocks d'eau. De nouveau, ce paramètre rejoint le bilan hydrique. Une meilleure rétention d'eau permet à la plante un meilleur accès à l'eau et donc de nouveau limiter le stress hydrique.

Les mesures seront faites sur 2 systèmes de cultures, conventionnel et conservation en transition, et 2 cultures, froment et lin, dans le but de comparer ces 2 systèmes.

4 Matériels et méthodes

4.1 Présentation des parcelles

Les parcelles étudiées se trouvent sur le site de Gembloux et appartiennent au centre de recherche agricole Wallon (CRA-W). Elles s'intègrent dans le projet systèmes de culture innovants (SYCI) qui consiste à étudier en parallèle différents systèmes de cultures. Quatre systèmes différents y sont étudiés, dont 2 nous intéressent ici : un système conventionnel et un système de conservation.

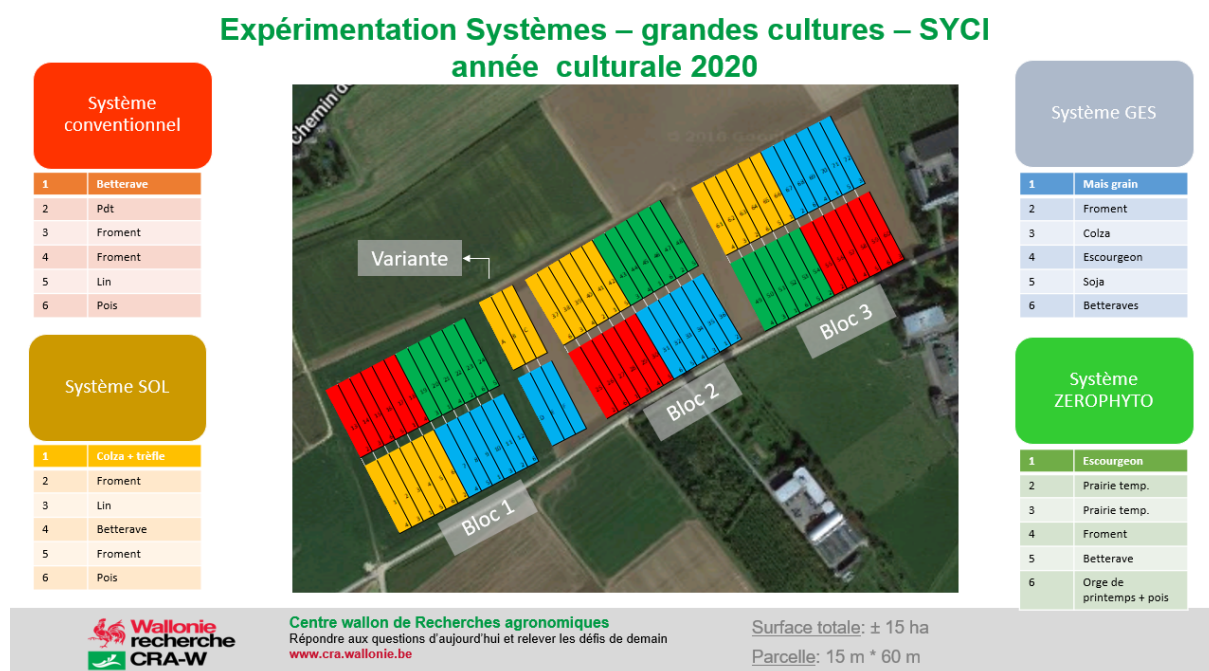


FIGURE 10 – Plan de l'essai SYCI (www.cra.wallonie.be)

La figure 10 montre le plan de l'essai SYCI ainsi que la disposition des parcelles dans ce plan et les rotations des différentes cultures. Le système a été mis en place pour commencer durant l'année culturelle 2020. L'année analysée est donc la troisième année durant laquelle le système est en place (année culturelle 2022). Chaque parcelle fait la même taille et mesure 900m². Les rotations sont les mêmes au sein de chaque système et durent 6 ans, seule la culture en cours est différente, il y a donc un décalage dans les rotations pour analyser plusieurs cultures sur une même saison. Il est important de noter que bien que les parcelles étudiées aient les mêmes cultures, les rotations ne sont pas les mêmes pour les deux systèmes. Cela signifie que les cultures précédentes sont différentes d'un système à l'autre, ce qui peut influencer les résultats. Dans ce cas-ci, en Aconv, le froment est précédé d'une culture de pomme de terre et le lin d'une inter-culture de moutarde. Alors qu'en AC, le froment est précédé d'une culture de betterave et le lin d'une inter-culture de maïs-féverole.

Pour éviter les effets de zones, le champ est divisé en 3 blocs différents, chaque bloc représentant une répétition des parcelles étudiées (figure 10). Parmi ces blocs, les positionnements des

différentes parcelles ne sont pas aléatoires car chaque système est regroupé au sein de chaque bloc. Par contre parmi, ces sous-blocs, la disposition des cultures est quant-à elle aléatoire. C'est ce qu'on appelle un système split-plot. Concernant ce mémoire, chaque bloc contient une parcelle en AC-froment, une AC-lin, une Aconv-froment et une Aconv-lin. Le détails de chaque parcelle est présenté en annexes au tableau 16.

Les parcelles ne diffèrent pas uniquement en terme de ce qui est semé mais également de la période où la culture est semée et des interventions que la parcelle subit. En effet pour les parcelles en lin, l'expérience suit en réalité deux cultures différentes. La culture de lin bien sûr et la culture de couverture qui la précède (différente en Ac et en Aconv).

Les détails de ces interventions sont disponibles en annexes (figures 50 à 57). On peut notamment remarquer qu'en AC pour les parcelles de lin, le semis direct n'est utilisé que pour la culture de couverture. La culture de lin, elle, est semée en semis classique. Le froment par contre est semé par semis direct. De plus, le lin subit des intervention supplémentaires par rapport au froment comme le déchaumage ou le roulage. Une autre différence majeure est l'utilisation de fertilisants et de traitements phytosanitaires qui diffèrent d'un système à l'autre. Néanmoins ces traitements ont tous eu lieu après l'échantillonnage pour l'analyse chimique. Ces différences entre les systèmes seront donc peu visibles.

La figure 11 représente le calendrier des différentes campagnes qui ont été menées durant cette année culturale. Toutes ces interventions seront expliquées dans les rubriques suivantes concernant chaque intervention. Il est néanmoins important de noter que le semis de froment en AC a été réalisé plus tardivement que celui en Aconv à cause de problèmes organisationnels. Les interventions avec une croix rouge sont des interventions qui étaient initialement prévues mais qui n'ont pas pu se faire pour différentes raisons.

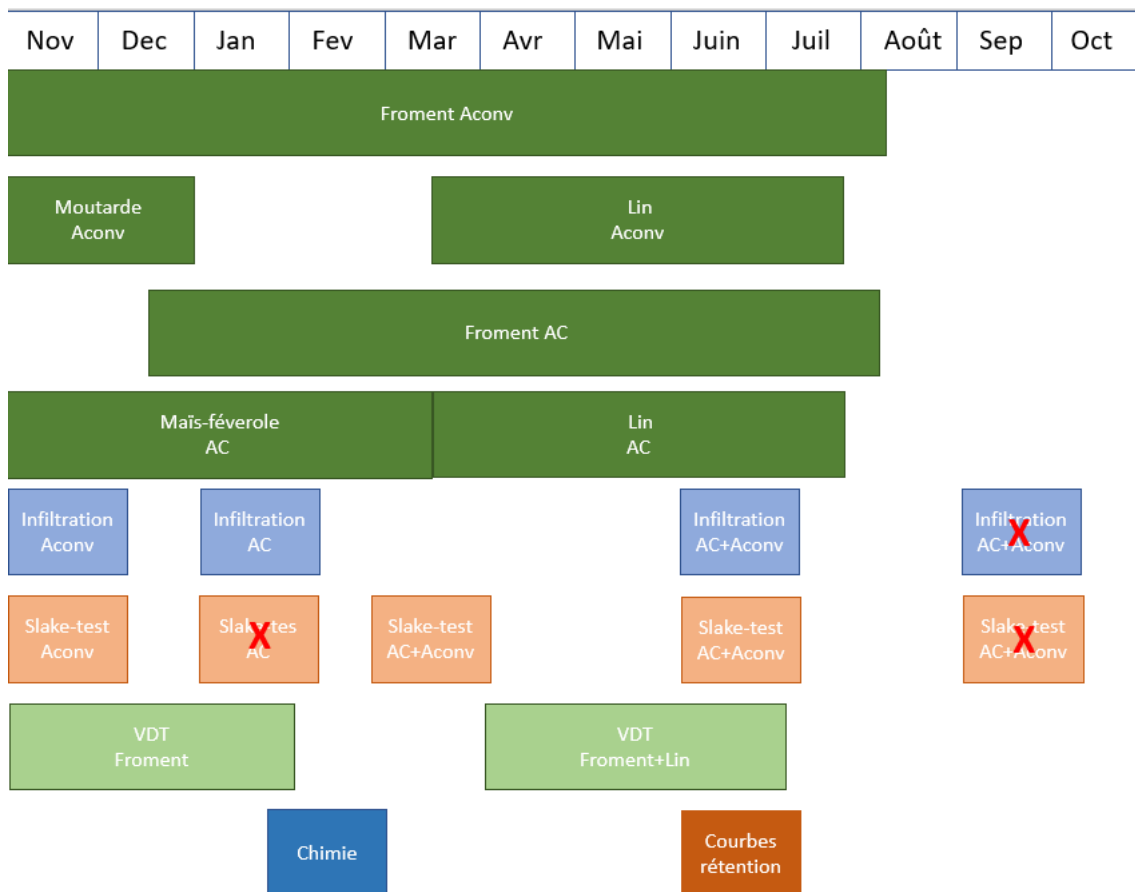


FIGURE 11 – Ligne du temps des interventions- année culturale 2022

4.2 Paniers à vers de terre

Le protocole pour mesurer l'activité des VDT provient de l'OPVT (Observatoire participatif des vers de terre, <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT>). Il s'agit d'un projet de sciences participatives dans lequel un protocole est proposé que tout le monde peut mettre en oeuvre pour ensuite envoyer leurs résultats. Cela permet à l'OPVT de collecter une grande diversité de données. L'université de Renne est à l'initiative de ce projet.

Le concept est simple. Il consiste à placer 50g de paille dans une cage de 30x50x10cm fixée sur le champ par des agrafes de maraîcher. Les brins de paille ne doivent pas dépasser 5 cm pour permettre le déplacement et l'enfouissement de ceux-ci par les VDT. Deux types d'observations peuvent être faites pour évaluer l'activité des VDT. Premièrement, le nombre de turricules observés dans la surface de la cage. Il s'agit des déjections faites par les VDT.

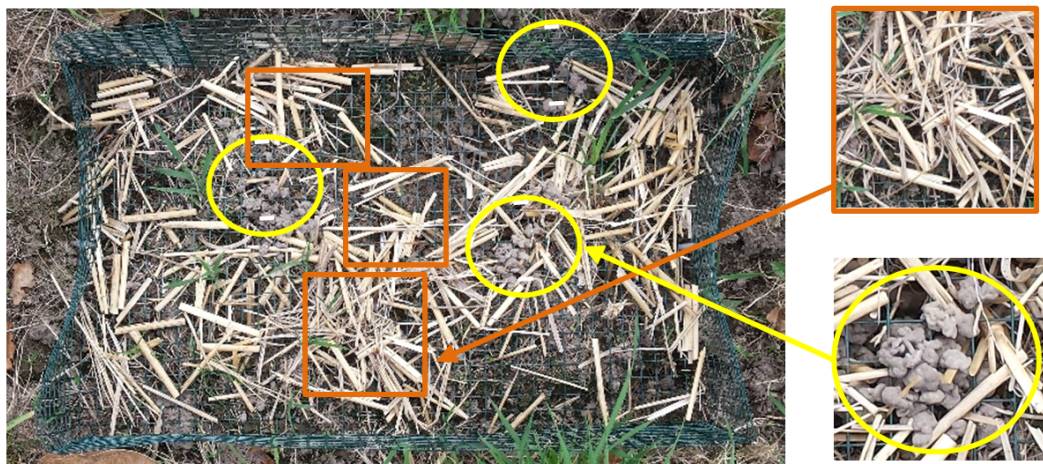


FIGURE 12 – Exemple de résultats de cabanes (en orange) et de turrículos (en jaune)(OPVT)



FIGURE 13 – Dispositif expérimental, parcelle 27; Janvier 2022

La deuxième mesure se fait en même temps que la première et consiste cette fois à compter les "cabanes à vers de terre". Il s'agit de petites structures effectuées par les VDT lorsqu'ils enfouissent la paille dans le sol pour s'en nourrir ultérieurement. La paille reste ainsi plantée dans le sol car elle n'est pas complètement enfouie ce qui constitue la cabane.

La figure 12 représente le dispositif mis en place avec des exemples de ce que sont les cabanes (en orange) et les turrículos (en jaune). Il faut visiter le champ régulièrement pour effectuer les observations qui permettront de mesurer l'activité des VDT.

Dans cette étude, 2 cages ont été mises sur chaque parcelle à 1,5m d'intervalle (figure 13) et 2 différentes campagnes expérimentales ont été faites. Une première campagne a eu lieu après le semis de froment pour suivre cette culture et a pris fin au moment du semis de lin pour permettre d'étudier les deux cultures en même temps. Cette première campagne a été faite exclusivement sur les parcelles en froment, les champs en lin étant couverts par des cultures de couverture différentes en conventionnel et en conservation il n'y avait pas de raison de les étudier. Ensuite après le semis de lin, les cages déjà présentes en froment pour la première campagne ont été déplacées au sein de la même parcelle pour ne pas être influencées par les mesures de cette première campagne. De la nouvelle paille a été mise en place pour recommencer l'expérience. Les cages prévues pour mesurer l'activité en lin ont été ajoutées à l'expérience.

4.3 Analyses chimiques

Les échantillons de sol composites destinés aux analyses chimiques ont été prélevés à trois profondeurs différentes : 0-9 cm, 9-15 cm et 15-30 cm. La sonde utilisée pour prélever ces échantillons de sol est représentée à la figure 14. Les échantillons récoltés pour ces mesures ont été pris en février. Cette date n'est pas aléatoire car les fertilisants chimiques ou autre produits phytosanitaires ne sont utilisés sur le champs qu'à partir de mars. Le but est donc d'avoir le moins d'influence possible des ces interventions sur les résultats des analyses chimiques. Pour éviter les effets de zones, la récolte d'échantillon a été répétée 6 fois sur chaque parcelle à divers endroits de celle-ci.

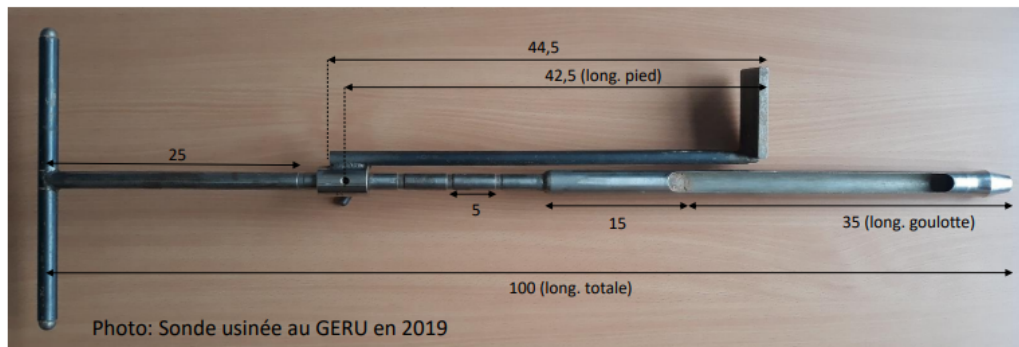


FIGURE 14 – Illustration de la sonde utilisée pour récolter les échantillons

Une fois les échantillons récoltés, ils ont été placés dans une étuve pour pouvoir sécher à 40°C pendant 48h. Une fois les échantillons secs, ils ont été broyés et tamisés pour avoir des agrégats ne dépassant pas 2 mm de diamètre. On obtient ainsi un sol très fin qui pourra être envoyé dans un laboratoire pour analyser la composition chimique de chacun des échantillons comme les concentrations en carbone organique, en azote, en phosphore, en cations échangeables (calcium, sodium, magnésium et potassium) et le rapport C/N. En plus des compositions chimiques, le pH du sol a également été mesuré.

Les stocks de carbone organique et d'azote sont des indicateurs importants pour la qualité du sol. Différentes méthodes existent pour calculer ces stocks. Premièrement la façon la plus répandue pour calculer ces stocks est la technique recommandée par l'IPCC dans le rapport "Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry" (IPCC, 2003). Ces stocks sont calculés à partir de mesures faites à des profondeurs fixes, selon l'équation 1. Le choix des 30 cm est dû au fait que la majorité du carbone organique des sols se trouvent dans cette couche supérieur.

$$S = C \times \rho \times \Delta Z \quad (1)$$

Où :

S : Le stock [g/m²]

C : La concentration [g/kg]

ρ : La densité apparente de l'échantillon [kg/m³]

ΔZ : L'épaisseur de la couche prélevée [m]

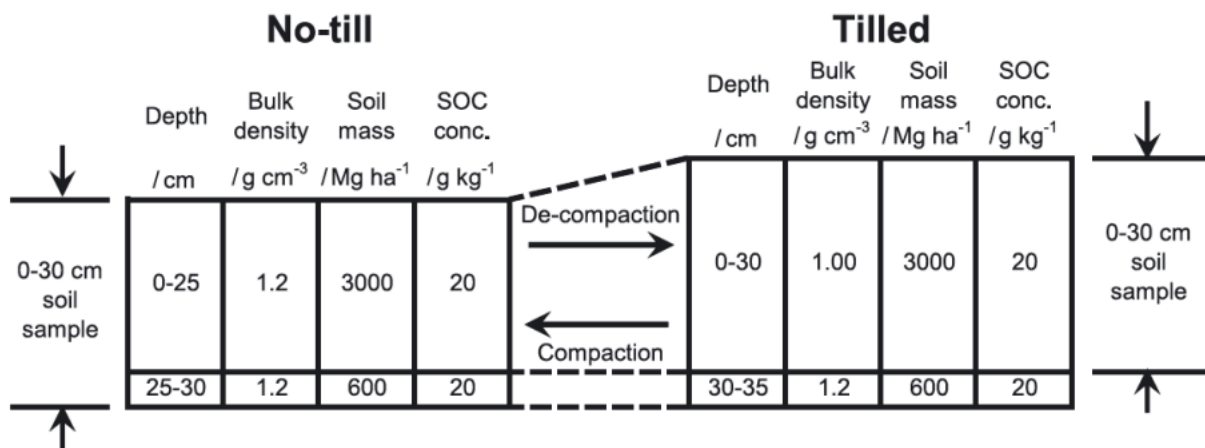


FIGURE 15 – Influence de la compaction du sol sur le calcul de stock (Wendt hauser, 2013)

La figure 15 montre que cette couche de 30 cm est influencée par la présence ou l'absence de labour. Le labour permet de décompacter le sol. La décompaction de ce sol induit une plus grande épaisseur de la couche superficielle. Sur cette figure, l'exemple montre une parcelle non labourée dont les 25 premiers centimètres correspondent aux 30 cm d'une parcelle labourée. Cette différence entre les deux pratiques culturales induit un biais dans le calcul de stock et donc dans les résultats. D'autres techniques existent pour limiter ce biais comme la technique de masse équivalente (Wendt & Hauser, 2013) qui consiste à utiliser une masse de sol équivalente plutôt qu'une profondeur. Les deux mesures ont leurs avantages. Dans ce mémoire, étant donné que la technique recommandée par l'IPCC est la plus répandue, ce sera cette technique qui sera utilisée pour mesurer les stocks. Malgré tout, le biais dû à la compaction devra être pris en compte. Les résultats ont malgré tout été calculés selon la méthode Wendt & Hauser en comparaison et se trouvent en annexes (figure 58 et 59).

4.4 Infiltrométrie

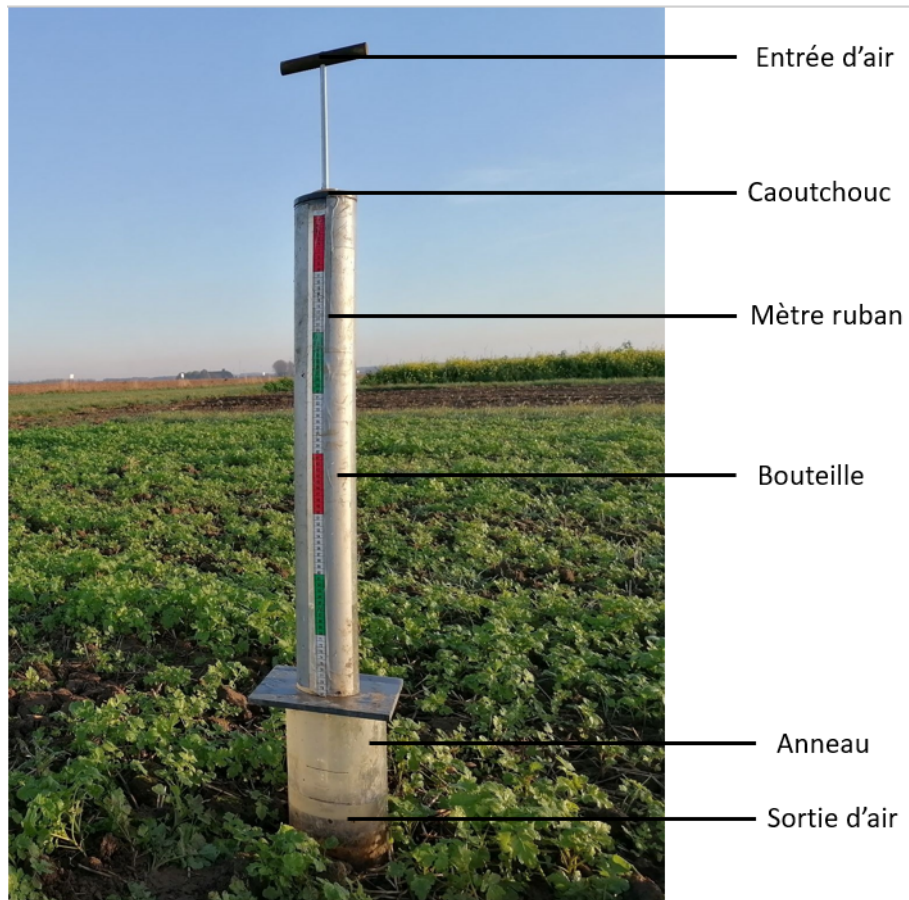


FIGURE 16 – Dispositif expérimental pour l’infiltration- Infiltromètre à simple anneau

La figure 16 représente le dispositif expérimental de l’infiltrométrie. Le dispositif est constitué de 3 parties principales. Une tige percée avec une entrée et une sortie d’air. Une bouteille de Mariotte, qui permet de maintenir une charge constante à la sortie de la bouteille, indépendamment du niveau d’eau dans la bouteille. Elle constitue le réservoir d’eau sur lequel est placé un mètre ruban qui permet de lire la hauteur d’eau dans ce réservoir. La tige percée est placée dans la bouteille, un joint de caoutchouc placé entre la bouteille et la tige évite l’air d’entrer dans la bouteille ailleurs que via l’entrée d’air de la tige prévu à cet effet. Et enfin, un anneau dans lequel on applique une hauteur d’eau stable qui va s’infiltrer dans le sol.

L’objectif de ce dispositif est de permettre une infiltration du sol avec une pression hydrostatique constante. Le rôle de la tige percée est de permettre une entrée d’air à une hauteur déterminée. À cette hauteur, l’entrée d’air permet d’appliquer une pression égale à la pression atmosphérique empêchant ainsi la colonne d’eau au dessus de ce point de participer à la charge hydrostatique. Grâce à ce dispositif, la charge est donc constante. L’anneau permet de délimiter le périmètre dans lequel on mesurera l’infiltration. Il est enfoncé dans le sol à une profondeur suffisante pour limiter un écoulement tridimensionnel, le but étant de calculer un écoulement vertical, à saturation, qu’on appelle conductivité hydraulique à saturation (K_s). De plus, l’anneau est préalablement graissé pour limiter les écoulements préférentiels de l’eau le long des parois de l’anneau. Cette conductivité se calcul selon l’équation 2.

$$K_s = \frac{Q \times G}{\frac{r}{\alpha} + r \times H + G \times \pi \times r^2} \quad (2)$$

Où :

K_s est la conductivité hydraulique à saturation [cm/min]

Q est le débit d'infiltration dans la bouteille [cm³/min]

r est le rayon interne de l'anneau [cm]

H est l'épaisseur de la lame d'eau dans l'anneau [cm]

G est un facteur de forme qui permet de prendre en compte la géométrie du dispositif [-].

α est un paramètre décrivant la conductivité hydraulique du sol il est obtenu via l'équation de Gardner et vaut 12 [m^{-1}] pour un sol limoneux (Elrick et al, 1989).

G est calculé selon l'équation 3

$$G = 0.316 \frac{D}{r} + 0.184 \quad (3)$$

Où

D : La profondeur d'enfoncement de l'anneau [cm]

Cette équation prend en compte le caractère tridimensionnel de l'écoulement une fois que l'eau est descendue au delà de la profondeur d'enfoncement comme sur la figure 17.

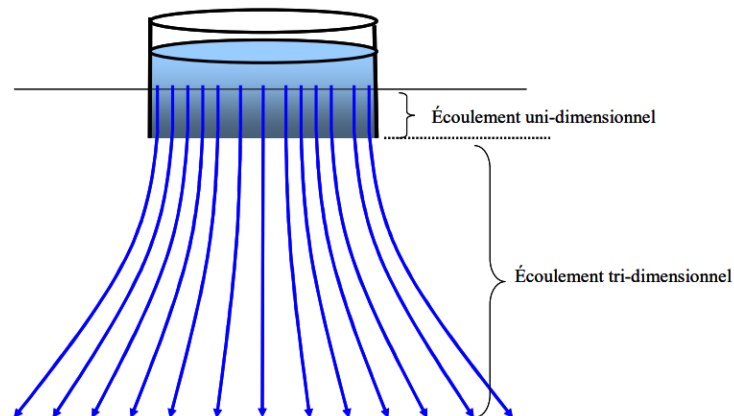


FIGURE 17 – illustration de l'écoulement 2D et 3D dans un infiltromètre à simple anneau-
Source : C. Bielders, non publié

La dispersion latérale de cet écoulement 3D est dépendante de la texture du sol. Plus les particules sont fines, plus la dispersion sera importante. Elle est également influencée par la teneur en eau du sol. Un sol plus sec induira une plus grande dispersion.

Pour effectuer ces mesures, l'anneau, avec un réservoir rempli d'eau, doit être placé préalablement sur le champ durant un laps de temps suffisamment long pour saturer le sol en eau. En effet, lors de l'expérience, l'infiltration est basée sur deux processus. Un potentiel matriciel et un potentiel gravitationnel. L'objectif de la saturation du sol est d'obtenir un régime permanent. Dans ce cas-ci le potentiel matriciel diminue jusqu'à atteindre ce régime permanent. À ce

moment-là, l'infiltration ne dépend plus que de la gravité et de la lame d'eau à la surface. Cette saturation est en général atteinte au bout de 30 minutes ce qui permet un flux stable. Une fois le flux stabilisé (régime permanent), la mesure peut commencer. Pour prendre les mesures, il suffit de mesurer la hauteur d'eau dans la bouteille pendant un intervalle de temps régulier et adapté au flux d'infiltration. Cette différence de hauteur d'eau en cm est ensuite multipliée par la surface interne de la bouteille pour obtenir Q [cm^3/min] duquel on déduit K_s grâce à l'équation 2.

4.5 Slake test

Le QuantiSlakeTest est une méthode d'évaluation créée et mise en place par Frédéric Vanwindekens et Brieuc Hardy (Vanwindekens et Hardy, 2022) basée sur la méthode de Le Bissonnais (Le Bissonnais, 1995). Le principe de la méthode Le Bissonnais, est d'immerger des agrégats de sol et comparer le diamètre avant et après immersion. La taille de ces agrégats va être réduite par différents mécanismes l'éclatement, le gonflement différentiel et la dispersion.

L'infiltration rapide de l'eau dans les pores du sol sec induit un éclatement rapide de l'agrégat immédiatement après l'immersion dans l'eau. Ce phénomène se poursuit au fur et à mesure de l'analyse, l'eau remplissant les pores de plus en plus petits.

Le principe du QST (QuantiSlakeTest) est le même, c'est à dire que l'on mesure la stabilité des agrégats par éclatement de l'eau. Mais la différence est que, au lieu de mesurer la différence de diamètre des agrégats entre le début et la fin de l'expérience, on va effectuer un suivi de la masse de cet agrégat tout le long de l'expérience. L'avantage est donc d'observer les effets de cet éclatement tout le long du processus et non pas juste au début et à la fin, ce qui permet de déduire plusieurs indicateurs. De plus, la mesure n'est plus volumique mais bien massique. Pour éviter les différences entre les échantillons n'ayant pas la même masse, on privilégiera une analyse de la masse relative plutôt que la masse absolue.

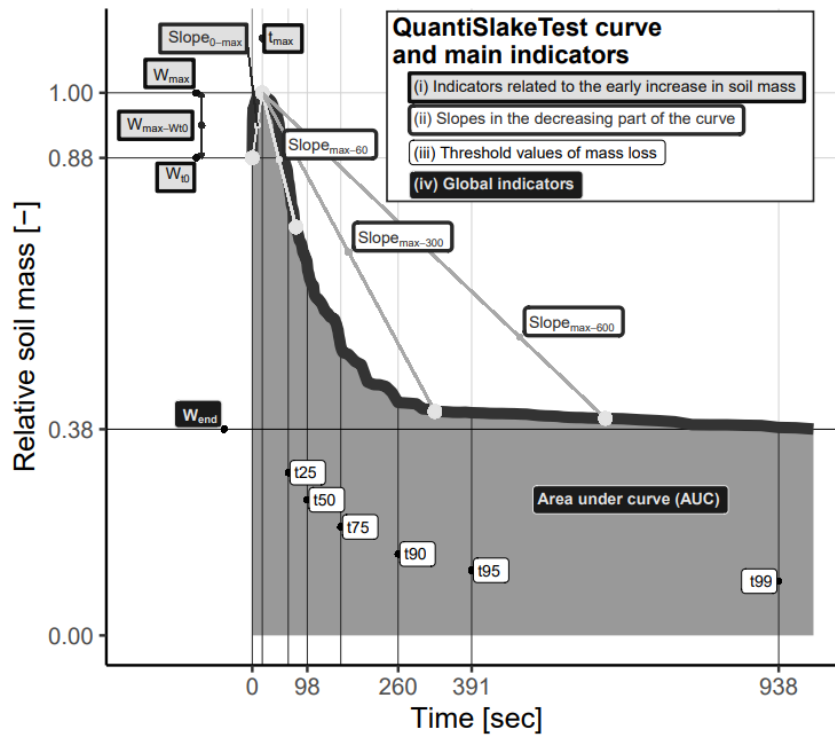


FIGURE 18 – Illustration des indicateurs dérivés du QST (Vanwindekens et Hardy, 2022)

La figure 18 représente différents indicateurs qui peuvent être déduits de cette courbe. Le premier indicateur (T_{max}) représente la prise de masse de l'échantillon après immersion. Les pores se remplissant d'eau avant de faire éclater l'échantillon, il est logique que ce dernier prenne de la masse lorsque l'eau remplace l'air. Cet indicateur est en lien avec la porosité du sol.

Le deuxième indicateur (SI) représente la pente durant la partie décroissante de la courbe, il s'agit de la différence entre le point le plus haut en masse relative, donc après la prise de masse due à l'engorgement de l'eau dans les pores et un autre point de la courbe suivant l'indicateur. Différentes pentes peuvent donc être analysées.

Le troisième indicateur (T) consiste à mesurer le temps pour que l'échantillon perde un pourcentage de sa masse totale qu'il perd le long de l'analyse (sur le graphique, 25,50,75,95,99).

Le quatrième indicateur reprend la totalité de l'expérience et non une partie comme les précédents indicateurs. On peut en tirer 2 différentes mesures, la masse relative finale (W_{end}) ainsi que l'aire sous la courbe (AUC). Le problème étant que pour ce dernier indicateur, il est dépendant de la longueur totale de l'expérience.

La première étape pour effectuer un QST est de récolter les échantillons qui seront analysés. Les échantillons ont été récoltés directement sur le champ grâce à des anneaux en métal de 100 cm³. La couche superficielle du sol est enlevée pour accéder à une couche qui n'est pas influencée par les effets de surface (entre 5 et 10 cm). Quatre échantillons ont été récoltés à différents endroits de chaque parcelle. Une fois ces échantillons récoltés, ils ont été placés dans un local sec pour sécher à l'air pendant 2 mois à température ambiante.

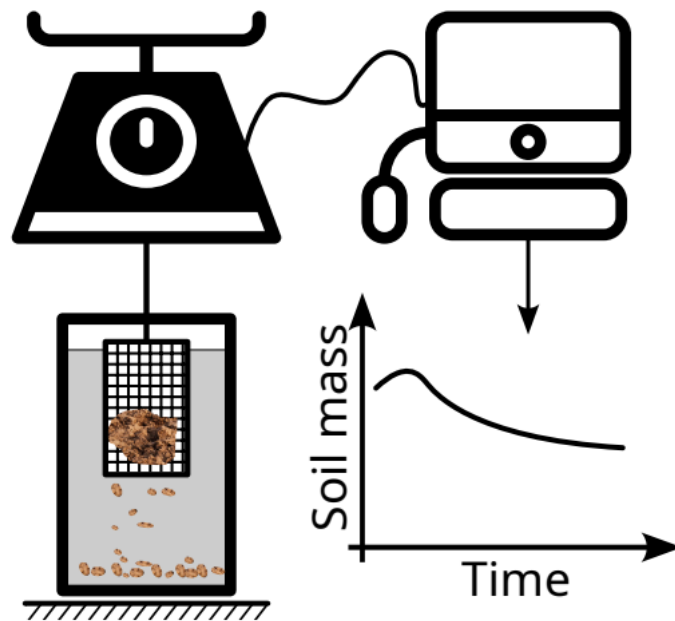


FIGURE 19 – Dispositif expérimental slake-test (Vanwindekens et Hardy, 2022)

Une fois les échantillons séchés le QST à proprement parlé peut commencer. La figure 19 représente un schéma du dispositif. Une photo de ce système se retrouve en annexes (figure 60). Le principe est de placer l'échantillon dans un panier suspendu à une balance. Ce dernier est ensuite plongé brusquement dans l'eau. L'infiltration de l'eau dans les pores de l'échantillon va déstructurer ce dernier qui va commencer à se désagréger. Cette perte de matière induit une diminution de sa masse petit à petit. La balance est raccordée à un ordinateur qui va enregistrer la masse à intervalles réguliers. La mesure s'arrête lorsque l'échantillon a atteint un état stable, sa masse ne diminuant encore que très peu. Cette période est en général comprise entre 10 et 15 minutes après l'immersion de l'échantillon.

Certains échantillons ont été perdus durant l'expérimentation soit à cause d'une mauvaise manipulation, soit à cause de problèmes dus au logiciel ou aux balances. Cela fait que certaines parcelles n'ont pas 4 échantillons comme prévu mais parfois moins.

4.6 Courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention est une courbe qui décrit la capacité d'un sol à retenir de l'eau au sein de celui-ci. Elle est fonction de 2 paramètres : la teneur en eau associée à une tension.

Le dispositif utilisé dans ce mémoire est le dispositif Hyprop qui fonctionne par évaporation. La figure 20 représente le fonctionnement des balances Hyprop. Deux mesures se font en continu. Premièrement la masse de l'échantillon est mesurée en continu par la balance. La teneur en eau est dérivée de cette évolution de la masse. Le principe est de mesurer ces paramètres en continu durant un laps de temps compris entre 10 et 15 jours.

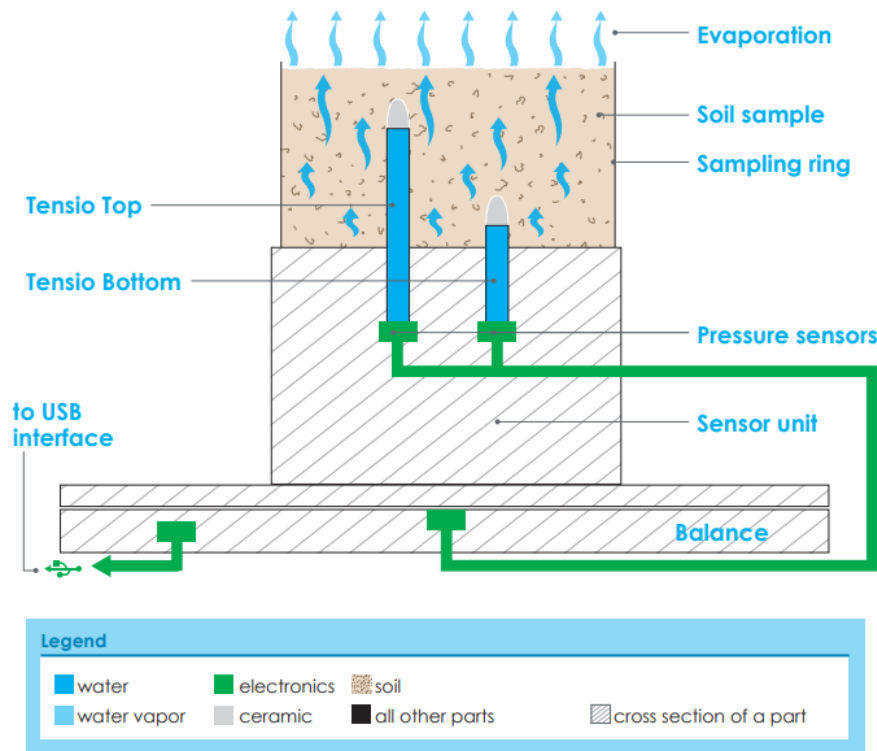


FIGURE 20 – Fonctionnement du dispositif Hyprop (<https://www.hyprop.co.za/>)

La deuxième mesure est celle de la tension. Pour mesurer cette tension, le dispositif est constitué de 2 tensiomètres à 2 profondeurs différentes dans l'échantillon. La mesure conservée pour la courbe de rétention est une moyenne de ces 2 tensiomètres. Une photo du dispositif mis en place se trouve en annexe (figure 61).

Avant de commencer la mesure, il faut préalablement dégazer les tensiomètres en les plongeant dans de l'eau déminéralisée et désaérée. Une pression au delà de -0,9 bar est ensuite induite dans les tensiomètres pour qu'ils absorbent cette eau et ainsi enlever les dernières bulles de gaz qui pouvaient rester dans les tensiomètres et compromettre les mesures. Une fois la mesure terminée, l'échantillon est placé dans une étuve où il séchera pendant 48h à 105°C pour être ensuite pesé et obtenir la masse sèche de ce dernier. La teneur en eau sera déduite de cette masse selon l'équation suivante :

$$\theta = \frac{V_{eau}}{V_{tot}} \quad (4)$$

Où V_{eau} et V_{tot} sont en cm^3 . V_{eau} correspond au volume occupé par l'eau dans l'échantillon et V_{tot} correspond au volume total de l'échantillon qui comprend la phase gazeuse, la phase liquide (V_{eau}) et la phase solide. Sachant que l'eau a une masse volumique de 1 g/cm^3 le volume d'eau est égal à sa masse.

Deux données sont principalement intéressantes, ce sont les teneurs en eau à CC et PF. Le pF 2.5 correspond à la CC, cela correspond à une succion de 300 cm. Le PFP se trouve à pF 4,2 cela correspond à une succion de 15800cm. Cette succion n'est pas mesurable par les balances hyprop car trop élevée. Elle sera donc effectuée via des casseroles à pression.

Les mesures sont enregistrées sur un ordinateur via le logiciel HYPROP-FIT dans lequel

sont ajoutées les masses sèches et les volumes des échantillons. Une courbe est ensuite ajustée avec les points de mesures via l'équation de van Genuchten (équation 5 , van Genuchten, 1980)). pour pouvoir en tirer les indicateurs associés.

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|\psi|)^n)^{1-\frac{1}{n}}} \quad (5)$$

Où :

$\theta(\psi)$: teneur en eau en fonction de la succion [cm^3/cm^3]

$|\psi|$: la succion [cm]

θ_r : teneur en eau résiduelle [cm^3/cm^3]

θ_s : teneur en eau à saturation [cm^3/cm^3]

α : paramètre associé au point d'entrée d'air [cm^{-1}]

n : une mesure de la distribution de la taille des pores [-]

Plusieurs indicateurs peuvent être déduits de cette mesure. La CC et PFP sont importants à prendre en compte et permettent de déduire la RUE selon l'équation 6

$$RUE = \theta_{CC} - \theta_{PF} \quad (6)$$

Où RUE, θ_{CC} et θ_{PF} son en cm^3 d'eau par cm^3 de sol [cm^3/cm^3].

La courbe de van Genuchten ainsi extraite des mesures permet également de déduire d'autres paramètres, tels que n ou α , qui peuvent également être intéressant.

Parmi les indicateurs que l'on veut évaluer, se trouve la teneur en eau au point de flétrissement. Malheureusement, cette mesure n'est pas prise par le système Hyprop car les tensiomètre ne mesurent que jusqu'à un pF de 2,9 à pF de 4. Pour avoir une mesure à pF 4,2 plusieurs techniques peuvent exister. Dans ce cas-ci la technique des CHP (Casseroles à haute pression) sera utilisée.



FIGURE 21 – Dispositif expérimental des CHP

Le dispositif expérimental est visible à la figure 21. La figure à gauche montre la dispo-

sition des échantillons sur les plaques poreuses. Le manomètre permet de mesurer et vérifier la pression dans la CHP. Les valves permettent d'augmenter ou diminuer la pression dans la CHP. Les tuyaux reliés aux plaques poreuses constituent le lien entre les plaques et la pressions atmosphériques. C'est par ces tuyaux que sort l'eau des échantillons.

Pour préparer les échantillons, il faut les saturer en eau et en faire une boue avec de l'eau désoxygénée permettant d'homogénéiser l'échantillon et enlever les agrégats. Il faut donc obtenir une boue fine. Une fois les échantillons préparés, ils sont placés dans une casserole fermée hermétiquement dans laquelle sera appliquée une pression d'air de 15,54 bar qui correspond au pF 4,2. Dans la CHP, les échantillons sont placés sur une plaque poreuse reliée à la pression atmosphérique. Le gradient de pression ainsi créé entre le milieu dans lequel se trouve l'échantillon et la base de la plaque poreuse induit un déplacement d'eau qui sera extrait de la CHP.

12 échantillons correspondants aux 12 parcelles sont placés sur chaque plaque poreuse. 3 plaques poreuses sont placées dans la casserole avec une répétition de chaque parcelle sur chaque plaque. Ce qui fait que chaque parcelle a 3 répétitions. Finalement, seules deux des trois plaques seront analysées car à la sortie de CHP, la plaque 2 a été perdue car de la condensation est retombée sur les échantillon lors de la dépressurisation de la casserole. Les échantillons ont donc réabsorbé de l'eau et ne sont donc plus à l'équilibre du pF 4,2.

L'eau sortant de la casserole est pesée à intervalles de 24h. La mesure se termine lorsque l'eau pesée à la sortie de la CHP est identique deux jours consécutifs à 0,01g près c'est à dire que pas plus de 0,01 g d'eau ne sort de la CHP durant ce laps de temps. Pour connaître la teneur en eau, les échantillons sont pesés à la sortie de la casseroles puis séchés à l'étuves et pesés une deuxième fois après le passage à l'étuve à 105°C. La teneur est déduite de ces 2 mesures via l'équation 7.

$$\theta_{4,2} = \frac{V_{eau}}{V_{tot}} \quad (7)$$

Où : V_{tot} est le volume total [cm³] et V_{eau} le volume d'eau [cm³]

La masse d'eau correspond à la différence entre la masse de l'échantillon à la sortie des CHP et la masse à la sortie de l'étuve. La densité de l'eau étant de 1g/cm³ son volume est égal à sa masse. Pour le volume total, la masse de l'échantillon a été divisé par sa densité apparente pour obtenir un volume.

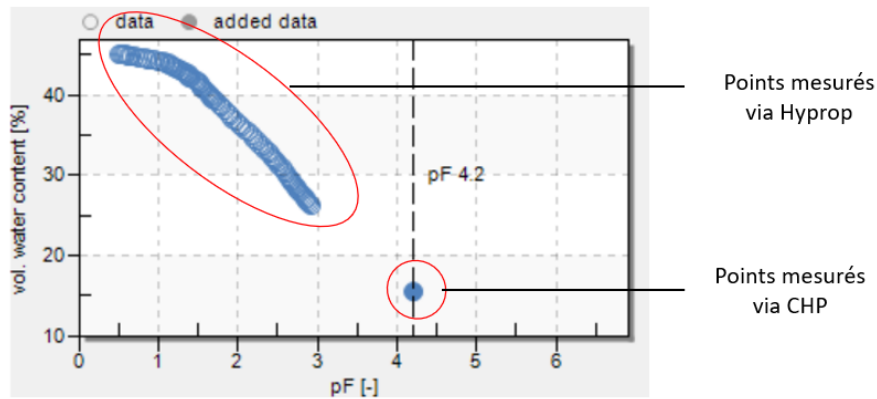


FIGURE 22 – exemple de mesures hyprop et CHP

Une fois cette mesure effectuée, elle peut être ajoutée dans le logiciel Hyprop-fit comme sur la figure 22. Ces mesures serviront à déduire les courbes de van Genuchten associées.

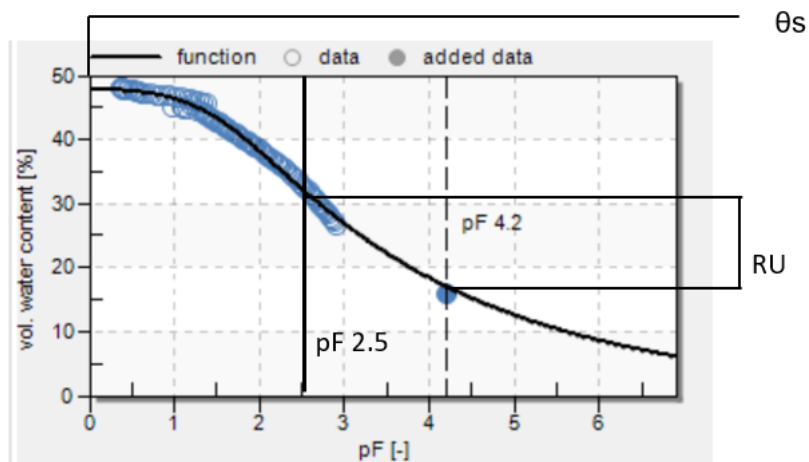


FIGURE 23 – Exemple de courbe de rétention- Parcelle 27

Sur la figure 23 apparaissent 4 des indicateurs qui seront analysés. Les points bleus sont les points mesurés par Hyprop et la CHP. La courbe noire est la courbe de rétention d'eau déduite de ces mesures par l'équation de van Genuchten. θ_s est la première mesure de teneur en eau car il s'agit de la teneur en eau à saturation donc quand l'eau n'a pas encore commencé à s'évaporer. RUE correspond à la différence de teneur en eau entre la CC (pF 2,5) et le PFP (pF 4,2).

4.7 Analyse des résultats

Pour analyser la pertinence des résultats, le logiciel JMP a été utilisé afin d'effectuer des ANOVA à 2 facteurs (système et culture). Pour pouvoir effectuer une ANOVA, trois hypothèses doivent être remplies. Premièrement, l'indépendance des résidus. Cela signifie que les données d'observations ne doivent pas être corrélées. Pour cette hypothèse, les dispositifs expérimentaux ont été faits de sorte que cette hypothèse soit remplie grâce au système de blocs aléatoires.

La deuxième hypothèse est la normalité des résidus. Pour la vérifier, les résidus ont été soumis au test de Shapiro-Wilk. Dans le cas où l'hypothèse de normalité était rejetée ($P\text{-valeur} < 0,05$),

on évalue si une transformation aux données permet de satisfaire cette hypothèse.

Le même mécanisme se fait pour la troisième hypothèse concernant l'homogénéité des variances des résidus. Le test effectué cette fois est le test de Bartlett. De nouveau si cette hypothèse n'est pas respectée ($p\text{-valeur} < 0,05$), on évalue si une transformation des données permet de satisfaire l'hypothèse. Une fois ces vérifications effectuées, l'analyse des résultats peut commencer.

5 Résultats et discussion

5.1 Corrélations entre les indicateurs

Avant de commencer l'analyse des résultats il est important de calculer les différents coefficients de corrélations entre tous ces indicateurs pour permettre de faire des liens entre ces indicateurs. Les résultats de ces coefficients de corrélation sont disponibles au tableau 1.

TABLE 1 – Résultats des coefficients de corrélations entre les indicateurs

	VDT	Corg	N	K_s	Tmax	Wend	SI30	T25	T50	T75	α	n	θ_s	θ_{CC}	θ_{PF}	RUE	Densité
VDT	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Corg	0,18	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
N	0,37	0,87	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
K_s	-0,38	0,33	0,17	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Tmax	-0,02	0,57	0,73	0,24	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Wend	0,16	0,77	0,83	0,27	0,9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SI30	0,53	0,58	0,74	-0,11	0,69	0,81	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
T25	0,18	0,5	0,72	0,05	0,94	0,91	0,82	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
T50	0,42	0,41	0,66	-0,15	0,77	0,82	0,86	0,94	/	/	/	/	/	/	/	/	/
T75	0,63	0,37	0,61	-0,22	0,63	0,72	0,86	0,83	0,96	/	/	/	/	/	/	/	/
α	-0,31	-0,34	-0,43	0,15	-0,33	-0,45	-0,65	-0,44	-0,49	-0,49	/	/	/	/	/	/	/
n	0,09	-0,18	-0,04	-0,43	-0,21	-0,41	-0,19	-0,25	-0,24	-0,21	-0,2	/	/	/	/	/	/
θ_s	-0,01	-0,06	-0,07	-0,44	0,03	0,08	0,08	0,12	0,19	0,17	0,1	0,1	/	/	/	/	/
θ_{CC}	0,33	0,53	0,56	0,22	0,49	0,69	0,77	0,58	0,6	0,59	-0,24	-0,41	-0,24	/	/	/	/
θ_{PF}	0,27	0,4	0,38	0,34	0,36	0,56	0,56	0,48	0,54	0,56	0,77	-0,71	-0,45	0,77	/	/	/
RUE	0,19	0,35	0,41	-0,06	0,34	0,39	0,52	0,32	0,28	0,25	-0,01	0,21	0,17	0,64	-0,01	/	/
Densité	-0,05	0,29	0,34	-0,73	-0,54	0,57	0,52	0,57	0,52	0,45	0,24	-0,38	-0,68	0,73	0,75	0,24	/

5.2 Densité apparente du sol

Facteur	P-value
Système	0,015
Culture	0,04
Système*culture	0,68
Bloc	0,75

Les Résultats de l'ANOVA de la densité apparente du sol montrent une influence significative du système ainsi que de la culture. Concernant le système, ces résultats sont logiques et la différence est due à la présence du labour en Aconv qui permet de décompacter le sol et donc de diminuer la densité apparente du sol. Concernant la culture, la seule intervention ayant lieu en lin mais pas en froment est le roulage. Ce roulage peut augmenter la densité du sol par compaction ce qui doit donc être la raison de la différence de densité observée entre les deux cultures.

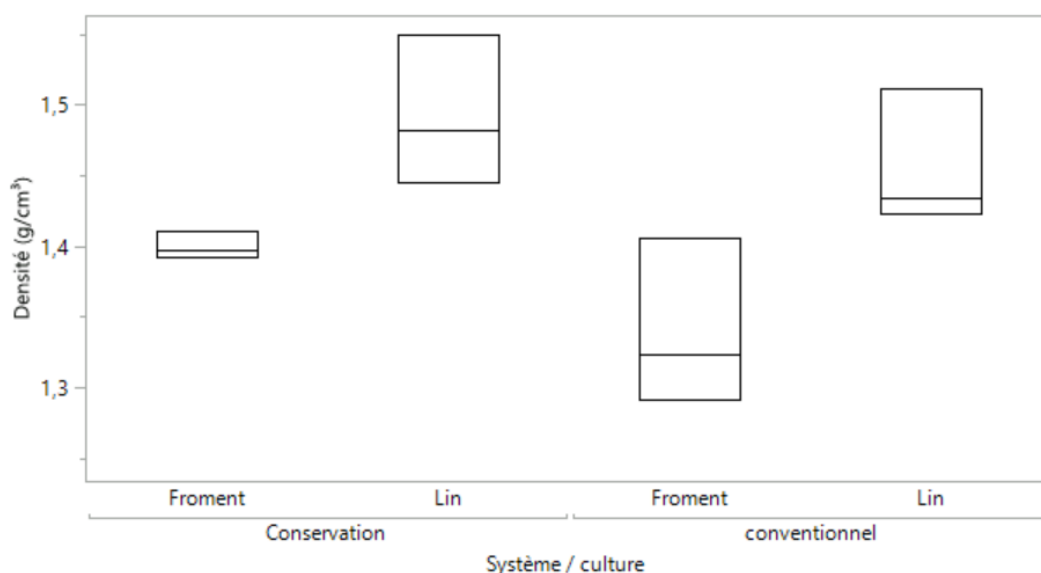


FIGURE 24 – Densité apparente des échantillons en fonction du système et de la culture.

5.3 Propriétés biologiques

TABLE 2 – Résultats de l'anova pour les turricules de VDT

Facteur	P-value
Système	0,028
Culture	0,97
Système*culture	0,007
Bloc	0,43
Date	<0 ,001

Les résultats de l'ANOVA montrent une très grande influence de la date sur les résultats. L'interaction système-culture ainsi que l'influence du système sont également significatifs.

TABLE 3 – Densité de turricules observés [-] entre le 11/02/2022 et le 27/06/2022 en fonction du système de culture et de la culture en place

Modalité	Culture	Moyenne	Ecart-type	Maximum	Minimum
Conservation	Froment	1,17	1,58	5	0
Conservation	Lin	0,44	0,92	3	0
Conventionnel	Froment	0,17	0,46	2	0
Conventionnel	Lin	0,39	0,7	2	0

L'analyse statistique dégage 2 éléments significatifs influençant les résultats. Premièrement, la date a un rôle très important. Cela est expliqué par les facteurs climatologiques et saisonniers, comme le froid ou les pluies, qui influencent fortement l'activité des VDT mais également la qualité des résultats récoltés qui peuvent être effacés par les pluies.

Ensuite l'interaction système-culture a également une grande influence sur les résultats. Cela est visible dans le tableau 3. En effet les populations de VDT sont fortement influencées par le travail du sol. Le labour étant nocifs pour ces populations, cette technique culturale a une influence négative sur les VDT ce qui diminue les populations et donc leurs activités. Cela rejoint ce qui a été trouvé dans la littérature. Le labour a pour conséquence de baisser drastiquement l'espérance de vie de la pédofaune de différentes façons. Premièrement, le labour détruit l'habitat de ces espèces (les galeries, les réserves de nourritures enfouies,...) rendant le milieu moins propice à l'installation des colonies. Deuxièmement les VDT peuvent être tués directement ou indirectement par le labour. Les lames de la charrue peuvent blesser ou tuer directement les VDT en les écrasant, en les découpant ou plus indirectement, exposer les VDT aux prédateurs ou à la dessiccation en retournant la terre, les rendant ainsi sans défenses en les exposant à la surface (Boström, 1995). Pour ces raisons, l'AC qui est une pratique sans labour permet de conserver les populations de VDT ce qui induit assez logiquement une meilleure activité biologique. L'utilisation du déchaumage en AC avant le semis de lin peut expliquer le fait que cette activité reste faible. Le déchaumage est moins agressif que le labour et permet donc une meilleure activité mais elle réduit tout de même les chances de survie des VDT. L'utilisation de cette pratique pourrait ralentir la transition au niveau biologique en ralentissant le retour des colonies de VDT. Ce déchaumage n'a eu lieu qu'en lin, ce qui expliquerait la différence entre les deux cultures ainsi que l'interaction culture-système. En effet c'est uniquement le travail mécanique qui nuit aux populations de VDT. Le déchaumage utilisé en lin limite les avantages de l'Aconv ce qui offre des résultats similaires pour l'Aconv et l'AC.

Les résultats des indicateurs biologiques ont fortement été influencés par les conditions météorologiques. En effet, le climat a été rude durant la période d'expérimentation avec un mois de juillet et un mois d'août très secs (6mm de pluie sur l'ensemble du mois de juillet et 18mm de pluie pour l'ensemble du mois d'août selon meteobelgique). La figure 25 montre les précipitations journalières relevées de février à septembre par la station de Ligny à 10 km de Gembloux. Le peu de précipitations en juillet et août est bien visible sur ce graphique. Le mois de juin quant à lui a subi de fortes pluies (90.8 sur l'ensemble du mois de juin selon meteobelgique). Ces raisons peuvent expliquer les faibles résultats observés.

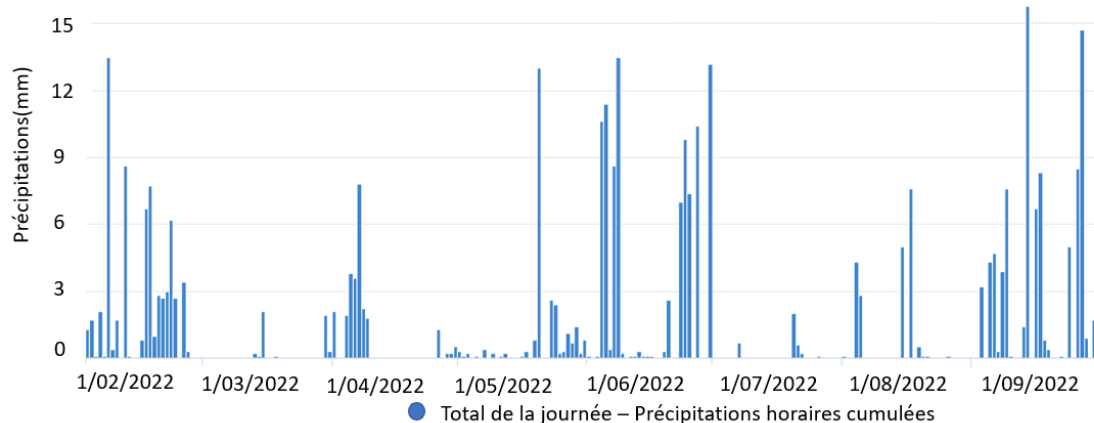


FIGURE 25 – Précipitations mesurées par la station de Ligny- Source : [https ://hydrometrie.wallonie.be/](https://hydrometrie.wallonie.be/)

La date a donc une influence importante sur l'activité des VDT. Cinq campagnes ont été effectuées pour récolter les données sur le champ, le 11/02, le 28/02, le 14/05, le 21/06 et le 27/06. La date avec le plus d'activité est le 28/02 avec une moyenne de 1.58 turricules par parcelle. La deuxième date la plus active est le 27/06 avec une moyenne de 1.08. Ensuite ce sont, dans l'ordre, le 11/02, le 21/06 et le 14/05 avec des moyennes respectives de 0.5, 0,167 et 0. On observe donc que même pour des dates proches dans le temps, les résultats peuvent grandement différer. Les résultats récoltés dépendaient fortement de la météo des jours précédents. En effet, si le sol était trop sec comme c'était le cas en mars et début mai, les VDT restaient en profondeur pour éviter la dessiccation. Leur activité était donc invisible en surface et il en résulte des résultats nuls. De plus en hiver, les VDT sont en état d'hibernation lorsqu'il gèle et sont donc inactifs, il est donc logique de retrouver moins de résultat à cette période de l'année. Finalement, certaines observations ont été réalisées après des pluies intenses (comme en juin) qui ont érodé la surface du sol et ainsi effacé les traces potentielles d'activité. Tous ces événements expliquent le peu de traces d'activités observées. On observe par exemple une faible activité le 11/02 (0.5) qui suit de fortes pluies alors que quelques jour plus tard, le 28/02 l'activité est bien plus élevée (1.58) lorsque les pluies étaient plus faibles.

Malgré tout, certains résultats ont quand même pu être récoltés et sont disponibles au tableau 3 pour les turricules. Concernant les cabanes par contre, les résultats sont trop faibles pour être intéressants. Pour les raisons citées ci-dessus, ils ne seront donc pas analysés.

5.4 Propriétés chimiques

5.4.1 Carbone organique

TABLE 4 – Résultats de l'ANOVA pour la teneur en carbone

Facteur	P-value
Système	0,09
Culture	0,66
Système*culture	0,23
Bloc	0,43
Profondeur	0,01
Système*profondeur	0,06
Culture*profondeur	0,59

Concernant la teneur en carbone seule la profondeur a une influence significative sur le résultats mais l'interaction système-profondeur, ayant une P-valeur de 0,06, est proche d'avoir une influence significative il est donc intéressant de l'analyser également.

Le graphique 26 montre la concentration en carbone organique en fonction de la profondeur et du système. L'influence de la profondeur sur la concentration en carbone organique correspond à ce qui avait été lu dans la littérature. Cette concentration dépend de la couche que l'on étudie. Que ce soit en Aconv ou en AC les 2 systèmes et les 2 cultures montrent une tendance où la concentration diminue avec la profondeur.

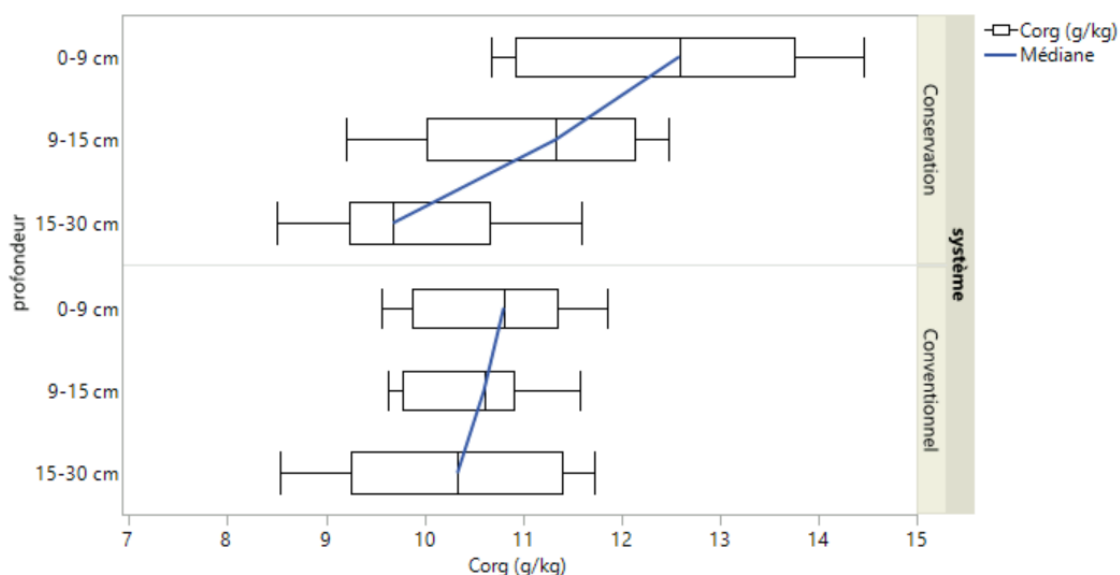


FIGURE 26 – Effet de la profondeur sur la concentration en carbone organique en fonction du système

On observe sur la figure 26 que ce gradient de concentration est plus élevés en AC qu'en Aconv. Les couches les plus superficielles sont plus riches en carbone organique en AC qu'en Aconv mais plus on s'enfonce dans les couches les plus profondes plus cette tendance s'inverse avec une concentration plus élevée pour l'Aconv dans la couche 15-30 cm. Cela correspond également à ce qui a été trouvé dans la littérature. En effet, Balesdent et al. (2000), expliquait la

différence de localisation du carbone organique entre l'AC et l'ACConv. Cela s'explique par le fait qu'en Aconv, les différentes couches sont mélangées et incorporées plus en profondeur grâce au labour alors qu'en AC les résidus restent à la surface. L'apport de matière organique en AC reste donc superficiel. Le labour permet d'homogénéiser les concentrations dans le sol.

TABLE 5 – Résultats de l'ANOVA pour le stock de carbone

Facteur	P-value
Système	0,073
Culture	0,56
Système*culture	0,39
Bloc	0,38

Les résultats de l'Anova concernant le stocks de carbone ne ressortent aucune différence significative peu importe le facteur. Malgré tout la p-valeur du système est tout de même proche de 0,05 les résultats seront donc quand même analysés.

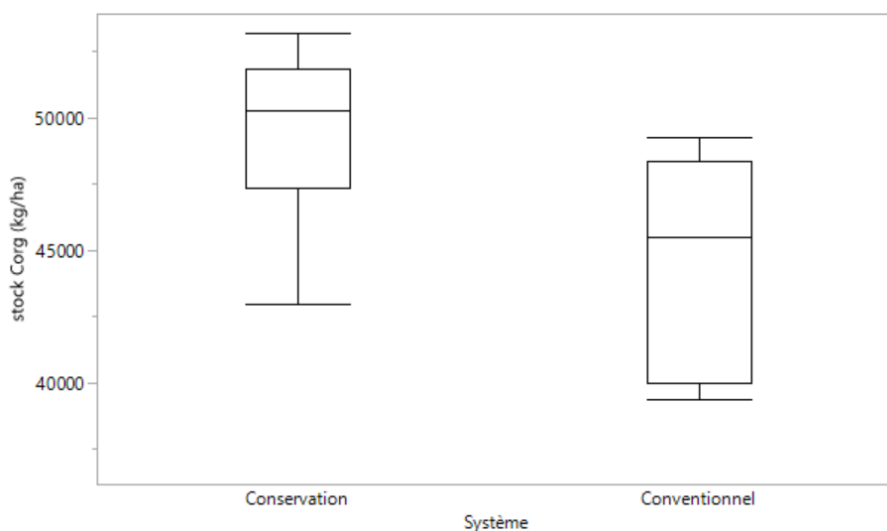


FIGURE 27 – Stock de carbone organique en fonction du système sur les 30 premiers centimètres

La figure 27 représente cette fois-ci le stock de carbone organique. L'analyse statistique révélait que les systèmes n'étaient pas significativement différents. Bien qu'elle ne soit pas significative, la p-valeur (0,073) exprime tout de même une légère différence entre les systèmes. La restitution de culture étant présente dans les deux systèmes, ces résultats ne concordent pas à ce qui a été trouvé dans la littérature. Cela est probablement dû au biais induit par les différences de masses. La méthode de masse équivalente (annexes, figure 59) montre que les résultats sont similaires entre les deux systèmes pour les stocks de carbone ce qui permet de confirmer cette hypothèse.

5.4.2 Azote

TABLE 6 – Résultats de l'ANOVA de la teneur en azote

Facteur	P-value
Système	<0,001
Culture	0,009
Système*Culture	0,27
Bloc	0,33
Profondeur	<0,001
Système*Profondeur	0,003
Culture*Profondeur	0,98

L'analyse statistique révèle globalement les mêmes résultats que pour le carbone avec une influence significative de la profondeur et de l'interaction système-profondeur. De plus, la culture et le système ont également une influence significative.

La figure 28 montre la différence de teneur en azote en fonction de la profondeur. Concernant le système, le résultat est le même que pour le carbone, on observe un gradient de concentration en AC moins important en Aconv. Les raisons sont les mêmes. Le labour permet de mélanger les horizons entre eux induisant une certaine homogénéité en Aconv. Les apports en azote minéral et l'azote contenu dans la MO se faisant en surface il est logique que les horizons les plus superficiels soient plus riches.

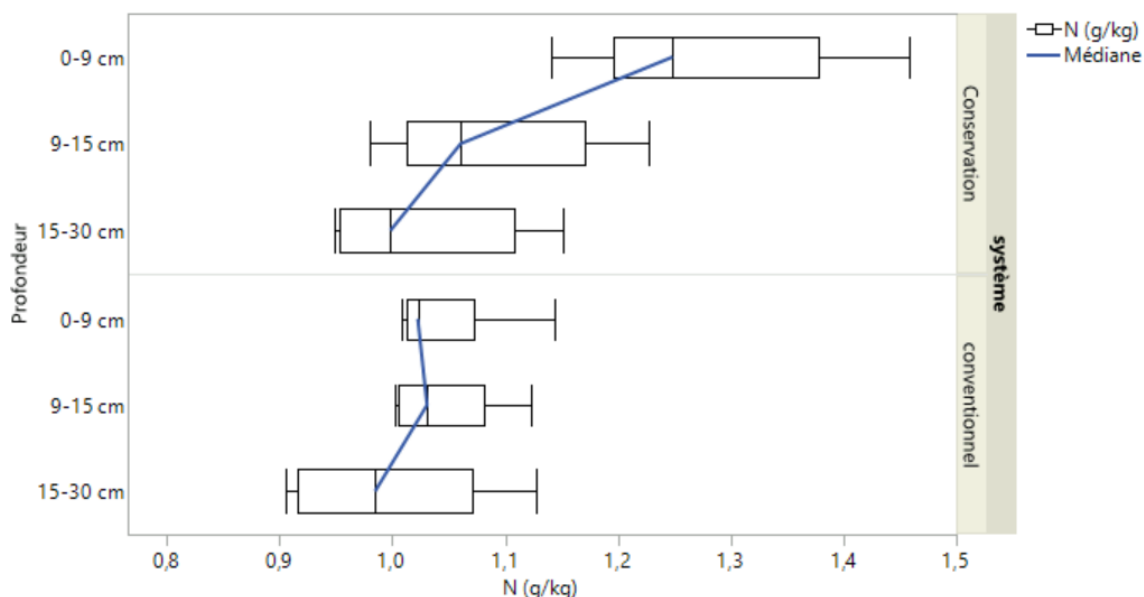


FIGURE 28 – Effet de la profondeur sur la concentration en azote en fonction du système

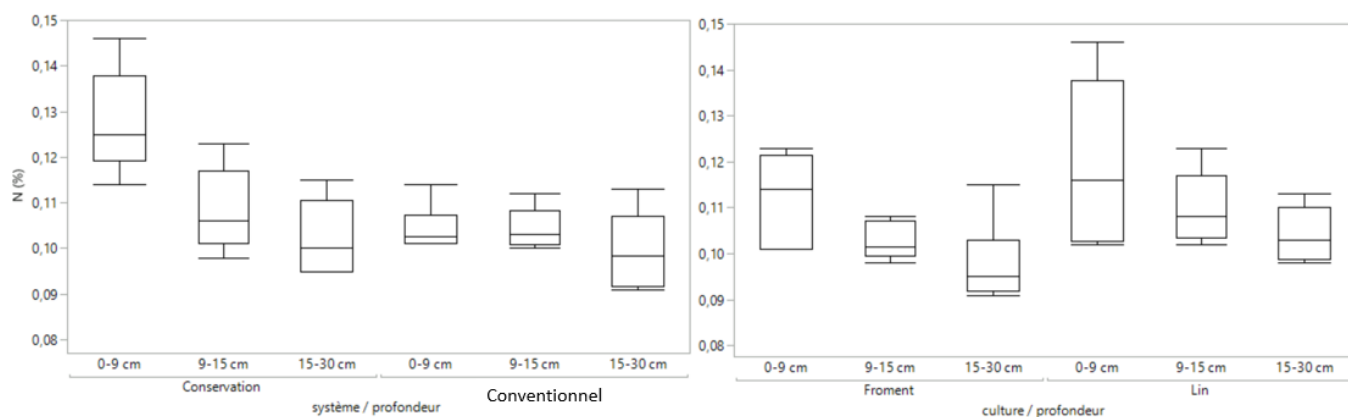


FIGURE 29 – Teneur en azote en fonction de la profondeur et du système (à gauche) ou de la culture (à droite)

La figure 29 montre les différences entre les systèmes et les cultures. Le graphique de gauche montre que les teneur en azote sont plus élevée en AC qu'en Aconv dans les couches de surface. Bien qu'une culture de couverture ait été semée sur les deux systèmes, celle en aconv a été détruite plusieurs mois avant le semis et le sol a été labouré. Les pertes par lixiviation peuvent donc être plus grande ce qui expliquerait la légère différence entre les deux systèmes.

Le graphique de droite montre que le lin a des teneurs plus élevées que le froment. Dans ce cas-ci lors de la prises des échantillons pour les mesures chimiques, le lin n'avait pas encore été semé. C'étaient les cultures de couvertures qui couvraient le champs. Ces couvertures peuvent permettre de capter plus d'azote que la culture de froment. L'un des rôles des cultures de couverture est de limiter la perte d'azote par lixiviation (Blanco-Canqui et al., 2012). Le froment ayant été semé que quelques semaines avant la récolte des échantillons il est possible que les parcelles de froment aient perdu plus d'azote par lixiviation que celles en lin.

TABLE 7 – Résultats de l'ANOVA du stock d'azote

Facteur	P-value
Système	0,01
Culture	0,11
Système*culture	0,81
Bloc	0,66

Les résultats présentés au tableau 7 sont globalement similaires à ce qui avait été observée pour le carbone. À la différence prêt que, cette fois-ci, le système a une influence significative sur le stock d'azote. Ces ressemblances sont liées au fait que la majorité de l'azote est contenue sous forme organique et est donc, en réalité, repris dans les stocks de carbone organique.

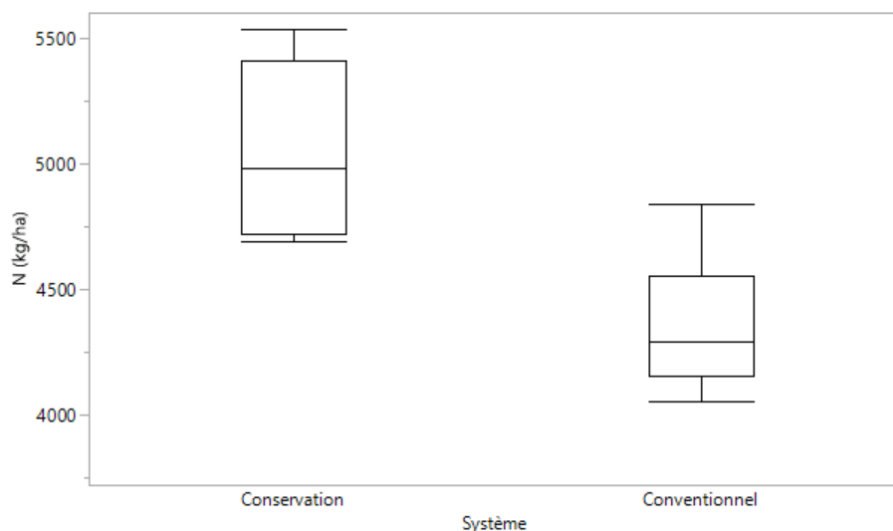


FIGURE 30 – Stock d’azote en fonction du système sur les 30 premiers centimètres

L’analyse statistique a révélé que seul le système avait une influence significative sur le stock d’azote. Ce résultat est bien visible à la figure 30. La littérature ne permet pas d’expliquer les différences étant donné que le labour n’influence pas la teneur en azote. La restitution des résidus de culture ne peut pas non plus expliquer ces différences car dans ce cas-ci les deux systèmes possèdent une culture de couverture dont les résidus sont restitués sur la parcelle on s’attend donc à avoir des résultats similaires entre les deux systèmes. La différence peut donc venir du biais induit par la différence de masse analysée entre les deux systèmes étant donné que la densité apparente en AC est plus élevée. La méthode de masse équivalente (annexes, figure 59) montre que les résultats sont plus proches, bien que toujours légèrement différents, d’un système à l’autre avec cette méthode cela permet de confirmer cette hypothèse. Il est important de noter que la culture de couverture semée dans le système conventionnel a été détruite plusieurs mois avant le semis suivant et le sol a été labouré après la destruction du couvert. La fixation d’azote est plus faible en comparaison à l’AC dont le couvert n’est détruit que fin mars. Cela permet d’expliquer la légère différence qui est observée également via la méthode de masse équivalente.

D’autres analyses chimiques ont été faites sur le rapport C/N ou encore la somme des cations échangeables ou le pH mais aucun de ces facteurs n’a révélé de différence significative que ce soit entre les cultures ou les systèmes. Ces deux indicateurs témoignent de la fertilité du sol. Étant donné qu’aucune différence n’est visible à ce niveau, la fertilité chimique des sols en Aconv et en AC semble être semblable pour les deux systèmes. Ces résultats sont disponibles en annexe (tableau 17).

5.5 Infiltrometrie

TABLE 8 – Résultats de l'ANOVA pour K_s

Facteur	P-value
Système	0,026
Culture	0,61
Système*culture	0,38
Bloc	0,44
Date	0,92

Les résultats des mesures d'infiltrations sont visibles à la figure 31. L'analyse statistique révèle que le système a un effet significatif sur l'infiltration. Ces résultats sont à interpréter avec précaution car les critères concernant la normalité des résidus pour l'ANOVA n'étaient pas respectés malgré les transformations. Ces résultats montrent que l'infiltration est, en moyenne, légèrement meilleure en Aconv qu'en AC.

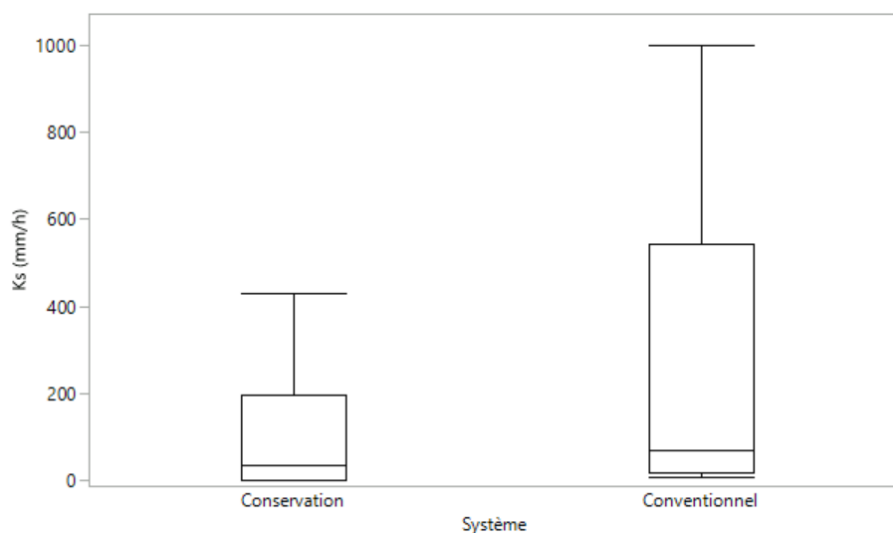


FIGURE 31 – Taux d'infiltration de l'eau en fonction du système toutes dates confondues

Selon la littérature, les résultats divergent d'une étude à l'autre et dépendent du stade de transition du système. Un système avec une AC bien installée aurait un meilleur taux d'infiltration qu'une AConv classique. Or les résultats de cette analyse montrent que ce n'est pas le cas pour les parcelles étudiées. Ce résultat pourrait donc s'expliquer par le fait que les parcelles, étant en AC seulement depuis 3 ans, sont en période de transition. Plusieurs facteurs peuvent influencer les résultats.

Durant les premières années de la transition, la compaction induite par cette transition réduit la porosité du sol ainsi que les connexions entre les pores et donc l'infiltration (Afzalinia, 2014). Les résultats nous montrent ici que l'Aconv infiltre mieux l'eau que l'AC. Il semblerait donc que la parcelle soit à un stade de la transition où l'infiltration n'est pas suffisamment améliorée par l'action des VDT qui permettent d'améliorer la porosité et l'infiltration. Le graphique 32 montre la corrélation entre la densité apparente du sol et le taux d'infiltration. Le coefficient de corrélation de -0,74 montre bien que les deux facteurs sont fortement liés. Plus la densité

augmente plus l'infiltration diminue.

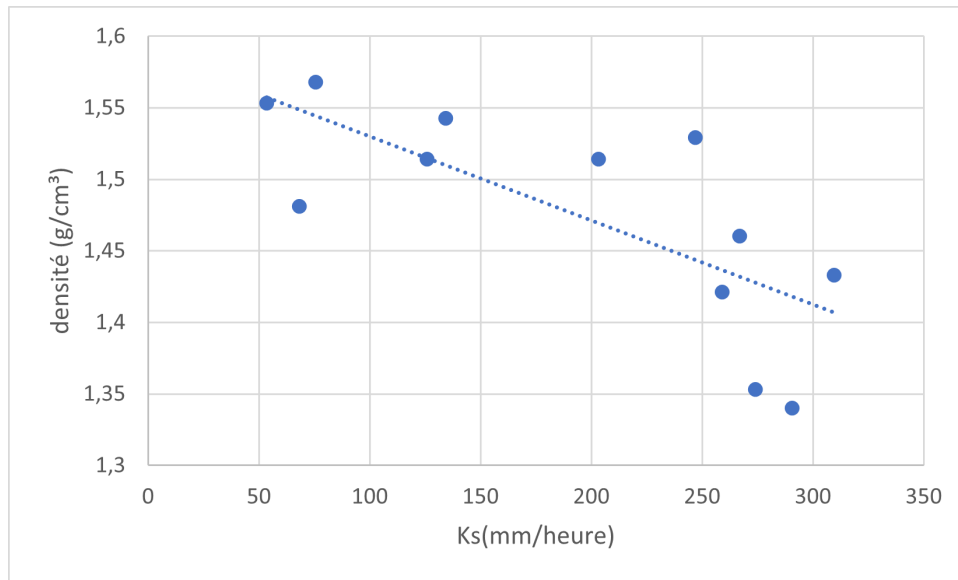


FIGURE 32 – Graphique de la corrélation entre le taux d'infiltration et la densité apparente du sol
Coefficient de corrélation :-0,74

De plus, il est intéressant de comparer ces résultats à ceux obtenus pour l'activité des VDT. En effet grâce à leurs activités, les VDT influencent positivement l'infiltration du sol (Afzalnia, 2014). Les macropores produits par les VDT en creusant leurs galeries permettent une meilleure infiltration du sol. Les résultats de l'activité des VDT montraient une plus grande activité pour l'AC en froment. Or, ce résultat n'est pas visible pour l'infiltration (figure 33). Bien que l'activité des VDT soit en faveur de l'AC, Les résultats de cette activité restaient assez faible. Un des facteurs principaux dans l'infiltration reste la compaction du sol. Le sol étant plus compact en AC, l'activité des VDT ne semble pas suffisante pour permettre une meilleure infiltration.

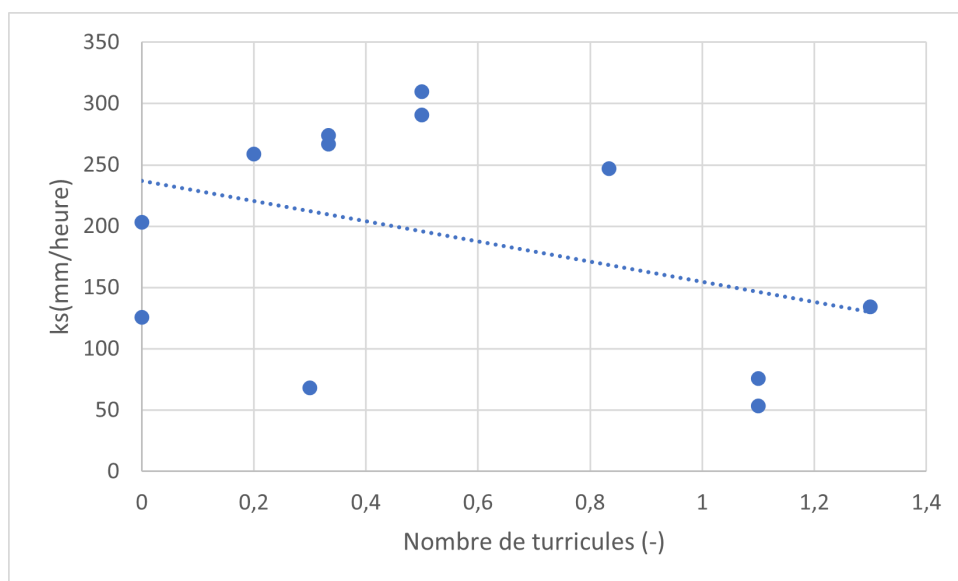


FIGURE 33 – Graphique de la corrélation entre le taux d'infiltration et l'activité des VDT
Coefficient de corrélation :-0,38

La figure 33 montre que pour l'infiltration l'activité des VDT ne permet pas d'augmenter l'infiltration au contraire plus il y a de VDT (comme c'était le cas en AC en froment) plus le taux d'infiltration est faible. Ce résultat n'est pas dû à l'activité des VDT mais à la compaction associée au système de culture comme le montre la figure 32. En effet, les VDT sont plus présent en AC (en froment) où les sol est plus compact. La faible infiltration n'a donc pas de lien avec l'activité des VDT mais bien avec la compaction

5.6 Slake test

Premièrement, avant d'analyser les indicateurs dérivés des QST, il est intéressant d'analyser l'allure générale des courbes déduites de ces mesures. Ces courbes sont disponibles à la figure 34. Seules les campagnes B et C sont analysées car la campagne A ne prenait en compte que le système conventionnel, il n'y a donc pas de comparaison à faire pour cette campagne.

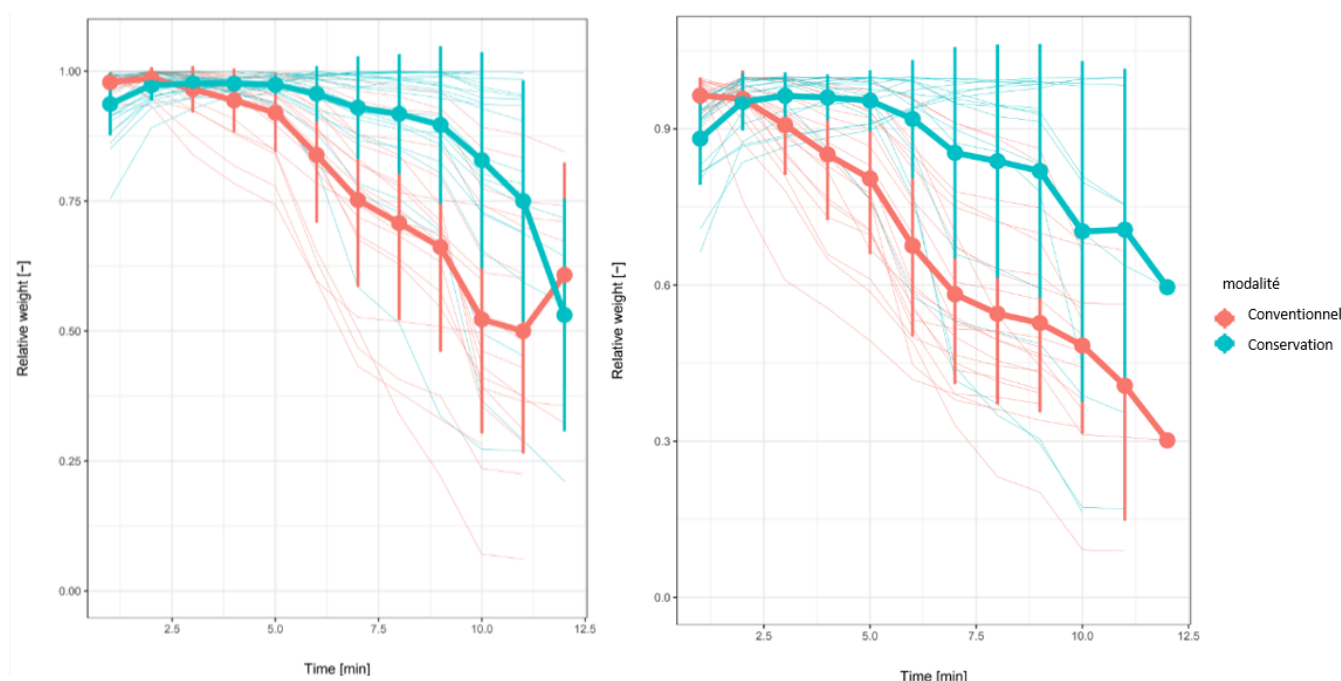


FIGURE 34 – Résultats de la campagne B (à gauche) ou C (à droite) des QST en fonction du système

La figure 34 représente la masse relative des échantillons en fonctions du temps. La figure de gauche représente la campagne B et celle de droite la campagne C. La première chose qui saute aux yeux est que la courbe des mesures en AC est majoritairement au dessus de celle en Aconv. Cela indique une meilleure stabilité des agrégats en AC.

On remarque également que la courbe de l'AC augmente au début de l'expérimentation contrairement à celle de l'Aconv. Cela signifie que l'échantillon "prends de la masse". Ce phénomène est dû au fait que les pores des échantillons se remplissent d'eau pendant que l'air se vide, ce qui lui fait gagner de la masse. Le phénomène qui lui fait perdre de la masse est la désagrégation de l'échantillon le long de l'expérience. Dans le cas de la courbe Aconv, le phénomène de désagrégation est plus fort que le gain de masse résultant du remplissage des pores par l'eau, ce qui fait que la courbe ne monte pas forcément en début d'expérience. Ce résultat montre

bien que la désagrégation de l'échantillon par effet de l'eau est plus important en Aconv qu'en AC.

Ces résultats rejoignent ce qui a été trouvé dans la littérature et résultent de différents processus. Premièrement, la décompaction du sol par le labour a pour conséquence de détruire les liens qui maintiennent la cohésion du sol. Cette baisse de cohésion fragilise les échantillons qui sont donc plus sensibles à la désagrégation. De plus, le sol étant moins compact, l'eau semble s'infiltrer plus rapidement dans les échantillons en Aconv, certainement à cause de la porosité plus élevée en Aconv. En effet la porosité étant directement liée à la densité apparente, si un échantillon est plus dense, sa porosité sera plus faible. Ce processus implique une force plus violente. En effet, si l'eau s'infiltrer plus rapidement, plus d'air doit s'échapper de l'échantillon. Lorsque cet air ne sait pas s'échapper, il applique une force qui provoque la désagrégation. Ce processus est moins violent en AC car l'air semble pénétrer plus graduellement ce qui diminue la force appliquée par l'air et permet à l'échantillon de mieux résister à la désagrégation.

5.6.1 Tmax

Parmi les indicateurs sélectionnés pour représenter le QST et donc la résistance du sol à la désagrégation, se trouve l'indicateur Tmax. Cet indicateur représente le temps séparant l'immersion de l'échantillon dans l'eau et le moment où sa masse est la plus élevée, ce qui correspond au point maximum de la courbe. Selon l'analyse statistique, le système a une grande influence sur le résultat ainsi que la culture et l'interaction système-culture. Ces résultats sont visibles à la figure 35. Les résultats sont à l'échelle logarithmique pour remplir les conditions nécessaires à une ANOVA.

TABLE 9 – Résultats de l'ANOVA pour log(Tmax) pour les campagne B et C

Facteur	P-value
Système	<0,001
Culture	<0,001
Système*Culture	<0,001
Bloc	0,36
Campagne	0,64

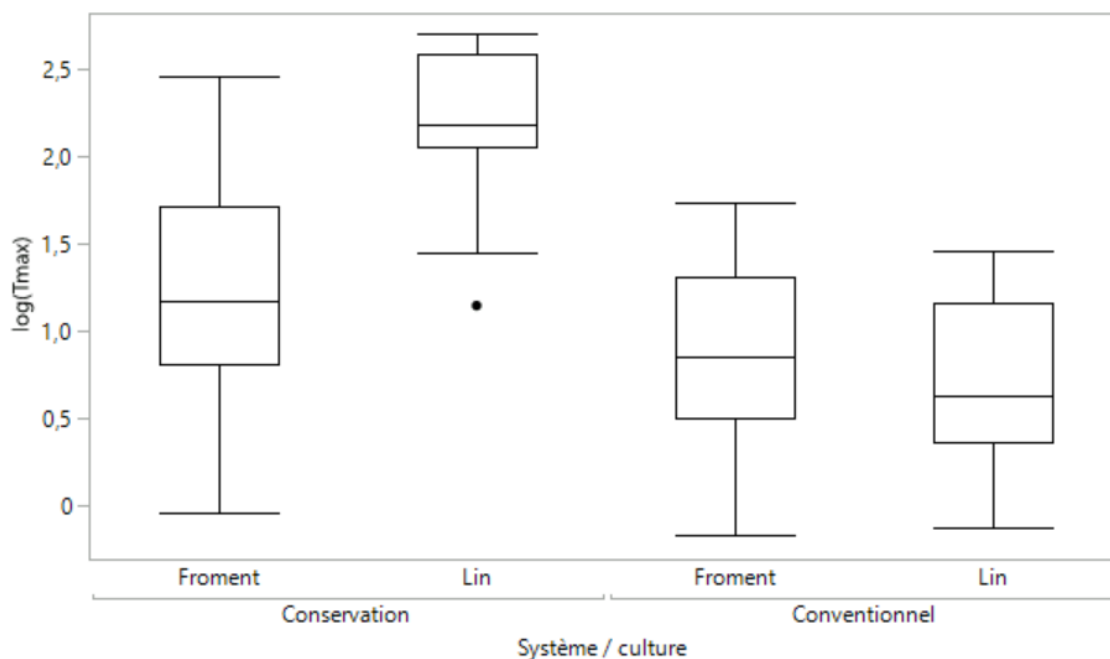


FIGURE 35 – Résultats de l'indicateur Tmax en fonction du système et de la culture pour les campagne B et C après transformation de variable : log

Durant cette expérience, 2 processus sont à l'oeuvre et s'opposent. Premièrement la perte de masse est induite par la perte de matière lors de la désagrégation et sort donc du panier pesé. Ensuite le gain de masse, lui, est caractérisé par l'expulsion de l'air présents dans les pores de l'échantillon qui est ensuite remplacé par de l'eau. L'air contenu dans l'échantillon est poussé vers le haut grâce à la poussée d'Archimède. Lorsque cet air s'échappe, la force appliquée vers le haut diminue jusqu'à disparaître lorsque tout l'air s'est échappé. La baisse de cette force s'opposant à celle de la gravité induit donc un gain de masse mesuré par la balance. Au début de l'expérience, le second processus l'emporte sur le premier, cela signifie que le gain de masse est supérieur à la perte par désagrégation. Il en résulte donc un gain de masse général pendant les premières secondes de l'expérience. Après un laps de temps un équilibre est atteint puis la tendance s'inverse, la perte de masse l'emporte sur le gain. Cet équilibre est donc caractérisé par un maximum atteint pour la masse de l'échantillon. si l'échantillon est plus stable, il perdra moins de masse par désagrégation ce qui fait que le maximum sera atteint plus tard car le gain de masse causé par l'éjection de l'air doit être plus faible pour contre-balancer la désagrégation plus faible. Le maximum sera atteint lorsque la désagrégation est plus importante que le gain de masse.

TABLE 10 – Résultats bruts pour Tmax (sec)

Modalité	Culture	Moyenne	Ecart-type	Maximum	Minimum
Conservation	Froment	47,2	79,8	284,8	0,9
Conservation	Lin	234,5	161,3	504,6	14
Conventionnel	Froment	12	12,8	53,9	0,7
Conventionnel	Lin	8,1	8,3	28,4	0,8

Ces résultats montrent assez explicitement que l'AC obtient des valeurs plus élevées que l'Aconv et ce, principalement en lin. Un premier facteur pouvant expliquer ce résultat est la

compacité du sol. En effet l'objectif du labour et de décompacter la terre. Ce travail n'ayant pas lieu en AC il est logique d'observer un sol plus compact en AC. Ce résultats est visible à la figure 24 qui représente la densité des échantillons mesurés. Une densité plus importante est signe d'un sol plus compact. La densité apparente du sol est également plus élevée en lin ce qui appuie encore une fois l'hypothèse selon laquelle la compaction joue un rôle important dans la résistance à la désagrégation. La corrélation entre ces deux paramètre est visible à la figure 36.

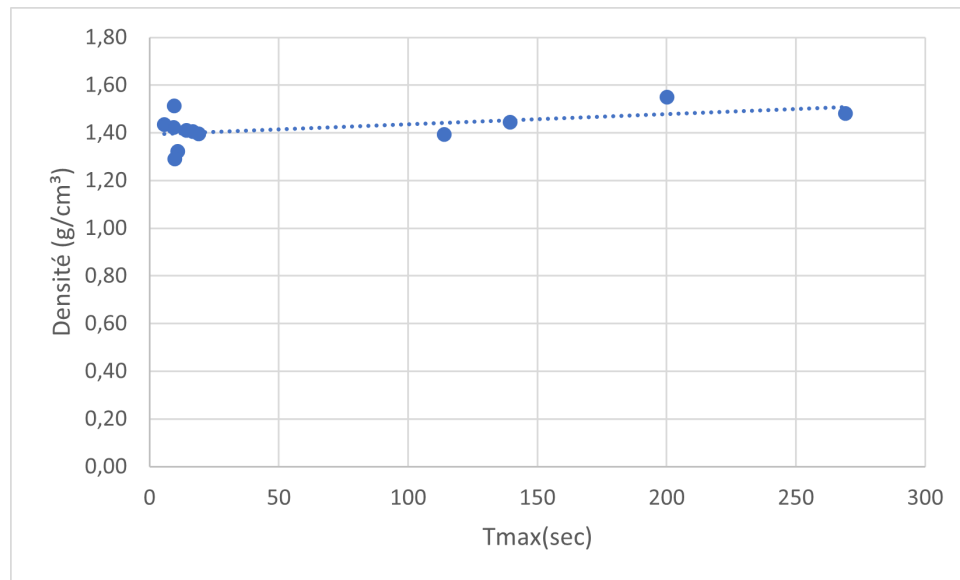


FIGURE 36 – Graphique de la corrélation entre la densité apparente du sol et Tmax
Coefficient de corrélation :0,54

Un second facteur permettant d'expliquer ces résultats est la teneur en carbone. En effet, cette teneur permet de stabiliser le sol grâce aux liens organo-minéraux et aux polysaccharides. L'échantillon étant plus stable, Tmax sera atteint plus tard. Le coefficient de corrélation entre Tmax et la teneur en carbone organique vaut 0,57 (tableau 1) ce qui permet de montrer le lien entre ces deux paramètres. Il est important de noter que les deux processus à l'oeuvre que sont le gain de masse par le remplissage des pores et la perte de masse par désagrégation ont lieux en même temps et il n'est pas possible avec cette méthode de différencier l'un de l'autre.

L'indicateur SImax représentant la pente entre T0 et Tmax. Il montre la même tendance que Tmax et est disponible en annexes (figure 86).

5.6.2 Wend

Wend correspond à la masse relative de l'échantillon à la fin de la mesure. Il s'agit d'un indicateur important car il prend en compte la totalité de la mesure et donc de la courbe. Bien qu'il soit légèrement influencé par la durée de la mesure il est important de l'analyser car il prend en compte la totalité de l'expérience et est le seul indicateur à rendre compte de la désagrégation totale. Un Wend plus élevé signifie que l'échantillon est plus stable car il aura perdu moins de matière durant l'expérience.

TABLE 11 – Résultats de l'ANOVA pour Wend

Facteur	P-value
Système	<0,001
Culture	<0,001
Système*Culture	<0,001
Bloc	0,08
Campagne	0,4

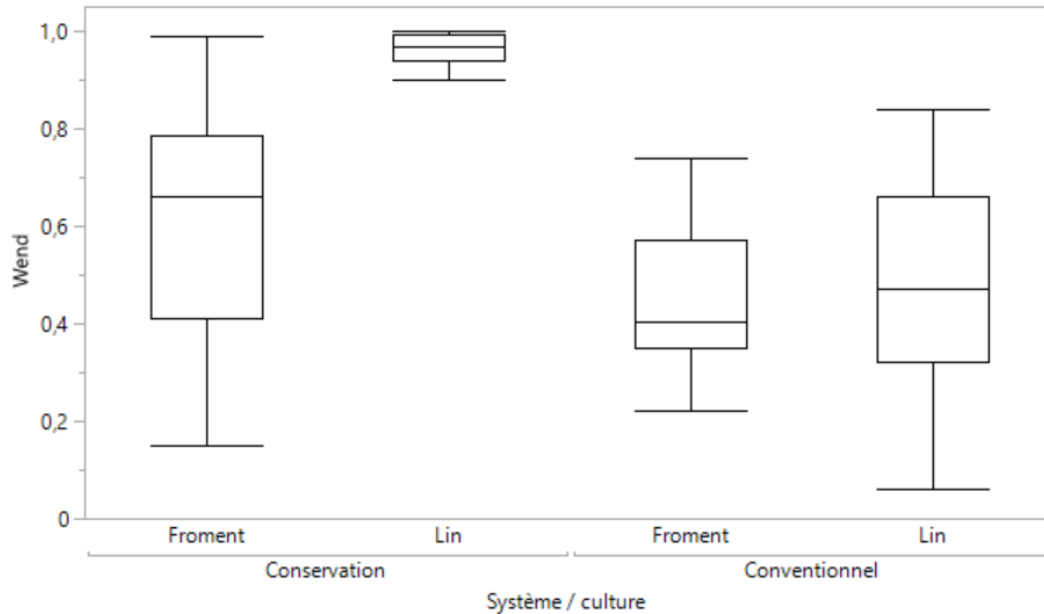


FIGURE 37 – Résultats pour Wend en fonction du système et de la culture

Tout comme pour Tmax, Wend est fortement influencé par le système avec un Wend plus élevé pour l'AC que l'AConv. De nouveau cette différence est encore plus frappante lorsqu'il s'agit du lin. Par contre en Aconv, la culture a peu ou pas d'influence sur le résultat. Cette mesure suit donc ce qui a été énoncé dans la rubrique précédente. Les raisons sont les mêmes que pour Tmax. La résistance est due à la teneur en carbone (coefficient de corrélation de 0,77) (figure 38) ainsi que la densité du sol (coefficient de corrélation de 0,57) (tableau 1)

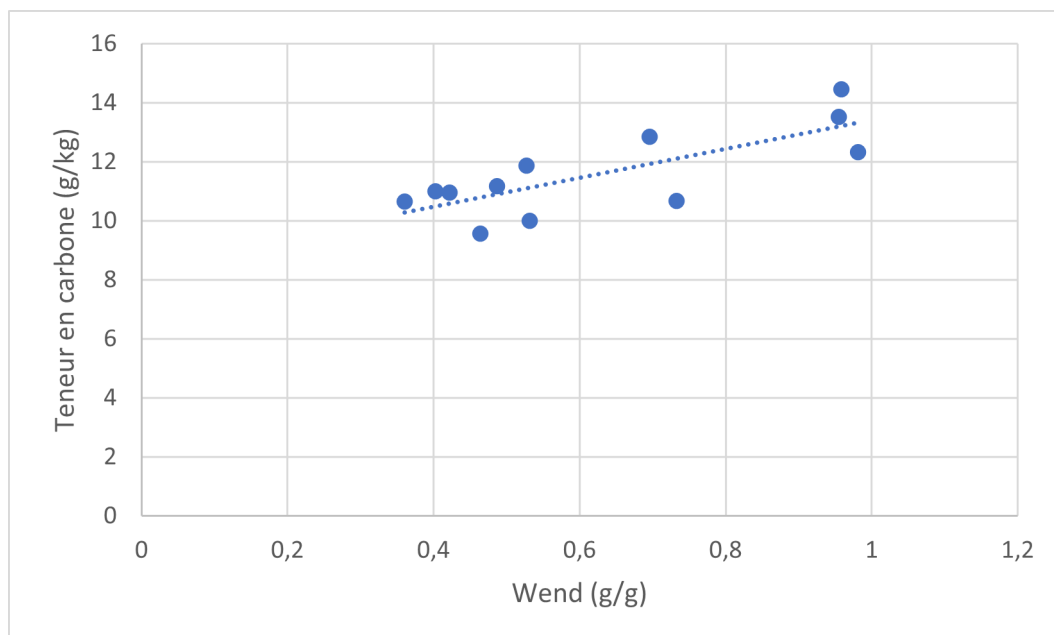


FIGURE 38 – Graphique de la corrélation entre la teneur en carbone organique et Wend
Coefficient de corrélation : 0,77

5.6.3 SI30

Les indicateurs SI représentent la pente après un certain temps. Dans ce cas-ci, le SI30 représente la pente après 30 secondes. Une pente plus élevée résulte d'une désagrégation plus rapide car la masse relative est plus basse après cette période de temps.

TABLE 12 – Résultats de l'ANOVA pour racine carrée(SI30)

Facteur	P-value
Système	<0,001
Culture	0,11
Système*Culture	0,1
Bloc	0,92
Campagne	0,01

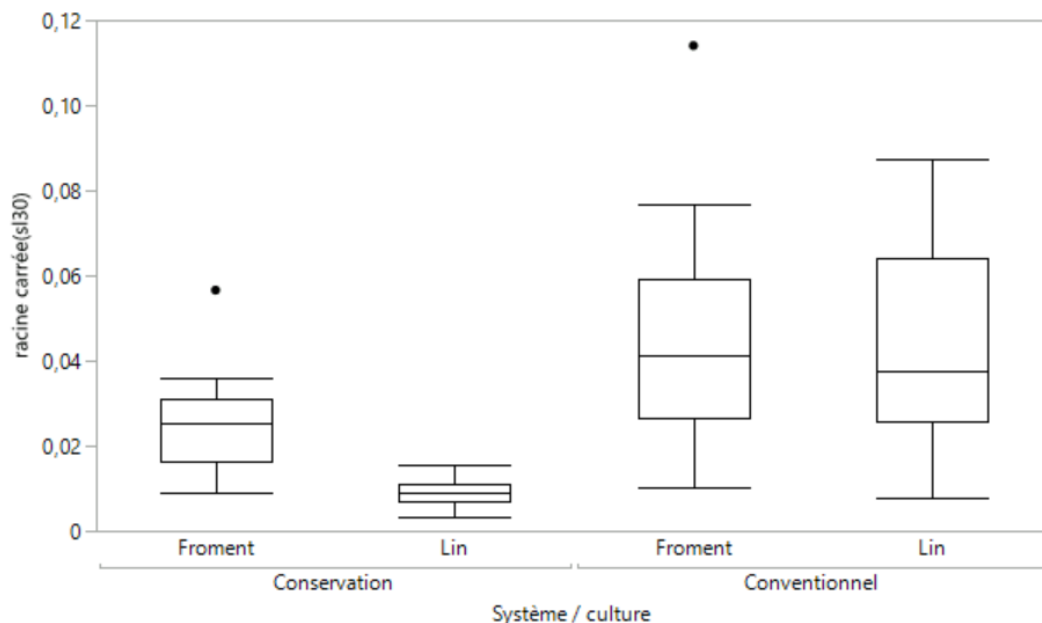


FIGURE 39 – Résultats pour S130 en fonction du système et de la culture après transformation de variable : racine carrée

On voit sur la figure 39 que les pentes en AC sont plus faibles qu'en Aconv, c'est-à-dire une désagrégation plus rapide pour l'Aconv. Cette fois-ci l'analyse statistique est moins fiable car l'hypothèse de l'homogénéité des résidus n'a pas pu être respectée malgré les transformations. La transformation appliquée ici est la racine carrée des résultats, pour valider l'hypothèse de normalité. Mais le résultat est néanmoins intéressant à interpréter. Cette fois-ci, la culture n'a plus d'influence significative. Contrairement aux autres indicateurs (Tmax et Wend) la campagne a une influence significative sur le résultat en plus du système de culture.

Les raisons sont les mêmes que pour les autres indicateurs. Il s'agit principalement de la compacité du sol (coefficient de corrélation de 0,52) et la teneur en carbone organique (coefficient de corrélation de 0,58) permettant des liaisons organo-minérales qui permettent au sol de mieux résister à la désagrégation et donc avoir une pente plus douce.

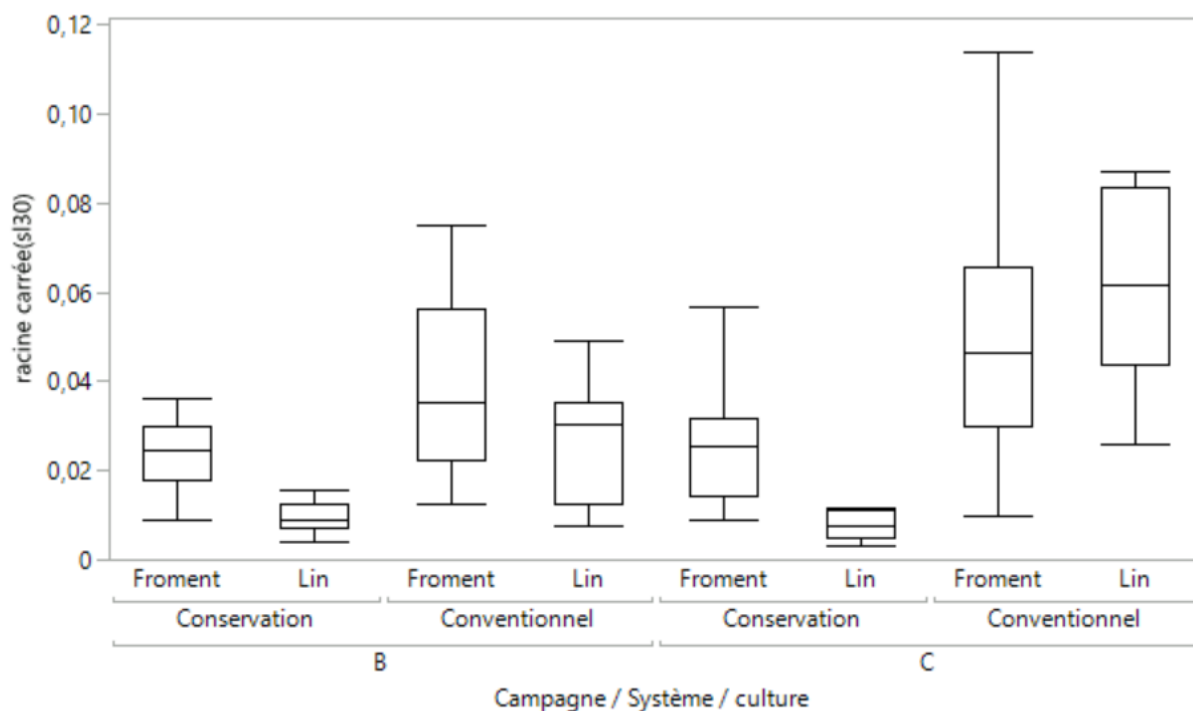


FIGURE 40 – Influence de la campagne sur SI30 en fonction du système et de la culture

La figure 40 montre l'influence de la campagne. Alors qu'elle n'avait pas d'influence sur la résistance générale à la désagrégation, il apparaît qu'elle a un effet significatif sur la vitesse du processus (tableau 12). Les résultats montrent que la pente de la campagne C (juin) est plus forte et moins homogène que la campagne B (mars).

Ce résultat peut être expliqué par la dégradation des liants dans le sol. Les polysaccharides ont une grande influence sur la résistance à l'eau des agrégats. Or ces éléments ont un temps de vie très court à l'échelle de la culture. En effet les polysaccharides disponibles au début de la culture grâce aux restitutions de cultures précédentes sont rapidement consommés par les micro-organismes (Tisdall et al., 1982). Il est donc normal d'observer une stabilité baissant au fur et à mesure de la culture. Cette observation est plus visible en Aconv pour le lin que pour le froment. Cela est expliqué par le fait que lors de la récolte des échantillons de la campagne B, le froment avait déjà été semé depuis plusieurs semaines. Cela signifie que les polysaccharides ont probablement déjà été dégradés en froment au moment de la campagne B. La différence est presque exclusivement visible en lin Aconv. Le lin en AC est moins affecté par cette dégradation car une grande partie de la stabilité de ces échantillons est conférée par la compacité des échantillons. Les polysaccharides jouent donc proportionnellement un rôle moins important.

Le stade de culture influence également les systèmes racinaires. La présence de racines plus développées permet une meilleure stabilité du sol. Les racines étant plus développées en fin de culture, cela va contre les observations de la figure 40. En réalité les polysaccharides ont une plus grande influence sur la stabilité des échantillons dans l'eau (Tisdall et al., 1982). Cela signifie que la croissance des racines bien qu'elles stabilisent les échantillons, ne suffisent pas à contrer la perte de stabilité due à la perte des polysaccharides. On observe donc ici 2 phénomènes opposés simultanément qui ne peuvent pas être discernés l'un de l'autre.

Une autre mesure de la pente (SI60) est disponible en annexe (annexes, figure 87) ainsi que l'influence de la campagne de cet indicateur (annexes, figure 88). Étant donné que les tendances sont les mêmes que pour SI30, il n'a pas été jugé utile de les commenter. C'est également le cas de T25, T50 ainsi que T75 qui correspondent au temps qu'il faut pour que l'échantillon perde un pourcentage de sa masse relative (respectivement, 25%, 50% et 75%) (annexes, figures 89, 91 et 93) ainsi que l'influence de la campagne sur ces indicateurs (annexes, figures 90, 92 et 94).

5.6.4 Résumé des effets du QST

Pour conclure cette section, il est intéressant de faire un résumé des effets relevés par le QST. Premièrement tous les indicateurs ont révélés une meilleure stabilité des agrégats pour l'AC et particulièrement en lin. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces résultats. Premièrement, les résultats précédents montraient que l'AC possédait une teneur en carbone organique plus élevée que l'Aconv dans la couche analysée (0-9 cm) (figure 26). La teneur en carbone organique est directement liée à la teneur en MO. Cette MO a une importance sur la stabilité des agrégats, soit sous forme d'éléments persistants contenus dans l'humus, soit sous forme d'éléments temporaires comme les racines ou les hyphes soit comme élément transitoires comme les polysaccharides produits par les micro-organismes (Tisdall et al., 1982). Ces résultats montrent que la stabilité est améliorée par la présence de carbone organique.

Les cultures de couverture ont également un rôle. Elles permettent principalement de restituer de la MO sur le champ et donc permettre une meilleure teneur en carbone organique (bien que l'apport des cultures de couverture soit relativement faible par rapport au stock total) et ainsi permettre les processus cités précédemment. En plus de cela elles permettent de nourrir les VDT qui ont également un rôle dans la stabilité des agrégats. En absorbant une partie de la MO, ils vont permettre de mélanger cette MO au sol dans leurs intestins qui permettront de faire des lien organo-minéraux (Swaby, 1950).

La densité apparente du sol est également un facteur qui a une grande influence sur la stabilité des agrégats. L'importance de la compaction du sol pour la stabilité a été prouvée par les différents coefficients de corrélations qui sont disponible au tableau 1.

Une autre observation intéressante est le fait que la campagne ait une influence ou non sur la stabilité du sol. La campagne influence les indicateurs SI30, SI60, T25, T50 et T75 mais elle n'influence pas Tmax, SImax et Wend. La différence entre ces types d'indicateur est que les premiers, qui sont influencés par la campagne, représentent principalement la cinétique de l'expérience de désagrégation. Ce qui signifie que la campagne a une influence sur la cinétique mais pas sur la désagrégation totale. On peut considérer que SImax prend également en compte la cinétique mais dans ce cas-ci, cet indicateur est plus influencé par le gain de masse par l'eau qui pénètre l'échantillon que par la désagrégation de l'échantillon.

Les résultats influencés par la campagne montrent que les échantillons provenant de la première campagne sont plus stables que ceux de la seconde. De nouveau, deux processus

s'opposent. Premièrement plus la culture est avancée, plus les racines sont développées et permettent d'améliorer la cohésion du sol. Or c'est le contraire qui est observé ici avec une perte de cohésion. Cette perte de cohésion est expliquée par le deuxième processus qu'est la dégradation des polysaccharides. Ce résultat est plus visible en lin qu'en froment car la campagne B a pris place au début de la culture de lin alors que le froment était déjà semé depuis plusieurs mois ce qui fait que les polysaccharides étaient déjà partiellement dégradés. De plus, ces résultats montraient aussi une plus grande différence entre les campagnes pour l'Aconv. Ce résultat est quant-à lui influencé par la stabilité générale de l'échantillon. Les résultats des indicateurs de la stabilité du sol montrent que les échantillons en AC sont globalement plus stables que ceux en Aconv certainement grâce à la compacité du sol. De ce fait, la dégradation des polysaccharides a plus d'effet sur l'Aconv car ces derniers jouent proportionnellement un rôle plus important en Aconv.

5.7 Courbe de rétention

5.7.1 θ_s

θ_s est un indicateur qui correspond à la teneur en eau à saturation. Cette teneur en eau correspond donc à la teneur à une succion de 0 cm lorsqu'aucune tension n'agit sur le stock. De nouveau l'hypothèse de normalité n'a pas pu être respectée et les résultats sont donc à analyser avec précaution.

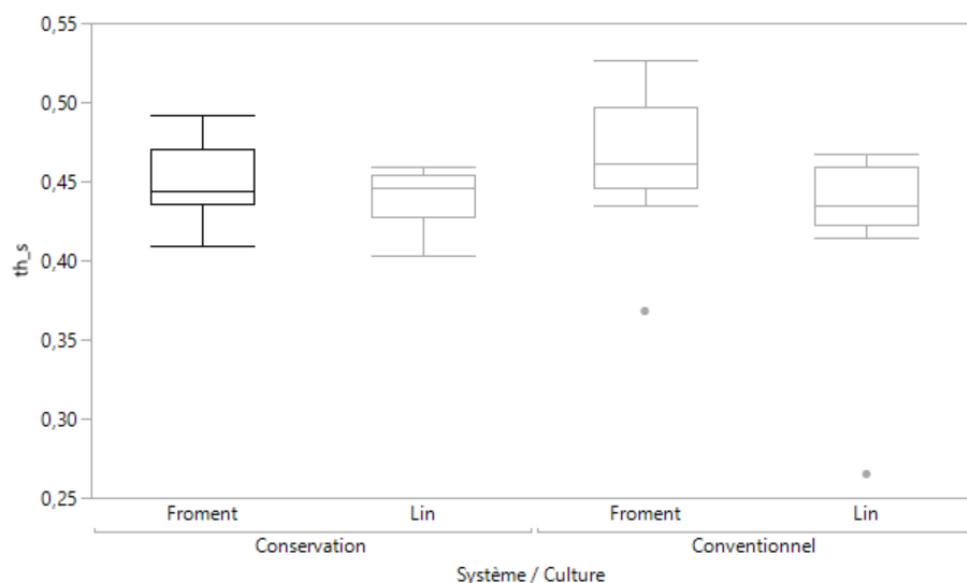


FIGURE 41 – Résultats pour θ_s en fonction du système et de la culture (juin 2022)

De nouveau, les conditions de l'ANOVA n'ont pas pu être respectées mais aucune différence significative ne semble être relevée entre les systèmes et les cultures. Ce résultat lié au résultat de l'indicateur "n", présenté plus tard, montre que la porosité totale ainsi que la répartition de la taille des pores est identique entre les deux systèmes.

θ_s est un indicateur révélant la porosité totale du milieu étudié. En effet la saturation signifie que tous les pores sont remplis d'eau. Un θ_s plus grand signifie plus d'eau stockée ce qui est le résultat d'une plus grande porosité. Il ne faut pas le confondre avec l'indicateur n qui mesure la

répartition de ces pores.

Les articles trouvés dans la littérature expliquaient que la porosité du sol en fonction du système était principalement impacté par deux processus (VandenBygaart et al., 1999). Premièrement, la densité des sol en AC est plus grande que celle en Aconv (figure 24). Cette densité induit une plus grande compaction pour l'AC. Cette compaction résulte d'un écrasement des pores qui sont alors réduit de taille et peuvent également disparaître. La compaction induit donc une perte de porosité. Cependant, la compaction reflète directement la porosité du sol. Cela signifie que les sol analysés pour la courbe de rétention ont globalement la même densité. Dans ce cas-ci, les densités présentées ne sont pas les mêmes que dans les section précédentes. Cela est certainement dû aux différences de dates de prélèvement ainsi que de la profondeur de l'échantillon. Étant donné qu'il s'agit d'échantillons de surfaces, les densité sont susceptibles de changer au cours de la culture et des conditions climatologiques. Ces nouvelles densité sont visibles à la figure 42. Avec ces nouvelles densité apparentes, le système n'a plus d'influence significative. Ce qui correspond donc mieux aux résultats de θ_s

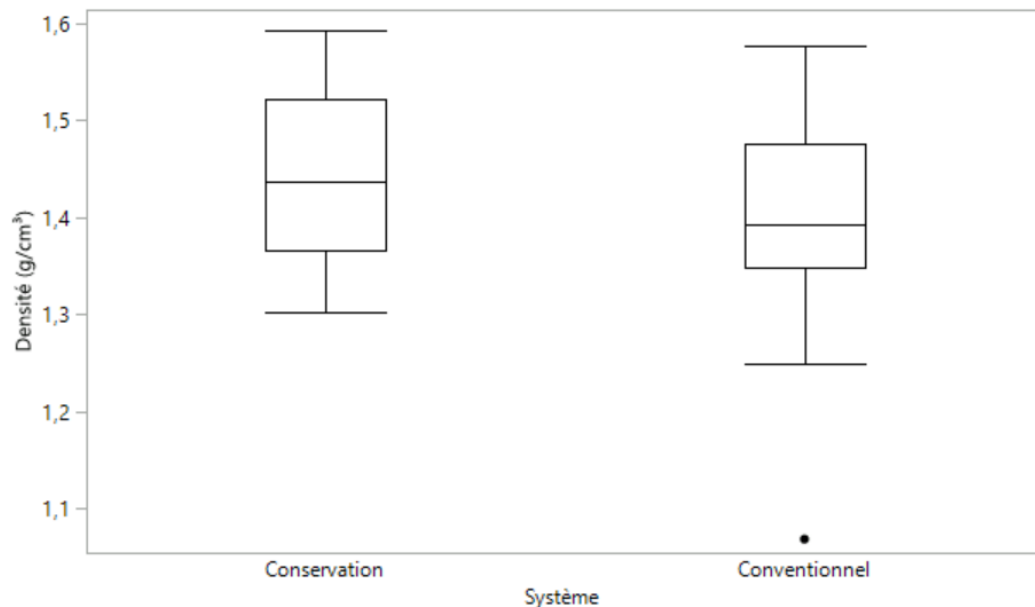


FIGURE 42 – Densité apparente pour les échantillons utilisés pour mesurer la courbe de rétention d'eau en fonction du système

La figure 43 montre la corrélation entre la densité apparente du sol et θ_s . Le coefficient de corrélation est de -0,68. Cela montre bien que plus la densité est élevée, plus θ_s sera faible. Cette corrélation pourrait être plus élevée mais les valeurs de θ_s sont des valeurs extrapolées avec la courbe de van Genuchten et non des valeurs mesurées ce qui peut expliquer une légère baisse dans le coefficient de corrélation.

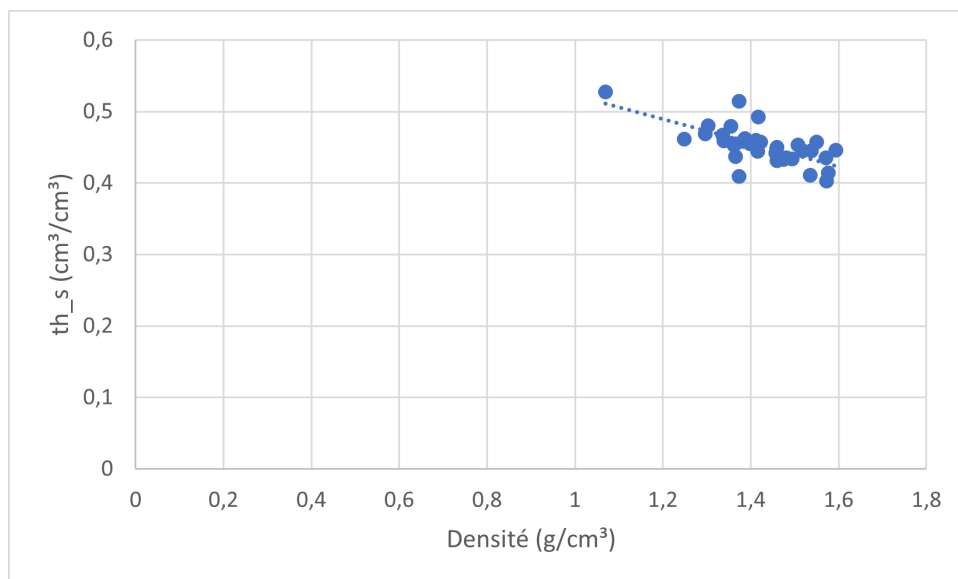


FIGURE 43 – Graphique de la corrélation entre la densité et la teneur en eau à saturation
Coefficient de corrélation :-0,68

Le deuxième processus impactant la porosité est directement lié au premier. Il s'agit de l'activité des VDT. Les résultats de la mesure concernant l'activité biologique indiquaient une plus grande activité des VDT pour les parcelles en AC. Cette meilleure activité permet aux VDT d'améliorer la porosité du sol en creusant des galeries dans ce dernier, qui peuvent donc être utilisées par l'eau pour s'infiltrer ou être stockée. Les résultats de cette activité montraient également que bien que l'activité soit plus grande en AC, elle restait relativement faible. Ce qui explique que la différence de porosité n'est pas visible ici. L'activité des VDT n'est pas encore suffisante pour contrer les effets de la compaction concernant la porosité. C'est ce qui avait été trouvé dans la littérature (VandenBygaart et al., 1999). Le stade de transition influence grandement l'activité biologique. Au début de la transition la porosité est plus faible mais sera améliorée avec le temps et sera même meilleure qu'en Aconv après cette période de transition. Les parcelles étudiées étant en AC seulement depuis 2019, la transition n'est pas encore assez avancée pour observer une meilleure porosité en AC.

5.7.2 α

L'indicateur α est un paramètre qui correspond à l'inverse du point d'entrée d'air. C'est lorsque ce point est atteint que les pores se vident et que la courbe de rétention commence à chuter. Un alpha plus grand fera retomber la courbe plus vite.

TABLE 13 – Résultats de l'ANOVA pour $\log(\alpha)$

Facteur	P-value
Système	0,04
Culture	0,67
Système*Culture	0,8
Bloc	0,25

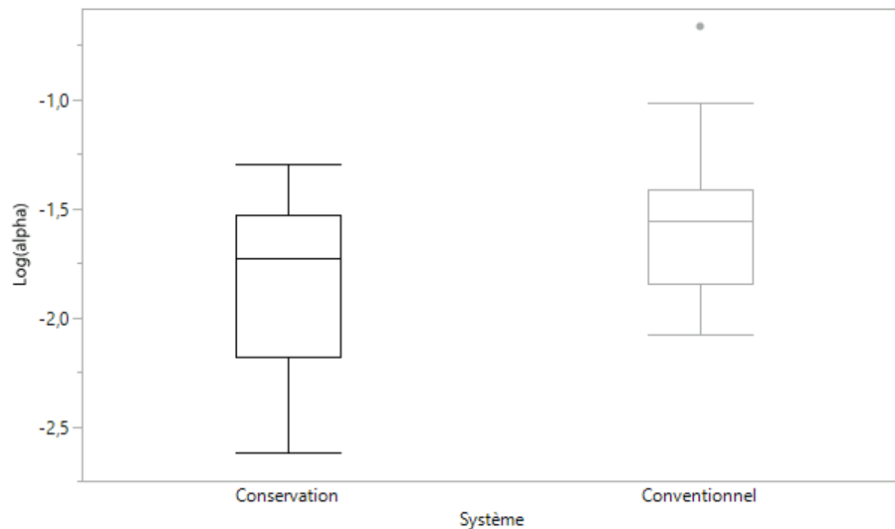


FIGURE 44 – Résultats pour α en fonction du système après transformation de variables : log

L'analyse statistique indique une différence significative entre les deux systèmes. En AC, le paramètre α est plus faible qu'en Aconv. Cela signifie que les pores vont commencer à se désaturer moins facilement en AC qu'en Aconv. Cela peut s'expliquer par une moins bonne connexion entre les pores en AC qu'en Aconv. On peut y voir un lien avec les mesures d'infiltration. Ces mesures montraient une meilleure infiltration en Aconv qu'en AC. L'infiltration permet également de désaturer le sol en permettant à l'eau de s'écouler dans les profondeurs du sol pour rejoindre la nappe phréatique. Le fait que les pores se désaturent moins facilement en AC peut être bénéfique comme néfaste. En effet pour la rétention d'eau c'est un avantage car ça ralentira la chute de la courbe de rétention. Par contre, cela peut également limiter l'aération du sol et l'infiltration comme cité précédemment ce qui peut faciliter la formation d'une lame d'eau en surface de parcelle qui peut provoquer un ruissellement et de l'érosion.

5.7.3 n

Le paramètre "n" de l'équation de van Genuchten est un paramètre prenant en compte la répartition de la taille des pores du sol. Le paramètre n est un paramètre adimensionnel. Pour ce paramètre, l'hypothèse de normalité de l'ANOVA n'a pas pu être respectée ce qui fait perdre en fiabilité les résultats analysés. Néanmoins la figure 45 représente ces résultats.

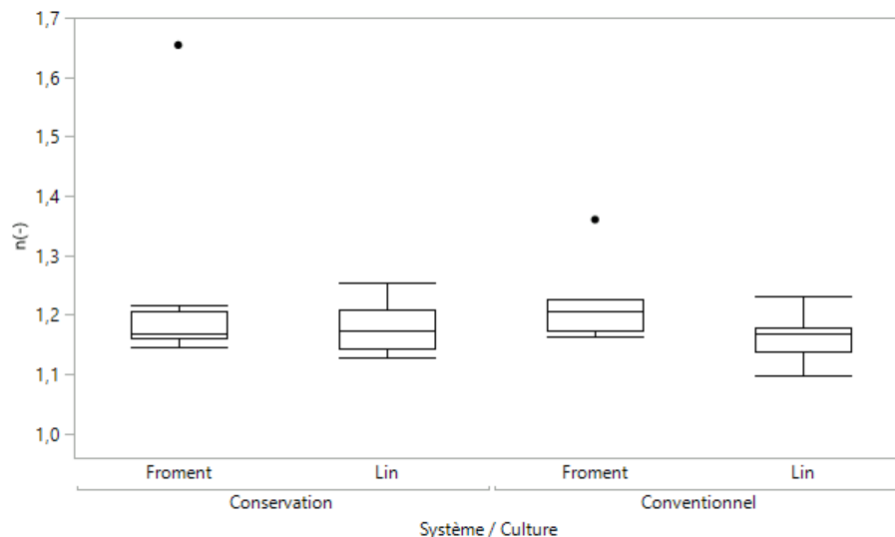


FIGURE 45 – Résultats pour n en fonction du système et de la culture

Aucune différence significative ne dégage de cette analyse. Selon ces résultats, la répartition de la taille des pores est la même pour les deux systèmes et les deux cultures comme le montre la figure 45.

5.7.4 θ_r

θ_r correspond à la teneur en eau résiduelle. Il s'agit de l'eau qui ne peut pas être extraite du sol. Il s'agit donc d'eau immobile et inaccessible pour la plante. Cette teneur en eau n'est donc pas sujette à la structure du sol mais bien à sa texture. Les parcelles analysées ont globalement la même texture. Les résultats ne diffèrent donc pas d'un système à l'autre ou d'une culture à l'autre. Ces résultats ne sont pas intéressants à analyser car la plupart valent 0, selon la courbe de van Genuchten. Cela signifie qu'il n'y a pas d'eau résiduelle. Encore une fois les résultats sont à analyser avec précaution. N'ayant pas de donnée pour cette mesure, il s'agit d'une extrapolation de la courbe de van Genuchten ce qui rend cette mesure peu fiable. Aucune ANOVA n'a été réalisée pour cet indicateur.

5.7.5 θ_{CC}

La teneur en eau à CC correspond au maximum que le sol peut stocker sans se vider trop facilement. La CC se trouve à pF 2,5. Il s'agit de la limite pour laquelle l'eau sera utilisable. Bien que le critère de normalité n'a pas pu être respecté pour l'ANOVA, toutes les transformations révélaient une différence significative entre les deux systèmes. Les résultats sont présentés à la figure 46.

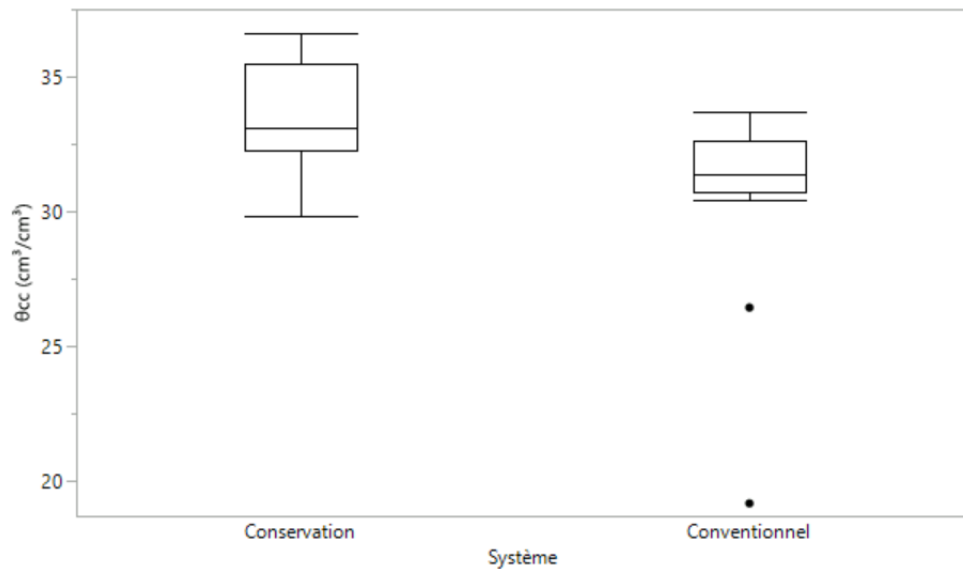


FIGURE 46 – Résultats de θ_{CC} en fonction du système (cm³/cm³)

Ces résultats démontrent que l'AC a une plus grande CC que l'Aconv. La différence entre ces deux systèmes peut venir de la porosité du sol. Un θ_{CC} plus élevé signifie qu'il y a plus de micropores et de mésopores. Cela signifie que l'AC possède plus de micropores et de mésopores que l'Aconv. Étant donné que les deux systèmes ont la même porosité totale cela signifie également que les parcelles en AC possèdent moins de macropores que l'Aconv. Malgré tout, les différences restent faibles et étant donné que l'hypothèse de normalité de l'ANOVA n'était pas respectée, ces résultats peuvent perdre en fiabilité.

Ces résultats sont en lien avec ce qui a été trouvé pour le paramètre α . Le fait que le point d'entrée d'air soit à une succion plus élevée permet de retarder la pente de la courbe de rétention. Ce qui permet à la CC, qui se situe à une succion fixe, d'avoir une meilleure teneur en eau à cette succion étant donné que θ_s est similaire. Un paramètre α plus faible et donc un point d'entrée d'air plus élevé permettra généralement une teneur en eau plus élevée par rapport à la succion appliquée.

5.7.6 θ_{PF}

θ_{PF} correspond à la teneur en eau au PFP. C'est à dire que l'eau n'est plus disponible pour les besoins de la plante. La succion que devrait appliquer la racine est trop élevée ce qui rend l'eau immobile. Il s'agit d'un point de mesure important car il pose une limite pour le stock d'eau utilisable par la plante.

TABLE 14 – Résultats de l'ANOVA pour θ_{PF}

Facteur	P-value
Système	0,046
Culture	<0,001
Système*Culture	0,089
Bloc	0,95

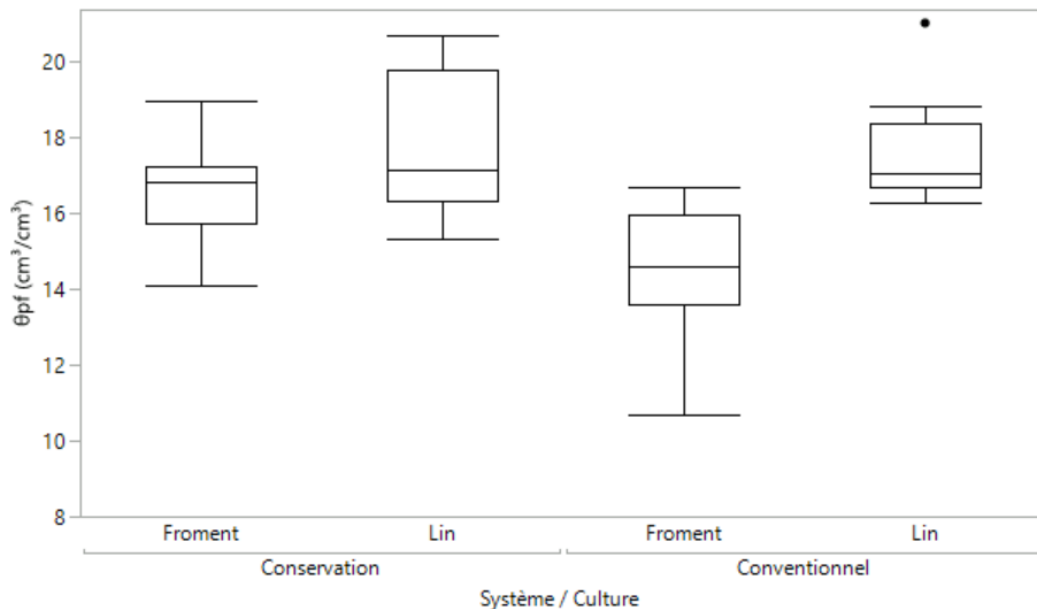


FIGURE 47 – Résultats pour θ_{PF} en fonction du système et de la culture (cm^3/cm^3)

Tout comme pour θ_{CC} , l'analyse statistique révèle une différence significative entre les systèmes. De plus, cette fois, la culture a également un effet significatif. La figure 47 montre que pour le système, θ_{PF} est plus grand en AC qu'en Aconv en froment. En lin les résultats sont globalement les mêmes entre les deux systèmes. Dans les deux systèmes, le lin a un θ_{PF} plus élevé que le froment.

Les échantillons analysés pour cette mesure sont des échantillons déstructurés. Ce qui fait que les différences observées ne peuvent pas venir de la structure du sol. De plus, la texture du sol ne peut pas être la cause non plus étant donné que les différentes parcelles ont toutes la même texture et donc le même taux d'argile. Ces différences ne peuvent être expliquées que par la chimie du sol.

Les mesures de teneurs de carbones montraient un plus grand taux de carbone en AC qu'en Aconv en surface. Ce résultat est en lien avec la teneur en eau à pF 4,2. En effet, le carbone est un élément avec une grande surface spécifique. Ce qui signifie que plus de molécules d'eau peuvent s'adsorber à sa surface. Par contre, la teneur en carbone ne montrait pas de différence significative d'une culture à l'autre. Malgré tout, ce résultat était proche d'une influence significative (p-valeur de 0,066).

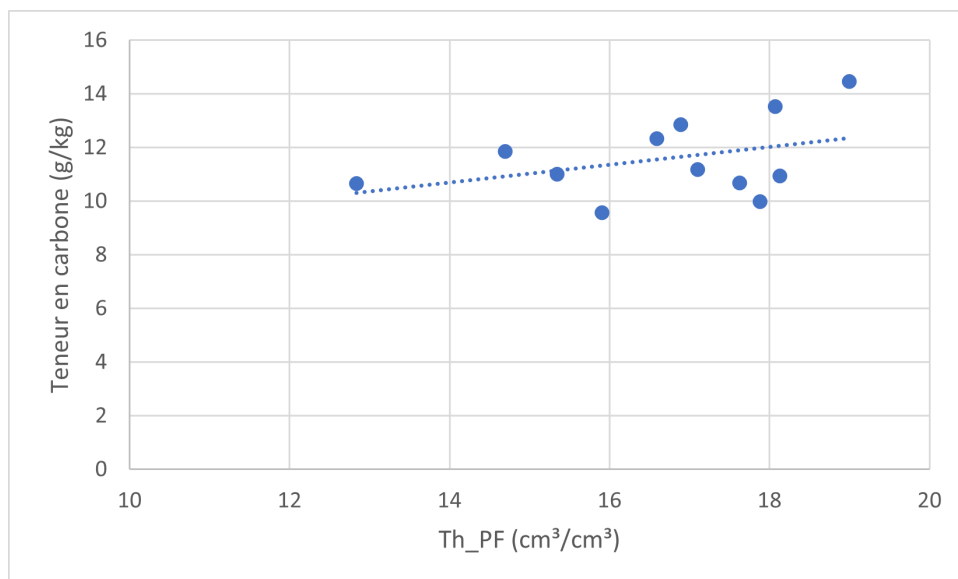


FIGURE 48 – Graphique de la corrélation entre la teneur en carbone organique et la teneur en eau au point de flétrissement permanent
Coefficient de corrélation :0,4

La figure 48 montre le lien entre la teneur en carbone et θ_{PF} . Étant donné que les échantillons ayant servi à mesurer θ_{PF} ont été pris en surface, seule la teneur en carbone en surface est utilisée en terme de comparaison. Ces résultats semblent confirmer l'hypothèse selon laquelle la surface spécifique du carbone est la raison pour laquelle l'AC ainsi que le lin ont des mesures plus élevées.

5.7.7 Réserve utile en eau

La RUE est l'indicateur le plus important pour la rétention d'eau. Il s'agit de la différence entre la CC et le PFP. Cet indicateur représente donc le stock d'eau global utilisable par la plante. Ni trop mobile comme la teneur en eau entre θ_s et θ_{CC} qui quitte le sol trop vite par infiltration. Ni trop peu mobile comme la teneur en eau à θ_{PF} qui demande une trop grande force de succion pour être mobilisé pour la plante.

TABLE 15 – Résultats de l'ANOVA pour RUE

Facteur	P-value
Système	0,13
Culture	0,54
Système*Culture	0,7
Bloc	0,75

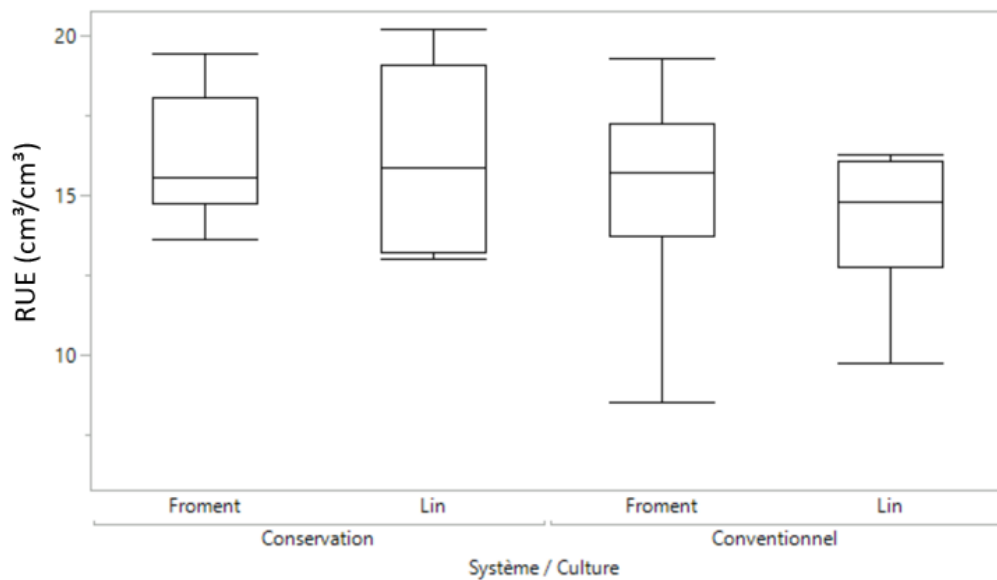


FIGURE 49 – Résultats pour RUE en fonction du système et de la culture

L'analyse statistique révèle qu'il n'y a pas de différence significative entre les systèmes ou les cultures. En effet, les parcelles en AC ont une meilleure teneur en eau à CC et une teneur en eau plus élevée au PFP. Ces différences étaient globalement les mêmes entre les deux indicateurs. Ce qui résulte que la différence entre les 2 (θ_{CC} et θ_{PF}) donne des résultats semblables. Les différences entre les cultures sont trop faibles pour avoir une influence significative sur la RUE.

Pour conclure cette section, il semblerait que, concernant la rétention d'eau, les deux systèmes soient plutôt semblables. Ces résultats sont encore une fois dépendants du stade de transition dans lequel se trouve les parcelles. Selon la littérature les premières saisons sont moins bonnes en AC. Le fait que les rétentions d'eau soient semblables est une bonne chose pour l'AC qui a des perspectives d'amélioration dans les saisons suivantes. En effet, la porosité de l'AC et donc les connexions entre les pores pourraient être améliorées au fil des années par l'activité biologique des VDT qui devrait croître. Mais également les racines des cultures précédentes dont les pores devraient subsister étant donné que le labour ne les détruit pas.

6 Conclusions

L'objectif de ce mémoire était de comparer les deux systèmes culturaux que sont l'AC et l'Aconv au point de vue physique, chimique et biologique du sol et principalement la transition que subit la parcelle pour passer en AC. Le but de L'AC est de conserver le sol et donc le protéger des effets négatifs que peuvent apporter l'agriculture. La conservation du sol passe tout d'abord par la structure de ce dernier qui peut être impactée négativement par les travaux du sol et l'exposition de ces sols. Une meilleure structure est caractérisée par une meilleure stabilité, une meilleure infiltration et une meilleure rétention d'eau. Certains aspects peuvent influencer ces résultats comme la composition chimique ainsi que l'activité biologique. Tous les indicateurs ont pour objectif de mesurer un caractère particulier du sol. Les interactions entre ces indicateurs permettent de mieux comprendre les résultats observés. Différents aspects sont importants pour mesurer la structure du sol.

Tout d'abord, la stabilité du sol est l'un des paramètres les plus importants pour la structure du sol. La stabilité est principalement représentée par les indicateurs venant du slake test. En effet, les indicateurs T, SI et Wend montraient tous une meilleure stabilité des sols en AC. Cela semble principalement lié à la teneur en carbone organique et la compacité du sol. Les indicateurs SI et T montraient que la cinétique est également différente avec des agrégats qui se désagrègent plus vite pour l'Aconv. La teneur en carbone organique permet d'améliorer la cohésion du sol grâce aux lien organo-minéraux, aux racines, aux hyphes et aux polysaccharides. La densité des échantillons joue également un rôle important dans la cohésion du sol. L'infiltration de l'eau dans les pores est moins violente lorsque la porosité est plus faible, ce qui fait que les échantillons avec une plus grande densité subissent des forces moins brutales que les échantillons les moins denses et donc plus poreux.

L'infiltration du sol est un autre paramètre permettant de diminuer l'érosion du sol. En effet, une meilleure infiltration permet de diminuer la lame d'eau qui ruisselle et donc diminuer les risques d'érosion. Les expériences de cette étude ont montré que l'infiltration en AC est plus faible que l'infiltration en AConv. Cela est principalement dû à la compacité du sol en AC. Le sol étant plus compact sur l'ensemble du profil, les pores sont moins nombreux et moins connectés entre eux, ce qui rend l'infiltration de l'eau plus difficile. Cela fait que, sans compter la couverture du champ, les parcelles en AC sont potentiellement plus exposées à l'érosion hydrique à cause d'un ruissellement plus important et au manque d'infiltration. Malgré tout la meilleure stabilité des parcelles en AC permet de contrer cet effet. De plus, le fait que les parcelles en AC soient constamment protégées par une culture, les sols ne sont jamais nus contrairement à l'Aconv. Ce qui permet également de mieux protéger la parcelle.

La rétention d'eau est le dernier paramètre physique du sol qui est analysé. Pour la croissance des plantes, le plus important est la RUE. Les résultats montrent que cette RUE est identique pour les deux systèmes. La porosité étant la même sur les deux systèmes, le stock total d'eau est également le même.

L'analyse biologique a révélé une meilleure activité pour l'AC que l'Aconv mais cette activité est trop peu importante pour avoir une influence suffisante sur la stabilité du sol, l'infiltration ou la porosité du sol.

L'analyse chimique quant-à elle a révélé l'importance de la teneur en carbone dans la stabilité du sol grâce aux liens organo-minéraux mais également grâce aux polysaccharides qui sont produits par les micro-organismes. Les parcelles en AC ayant une teneur en carbone plus élevées en surface résistent mieux à la désagrégation. De plus la teneur en carbone a également une influence sur la rétention d'eau grâce à sa grande surface spécifique. Le carbone améliore donc la stabilité du sol.

Un autre point important de ce mémoire était d'analyser l'impact de la transition vers une AC. Selon la littérature, il faut un minimum de sept ans pour que la transition se fasse. Pour les parcelles étudiées, cela ne fait que trois ans que les parcelles sont passées en AC. La transition est donc loin d'être totale. Cela fait que l'AC a des perspectives d'amélioration dans les années qui viennent.

D'un point de vue biologique, la transition est loin d'être totale. On observe une meilleure activité en AC qu'en Aconv mais cette activité reste relativement faible. Les VDT ont pour objectif d'améliorer la porosité grâce à leurs galeries et la stabilité du sol en permettant un brassage entre la MO et le sol. Ce service n'est pas encore visible et il faudra donc attendre encore quelques saisons pour observer les effets positifs de l'activité des VDT.

Au niveau chimique, on observe un plus grand stock de carbone mais ce stock est biaisé par la méthode de calcul utilisée en réalité les stocks sont similaires entre les deux systèmes étant donné que le système en Aconv pratique également la culture de couverture et la restitution des résidus de culture. Malgré tout on observe tout de même un gradient plus important en AC ce qui fait que la teneur en carbone organique est plus importante en AC Pour les horizons de surface. Le stock d'azote est légèrement plus élevé comme ce qui avait été prédit dans l'état de l'art grâce aux cultures de couvertures. Les racines présentes constamment sur le champs grâce au système de couverture permanent limitent la lixiviation augmentant ainsi légèrement le stock d'azote. La teneur en azote montre le même gradient en fonction de la profondeur que pour le carbone. Pour les deux éléments cela est dû au fait que le labour en Aconv permet de mélanger les différents horizons et donc homogénéiser le sol.

Évidemment, cette transition affecte également les propriétés physiques du sol. Le fait de ne pas avoir de labour rend le sol plus compact, cet effet prend place dès les premières saisons. Cette compaction permet une meilleure stabilité du sol. Mais elle diminue également la porosité et sa continuité, ce qui fait également baisser l'infiltration en eau dans le sol. La porosité en elle-même est similaire entre les deux systèmes mais elle sera probablement améliorée dans les saisons prochaines grâce à l'activité des VDT et leurs galeries. La RUE est également similaire d'un système à l'autre. Bien que la CC de l'AC soit plus élevée qu'en Aconv, la teneur en eau au PFP l'est également. Il en résulte donc une RUE similaire.

Malgré tout, il faut garder en tête que toutes ces mesures (hors infiltration) ont été faites en laboratoire. Il est fort probable que les résultats diffèrent légèrement avec la réalité sur champ. La culture de couverture joue également un rôle important pour la rétention d'eau étant donné qu'elle protège le sol du soleil et donc de l'évaporation. Elle sert également de couche isolante, l'humidité sous le couvert végétal étant plus élevée que sans couvert végétal. Cela pourrait influencer la rétention d'eau en faveur de l'AC qui bénéficie d'une couverture permanente. La couverture peut également avoir une influence sur l'érosion de la parcelle en diminuant l'effet splash et en ralentissant les écoulements ce qui permet donc de diminuer l'énergie de la lame d'eau qui emporte les particules de sol.

Pour analyser correctement la transition l'intérêt est de répéter ces expériences chaque saison jusqu'à la fin de la transition pour avoir un suivi continu de ce qui se passe dans le sol durant cette étape. C'est l'objectif du plan SYCI mis en place par le CRA-W qui doit évaluer l'impact de ce système de culture en comparaison avec le système conventionnel.

Pour conclure, le système de culture qu'est l'AC devrait sur le long terme permettre de conserver l'intégrité du sol tant au point de vue biologique et chimique qu'au point de vue physique. La troisième année culturale étudiée dans ce mémoire n'en est pas encore à ce stade. Certains aspects sont grandement améliorés comme la stabilité du sol. D'autres le sont légèrement comme les stocks d'azote ou l'activité des VDT. D'autres sont encore à améliorer. La rétention d'eau est équivalente à celle de l'Aconv mais peut être améliorée grâce à l'activité des VDT qui permettraient d'augmenter la porosité avec le temps. L'infiltration quant-à-elle est plus faible qu'en Aconv. Cet aspect devrait également être amélioré par l'activité des VDT qui devraient compenser la compaction du sol. Les analyses des prochaines années culturales révéleront ce qu'il en sera réellement et si l'AC est suffisante pour restaurer et conserver les sols tout en permettant de nourrir la population ou si l'Aconv restera indispensable pour combler les demandes.

7 Bibliographie

Afzalina, S., et J. Zabihi. « Soil Compaction Variation during Corn Growing Season under Conservation Tillage ». *Soil and Tillage Research* 137 (1 avril 2014) : 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.11.003>.

Allison, F.E. « Soil Aggregation—Some Facts and Fallacies as Seen by a Microbiologist ». *Soil Science* 106, no 2 (1968) : 136-43. <https://doi.org/10.1097/00010694-196808000-00010>.

« Archive des stations - Météo en Belgique ». Consulté le 30 décembre 2022. <https://www.meteobelgique.be/index.php?datastationmonth.phpItemid=392>.

B., H. « Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture ». *Population (French Edition)* 5, no 4 (octobre 1950) : 764. <https://doi.org/10.2307/1523706>.

Balesdent, J, C Chenu, et M Balabane. « Relationship of Soil Organic Matter Dynamics to Physical Protection and Tillage ». *Soil and Tillage Research* 53, no 3-4 (février 2000) : 215-30. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5).

Basche, Andrea D., et Marcia S. DeLonge. « Comparing Infiltration Rates in Soils Managed with Conventional and Alternative Farming Methods : A Meta-Analysis ». *PLOS ONE* 14, no 9 (19 septembre 2019) : e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>.

Bescansa, P., M. J. Imaz, I. Virto, A. Enrique, et W. B. Hoogmoed. « Soil Water Retention as Affected by Tillage and Residue Management in Semiarid Spain ». *Soil and Tillage Research* 87, no 1 (1 mai 2006) : 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.028>.

Blanco-Canqui, Humberto, M. M. Claassen, et D. R. Presley. « Summer Cover Crops Fix Nitrogen, Increase Crop Yield, and Improve Soil–Crop Relationships ». *Agronomy Journal* 104, no 1 (2012) : 137-47. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0240>.

Bourguignon, Claude., et Bourguignon Lydia.. « Le sol, la terre et les champs. Pour retrouver une agriculture saine ». 2015 Briones, María Jesús I., et Olaf Schmidt. « Conventional Tillage Decreases the Abundance and Biomass of Earthworms and Alters Their Community Structure in a Global Meta-Analysis ». *Global Change Biology* 23, no 10 (2017) : 4396-4419. <https://doi.org/10.1111/gcb.13744>.

Boström, Ullalena. « Earthworm Populations (Lumbricidae) in Ploughed and Undisturbed Leys ». *Soil and Tillage Research* 35, no 3 (septembre 1995) : 125-33. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00489-0](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00489-0).

Briones, María Jesús I., et Olaf Schmidt. « Conventional Tillage Decreases the Abundance and Biomass of Earthworms and Alters Their Community Structure in a Global Meta-Analysis ». *Global Change Biology* 23, no 10 (2017) : 4396-4419. <https://doi.org/10.1111/gcb.13744>.

Brussaard, L., et H.G. Van Faassen. « Effects of Compaction on Soil Biota and Soil Biological Processes ». *Soil Compaction in Crop Production*, 1994, 215-35. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-88286-8.50018-0>

Chen, Y., C. Cavers, S. Tessier, F. Monero, et D. Lobb. « Short-Term Tillage Effects on Soil Cone Index and Plant Development in a Poorly Drained, Heavy Clay Soil ». *Soil and Tillage Research* 82, no 2 (1 juin 2005) : 161-71. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.06.006>.

Clarke, A. L., D. J. Greenland, et J. P. Quirk. « Changes in Some Physical Properties of the Surface of an Impoverished Red-Brown Earth under Pasture ». *Soil Research* 5, no 1 (1967) : 59-68. <https://doi.org/10.1071/sr9670059>.

« Conservation Agriculture | Food and Agriculture Organization of the United Nations ». Consulté le 1 mars 2022. <https://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>.

Constantin, J., B. Mary, F. Laurent, G. Aubrion, A. Fontaine, P. Kerveillant, et N. Beaudoin. « Effects of Catch Crops, No till and Reduced Nitrogen Fertilization on Nitrogen Leaching and Balance in Three Long-Term Experiments ». *Agriculture, Ecosystems Environment* 135, no 4 (février 2010) : 268-78. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.10.005>.

Curry, James P. « Factors Affecting the Abundance of Earthworms in Soils ». In *Earthworm Ecology*, 2e éd. CRC Press, 2004

Curry, James P., David Byrne, et Olaf Schmidt. « Intensive Cultivation Can Drastically Reduce Earthworm Populations in Arable Land ». *European Journal of Soil Biology* 38, no 2 (1 avril 2002) : 127-30. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(02\)01132-9](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(02)01132-9).

Darwin, Charles. *The Formation of Vegetable Mould, Through the Action of Worms : With Observations on Their Habits*. J. Murray, 1892.

LIFE. « Dust Bowl, 1954 : Photos From an American Environmental Catastrophe », 13 janvier 2014. <https://www.life.com/history/dust-bowl-photos-from-an-american-catastrophe/>.

Elrick, D., K. Tan, et Daniel Reynolds. « Hydraulic Conductivity Measurements in the Unsaturated Zone Using Improved Well Analyses ». *Groundwater Monitoring Remediation* 9 (1 janvier 2007). <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1989.tb01162.x>.

« FAOSTAT ». Consulté le 16 octobre 2022. <https://www.fao.org/faostat/fr/data/RL>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. « À propos ». Consulté le 23 octobre 2022. <http://www.fao.org/about/fr/>.

Fu, Yu, Guang-lu Li, Teng-hui Zheng, Bai-qiao Li, et Teng Zhang. « Splash Detachment and Transport of Loess Aggregate Fragments by Raindrop Action ». *CATENA* 150 (1 mars 2017) : 154-60. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.021>.

Giller, Ken E., Jens A. Andersson, Marc Corbeels, John Kirkegaard, David Mortensen, Olaf Erenstein, et Bernard Vanlauwe. « Beyond conservation agriculture ». *Frontiers in Plant Science* 6 (2015). <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2015.00870>.

« Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry — IPCC ». Consulté le 14 décembre 2022. <https://www.ipcc.ch/publication/good-practice-guidance-for-land-use-land-use-change-and-forestry/>.

Herridge, David F., Mark B. Peoples, et Robert M. Boddey. « Global Inputs of Biological Nitrogen Fixation in Agricultural Systems ». *Plant and Soil* 311, no 1 (1 octobre 2008) : 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9668-3>.

Hillel, Daniel. *Out of the Earth : Civilization and the Life of the Soil*. Revised edition. Berkeley : University of California Press, 1992.

Hobbs, Peter R., Ken Sayre, et Raj Gupta. « The Role of Conservation Agriculture in Sustainable Agriculture ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 363, no 1491 (12 février 2008) : 543-55. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>.

« Hyprop Investments | Home ». Consulté le 11 novembre 2022. <https://www.hyprop.co.za/>.

Koudahe, Komlan, Samuel C. Allen, et Koffi Djaman. « Critical Review of the Impact of Cover Crops on Soil Properties ». *International Soil and Water Conservation Research* 10, no 3 (1 septembre 2022) : 343-54. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>.

Knowles, Meghan E., Donald S. Ross, et Josef H. Görres. « Effect of the Endogeic Earthworm *Aporrectodea Tuberculata* on Aggregation and Carbon Redistribution in Uninvaded Forest Soil Columns ». *Soil Biology and Biochemistry* 100 (1 septembre 2016) : 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.06.016>.

Le Bissonnais, Yves. « Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion ». *Étude et Gestion des Sols*, 1995, 13.

Ma, Gangan, Guanglu Li, Xudong Mu, Weiliang Hou, Yangyang Ren, et Mingxi Yang. « Effect of Raindrop Splashes on Topsoil Structure and Infiltration Characteristics ». *CATENA*

212 (1 mai 2022) : 106040. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106040>.

Murua, J R, et A Laajimi. « Transition de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture durable : quelques réflexions », 1995, 75-86.

NSI00017. « Précipitation ». Consulté le 30 décembre 2022. <https://hydrometrie.wallonie.be/home/observations>

« OPVT - Accueil - EcoBioSoil ». Consulté le 5 novembre 2021. https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php.

Peigné, J., M. Cannavaculo, Y. Gautronneau, A. Aveline, J. L. Giteau, et D. Cluzeau. « Earthworm Populations under Different Tillage Systems in Organic Farming ». *Soil and Tillage Research* 104, no 2 (1 juillet 2009) : 207-14. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.02.011>.

Powlson, D.S., M.J. Glendining, K. Coleman, et A.P. Whitmore. « Implications for Soil Properties of Removing Cereal Straw : Results from Long-Term Studies ». *Agronomy Journal* 103, no 1 (2011) : 279-87. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0146s>.

Salem, Haytham M., Constantino Valero, Miguel Ángel Muñoz, María Gil Rodríguez, et Luis L. Silva. « Short-Term Effects of Four Tillage Practices on Soil Physical Properties, Soil Water Potential, and Maize Yield ». *Geoderma* 237-238 (1 janvier 2015) : 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.014>.

Sartori, F., I. Piccoli, R. Polese, et A. Berti. « A Multivariate Approach to Evaluate Reduced Tillage Systems and Cover Crop Sustainability ». *Land* 11, no 1 (2022). <https://doi.org/10.3390/land11010055>.

Scholtès, Luc. « Modélisation micromécanique des milieux granulaires partiellement saturés », 2009.

Six, J, E. T Elliott, et K Paustian. « Soil Macroaggregate Turnover and Microaggregate Formation : A Mechanism for C Sequestration under No-Tillage Agriculture ». *Soil Biology and Biochemistry* 32, no 14 (1 décembre 2000) : 2099-2103. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6).

Slavikova, Sara Popescu. « Conventional vs Sustainable Agriculture : Which One Is Better | Greentumble », 26 septembre 2019. <https://greentumble.com/can-sustainable-agriculture-feed-the-world/>.

Swaby, R. J. « The Influence of Earthworms on Soil Aggregation ». *Journal of Soil Science* 1, no 2 (1950) : 195-96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1950.tb00730.x>.

Tisdall, J. M., et J. M. Oades. « Organic Matter and Water-Stable Aggregates in Soils ». *Journal of Soil Science* 33, no 2 (1982) : 141-63. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>.

VandenBygaart, A. J, R Protz, A. D Tomlin, et J. J Miller. « Tillage System Effects on Near-Surface Soil Morphology : Observations from the Landscape to Micro-Scale in Silt Loam Soils of Southwestern Ontario ». *Soil and Tillage Research* 51, no 1 (1 juillet 1999) : 139-49. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00050-1).

Vanwindekens, Frédéric M., et Brieuc F. Hardy. « The QuantiSlakeTest, Dynamic Weighting of Soil under Water to Measure Soil Structural Stability ». Preprint. *Soils and managed ecosystems*, 1 novembre 2022. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-1092>.

van Genuchten, M. Th. . « A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils ». *Soil Science Society of America Journal* 44, no 5 (septembre 1980) : 892-98. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

Vršič, S. « Soil erosion and earthworm population responses to soil management systems in steep-slope vineyards .. » *Plant, Soil and Environment* 57, no No. 6 (8 juin 2011) : 258-63. <https://doi.org/10.17221/439/2010-PSE>.

Webb, J., Brian Pain, Shabtai Bittman, et John Morgan. « The Impacts of Manure Application Methods on Emissions of Ammonia, Nitrous Oxide and on Crop Response—A Review ». *Agriculture, Ecosystems Environment* 137, no 1-2 (15 avril 2010) : 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.01.001>

Wendt, J. W., et S. Hauser. « An Equivalent Soil Mass Procedure for Monitoring Soil Organic Carbon in Multiple Soil Layers ». *European Journal of Soil Science* 64, no 1 (2013) : 58-65. <https://doi.org/10.1111/ejss.12002>.

Williams, N.D., et E.L. Petticrew. « Aggregate Stability in Organically and Conventionally Farmed Soils ». *Soil Use and Management* 25, no 3 (2009) : 284-92. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00223.x>.

Yarham, D J. « The Effect of Non-Ploughing on Cereal Diseases ». *Outlook on Agriculture* 8, no 1, *suppl* (1 septembre 1975) : 245-47. <https://doi.org/10.1177/003072707500801S10>.

Zulki fli, NurZa firah, NurinN.A., MohamadSamsuriJan, MarkZuknik, MohdRafatullah, etM.I.Syakir. 'SustainableEcosystemServicesFrameworkforTropicalCatchmentManagement : AReview'. *Sustainability* 9(4avril2017) : 546. <https://doi.org/10.3390/su9040546>.

Impact de l'agriculture de conservation et de la transition depuis une agriculture conventionnelle sur la qualité des sols

Maxime Vancayzeele

L'agriculture conventionnelle a permis de nourrir les civilisations pendant des milliers d'années mais avec la population croissante, les demandes ne cessent de croître également. Cette tendance pousse l'agriculture à être intensive en puisant plus dans les sols pour combler les demandes. Mais cette intensité n'est pas soutenable pour nos sols qui s'épuisent au fil des cultures. L'objectif de l'agriculture de conservation est de permettre de cultiver les sols tout en conservant les propriétés chimiques, biologiques et physiques du sol. Cette agriculture, qui a vu le jour suite aux événements du Dust Bowl aux États-Unis, est bien plus récente et moins connue que l'agriculture conventionnelle. Elle se base sur trois principes interdépendants : un travail du sol minimal, une couverture permanente du sol et une diversification des espèces. L'objectif de ce mémoire est donc de comparer ces deux systèmes de cultures sur deux cultures différentes, lin et froment, durant la transition qui résulte du passage d'une agriculture conventionnelle vers une agriculture de conservation. Cette étude prend place pendant la troisième année culturale de l'essai systèmes de culture innovants appartenant au CRA-W à Gembloux. Pour analyser et comparer la qualité des différents sols, des indicateurs sont déduits des différentes expériences faites durant la saison. Ces expériences comprennent des mesures de l'activité biologique, des mesures chimiques, la courbe de rétention d'eau, la stabilité du sol et l'infiltration d'eau. Les résultats montrent que l'agriculture de conservation permet une meilleure activité biologique grâce à l'absence du labour mais cette activité reste trop faible pour avoir un impact significatif sur les autres indicateurs. Les teneurs en carbone et en azote en conservation ont également été améliorées, principalement en surface, grâce à l'absence de retournement du sol. L'infiltration quant-à-elle était plus faible en conservation, à cause de la densité du sol plus élevée diminuant la porosité. La stabilité structurale du sol est grandement améliorée en conservation. Cela est probablement lié à la teneur en carbone qui permet de stabiliser le sol grâce aux liaisons organo-minérales et aux polysaccharides provenant de la matière organique ainsi que la compacité du sol. Finalement, concernant la rétention d'eau, aucune différence significative n'a été relevée entre les deux systèmes. L'agriculture de conservation révèle donc certaines différences par rapport à l'agriculture conventionnelle. Certaines bonnes d'autres moins. Mais ces parcelles étant en transition continuent à évoluer et doivent donc continuer à être étudiées dans les années qui suivent.

Université catholique de Louvain

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2bte L7.05.01, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro