

Classification des pratiques d'agriculteurs et relation avec les caractéristiques structurales et biologiques des sols en régions limoneuse et sablo-limoneuse de Wallonie

Présenté par Paul Vanhove

Promoteur : Prof. Pierre Bertin (UCL/ELI/ELIA)
Lecteurs : Prof. Philippe Baret (UCL/ELI/ELIA)
Prof. Julie Van Damme (UCL/ELI/ELIA – CRA-W)
Ir. Frédéric Muratori (Regenacterre)

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

Table des matières

Table des matières	i
Remerciements	vi
Table des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Résumé	xii
Liste des abréviations	xiii
Introduction.....	1
Première partie : État de l'art	3
Chapitre 1: Propriétés d'un sol cultivé et impacts des pratiques culturales sur le système sol-plante	5
1. Propriétés du sol	5
1. Caractéristiques physico-chimiques	5
Texture.....	5
Structure	6
2. Propriétés biologiques du sol	7
Diversité biologique du sol et effets sur son fonctionnement	7
Les indicateurs biologiques de la santé du sol	10
2. Le sol, un milieu surexploité	11
3. L'évolution de l'agriculture en Europe.....	13
4. Conséquences sur les sols wallons	13
5. Pratiques culturales et impacts	15
1. Travail du sol.....	15
Généralités	15
Différentes pratiques	16
Effets des TCS sur les propriétés du sol	18
2. Couverts végétaux.....	19
Définition	19
Législation	19

Effets	20
Chapitre 2: La culture de blé d'hiver	23
1. Généralités	23
2. Itinéraire de culture.....	24
1. Place dans la rotation	24
2. Travail du sol et semis	24
3. Interventions.....	25
4. Récolte.....	26
3. Réponses à des changements de pratiques	26
Chapitre 3: Objectifs du mémoire.....	28
Deuxième partie : Matériel et méthodes	29
Chapitre 4: Contexte de l'étude.....	31
Chapitre 5: Méthode d'enquête et de mesures	34
1. Méthode d'enquête	34
1. La préparation.....	34
2. L'échantillonnage.....	35
3. Les entretiens.....	35
4. Le traitement des données collectées	36
2. Méthodes de mesures	36
1. Plan expérimental	36
2. Mesure de la compaction.....	36
3. Test à la bêche.....	37
4. Slake test	39
5. Solvita® Field Test	41
6. Teabag Index.....	42
Chapitre 6: Méthodes d'analyse statistique.....	44
1. Analyse des correspondances multiples (ACM).....	44
2. Classification ascendante hiérarchisée (CAH).....	44
3. Moyennes et écarts-types	45
4. Analyse de la variance (ANOVA 1 et test de Tukey).....	45
Troisième partie : Résultats.....	47

Chapitre 7: Résultats des enquêtes.....	48
1. Informations générales.....	48
2. Travail du sol	51
3. Utilisation des couverts végétaux.....	55
1. Espèces choisies dans le couvert.....	55
2. Modes de destruction du couvert	59
4. Analyse statistique des réponses aux enquêtes.....	60
1. Choix des variables.....	60
2. Analyse des correspondances multiples (ACM).....	64
3. Classification ascendante hiérarchique (CAH)	68
Chapitre 8: Résultats des mesures et analyses des différences entre les classes d'agriculteurs	71
1. Pénétrométrie	71
2. Test à la bêche.....	73
1. Résultats pour la cohésion de la bêchée :	73
2. Résultats pour la densité de racines saines	75
3. Résultats globaux du test à la bêche.....	77
3. Slake test.....	79
4. Solvita® Field Test.....	81
5. Teabag Index	82
1. Pour le coefficient de stabilisation S.....	82
2. Pour le taux de décomposition k	84
6. Résumé des résultats des mesures	86
1. Résultats des classes pour chaque mesure significative.....	86
2. Résultat des mesures significatives selon chaque classe	87
Quatrième partie : Discussion	89
Chapitre 9: Critique de la méthodologie.....	90
1. Méthodologie des enquêtes	90
1. Les entretiens semi-dirigés	90
2. L'échantillonnage.....	91
2. Indicateurs choisis.....	91

Chapitre 10: Discussion des résultats.....	93
1. ACM et CAH.....	93
2. ANOVA 1 et tests de Tukey : comparaison résultats-théorie.....	95
3. Conclusion	98
4. Le cas du Solvita® Field Test.....	99
Chapitre 12: Limitations d'un travail de terrain et perspectives futures.....	100
Conclusion	101
Cinquième partie : Annexes	103
Guide d'entretien	104
Grille d'évaluation du test à la bêche.....	108
Bibliographie.....	109

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement,

Mon promoteur, le professeur Pierre Bertin, pour sa confiance, sa disponibilité et son encadrement tout au long de cette année académique. Merci d'avoir proposé un sujet aussi intéressant, stimulant et responsabilisant. Et enfin, merci pour ces relectures de dernière minute qui m'ont permis de rendre mon mémoire *presque* dans les temps.

Frédéric Muratori et Guillaume Sneessens de Regenacterre, ainsi que Quentin Triest du GAL Culturalité pour les échanges enrichissants que nous avons pu avoir tout au long de l'année ainsi que pour tous les conseils qu'ils m'ont prodigués.

Les agriculteurs interviewés durant la réalisation de l'enquête ; sans leur collaboration et leur intérêt, ce mémoire n'aurait pas abouti. Merci de m'avoir accordé du temps lors de l'entretien ainsi que de m'avoir laissé saccager vos parcelles avec ma bêche et dénaturer le paysage avec mes drapeaux.

Mes lecteurs : Julie Van Damme, Frédéric Muratori et Philippe Baret, pour avoir accepté de participer à l'aventure et de consacrer du temps à la lecture de ce travail.

Lola Leveau (qui a sacrifié son 4x4 sur l'autel de l'agronomie), Nadège Meister et Nicolas Ooghe, qui m'ont à l'occasion accompagné et fourni une aide fort appréciable lors de mes mesures en champs.

Le SPW Agriculture pour leur réponse rapide et efficace lors de ma recherche de documentation.

Mes co-karteurs adorés, pour toutes ces parties riches en émotions. Merci de m'avoir systématiquement laissé gagner à Mariokart durant nos pauses. Vous vous pensiez probablement subtils, mais vous battre de manière aussi aisée et régulière a fini par me mettre la puce à l'oreille.

Enfin, un immense merci à mes parents, qui m'ont soutenu tout au long de mon mémoire et de mes études, même dans les moments les moins joyeux. Sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible.

Table des figures

Triangle textural. (Wikimedia Commons 2016)	6
Pertes estimées en sols à la suite de l'érosion hydrique en Wallonie.	14
Teneur en carbone organique des sols agricoles wallons. Pour obtenir le pourcentage de matière organique totale dans les sols, il est d'usage de multiplier la teneur en carbone organique par un facteur de conversion de 1,724.	14
Performances des différents itinéraires de travail du sol (d'après Morris et al. 2010). Minimum tillage = travail minimum du sol ; Conventional tillage = labour classique ; Direct drilling = semis direct.	16
Classification des opérations de travail du sol selon l'effet de l'outil, la profondeur de travail et la proportion de la surface de la parcelle effectivement travaillée. (Labreuche et al., 2014)	17
Carte des zones wallonnes vulnérables au lessivage des nitrates	20
Rendement de blé d'hiver suivant une culture de maïs grain selon trois systèmes de travail du sol: le labour (conventionnel), le travail superficiel et le semis direct. Essais effectués à Boigneville, dans l'Essonne (91), France.....	27
Localisation de chaque parcelle étudiée dans le cadre de ce mémoire.....	32
Pénétrromètre	37
Représentation du mode opératoire du test à la bêche.....	38
Matériel utilisé pour le slake test. Avant-plan : casier à mottes ; arrière-plan : réservoir d'eau dans lequel est plongé le casier.	40
Bocal hermétique Solvita contenant un échantillon de sol et une sonde réagissant au dioxyde de carbone	41
Valeurs propres de l'ACM et pourcentage cumulé d'inertie. Les 'F' sont les dimensions issues de l'analyse.	64
Carte factorielle des deux premières dimensions des modalités, produite par l'ACM	65
Carte factorielle des observations, produite par l'ACM	67
Dendrogramme issu de la CAH sur les coordonnées des observations de l'ACM. Quatre classes ont été établies.	68
Moyennes de profondeur de la couche compactée par rapport à la surface chez les différentes classes d'agriculteurs.....	71
Moyennes du score de cohésion de la bêchée chez les différentes classes d'agriculteurs.	73

Moyennes du score de densité de racines saines chez les différentes classes d'agriculteurs.	75
Moyennes du score total du test à la bêche chez les différentes classes d'agriculteurs.	77
Moyennes de la classe attribuée après le slake test chez les différentes classes d'agriculteurs.	79
Sondes Solvita ® après 24h de réaction au dioxyde de carbone libéré par des échantillons de sol.	81
Moyennes du coefficient de stabilisation (S) chez les différentes classes d'agriculteurs.	82
Moyennes du taux de décomposition (k) chez les différentes classes d'agriculteurs..	84
Classification intuitive des observations selon les deux premières dimensions de l'ACM.....	94

Liste des tableaux

Impact des différents groupes fonctionnels sur les fonctions, la biodiversité des sols et la production végétale. (King et al., 2016. D'après Lavelle, 2002)	9
Superficie et pourcentage de la SAU de différentes cultures en Wallonie	23
Liste des agriculteurs (anonymisée), de la commune, de la géolocalisation et de la région agricole des champs étudiés.....	31
Informations générales pour chaque exploitation. Transition = transition de conventionnel à TCS (Techniques Culturelles Simplifiées).....	49
Informations générales pour chaque exploitation. Le tiret signifie non, ou jamais. ..	50
Travail du sol effectué avant le semis de blé d'hiver. SàD=semoir à disques, Déchaum=déchaumage, Décomp=décompactage.....	52
Nombre d'opérations de travail du sol de chaque catégorie avant une culture de blé d'hiver. FRE40 : fragmentation, retournement et enfouissement de 15 à 40 cm. ME15 : mélange et enfouissement de 3 à 15 cm. ME40 : mélange et enfouissement de 15 à 40 cm. MinEnf : pas de mélange et minimum d'enfouissement, de 15 à 40 cm. SD : travail superficiel sur la ligne de semis, c'est-à-dire 5% de la largeur totale. Superficiel : travail superficiel sur toute la largeur, de 0 à 3 cm. Les vides sont des zéros.	53
Espèces composant le couvert implanté lors de l'interculture, avant une culture de printemps.....	56
Nombre d'espèces du couvert pour chaque type de système racinaire, et proportion de légumineuses dans le mélange.	58
Moyens utilisés pour détruire le couvert végétal.	59
Destination du couvert détruit. Enfoui15 = enfouissement de 3 à 15 cm, Enfoui40 = enfouissement de 15 à 40 cm, Surface = couvert laissé à la surface, formant un mulch.	60
Variables explicatives issues des enquêtes en vue de procéder à une Analyse des Correspondances Multiples (ACM). Abréviations et explications : voir 4. Analyse statistique des réponses aux enquêtes.	62
Valeurs propres, pourcentage de variabilité expliquée et pourcentage cumulé de variabilité expliquée pour les 10 premières dimensions de l'ACM.....	64
Effets significatifs des modalités dans les deux premières dimensions (F1 et F2).	66
Classes établies par la CAH et agriculteurs en faisant partie.....	69

Variances (absolues et en pourcents de la variance totale) inter- et intra-classes. Les classes sont issues d'une CAH.	70
Moyennes estimées de la profondeur de la couche compactée et intervalles de confiance.	72
Test de Tukey: comparaison des moyennes de profondeur de la couche compactée entre les différentes classes d'agriculteurs.	72
Moyennes estimées du score de la cohésion de la bêchée et intervalles de confiance.	74
Test de Tukey: comparaisons du score de cohésion de la bêchée entre les différentes classes d'agriculteurs.	74
Moyennes estimées du score de densité de racines saines et intervalles de confiance.	75
Test de Tukey: comparaisons des moyennes du score de densité de racines saines entre les différentes classes d'agriculteurs.	76
Moyennes estimées du score total du test à la bêche et intervalles de confiance.	77
Test de Tukey: comparaison des moyennes du score total du test à la bêche entre les différentes classes d'agriculteurs.	78
Moyennes estimées des classes du slake test et intervalles de confiance.	79
Test de Tukey: comparaison des moyennes du slake test entre les différentes classes d'agriculteurs.	80
Moyennes estimées du coefficient de stabilisation (S) et intervalles de confiance.	83
Test de Tukey: comparaison des moyennes du coefficient de stabilisation entre les différentes classes d'agriculteurs.	83
Moyennes estimées du taux de décomposition (k) et intervalles de confiance.	85
Test de Tukey: comparaison des moyennes du taux de décomposition (k) entre les différentes classes d'agriculteurs.	85
Résumé des résultats des mesures pour les différentes classes d'agriculteurs. Les lignes 'Classe' sont constituées des moyennes estimées, et la ligne 'Tukey' indique les différences significatives entre les classes. n.s. = non significatif.	86

Résumé

L'agriculture intensive (qualifiée de 'conventionnelle'), basée le travail profond du sol et l'usage d'intrants de synthèse, est pratiquée par la majorité des agriculteurs wallons. Les rendements sont plus élevés que jamais mais cette intensification et artificialisation de la production de nourriture a un effet de dégradation à grande échelle des sols agricoles. La biodiversité et la teneur en matière organique des sols se réduisent, diminuant la fertilité des sols et leur résistance à l'érosion hydrique. Le sol pouvant être considéré comme un écosystème mettant des décennies à se régénérer, il est crucial d'agir sur la source de sa dégradation.

Dans ce contexte, ce mémoire a deux objectifs principaux : recenser les différentes pratiques des agriculteurs membres de l'asbl Regenacterre, qui promeut une agriculture régénérative des sols en Belgique au moyen des techniques culturales simplifiées (TCS), et les regrouper en catégories de pratiques ; et mesurer *in situ* l'impact de ces catégories de pratiques sur la structure et le fonctionnement biologique des sols par des techniques simples de diagnostic. Pour ce faire, la réalisation de cette étude a été effectuée en trois phases : une phase d'enquête chez les agriculteurs afin de collecter des données sur les pratiques, une phase de mesures sur au moins une parcelle de chaque agriculteur, et une phase d'analyse des résultats et de mise en relation avec les pratiques.

L'analyse des correspondances multiples suivie d'une classification ascendante hiérarchique a permis de répartir les agriculteurs en quatre classes selon leurs pratiques. Les classes 1 et 2 sont plutôt 'mixtes' mais les classes 3 et 4 sont respectivement constituées uniquement d'agriculteurs conventionnels et d'agriculteurs en système de TCS.

Les différences principales entre les mesures effectuées pour les différentes classes d'agriculteurs confirment l'impact du travail (ou non-travail) du sol sur sa structure et son fonctionnement biologique. Les agrégats les moins résistants aux contraintes physiques ont été retrouvés chez les agriculteurs de la classe 3, résultat de l'enfouissement de la matière organique lors des travaux profonds. Des différences de structure et de compaction influençant la croissance verticale des racines ont également été mises en évidence entre des classes pratiquant des travaux du sol différents.

Si la plupart des résultats sont en accord avec la littérature à propos des effets des pratiques agricoles sur les caractéristiques des sols, il paraît important de continuer la recherche sur la pratique des TCS en Wallonie. Des données concernant les surfaces exploitées en TCS n'ont en effet pas pu être trouvées, alors qu'il s'agit d'un mode d'agriculture qui semble capable de répondre aux défis et contraintes d'aujourd'hui et de demain, aussi bien en termes de productivité que de restauration durable de la qualité des sols cultivés.

Liste des abréviations

ACM	Analyse des Correspondances Multiples
ANOVA 1	Analyse de la variance à un facteur de classification
CAH	Classification Ascendante Hiérarchisée
CIPAN	Culture intermédiaire piège à nitrates
CPAR	Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité
CRA-W	Centre wallon de Recherches Agronomiques
MO	Matière Organique
PAC	Politique Agricole Commune
PGPR	Plant Growth Promoting Rhizobacteria
SàD	Semoir à Disques
SAU	Surface Agricole Utile
SIE	Surface d'Intérêt Écologique
SPW	Service Public de Wallonie
TCS	Techniques Culturelles Simplifiées

Introduction

L'agriculture en Europe a subi de profondes mutations au cours du XX^e siècle, nous amenant à la situation actuelle, où l'agriculture dite 'conventionnelle' se repose sur l'utilisation à grande échelle d'intrants de synthèse et le travail du sol intense permis par l'augmentation de puissance des machines agricoles. Si l'on ne peut nier l'impact positif de ces pratiques sur les rendements (dont l'amélioration est également due aux progrès génétiques), il n'est plus possible de continuer à produire 'aveuglément', sans se soucier des externalités négatives de l'agriculture intensive sur les sols et l'environnement. Notamment, l'appauvrissement des sols en matière organique et leur exposition à l'érosion hydrique dans les régions de grandes cultures soulèvent la question de la durabilité du système.

Cependant, il faut admettre que la transition vers un système plus durable ne peut pas être effectuée sans la collaboration et la volonté de nombreux acteurs du monde agricole, dont les chercheurs et – évidemment – les agriculteurs eux-mêmes.

Dans le contexte de cette transition, une enquête sur les pratiques agricoles a été menée chez des agriculteurs adhérant à l'ASBL Regenacterre, qui promeut une agriculture régénératrice des sols en Belgique. Si certains chefs d'exploitation sont adhérents pour des raisons pratiques (achats groupés de produits phytosanitaires) et ne souhaitent pas sortir du système conventionnel, d'autres sont en revanche avancés dans un autre système : les Techniques Culturelles Simplifiées (TCS), qui préconisent un travail minimal du sol afin de lui rendre une structure plus naturelle et plus résiliente, exploitant toutes les facettes de la biologie du sol. L'enquête vise à appréhender cette diversité de pratiques chez les adhérents de Regenacterre et à mettre en relation des catégories de pratiques avec des réponses du sol, via une série de mesures en champs.

Ce travail est divisé en quatre parties. La **première partie**, *l'état de l'art*, a pour objectif de faire le point sur le fonctionnement des sols, les pratiques agricoles et leur diversité. Les caractéristiques physico-chimiques et biologiques d'un sol agricole seront d'abord détaillées, suivies des conséquences de l'agriculture actuelle sur leurs propriétés et leur état. Viennent ensuite les différents systèmes de travail du sol et d'usage des couverts végétaux, avec une explication de leurs effets sur les sols. La place du blé d'hiver dans ces systèmes, culture phare en Wallonie, sera également abordée.

La **deuxième partie**, *matériel et méthodes*, détaille les démarches et les protocoles suivis pour récolter et analyser les données, tant lors des entretiens semi-directifs que lors des phases de mesures et d'analyse statistique.

La **troisième partie**, *les résultats*, présente d'abord les données récoltées lors des entretiens à propos des pratiques générales, du travail du sol et de l'utilisation des

couverts végétaux. Ces données sont ensuite analysées pour créer des classes d'agriculteurs sur base de leurs pratiques. Une fois cette classification établie, les résultats des mesures seront comparés entre les différentes classes, dans le but d'y trouver des différences ou des similitudes.

La **quatrième partie**, la *discussion*, est l'occasion de comparer les résultats obtenus pour les différentes classes avec ce qui était attendu sur base des connaissances théoriques, ainsi que de prendre du recul sur la méthodologie et de discuter des perspectives apportées par une telle enquête.

Première partie : État de l'art

Chapitre 1: Propriétés d'un sol cultivé et impacts des pratiques culturales sur le système sol-plante

1. Propriétés du sol

Ce chapitre portant sur les sols, il convient d'abord de préciser ce concept connu intuitivement – mais assez vaguement – de tous. Force est de constater que cette définition ne sera pas la même en fonction de l'usage que l'on réserve à ce sol : un ingénieur en construction ne considèrera pas le sol de la même manière qu'un agronome ou un biologiste. Dans ce travail, nous nous concentrerons sur la vision des agronomes et pédologues. La société Suisse de pédologie le définit comme « la couche la plus externe, marquée par les êtres vivants, de la croûte terrestre. Il est le siège d'un échange intense de matière et d'énergie entre l'air, l'eau et les roches. Le sol, en tant que partie de l'écosystème, occupe une position-clé dans les cycles globaux des matières ». (Gobat et al. 2010)

Si les sols peuvent avoir une épaisseur de plusieurs mètres – jusqu'à la roche-mère –, l'agriculteur et l'agronome, dans leurs activités, se concentrent sur la partie arable du sol, c'est-à-dire celle qui sert de substrat aux plantes cultivées. Cette couche arable est celle qui est susceptible d'être travaillée par une charrue, elle se situe donc dans les 40 premiers centimètres du sol (Labreuche et al. 2007). C'est là le siège de la majorité de l'activité chimique, physique et biologique du sol et c'est à cette couche que nous ferons référence par l'appellation 'sol' dans ce travail,

1. Caractéristiques physico-chimiques

TEXTURE

La texture d'un sol est fonction de la répartition granulométrique des minéraux qui le composent. Un classement des particules (supposées sphériques) a été établi selon leur diamètre (Dominique King et al. 2008):

< 2 μm	2 μm à 50 μm	50 μm à 2 mm
Argiles (fraction fine)	Limons (fraction intermédiaire)	Sables (fraction grossière)

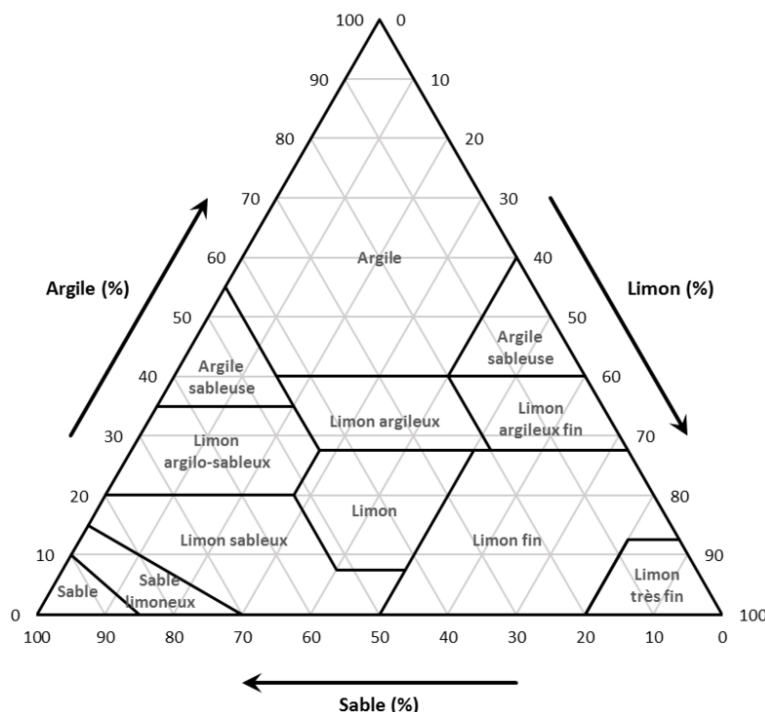


Figure 1: Triangle textural. (Wikimedia Commons 2016)

Pour définir la texture du sol, on utilise la proportion relative en masse des particules de chaque classe. On peut les reporter sur un graphe appelé *triangle textural* et on se retrouve dans une classe, comme indiqué sur la Figure 1 (Wikimedia Commons 2016). Ainsi, si la fraction dominante est la fraction fine, on aura un sol dit argileux. Signalons que cette manière de classer les types de sols ne prend pas en compte les particules de diamètre supérieur à 2 mm (graviers, galets, blocs).

La texture est une caractéristique importante des sols puisqu'elle en détermine d'autres propriétés, comme la structure du sol, donc sa porosité et son régime hydrique. En particulier, la teneur et le type d'argiles ont des effets sur la formation du complexe argilo-humique et la capacité d'échange, qui influencent directement la fertilité des plantes (Gobat et al. 2010).

Les caractéristiques texturales des sols ne varient pas à court terme, contrairement à leurs caractéristiques structurales, qui sont, elles, plus sujettes aux variations (par exemple entre les saisons).

STRUCTURE

Selon Gobat et al. (2010), la structure est le mode d'assemblage des constituants solides du sol, minéraux et/ou organiques, qui peuvent s'agréger ou non¹. Elle dépend directement de la texture du sol mais aussi d'autres facteurs : le taux de matière organique, l'humidité et les actions de la faune du sol sont également déterminants. Les agrégats sont classés en 4 catégories aux propriétés physico-chimiques distinctes :

- Les **microagrégats** de 2 à 20 μm , constitués d'argiles et de limons fins liés à des molécules aromatiques², et de polysaccharides bactériens ;
- Les **microagrégats** de 20 à 250 μm , formés de limons grossiers et de sables, liés entre eux par des polysaccharides bactériens ;

¹ S'il y a agrégation on peut parler de structures *pédiques*, sinon il s'agit de structures *apédiques*.

² Composés organiques dont les atomes forment des structures cycliques très stables.

- Les **macroagrégats** de 250 à 2000 μm , formés des mêmes composés que les précédents et des sables grossiers reliés par des polysaccharides, des bactéries et du mycélium, produisant de la glomaline³ qui stabilise les agrégats ;
- Les **macroagrégats** supérieurs à 2000 μm . Ils sont similaires aux macroagrégats plus petits avec en plus de la matière organique libre et des racines.

Ces différents types d'agrégats peuvent s'arranger entre eux de beaucoup de manières différentes. Une observation visuelle (plutôt empirique, au contraire de la texture) permet de déterminer si la structure est favorable ou défavorable aux cultures, et quelles opérations de travail du sol sont conseillées pour conserver ou améliorer cette structure.

Une caractéristique importante qui découle du type de structure du sol est la **porosité**, définie comme étant « la propriété du sol qui reflète le volume des vides du sol, exprimé en pourcentage du volume total ». (Gobat et al. 2010) Ces vides dans le sol sont des pores, qui sont remplis d'air ou d'eau. Ils peuvent ainsi apporter de l'oxygène aux racines ou microorganismes du sol et stocker de l'eau pour les racines. On distingue les micro- et les macropores : les micropores ont un diamètre inférieur à 80 μm et les macropores un diamètre supérieur à 80 μm . Leur différence de diamètre leur confère des propriétés différentes au contact d'eau et d'air : les macropores ne retiennent pas l'eau, qui suit alors son gradient gravitationnel, et peuvent contenir de l'air. À l'opposé, les micropores retiennent l'eau ; une force de succion est nécessaire pour l'en extraire (Andrews et al. 2011). La porosité – et la distribution des diamètres poreux – va donc déterminer la capacité de stockage d'eau du sol ; une végétation poussant sur un sol avec une bonne porosité résistera mieux aux périodes de sécheresse.

2. Propriétés biologiques du sol

DIVERSITÉ BIOLOGIQUE DU SOL ET EFFETS SUR SON FONCTIONNEMENT

Les caractéristiques physico-chimiques du sol sont bien documentées, et l'étude du sol en tant qu'écosystème fait également l'objet de nombreuses recherches. Il est estimé que plus de 25% des espèces décrites dans le monde résident dans le sol ou la litière au moins une partie de leur vie (Andrén and Balandreau 1999; Lavelle et al. 2006) et l'écologie de ces organismes est de mieux en mieux décrite, même si des progrès considérables peuvent encore être faits.

La matière organique du sol peut être inerte (résidus de culture, humus) ou vivante [faune et flore – voir Tableau 1 pour une présentation des organismes du sol en groupes fonctionnels selon leur utilité écologique (Lavelle 2002)], et elle y remplit de nombreux

³ La glomaline est une protéine produite par certains champignons mycorhiziens. On la qualifie souvent de 'colle organique'.

rôles. Les plus importants sont sans doute ceux de **source d'éléments nutritifs et d'énergie** pour les organismes vivants ainsi que de contributeurs à la **fertilité du sol** (Briat et Job 2017). Les éléments minéraux sont fournis lors de la biodégradation et minéralisation de la matière organique par les organismes du sol. La fertilité apportée par la matière organique peut être d'ordre physique, chimique et biologique. Physique par l'agrégation des particules de sol, renforçant la résistance des sols aux contraintes physiques dues aux précipitations ou aux travaux du sol, et permettant à l'eau et l'air de mieux circuler entre ces agrégats ; chimique par la libération et l'adsorption des minéraux, notamment à la surface des complexes argilo-humiques ; biologique par la présence d'auxiliaires de culture.

Les microorganismes du sol sont littéralement à la base du système. Ce sont eux qui font la minéralisation et qui donnent à des éléments essentiels (azote, phosphore, soufre, fer) leur forme assimilable par les plantes. Ils peuvent augmenter la concentration en éléments métalliques et non-métalliques pour les rendre disponibles pour les racines (Uroz et al. 2015). Ils peuvent également former des associations symbiotiques avec les racines des végétaux (tel le genre *Rhizobium*) pour leur permettre de capter l'azote atmosphérique (Pédro et Académie des Sciences 2007). Il existe aussi des microorganismes qualifiés de PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) capables d'influencer la croissance des plantes en modifiant leur équilibre hormonal, stimulant ainsi la croissance des racines (Vacheron et al. 2013), ou de lutter contre la population de pathogènes en produisant des antibiotiques, des sidérophores⁴ ou en étant en compétition pour les nutriments (Singh 2015).

Il est important de comprendre et concevoir les interactions entre matière organique en décomposition et organismes vivants du sol comme étant un cercle vertueux : au plus on a de matière organique dans le sol, au plus on aura d'organismes vivants dans ce sol. Ces organismes dégradent et minéralisent les matières organiques plus rapidement lorsqu'ils sont plus nombreux, fournissant ainsi plus de nutriments aux plantes, qui formeront plus de matière organique si elles sont enfouies, etc. (Briat et Job 2017) Il peut être intéressant de signaler que la majorité des travaux dans ce domaine indiquent qu'il n'y a pas de relation entre la *diversité* des microbes dans le sol et la vitesse de minéralisation de la matière organique (Griffiths et al. 2000; Juarez et al. 2013), phénomène expliqué par la redondance fonctionnelle de ces organismes.

⁴ Les sidérophores sont des molécules présentant une très forte affinité pour l'ion Fe³⁺. Elles forment des complexes avec cet ion pour le rendre assimilable, et il sera ensuite utilisé dans le fonctionnement des microorganismes.

Tableau 1: Impact des différents groupes fonctionnels sur les fonctions, la biodiversité des sols et la production végétale. (King et al., 2016. D'après Lavelle, 2002)

Groupe fonctionnel	Impacts sur le fonctionnement des sols	Impacts sur la biodiversité	Impacts sur la production végétale
Plantes	Agrégation, porosité, cycle de l'eau et des nutriments, disponibilité de la MO du sol, activité biologique	Influence des micro-organismes de la rhizosphère : impact sur toute la chaîne trophique de décomposition	Absorption des nutriments et de l'eau, production des molécules chimiques régulatrices de croissance
Ingénieurs du sol (termites, fourmis, vers de terre)	Bioturbation ⁵ produisant des structures biogéniques (régulant les propriétés et les processus physiques des sols), participation à la dynamique de la matière organique des sols, au cycle des nutriments et à l'activité biologique du sol	Créateurs d'habitats pour d'autres organismes, impacts sur les transformateurs de la litière, mutualisme avec les micro-organismes, dissémination des organismes	Impacts positifs ou négatifs directs ou indirects sur les racines et les semences
Transformateurs de la litière (macro- et microarthropodes, enchytréides ⁶ et autres consommateurs de détritus)	Fragmentation de la litière, minéralisation des nutriments, protection et décomposition de la matière organique	Modification des micro-organismes	Le plus souvent des effets indirects
Phytophages et parasites de plantes	Bioturbation	Modification des espèces végétales	Impacts négatifs (se nourrissent des végétaux ou les détruisent)
Microprédateurs (nématodes et protozoaires)	Minéralisation des nutriments	Modification des communautés microbiennes	Le plus souvent des effets indirects
Micro-organismes : symbiotes, activateurs de croissance des plantes, pathogènes, recycleurs des nutriments, agents de contrôle biologique	Agrégation, décomposition, biodégradation des molécules toxiques, cycles et disponibilité des nutriments, contrôle biologique	Modification des plantes et autres organismes du sol	Impacts positifs ou négatifs directs et indirects sur la biomasse végétale

⁵ Bioturbation : mouvements de matière dus aux déplacements des organismes vivants. Ses effets sur le sol sont principalement l'ameublissement, l'oxygénation, la redistribution de la matière organique, la remontée en surface d'éléments enfouis et la neutralisation du pH. (Gobat et al. 2010)

⁶ Enchytréides : annélides la longueur varie entre 6 et 50 mm.

LES INDICATEURS BIOLOGIQUES DE LA SANTÉ DU SOL

Un concept très important dans le cadre de l'agriculture intensive s'est développé au cours du XXe siècle : celui de la santé des sols. La FAO (2016) la définit comme étant « la capacité du sol à fonctionner comme un système vivant. Les sols en bonne santé maintiennent en leur sein une diversité d'organismes qui contribuent à combattre les maladies des plantes, les insectes et les adventices, s'associent de façon bénéfique et symbiotique aux racines, recyclent les nutriments végétaux essentiels, améliorent la structure du sol et, partant, la rétention des eaux et des nutriments, le tout contribuant à améliorer la production végétale ». Les termes de *qualité* et de *santé* du sol sont globalement interchangeable même s'il convient de garder à l'esprit que la qualité du sol est reliée à sa fonction, tandis que sa santé le présente plutôt comme étant un écosystème, une ressource dynamique finie et non-renouvelable (Karlen et al. 2001; Kinyangi 2007).

Cependant, comme expliqué par John Doran (MacEwan et Carter 1996), il est difficile de définir en pratique un standard de bonne santé applicable aux sols agricoles car la perception de celle-ci dépend de l'usage du sol et des priorités et objectifs des exploitants. De plus, lorsqu'il s'agit d'évaluer quantitativement la santé d'un sol, le scientifique se heurte à une grande diversité d'indicateurs⁷, diversité qui s'étale dans différentes échelles de temps et d'espace. Kinyangi (2007) propose d'évaluer la santé du sol selon ce processus : sélectionner les indicateurs, déterminer le jeu de données minimal, développer un schéma d'interprétation des indices et la validation sur site agricole. L'intérêt d'une telle approche est de mettre l'accent sur l'aspect holistique de l'évaluation de la santé du sol, en prenant en compte tous les compartiments du 'système sol' plutôt que de mesurer séparément des paramètres avec pas ou peu de mise en contexte globale. Ajoutons que pour faire efficacement le lien entre la recherche scientifique et la pratique sur le terrain, les indicateurs choisis doivent être mesurables par le maximum de personnes, en particulier les agriculteurs.

Les indicateurs biologiques sont considérés comme très importants par beaucoup d'auteurs (van Bruggen et Semenov 2000; Doran 2002), et incluent souvent le taux de matière organique, la respiration, la biomasse microbienne et l'azote minéralisable (Kinyangi 2007; Krüger et al. 2017). Cependant, van Bruggen et Semenov (2000) considèrent que même si ces mesures permettent de bien évaluer la qualité d'un sol, elles ne sont pas adéquates pour en connaître la santé du sol en tant qu'écosystème. Ils argumentent que les indicateurs généralement choisis ne fournissent pas d'informations constamment corrélées à la santé du sol, et que ce manque de constance est peut-être dû à la grande sensibilité de ces indicateurs au moment de la mesure,

⁷ En métrologie – la science des mesures – un indicateur est « un outil d'évaluation, élément mesurable ou appréciable permettant de considérer l'évolution d'un processus par rapport à une référence ». (Dictionnaire de l'Académie Française. 2018)

dans le sens où elle peut être effectuée après un travail du sol, l'incorporation de résidus, un épisode pluvieux, ...

En conclusion, il ressort que beaucoup de travail a déjà été effectué vers l'établissement et l'utilisation massive d'indicateurs biologiques comme moyen d'évaluation de la santé des sols, mais que leur fiabilité et leur pertinence ne fait pas l'unanimité. La nécessité de déterminer un standard de bonne santé du sol apparaît néanmoins comme cruciale, en particulier dans le contexte actuel de prise de conscience de la pression exercée sur les sols du monde entier (voir Le sol, un milieu surexploité).

2. Le sol, un milieu surexploité

Par sa productivité et sa demande en intrants croissantes (FAOSTAT 2018), l'agriculture moderne demande à son substrat – le sol – une contribution de plus en plus importante à travers le monde. De cette utilisation poussée couplée à une artificialisation constante des sols résulte leur dégradation, que l'on peut définir comme étant la diminution ou disparition de leur capacité à remplir une ou plusieurs de leurs fonctions (King et al. 2008). Selon un rapport de la Commission européenne (2018), on peut compter huit menaces principales concernant les sols des pays de l'Union Européenne : la contamination, l'imperméabilisation, l'érosion, la diminution du taux de matière organique, le tassement, la réduction de la biodiversité, la salinisation, les inondations et les glissements de terrain.

- La **contamination des sols** peut être dite *diffuse* ou *ponctuelle*. La contamination diffuse provient généralement de l'atmosphère : des métaux toxiques ou autres polluants émis par l'activité humaine se déposent sur les sols cultivés. Elle peut également provenir des amendements organiques, telles des boues, qui peuvent présenter des teneurs élevées en éléments métalliques. La contamination ponctuelle provient quant à elle de sites d'activités industrielles lourdes (mines, décharges, sites industriels, ...).
- **L'imperméabilisation des sols** est due à l'urbanisation croissante qui remplace des sols naturels ou cultivés par des constructions artificielles (routes, bâtiments) qui ne permettent pas à l'eau de pluie de s'infiltrer correctement. Elle va alors ruisseler et peut créer des **coulées de boues ou des inondations**.
- **L'érosion des sols** correspond à une perte nette de sol. Les particules de sol se font emporter par le vent (érosion éolienne) ou par la pluie (érosion hydrique), emportant avec elles leur potentiel de fertilité. Selon le modèle *Pan-European Soil Erosion Risk Assessment* développé par Kirkby et al. (2003), 18% des sols européens présentent des risques de perte de plus d'1t.ha⁻¹.an⁻¹, perte considérée comme irréversible sur une échelle de temps de 50 à 100 ans. Cette irréversibilité temporaire découle de la lenteur de formation naturelle des sols. L'érosion est favorisée par des pratiques agronomiques inadaptées : sol laissé

nu sur de trop grandes périodes de temps, cultures sur parcelles à trop forte pente, destruction de la végétation alentour, ... La teneur en matière organique et la texture du sol jouent également un rôle.

- **La diminution du taux de matière organique (MO)** provoque une baisse de fertilité, de résistance à l'érosion et de biodiversité. Cette diminution a plusieurs causes connues : le labour profond, qui dilue la matière organique sur une plus grande profondeur ; la transformation de prairies (sols riches en MO) en parcelles cultivées ; l'exportation des résidus de culture et la faible restitution de MO.
- **Le tassement des sols** est provoqué par le passage d'engins agricoles lourds ou de surcharge de bétail sur des prairies. Ce tassement détériore la structure du sol et forme une couche compactée, qui limitera la croissance des racines et l'infiltration de l'eau et de l'air à travers le sol, avec des conséquences agronomiques néfastes.
- **La diminution de la biodiversité des sols** est une conséquence des problèmes listés ci-dessus : diminution de la teneur en MO (donc de la source d'énergie des organismes du sol), tassement, contamination, érosion. Cette diminution altère la capacité de l'écosystème 'sol' à remplir des fonctions écologiques telles que le maintien de la qualité de l'air, de l'eau et de sa propre fertilité. Ces externalités positives sont qualifiées de 'services écosystémiques' et sont bénéfiques aux activités humaines. À titre d'exemple, une étude de l'INRA (Gallai et al. 2009) a établi que la valeur de la contribution économique du service de pollinisation fourni par les insectes pour la production agricole utilisée directement dans l'alimentation humaine représentait 14 milliards d'euros, soit environ 10% de la valeur de la production agricole totale.

A l'exception de l'artificialisation, chacune de ces problématiques est liée à l'agriculture. Dans ce contexte, il paraît clair que, au-delà d'une prise de conscience, des changements dans les pratiques doivent survenir si l'on veut préserver la capacité des sols à combler les besoins des générations futures. Penchons-nous donc sur l'agriculture européenne et plus précisément sur ses impacts sur les sols wallons, ainsi que sur les moyens à la disposition des agriculteurs pour contrer cette dégradation des sols à grande échelle.

3. L'évolution de l'agriculture en Europe

Au cours du XX^e siècle, l'agriculture s'est industrialisée grâce au développement d'engins agricoles et d'intrants de synthèse (engrais et produits phytosanitaires). Ces intrants de synthèse permettent aux agriculteurs de 'maîtriser la nature' et de multiplier les rendements (Bairoch 1989), et les machines de plus en plus puissantes autorisent un travail du sol plus profond, atteignant des profondeurs jamais travaillées auparavant. Le labour et le travail intensif du sol sont érigés en idéaux apportant des solutions aux problèmes passés (Pousset 2012).

En Europe, l'augmentation de la productivité a été fortement encouragée dès 1962 par la Politique Agricole Commune (PAC), qui visait à l'époque une modernisation et un développement de l'agriculture européenne (Commission Européenne 2018b). Les exploitations se spécialisent, l'intensification se poursuit au fil des ans, et les rendements augmentent continuellement tant en Europe qu'en Wallonie, qui est soumise aux mêmes conditions (CSA 2008).

En conséquence à cette intensification constante de l'agriculture (sans qu'il ne s'agisse de la seule cause), l'état des sols ne cesse de se dégrader sur le continent, comme le signale la Commission Européenne (2018a) dans un rapport destiné au Conseil et au Parlement.

4. Conséquences sur les sols wallons

Voyons quelles sont les conséquences de ces pratiques sur l'état des sols wallons. Intéressons-nous à deux paramètres cruciaux pour la viabilité du système : l'érosion hydrique et la matière organique des sols. Les Figure 2 et Figure 3 (SPW Agriculture 2018c; SPW Agriculture 2018a) indiquent une même réalité : les sols sont en meilleur état dans le Sud-Est de la Wallonie que dans le Nord-Ouest, avec une érosion moindre (voire nulle) et une bien plus grande teneur en carbone organique dans les sols. Les régions limoneuse et sablo-limoneuse présentent un état de dégradation parmi les plus avancés de Wallonie. Ces disparités peuvent s'expliquer par la différence d'utilisation du sol : les bonnes terres des régions limoneuse, sablo-limoneuse et du Condroz sont majoritairement utilisées pour les grandes cultures ; le reste de la SAU est plutôt occupé par des prairies (SPW Agriculture 2018b). Or, les prairies ont une capacité de stockage de carbone organique bien plus élevée que celle des sols cultivés (Goidts et van Wesemael 2007; CSA 2008).

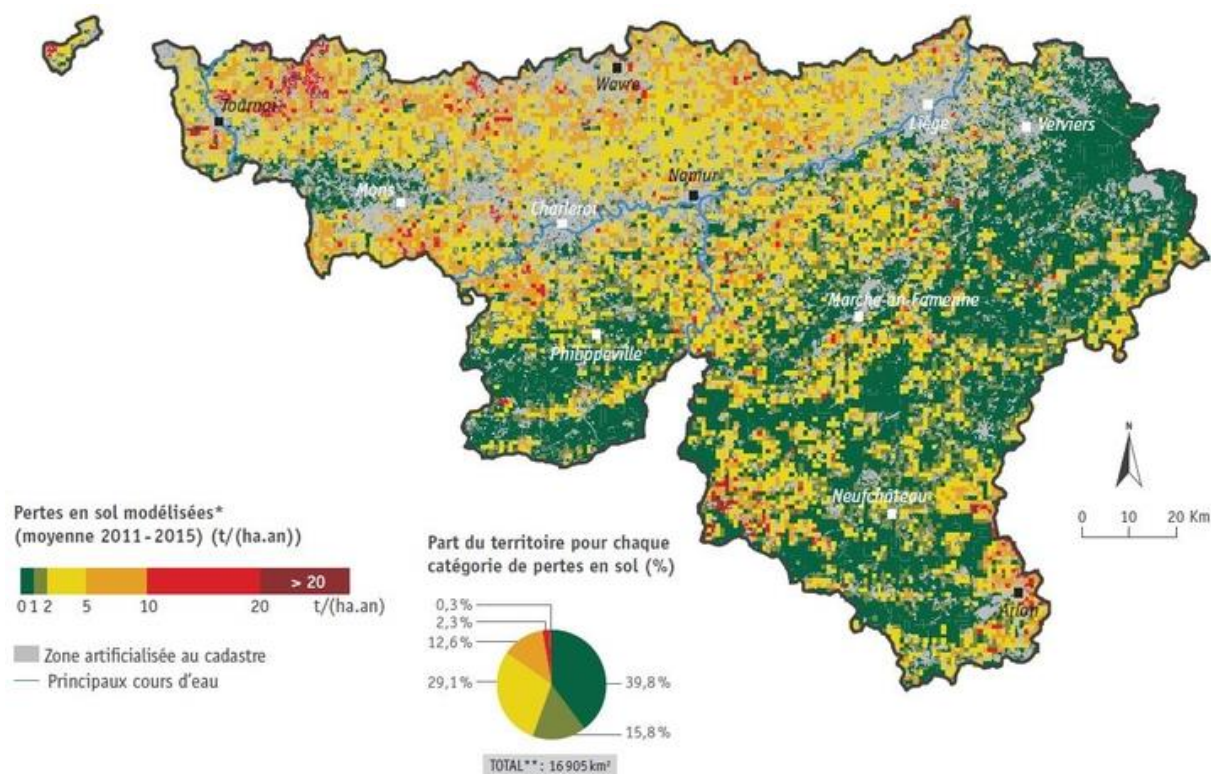


Figure 2: Pertes estimées en sols à la suite de l'érosion hydrique en Wallonie.

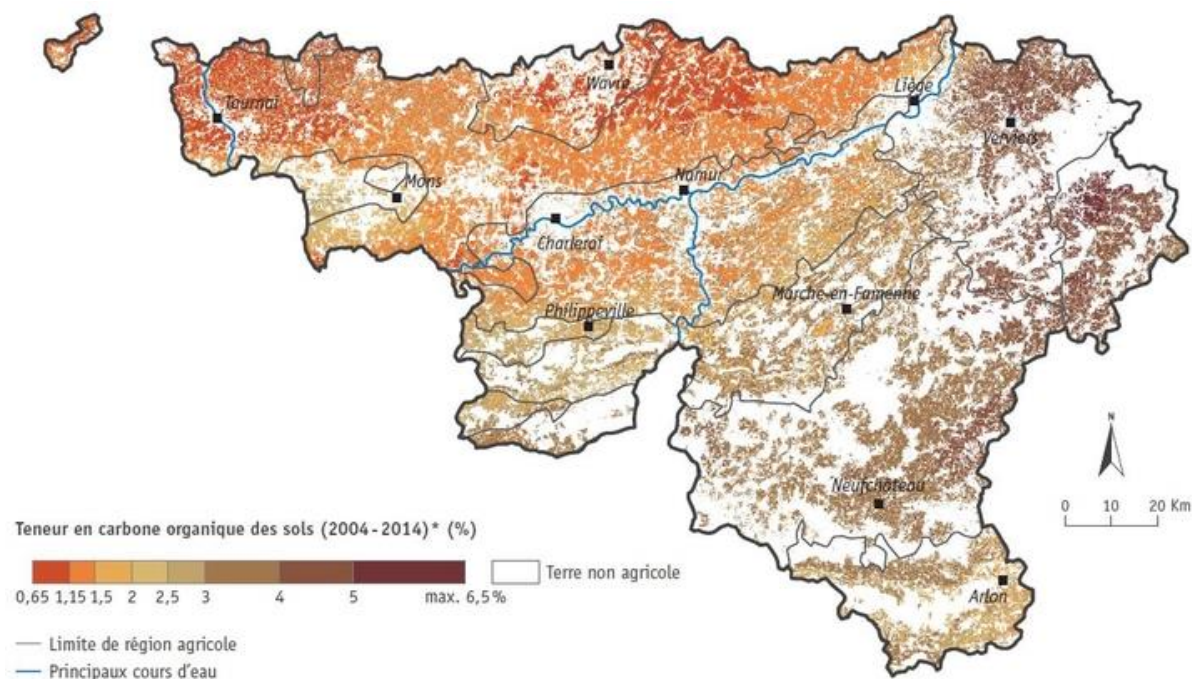


Figure 3: Teneur en carbone organique des sols agricoles wallons. Pour obtenir le pourcentage de matière organique totale dans les sols, il est d'usage de multiplier la teneur en carbone organique par un facteur de conversion de 1,724.

Les teneurs faibles en MO (de 1,12 à 2,59% de matière organique totale) et la forte érosion hydrique (de 2 à plus de 10 tonnes/ha.an) des sols utilisés pour les grandes cultures peuvent alarmer, et il est nécessaire de se demander comment des changements dans les pratiques agricoles peuvent contribuer à améliorer la qualité de ces sols. La suite de ce chapitre apporte des pistes de réflexion à ce sujet, notamment au niveau du travail du sol et de l'usage des couverts végétaux.

5. Pratiques culturales et impacts

1. Travail du sol

GÉNÉRALITÉS

Par 'travail du sol', nous désignons l'ensemble des travaux mécaniques qui ont pour impact de fragmenter le sol. Ces travaux ont des impacts directs et indirects sur les caractéristiques du sol. (Labreuche et al. 2014)

L'impact direct le plus important est une modification de la structure du sol, due aux outils qui fragmentent et déplacent le sol mais également aux machines agricoles qui tassent le sol avec leur masse importante. Le type de travail du sol détermine la façon dont celui-ci est modifié : son retournement plus ou moins profond (ou pas du tout) influence le gradient vertical de certains éléments minéraux, des résidus de culture, des amendements ou des stocks de graines d'adventices. La présence de mulch (couverture du sol par des résidus de cultures, ou des plantes vivantes) est également déterminée par le travail du sol, et principalement par la pratique ou non du labour. Une telle couverture du sol permet de le protéger contre les adventices et l'érosion, et est active dans la régulation des flux d'eau et de chaleur ainsi que dans le bon développement de la faune du sol. (Chung et Horton 1987; Brévault et al. 2007; Sarkar et Singh 2007)

Nous avons pu voir que la structure du sol était modifiée lors de son travail, or celle-ci joue un rôle crucial dans le déroulement des phénomènes qui y ont lieu : conditions de développement de la faune et la flore du sol, aération et teneur en eau, type et cinétique des réactions biogéochimiques, ... (Gobat et al. 2010). Tous ces impacts sont évidemment déterminants dans la gestion d'une culture. Les choix en termes de travail du sol influencent les performances et externalités d'une exploitation et il ne convient donc pas de les effectuer à la légère, surtout dans le contexte actuel où l'agriculture doit faire face à de nombreux défis d'ordre économique, agronomique et environnemental. Selon Morris et al. (2010), il est possible de représenter les différents effets du travail du sol au niveau de l'exploitation sur trois axes : le coût, le rendement et les bénéfices environnementaux. Trois itinéraires types de culture sont représentés : le conventionnel avec labour (*conventional tillage*), le travail du sol simplifié (*minimum tillage*) et le semis direct (*direct drilling*) (voir Figure 4).

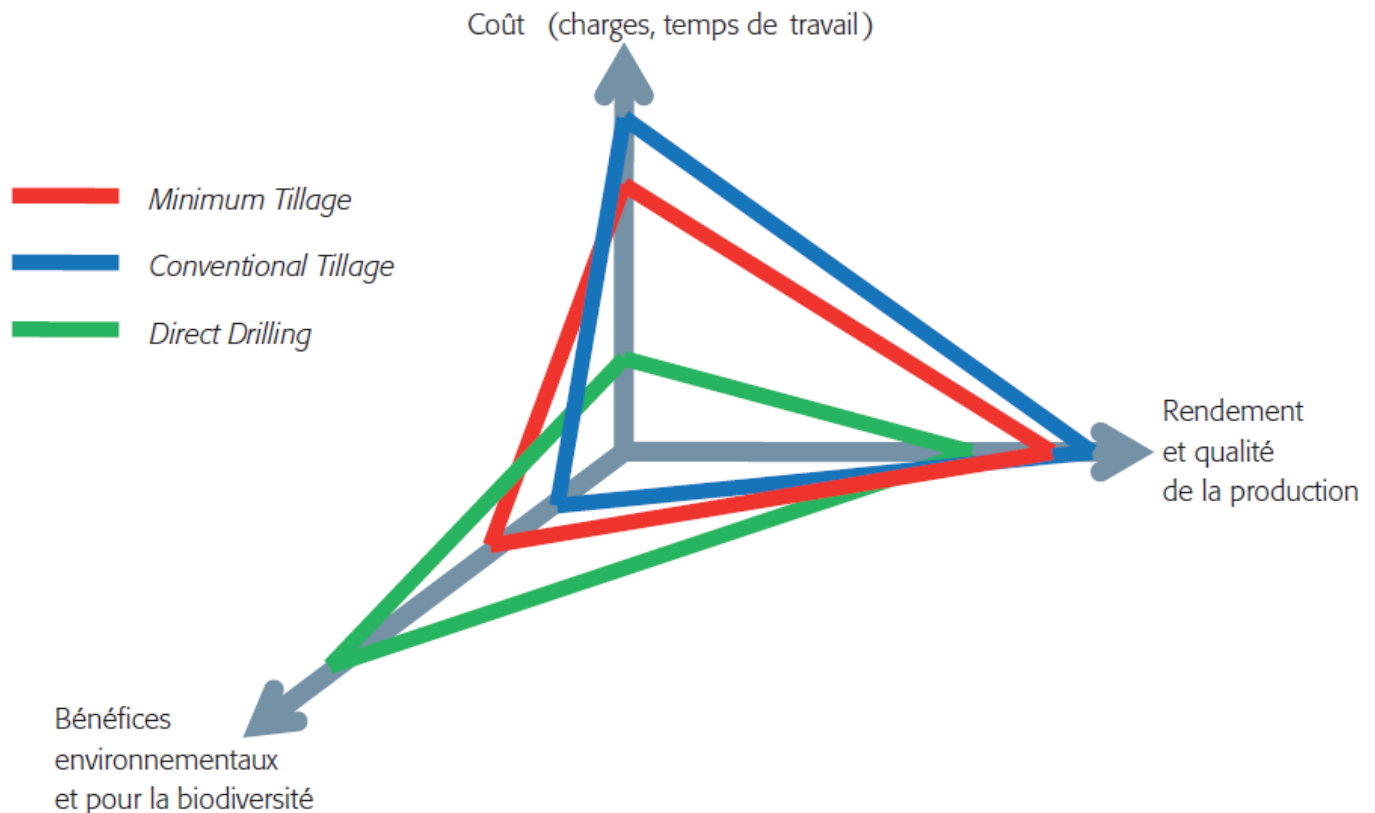


Figure 4: Performances des différents itinéraires de travail du sol (d'après Morris et al. 2010). Minimum tillage = travail minimum du sol ; Conventional tillage = labour classique ; Direct drilling = semis direct.

On peut voir qu'il n'existe pas de 'solution miracle' et que l'augmentation des bénéfices environnementaux va de pair avec une diminution théorique du rendement. La prudence est toutefois de mise lors de la généralisation de ce graphique : une grande diversité de pratiques existe à l'intérieur même de chaque itinéraire type et il n'est par exemple pas systématiquement vrai qu'un itinéraire de travail du sol simplifié ait des coûts de productions et un rendement moindres qu'un itinéraire conventionnel.

DIFFÉRENTES PRATIQUES

La palette d'interventions envisageables pour les agriculteurs étant très large avec des machines et outils de tous types, il convient donc de classer et regrouper les différentes pratiques de travail du sol. Labreuche *et al.* proposent un classement (Figure 5) selon trois critères :

- L'effet de l'outil sur le sol et les résidus de culture
- La profondeur de travail
- La proportion de la surface de la parcelle qui reçoit ce travail de manière effective

		Fragmentation + Retournement + Enfouissement	Mélange + Enfouissement	Pas de mélange et un minimum d'enfouissement		
			Fragmentation sans retournement			
Profondeur	Pas de travail	semis : 3 cm, reste: 0 cm			Semis direct (sous couvert)	
	Superficiel	3 - 15 cm	Labour très superficiel (≤15cm) Déchaumeur à versoirs	Travail superficiel Dents, disques, chisel, herse, houes, cultivateur, canadien vibroculteurs	Travail superficiel en bandes Strip tillers Rotasemis	
	Profond	15 - 40 cm	Labour +/- profond Charrue à versoirs (+rasette)	Pseudo-labour machines à bêcher, charrue à disques, cultivateurs lourds (chisel), pulvérisateurs lourds (disques), charrue Express	Décompactage lames, dents	
	Très profond	40 - 80 cm	Labour très profond, défoncement Charrue « robuste »		Sous-solage dents (+ obus)	
		100%	100%	Bandes 30%	100%	Ligne de semis 5%
Zone travaillée (%)						

Figure 5: Classification des opérations de travail du sol selon l'effet de l'outil, la profondeur de travail et la proportion de la surface de la parcelle effectivement travaillée. (Labreuche et al., 2014)

On peut donc distinguer quatre effets principaux du travail du sol : la fragmentation, le retournement, l'enfouissement et le mélange. Ces travaux peuvent être faits à différentes profondeurs : jusqu'à 3 cm pour le semis, de 3 à 15 cm pour du travail superficiel et de 15 à 40 cm pour du travail profond. Rarement, un travail sous les 40 centimètres peut être effectué, mais l'usage du labour de défoncement n'entre pas dans le cadre des opérations classiques de grandes cultures. La succession des choix de modes de travail d'une même parcelle constitue un système de travail du sol, défini comme étant 'la combinaison logique des opérations mécaniques sur le sol, ayant pour objectif la préparation de ce dernier pour y recevoir les cultures de la succession' (Sébillotte 1974). De la diversité des opérations envisageables naît évidemment une diversité de ces systèmes, également appelés itinéraires techniques. Selon Labreuche et al. (2007), il est possible de classer ces itinéraires de deux manières possibles : selon l'opération la plus profonde ou selon les objectifs poursuivis par l'agriculteur.

La **classification selon l'opération la plus profonde** est la suivante :

- **Les systèmes avec labour** : usage de la charrue à versoirs lors du travail profond. Les interventions culturales sont déterminées par ce labour, tant antérieurement qu'ultérieurement.
- **Les systèmes de travail superficiel avec travail profond sans retournement** : cet itinéraire s'appuie par un pseudo-labour qui précède un travail superficiel pour préparer le lit de semences. Selon Labreuche et al. (2007), le travail profond dans ce genre de systèmes est effectué avec un décompacteur.
- **Les systèmes de travail superficiel** : en plus du semis, on effectue uniquement des travaux superficiels, tel le déchaumage.
- **Le semis direct** : le travail du sol est uniquement réalisé sur la couche superficielle de la ligne de semis, et la semence est implantée immédiatement. Généralement, les outils utilisés à cet effet sont des semoirs à disques.

La **classification selon les objectifs poursuivis** distingue quant à elle :

- **Les systèmes 'conventionnels'** : ce sont les systèmes les plus courants (du moins en Europe), ceux qui font intervenir la charrue comme outil principal de travail du sol.
- **Les systèmes de travail simplifié** : on parle souvent de Techniques Culturales Simplifiées (TCS) pour évoquer des systèmes sans labour. Le non-labour et les TCS sont assimilables pourvu que l'intensité avec laquelle le sol est travaillé soit fortement réduite par rapport aux systèmes conventionnels.
- **Les systèmes d'agriculture de conservation** : il s'agit de systèmes intégrant les aspects physiques, chimiques et biologiques des sols avec pour objectif la conservation et/ou l'amélioration de leurs propriétés. Ces systèmes reposent sur trois piliers : la réduction du travail du sol (sans retournement) ou le semis direct ; le maintien d'une couverture végétale permanente (morte ou vivante) ; la pratique d'une rotation suffisamment variée et longue. (García-Torres et al. 2010)

EFFETS DES TCS SUR LES PROPRIÉTÉS DU SOL

Les techniques culturales simplifiées ont différents effets sur le sol. Premièrement, grâce à l'absence de retournement et d'enfouissement, la matière organique du sol est surtout située en surface (West et Post 2002), ce qui a pour effet d'augmenter la stabilité structurale des agrégats (Franzluebbers et Arshad 1996; Rhoton et al. 2002) et ainsi de lutter contre l'érosion. Celle-ci est également limitée par la présence de résidus de cultures à la surface, créant ainsi une barrière physique contre les gouttes de pluie et limitant l'effet 'splash' qui arrache et entraîne des particules de sol (Döring et al. 2005) ainsi que par l'augmentation de la porosité biologique (surtout verticale)

due à l'activité lombricienne, qui permet une meilleure infiltration de l'eau dans le profil (Labreuche et al. 2007). Il convient toutefois de préciser que lors de la conversion des pratiques conventionnelles aux TCS, la porosité du sol a tendance à présenter une diminution variable (Rasmussen 1999; Kay et VandenBygaart 2002) due à la diminution de fragmentation du sol mais que l'activité biologique structurante finit par contrer cette diminution de porosité. Cette diminution est considérée comme étant une période de transition, qui peut durer de quelques années à plus de quinze ans selon les auteurs (Ball et al. 1994; Friedel et al. 1996; Richard et al. 2001; Anken et al. 2004). La population de microorganismes et de décomposeurs du sol est affectée par tous ces changements dans leur milieu de vie dus aux TCS, et il en résulte généralement une augmentation de la biodiversité et de l'activité biologique. (Labreuche et al. 2007)

2. Couverts végétaux

DÉFINITION

En agriculture, une culture intermédiaire, également appelée 'couvert végétal' ou simplement 'couvert' est une culture temporaire implantée entre deux cultures principales (cultures de rente) afin de limiter la lixiviation des nitrates, diminuer l'érosion et la battance⁸ et lutter contre les adventices. Elles peuvent également être utilisées pour enrichir le sol en azote (usage de légumineuses) et en matière organique avant la culture suivante.

Lorsque le but de cette culture est de piéger les nitrates pour éviter leur lixiviation, on la qualifie de Culture Intermédiaire Piège à Nitrates, ou CIPAN. On parlera plutôt d'engrais vert lorsque les objectifs poursuivis sont ceux de l'enrichissement du sol en matière organique et en azote. Dans ce travail, toutes les cultures intermédiaires seront qualifiées de couverts végétaux.

LÉGISLATION

En Wallonie, les pratiques liées à l'usage des couverts sont réglementées par une législation précise selon la zone et l'itinéraire cultural. (PROTECT'eau asbl 2018b) Il est possible de dégager quatre situations :

- **Partout en Wallonie** : après fertilisation organique entre le 1^e juillet et le 15 septembre, une CIPAN est obligatoire du 15/09 au 15/11

⁸ La battance est la désagrégation d'un sol sous l'effet de la pluie, formant une croûte qui bouche les pores en surface. Elle peut survenir sur des sols finement travaillés qui subissent un épisode de forte pluie, ou être indicatrice d'une pauvreté en matière organique.

- **Sur les parcelles en pente sujettes à l'érosion (R10-R15⁹)** : obligation de couvert du 15 septembre au 1^{er} janvier, sauf après une culture sarclée¹⁰
- **En zone vulnérable** : 90% des surfaces récoltées avant le 1^{er} septembre et suivies par des cultures de printemps doivent être couvertes au minimum du 15/09 au 15/11
- **En zone vulnérable après légumineuse** : si la légumineuse est récoltée avant le 1^{er} août et suivie d'un froment, un CIPAN est obligatoire du premier septembre au premier octobre.



Figure 6: Carte des zones wallonnes vulnérables au lessivage des nitrates

La zone vulnérable s'étend sur une surface risquant de contribuer à l'eutrophisation de la Mer du Nord, ainsi que là où la concentration en nitrates des eaux de sous-sol dépasse – ou risque de dépasser – les 50 mg/l. Cette zone vulnérable est composée de six territoires : les Sables bruxelliens, le Crétacé de Hesbaye, le territoire de Comines, le Pays de Herve, le Sud Namurois et le Nord du sillon Sambre et Meuse. La désignation de chacune de

ces zones a fait l'objet d'un arrêté ministériel (PROTECT'eau asbl 2018c).

Pour les agriculteurs, il est possible de valoriser les CIPAN en Surfaces d'Intérêt Ecologique (SIE) et de bénéficier de primes prévues dans le cadre de la Politique Agricole Commune (PAC). Les conditions sont plus contraignantes : le couvert doit être composé de minimum deux espèces de familles différentes faisant partie d'une liste et présent minimum trois mois (semis entre le premier juillet et le premier octobre). Il ne peut pas être détruit chimiquement ni recevoir de fertilisation minérale azotée, et les conditions de fauche et de pâturage sont également plus strictes (PROTECT'eau asbl 2018a).

EFFETS

Les objectifs poursuivis par l'implantation de couverts en interculture sont les suivants : lutter contre la lixiviation des nitrates, l'érosion, la battance et les adventices, augmenter l'activité biologique, la teneur en azote (engrais vert) et en matière organique et structurer le sol.

⁹ La désignation R10-R15 d'une parcelle signifie qu'elle présente une pente minimale de 10 ou 15% sur au moins la moitié de sa superficie, ou sur plus de 0,5 ha.

¹⁰ Culture sarclée : culture nécessitant plusieurs interventions culturales (hors pesticides) après le semis. Exemples : maïs, betteraves, pommes de terre, légumes.

La lixiviation des nitrates est le processus au cours duquel les nitrates sont dissous dans l'eau de pluie et emportés verticalement par son infiltration, jusqu'à une nappe phréatique ou un réseau de drainage souterrain. Il s'agit d'un phénomène naturel qui est devenu problématique à cause des applications d'engrais azotés sur les sols cultivés. Les nitrates, largement en excès, se retrouvent ainsi dispersés dans l'environnement, présentant des risques pour la santé et la biodiversité (eutrophisation des milieux aquatiques¹¹). C'est pour lutter contre cette lixiviation que les CIPAN ont été mis en avant dans les conseils et la législation (Destain et al. 2010). Les espèces choisies à cet effet l'ont été en vertu de leur capacité à être bien établies pour capter des nitrates avant l'automne, période de pic de transformation d'azote organique en azote minéral¹² (Thomas et Archambeaud 2016).

L'utilisation des couverts comme **engrais vert** est due à la capacité qu'ont les légumineuses à fixer l'azote atmosphérique et à l'utiliser pour leur développement grâce aux nodules formés sur leurs racines par les bactéries du genre *Rhizobium*. Les légumineuses captent donc de l'azote atmosphérique lors de l'interculture, et lors de la culture suivante les résidus enfouis en relâchent lentement une partie dans le sol en se décomposant. Cette propriété des légumineuses est utilisée pour réduire l'apport en azote sur la culture suivante.

Les engrais verts peuvent également être utilisés pour augmenter la **teneur en matière organique** du sol. Lors de la destruction de la couverture végétale, la biomasse peut être exportée (biométhanisation, fourrage) ou restituée dans ou sur le sol.

L'érosion d'un sol est réduite par la végétation. Celle-ci réduit en effet le déplacement latéral de l'eau en surface tout en favorisant son infiltration en profondeur via l'action de fractionnement du sol par les racines. La présence d'un couvert permet également de diminuer l'énergie cinétique des gouttes d'eau de pluie lorsqu'elles touchent le sol, évitant ainsi une trop grande dispersion des particules de sol. L'effet antagoniste des couverts contre la **battance** suit la même logique. De plus, la végétation améliore la **stabilité structurale** du sol en stimulant la formation d'agrégats et les galeries creusées par d'anciennes racines permettent une meilleure aération (Dabney et al. 2001).

Grâce à leur croissance rapide, les couverts vont vite couvrir la surface du sol et **empêcher le développement d'adventices** en les privant directement du rayonnement solaire. Cela permet de diminuer la présence d'adventices au cours de la culture principale en diminuant le stock de graines du sol.

¹¹ L'eutrophisation des milieux aquatiques est le processus par lequel des plantes et algues prolifèrent excessivement suite à une trop forte présence en nutriments et 'étouffent' leur milieu en consommant tout l'oxygène de l'eau lors de leur décomposition.

¹² Ce phénomène s'appelle la minéralisation et est dépendant des conditions de température, d'humidité et d'oxygénation (travail du sol).

Enfin, **l'activité biologique** est fortement stimulée par la présence de couverts. Par opposition aux sols nus, une couverture végétale protège la faune et la flore des variations de températures et leur fournit un abri et de la nourriture. Ces organismes assurent différentes fonctions agronomiques :

- La macrofaune (>2 mm) fragmente et mélange verticalement les débris végétaux dans le sol et en développe la porosité. Les vers de terre constituent une bonne partie de la macrofaune et leurs déjections créent des agrégats stables et fertiles.
- La mésofaune (0,1 à 2 mm) broie la matière organique et la rend accessible à la microflore.
- La microflore (<0,1 mm) assure la décomposition de la matière organique en éléments minéraux disponibles pour les plantes. Les champignons et actinomycètes piègent également les agrégats dans leurs réseaux à l'aide de protéines, sucres et lipides, augmentant la stabilité structurale du sol.

Chapitre 2: La culture de blé d'hiver

1. Généralités

Le blé tendre est le nom commun de l'espèce *Triticum aestivum vulgare*. Il peut être adapté à un semis d'automne ou de printemps, auquel cas on le qualifie respectivement de 'blé d'hiver' (ou froment d'hiver) ou de 'blé de printemps'. Le blé tendre est une monocotylédone hexaploïde de la famille des Poacées (ou graminées) et est une des espèces végétales les plus cultivées à travers le monde (FAOSTAT 2018). En Wallonie, les céréales, froment d'hiver en tête, viennent en deuxième position dans le classement de l'utilisation de la surface agricole utile (SAU) après les prairies, comme visible dans le Tableau 2 présentant une moyenne des données récoltées sur la période 2014-2016 (SPW Agriculture 2018b):

Tableau 2: Superficie et pourcentage de la SAU de différentes cultures en Wallonie

Culture	Superficie (ha)	Pourcentage SAU totale
Prairies	308.580	42,18
Céréales	196.419	26,85
Froment d'hiver	132.085	18,06
SAU totale	731.570	100

Il est à noter que l'usage des terres est fonction de leur localisation : les grandes cultures (céréales, cultures industrielles¹³, pommes de terre) sont majoritaires dans le Nord-Ouest de la Wallonie tandis que les prairies se trouvent plutôt dans le Sud-Est. Ainsi, dans le Brabant Wallon, on avait en 2015 9% de pommes de terre, 10% de prairies permanentes, 11% de betteraves sucrières et 33% de froment. (Le centre provincial de l'agriculture et de la ruralité (CPAR) 2016)

Si au niveau mondial, la culture de céréales sert surtout à l'alimentation humaine, il en va autrement en Belgique : seuls 9% des récoltes de froment sont destinés à notre alimentation (Delcour et al. 2014) via la filière de la meunerie. On retrouve ce blé sous forme de farine dans l'industrie alimentaire et la boulangerie. Par opposition, quasiment la moitié (45%) de la production de céréales wallonnes est vouée à

¹³ Les cultures industrielles regroupent notamment les betteraves sucrières, le lin, le colza et la chicorée à inuline.

l'alimentation animale, que ce soit sous forme de grains ou de coproduits. Nous pouvons également noter l'usage du froment pour la production de bioéthanol (minimum 27% de la production).

2. Itinéraire de culture

1. Place dans la rotation

La rotation culturale est un enchaînement répété de cultures sur une même parcelle au fil des ans. Elles peuvent être biennales avec deux cultures qui se succèdent toujours dans le même ordre, triennales avec trois cultures, quadriennales... S'il n'y a pas de rotation, on parle de *monoculture*. La rotation permet de briser le cycle de certains ravageurs et adventices, d'alterner les désherbants pour éviter les résistances et d'alterner les types de systèmes racinaires pour exploiter et structurer le sol de différentes manières.

Le froment vient généralement en deuxième place dans la rotation, après une culture de printemps (parfois de colza d'hiver) qualifiée de 'tête de rotation'. Une tête de rotation est une culture très productive et exigeante, qui recevra généralement de la fumure organique. En plaçant le blé en deuxième position, on peut ainsi récolter la tête de rotation vers le mois d'octobre (plus tôt pour le lin et le colza, parfois également pour la pomme de terre) puis semer le froment, qui occupera le sol pendant l'hiver et reprendra sa croissance avec la remontée des températures au printemps.

2. Travail du sol et semis

Le blé, comme les autres céréales, n'est pas très sensible à l'état de compaction du sol. En **agriculture conventionnelle**, le labour n'est donc pas obligatoire si les cultures et récoltes précédentes ont été réalisées dans de bonnes conditions, mais il est toutefois conseillé après des pommes de terre (structure à refaire, humidité lors de la récolte) ou du maïs (résidus d'herbicides et taille des chaumes)(Bertin 2017). **Dans les autres cas**, un passage au cultivateur à dents est généralement suffisant. Un travail du sol en profondeur (par exemple avec un décompacteur) peut remplacer le labour si la structure du sol n'est pas satisfaisante. Il est également possible d'effectuer un semis direct.

La situation la plus fréquente en matière de **travail du sol conventionnel** est de passer avec deux tracteurs. Le premier avec une charrue ou un cultivateur à l'arrière, et le second avec : cultivateur et rouleau à l'avant, herse rotative à axe vertical et semoir à l'arrière. L'objectif de la herse rotative est de préparer un lit de semence où la terre est très fine afin de maximiser la surface de contact entre la graine et le sol. **En TCS**, il est plus courant de passer avec un cultivateur et un semoir à disques, ou avec une herse rotative suivie d'un semoir classique.

Les graines de céréales pouvant transporter de nombreuses maladies, il est important de veiller à leur qualité sanitaire. Pour ce faire, si un agriculteur souhaite réutiliser une partie des graines issues de sa production, il lui est très fortement conseillé de les désinfecter avec un fongicide à large spectre d'action. Les semences commerciales font elles l'objet de nombreux traitements, notamment contre les insectes et les maladies fongiques.

Le semis se pratique généralement entre mi-octobre et mi-novembre afin d'avoir le temps de récolter la culture précédente et d'éviter d'avoir des adventices qui se développent avant l'hiver si on sème trop tôt. Le blé d'hiver étant une espèce ayant besoin d'une période de vernalisation, il n'est pas bon de le semer plus tardivement. Il est conseillé de semer environ 250 grains/m² en octobre et de 300 à 400 grains/m² en novembre, avec un taux de levée variant de 85% pour un semis d'octobre à 75% pour un semis de novembre (Livre blanc des céréales, 2018).

3. Interventions

Quand une culture de froment est implantée à partir de fin octobre, les adventices n'ont pas le temps de se développer avant l'hiver. En **agriculture conventionnelle**, un désherbage chimique est généralement effectué à la sortie de l'hiver, quand le sol est correctement ressuyé afin de ne pas détruire la structure lors du passage des machines. Il faut également attendre que la première talle soit visible pour éviter de détruire la culture en même temps que les adventices. Un deuxième passage d'herbicide est possible en avril pour éliminer les dicotylées restantes, en veillant à ce que l'épi en développement dans la tige mesure au moins un centimètre pour ne pas le rendre stérile. En **agriculture biologique**, l'utilisation de variétés compétitives face aux adventices et la technique du faux-semis seront privilégiées. Le faux-semis consiste en un ou plusieurs passages avec un outil de travail du sol afin de faire remonter les semences d'adventices en surface et de favoriser leur germination précoce avant le semis de la culture. Une fois les adventices en germination, un nouveau travail du sol est effectué pour les détruire. Cette technique permet d'empêcher le développement d'adventices au cours de l'automne, quand le blé n'est pas encore couvrant. Une fois la culture implantée, si des adventices sont tout de même présentes, il est possible de passer entre les lignes de semis avec différents outils : la herse étrille, la houe rotative ou encore la bineuse.

Sur une parcelle bien entretenue, un apport en phosphore et potassium n'est généralement pas requis pour une culture de blé, mais un apport azoté reste nécessaire. Il est souvent divisé en trois fractions : une au stade 'plein tallage' en mi-mars, un au stade 'redressement' en mi-avril et un au stade 'dernière feuille' dans la deuxième moitié du mois de mai. (Livre blanc des céréales, 2018) Il est parfois indiqué d'apporter l'azote en seulement deux fractions (une entre le tallage et le redressement, l'autre au stade dernière feuille), en particulier lorsque la culture précédente laisse un reliquat azoté élevé dans le sol et que le blé est semé précocement et à forte densité. Il est

important de veiller à ne pas fournir trop d'azote à la culture de froment. D'une part pour empêcher de déverser trop de nitrates dans l'environnement et d'autre part pour éviter un excès du développement végétatif du blé (tiges trop grandes) qui entraîne un risque accru de verse et de maladie. Toujours pour éviter la verse, il est courant d'utiliser un raccourcisseur, qui est une solution liquide avec comme substance active du chloroméquat, un ammonium quaternaire, qui va limiter la croissance des entrenœuds.

Les maladies les plus fréquentes chez le blé sont les rouilles jaune (*Puccinia striiformis*) et brune (*Puccinia recondita*), la septoriose (*Septoria tritici*) et l'oïdium (*Erisiphe graminis*). Pour les éviter, il est recommandé de choisir des variétés résistantes (surtout en agriculture biologique), d'éviter les excès d'azote et de faire un traitement préventif au fongicide lorsque 80% des épis sont sortis (Bertin, 2017). Si ces pathogènes se développent tout de même, une gamme de fongicides à effets variés fait partie de l'arsenal de lutte des agriculteurs. La pression des insectes sur la culture se fait généralement peu sentir : les pucerons peuvent propager des viroses mais causent souvent assez peu de problèmes chez le blé.

4. Récolte

La récolte se fait à la moissonneuse-batteuse, généralement vers mi-août quand les grains sont bien remplis et que l'humidité est sous les 15%. Cependant, en 2018, la récolte a eu lieu exceptionnellement tôt (deux tiers de la superficie de froment auraient été récoltés à la date du 23 juillet) pour cause de sécheresse et températures élevées. Sur la période allant de 2014 à 2016, le rendement moyen en Wallonie était de 8,47 tonnes à l'hectare (SPW, 2018), et selon le CRA-W cette sécheresse ne devrait pas avoir influencé les rendements ni la qualité du grain récolté étant donné qu'elle est intervenue tard dans la saison, à un stade où le système racinaire déjà bien développé du froment lui a permis d'aller puiser de l'eau en profondeur (Rosillon et al. 2018).

Après la récolte, il faut s'occuper des pailles. Il est possible de les broyer avec la moissonneuse-batteuse lors de la récolte pour ensuite les enfouir ou en faire un mulch, ou de ne pas les broyer et d'en faire des ballots à l'aide d'une presse.

3. Réponses à des changements de pratiques

Différentes études ont montré que les cultures d'automne, dont le froment, sont plus adaptées aux techniques culturales simplifiées que les cultures de printemps. Il semblerait que ce soit dû à la plus faible sensibilité à la compaction des cultures d'automne et à leur plus grande capacité de compensation (il est nécessaire de compenser le retard pris par le réchauffement printanier plus lent du sol dans des systèmes sans labour) (Labreuche et al. 2014). Une fois passée la période de transition (voir 'Effets des TCS sur les propriétés du sol'), les rendements en froment se montrent

très similaires pour les systèmes conventionnels ou simplifiés, comme le montre la Figure 7.

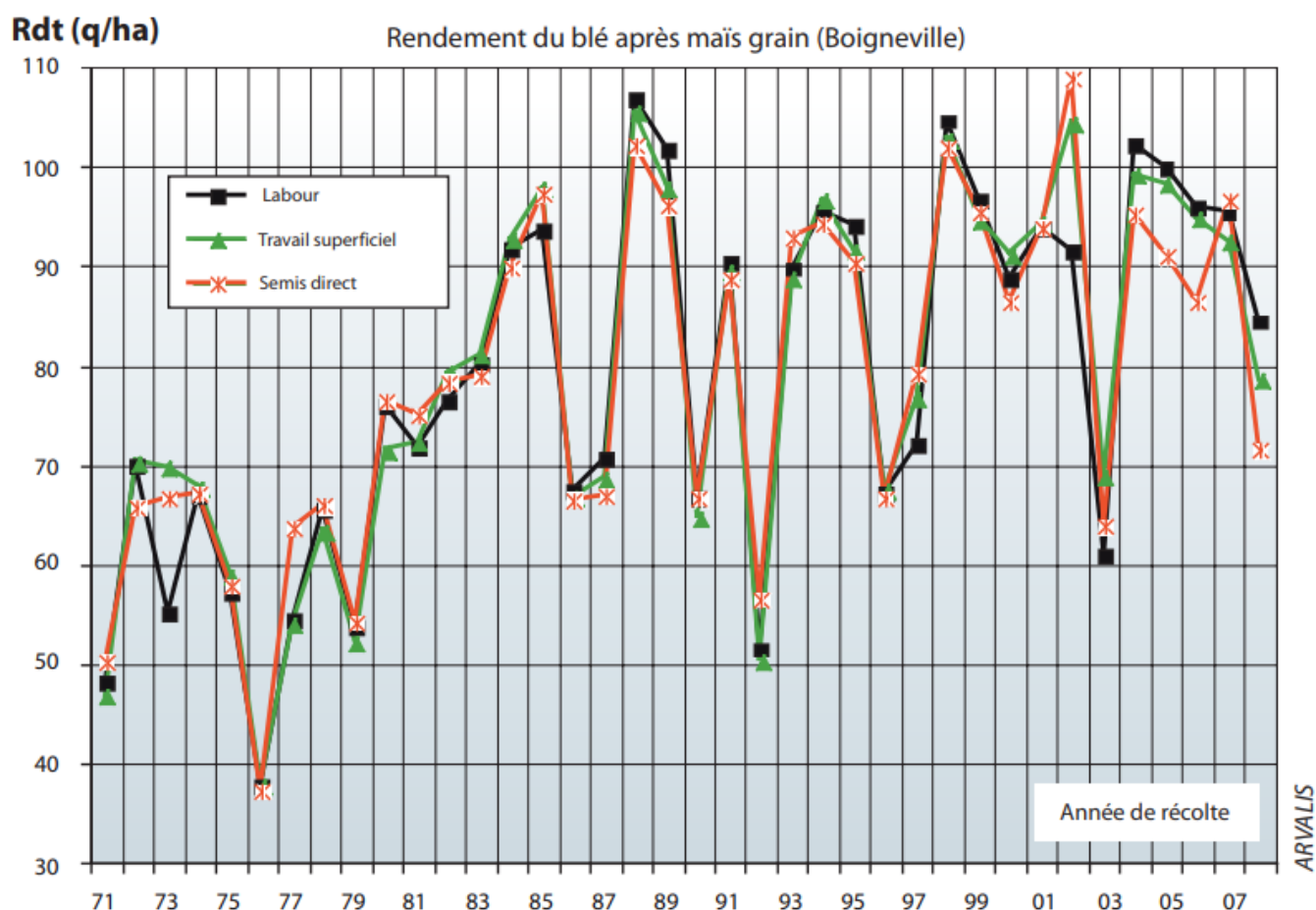


Figure 7: Rendement de blé d'hiver suivant une culture de maïs grain selon trois systèmes de travail du sol: le labour (conventionnel), le travail superficiel et le semis direct. Essais effectués à Boigneville, dans l'Essonne (91), France

Les TCS permettent également d'économiser du temps et du carburant lors de l'implantation de la culture (en particulier en semis direct). Au niveau des adventices, le désherbage doit néanmoins être effectué plus tôt (au moyen d'un herbicide foliaire plutôt que racinaire : les résidus de récolte en surface limitent leur efficacité), et une attention particulière doit être accordée à la gestion des couverts durant l'interculture : plus la végétation sera dense, moins les adventices auront l'opportunité de se développer et de monter en graines. Il semblerait que la fusariose sur épis soit plus fréquente en TCS qu'en conventionnel à cause des résidus en surface, surtout des cannes de maïs. Il est alors conseillé de broyer finement ces résidus et de les incorporer dans les premiers centimètres du sol (Chambres d'agriculture de Bretagne et ARVALIS - Institut du végétal 2008).

Chapitre 3: Objectifs du mémoire

Dans le contexte actuel de forte pression sur les sols wallons dédiés aux grandes cultures, il paraît crucial de s'intéresser à la diversité des pratiques agricoles, pratiques influençant de manière variable la structure et le fonctionnement des sols, qui sont littéralement à la base de toute production de nourriture. Dans ce cadre, ce travail est articulé autour de deux objectifs principaux :

Faire un état des lieux des pratiques agricoles d'un échantillon d'agriculteurs adhérent à Regenacterre. Nous nous intéressons aux généralités à propos de la ferme (bétail, superficie, région agricole, ...), puis un intérêt particulier est porté aux pratiques en termes de travail du sol et d'utilisation des couverts végétaux, jugées très importantes pour leur impact sur les sols. Pour travailler sur un standard commun et ne pas rencontrer de problèmes lors de l'échantillonnage, la culture de blé d'hiver a été choisie comme référence pour le travail du sol.

Un résultat recherché de l'analyse des pratiques agricoles est l'établissement de catégories d'agriculteurs à l'aide d'une analyse des correspondances multiples suivie d'une classification ascendante hiérarchique. Ces catégories nous permettent de **comparer les effets des différents systèmes de culture** (notamment les TCS et l'agriculture conventionnelle) **sur la structure et le fonctionnement du sol.**

Les moyens de mesure utilisés dans cette étude remplissent certains critères : ils sont simples, rapides et validés par la recherche scientifique. Le choix de la simplicité et rapidité des mesures a été fait pour des raisons pratiques, mais également pour que ces protocoles 'parlent' plus aux agriculteurs que des mesures de laboratoire, et qu'ils puissent *in fine* s'approprier ces techniques et évaluer eux-mêmes leurs sols au fil des ans s'ils y portent un intérêt particulier. Aussi, tous les paramètres mesurés concernent l'activité biologique et la structure du sol, qui ont été établis comme étant des indicateurs fiables de la qualité des sols.

Deuxième partie : Matériel et méthodes

Chapitre 4: Contexte de l'étude

Dans le cadre de ce mémoire, une enquête a été menée chez 17 agriculteurs du Brabant wallon ou alentours (3 sont situés en dehors : un à Gembloux, un autre à Éghezée et le dernier aux Bons Villers, dans le nord du Hainaut). Cette enquête a été accompagnée chez chacun des agriculteurs par une série de mesures en champ. Quatre exploitants ayant exprimé leur intérêt pour une comparaison de deux de leurs parcelles, le nombre de champs étudiés s'élève à 21. Toutes les questions posées et les mesures effectuées dans ce travail portent sur la culture de blé tendre d'hiver, *Triticum aestivum vulgare*.

Tableau 3: Liste des agriculteurs (anonymisée), de la commune, de la géolocalisation et de la région agricole des champs étudiés

Agriculteur	Commune	Géolocalisation de la parcelle étudiée	Région agricole
A	Beauvechain	50,754881 N, 4,812100 E	Limoneuse
B1	Beauvechain	50,738630 N, 4,789493 E	Limoneuse
B2	Beauvechain	50,742113 N, 4,782596 E	Limoneuse
C1	Chastre	50,650684 N, 4,579765 E	Sablo-limoneuse
C2	Chastre	50,650732 N, 4,582057 E	Sablo-limoneuse
D	Chaumont-Gistoux	50,663853 N, 4,752165 E	Limoneuse
E	Chaumont-Gistoux	50,657338 N, 4,646966 E	Sablo-limoneuse
F	Chaumont-Gistoux	50,673622 N, 4,738525 E	Limoneuse
G	Chaumont-Gistoux	50,656725 N, 4,683442 E	Limoneuse
H	Chaumont-Gistoux	50,676513 N, 4,631408 E	Sablo-limoneuse
I	Éghezée	50,559110 N, 4,831316 E	Limoneuse
J	Gembloux	50,510669 N, 4,716917 E	Limoneuse
K	Genappe	50,619996 N, 4,427834 E	Sablo-limoneuse
L	Jodoigne	50,667839 N, 4,818531 E	Limoneuse
M	Les Bons Villers	50,531697 N, 4,434882 E	Limoneuse
N1	Nivelles	50,607237 N, 4,385708 E	Sablo-limoneuse

N2	Nivelles	50,603285 N, 4,381976 E	Sablo-limoneuse
O1	Perwez	50,635347 N, 4,826197 E	Limoneuse
O2	Perwez	50,657529 N, 4,763365 E	Limoneuse
P	Perwez	50,615781 N, 4,796396 E	Limoneuse
Q	Walhain	50,602074 N, 4,691652 E	Limoneuse

La région agricole où se trouve chaque parcelle a été vérifiée à l'aide des données disponibles sur la plateforme en ligne de la Région wallonne (SPW Géomatique 2018). La carte ci-dessous a pour but de fournir au lecteur une meilleure représentation de la localisation des terres étudiées.

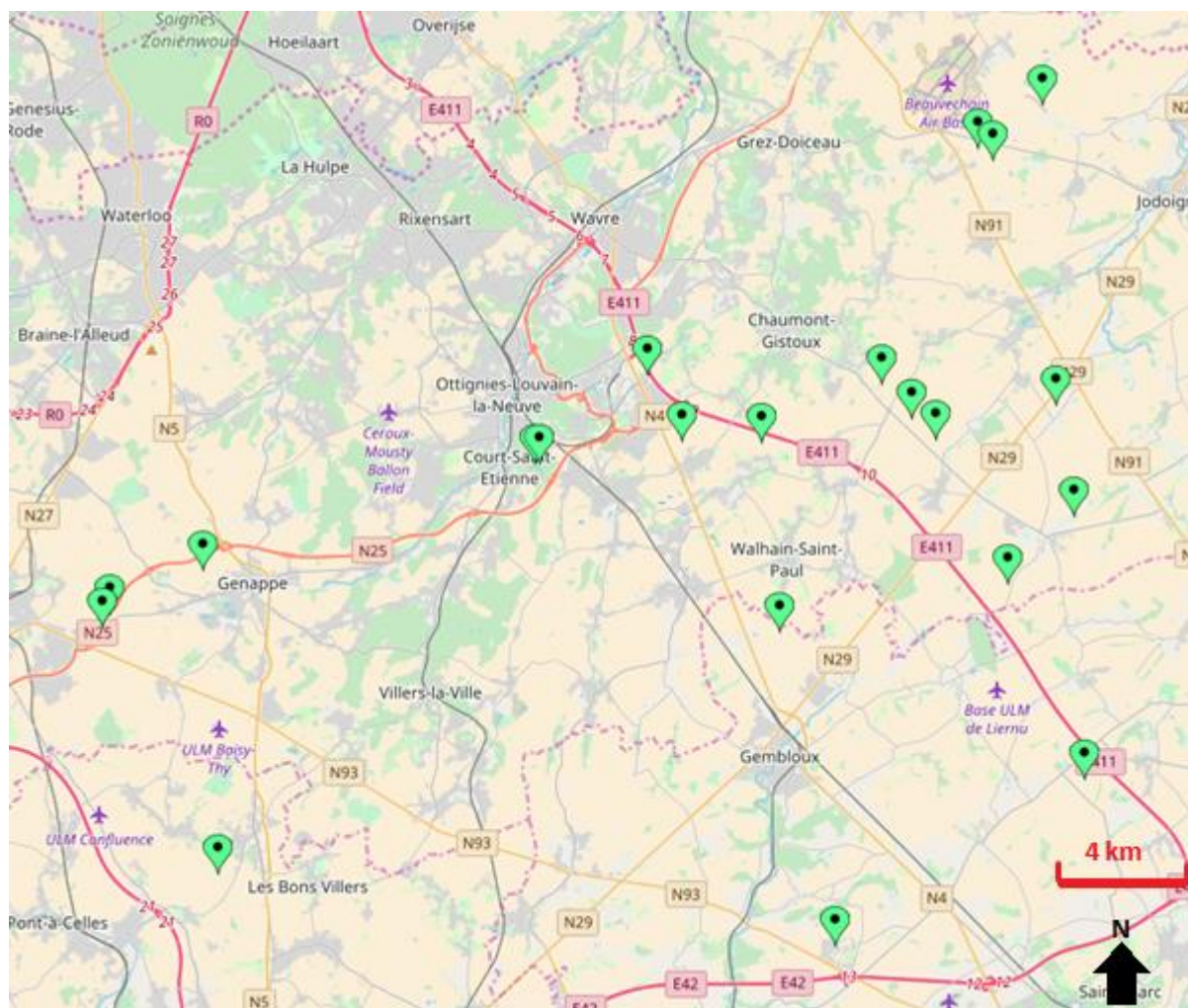


Figure 8: Localisation de chaque parcelle étudiée dans le cadre de ce mémoire

Ces agriculteurs sont ou ont été membres de l'asbl Regenacterre qui propose des services de conseil agronomique et d'achats groupés (semences et produits

phytosanitaires) avec pour objectif de promouvoir et développer une agriculture de régénération des sols en Belgique. On peut donc retrouver une diversité de pratiques agricoles dans l'échantillon enquêté : 9 agriculteurs ont déclaré avoir des pratiques dites « conventionnelles » tandis que les 8 autres se positionnent dans un système plus actif pour la conservation des sols ou sont en transition vers celui-ci.

Chapitre 5: Méthode d'enquête et de mesures

1. Méthode d'enquête

1. La préparation

Après des réunions et de la revue bibliographique, la stratégie d'enquêtes a été établie : des entretiens semi-dirigés seraient réalisés chez des agriculteurs de Regenacterre, et suivis par une série de mesures en champs. L'objectif de l'enquête était d'avoir une bonne représentation de la gestion globale de l'exploitation, et d'obtenir des données plus précises sur les sujets d'intérêt de cette étude : l'usage des couverts et les travaux du sol. Celui des mesures est de pouvoir mettre en relation les pratiques agronomiques des agriculteurs interrogés et les résultats obtenus en parcelle en termes d'activité biologique, de compaction ou de structure du sol.

Un questionnaire (voir annexe) a été rédigé sur base d'un outil d'évaluation de durabilité des fermes en cours de développement par Regenacterre. Il a pour vocation d'être un outil de suivi de l'évolution des pratiques et de leur impact sur la durabilité des fermes ainsi qu'un support de conseil agronomique. Il vise à cibler des points-clés dans les domaines suivants :

- Les **cultures** : la durée de la rotation, l'usage de cultures associées, l'utilisation d'engrais vers et la diversité des productions ;
- L'**environnement** : la diversité dans la population d'insectes, l'importance accordée à l'impact de l'exploitation sur le paysage, la présence de bandes enherbées ;
- La **gestion** : évaluation du degré d'indépendance et d'information de l'agriculteur lors de sa prise de décision, vente à la ferme ou non ;
- Les **intrants** : engrais, utilisation annuelle de carburant, liste et quantité de pesticides utilisés ;
- La **mécanique** : fréquence et intensité (poids) du passage des machines, volume de bouillie pulvérisé par hectare ;
- Le **sol** : taux de matière organique et pH issus d'analyses de sol, présence et fréquence de la battance, taux de couverture du sol sur l'année, efficacité du drainage, compaction, respiration du sol, concentration de vers de terre, pratique du labour.

Tous ces points ont été abordés lors des entretiens à l'exception de la respiration du sol, qui est inconnue de l'agriculteur à moins d'avoir fait réaliser une analyse en laboratoire. Il est toutefois reconnu que certains points sont destinés à ne recevoir que des réponses en partie subjectives, telles l'importance accordée au paysage, l'indépendance dans la prise de décision ou la présence de lombrics.

En marge de l'exploitation de l'outil d'évaluation de durabilité, il a été décidé de récolter plus d'informations à propos des pratiques de travail du sol (tous les travaux

avant et pendant la culture) dans le cadre de la **culture de froment d'hiver**, ainsi que les pratiques liées à l'usage des couverts (moments d'implantation et de destruction, espèces utilisées, mode de destruction, objectif poursuivi). Le choix de la culture de blé d'hiver est dû à sa présence dans la rotation de la plupart des agriculteurs wallons, facilitant ainsi la démarche d'échantillonnage. Ce choix s'est avéré efficace : sur une vingtaine d'agriculteurs contactés, un seul a dû décliner la proposition d'enquête parce qu'il ne cultivait pas de blé.

2. L'échantillonnage

Regenacterre possède une base de données comprenant les coordonnées des agriculteurs et le type d'agriculture pratiquée, avec comme possibilités 'labour', 'TCS'¹⁴ ou 'semis direct'. Les agriculteurs n'ont pas été tirés aléatoirement mais sur base de critères géographiques et de type de pratiques, favorisant ainsi une diversité de pratiques dans des conditions agro-climatiques les plus similaires possibles. Bien sûr, une des contraintes était la disponibilité et la volonté des agriculteurs à participer à l'étude mais cet aspect n'a pas présenté beaucoup de problèmes, la grande majorité d'entre eux ayant répondu favorablement.

Les agriculteurs choisis ont d'abord été contactés par téléphone afin de leur présenter brièvement le travail, ses objectifs et le temps approximatif qu'ils consacraient à l'entretien. Un rendez-vous était alors fixé à leur domicile.

3. Les entretiens

Les entretiens étaient semi-dirigés. Cela signifie que l'enquêteur et l'enquêté étaient en discussion ouverte mais en suivant un canevas préétabli dans le guide d'entretien, avec néanmoins des questions nécessitant des réponses précises et complètes. Ce type d'entretien permet non seulement de collecter des données factuelles ou chiffrées, mais également de recevoir des informations imprévues qui peuvent réorienter la recherche ou donne un angle nouveau à la réflexion. Il est également possible de comprendre la psychologie de l'enquêté et les raisonnements cachés derrière ses choix dans la gestion de l'exploitation, pourvu que l'enquêteur soit assez à l'écoute. (Kaufmann 2016)

Durant chaque entretien, des notes étaient prises à la volée par ordinateur et un enregistrement audio était effectué, pour combler les notes lacunaires.

¹⁴ Les TCS, pour Techniques Culturelles Simplifiées, sont un ensemble de pratiques limitant les travaux du sol.

4. Le traitement des données collectées

Les notes prises durant l'entretien étaient le support principal lors du traitement et de l'encodage des données dans des feuilles Excel. Les enregistrements audio ont servi lorsque les notes ne permettaient pas de remplir totalement les fiches. En tout, 17 entretiens ont été réalisés pour un total de 998 minutes, ce qui représente une moyenne de 59 minutes par entretien.

2. Méthodes de mesures

1. Plan expérimental

Pour chaque champ étudié, la zone choisie pour effectuer les mesures était un carré d'une dizaine de mètres de côté correspondant aux critères suivants :

- Terrain plat ou avec pente la plus faible possible
- Hors des traces de passage de tracteur
- Au moins à 15m des limites de la parcelle

L'emplacement de chaque zone choisie a été marqué par un drapeau et les coordonnées GPS ont été enregistrées afin de s'assurer de le retrouver précisément. Toutes les mesures ont été prises dans cette zone, sauf le Solvita® Field Test pour lequel du sol a été prélevé dans les diagonales du champ entier (voir point 5).

2. Mesure de la compaction

L'intensité et la profondeur de compaction du sol ont été mesurées à l'aide d'un pénétromètre agricole. Comme visible sur la photo (Figure 9), il s'agit d'une barre métallique à enfoncer dans un sol cultivé, équipée de poignées et d'un cadran d'affichage de pression à l'extrémité supérieure et d'une pointe effilée à l'autre extrémité. Lorsque l'expérimentateur enfonce l'outil dans le sol, le cadran affiche la résistance de celui-ci à la pression – en d'autres mots, sa compaction.



Figure 9: Pénétrromètre

Sur le modèle utilisé (Agratronix Soil Compaction Tester, USA), l'unité utilisée pour afficher la compaction est la livre-force par pouce carré (psi). Au niveau de la conversion, nous avons $1 \text{ psi} = 6894,76 \text{ Pa}$, ou $1 \text{ psi} = 0,069 \text{ bar}$.

Le cadran indique des valeurs allant de 0 à 400 psi. De 0 à 200, le sol est considéré comme non compacté et le pénétrromètre s'enfonce aisément dans le sol ; de 200 à 300, légèrement compacté ; de 300 à 400, fortement compacté. Il est spécifié dans le manuel d'utilisation d'arrêter d'enfoncer la barre si la valeur de 400 psi est dépassée : à ce stade, le pénétrromètre ne s'enfonce plus. Sur la barre métallique on retrouve des graduations : une tous les 3 pouces (7,62 cm).

La stratégie de mesures était la suivante : dans la zone de mesures,

l'outil a été enfoncé dans le sol, jusqu'à ce que l'aiguille soit dans la zone rouge (>300 psi). La profondeur atteinte à ce moment-là a été notée à la demi-graduation près. L'opération est à répéter au moins 5 fois, avec quelques pas de distance entre chaque mesure. Quand au moins 80% des mesures indiquaient une compaction à la même profondeur – ce qui a toujours fini par se produire – cette profondeur était retenue.

3. Test à la bêche

Le test à la bêche est une méthode d'observation visuelle des 30 premiers centimètres d'un sol cultivé (avec une culture ou un couvert installé au moment de l'observation) ou d'une prairie. Cette pratique est une version simplifiée du profil cultural, plus complet, qui va jusqu'à 1,5 m de profondeur et qui s'étend sur une longueur de 3 à 4 m. La méthode, utilisée par la Chambre d'Agriculture d'Alsace, est la suivante (Figure 10) :

1. Creuser une pré-tranchée dans la zone choisie pour effectuer le test
2. Découper des sillons dans la continuité de la pré-tranchée, délimitant un bloc de sol que l'on désire retirer

3. Planter sa bêche de l'autre côté du bloc de sol d'intérêt et le sortir, en perturbant le moins possible le sol et sa structure
4. Décrire le mini-profil retiré à l'aide d'une grille d'évaluation reprenant les méthodes de Görbing et Diez (Mueller et al. 2009)

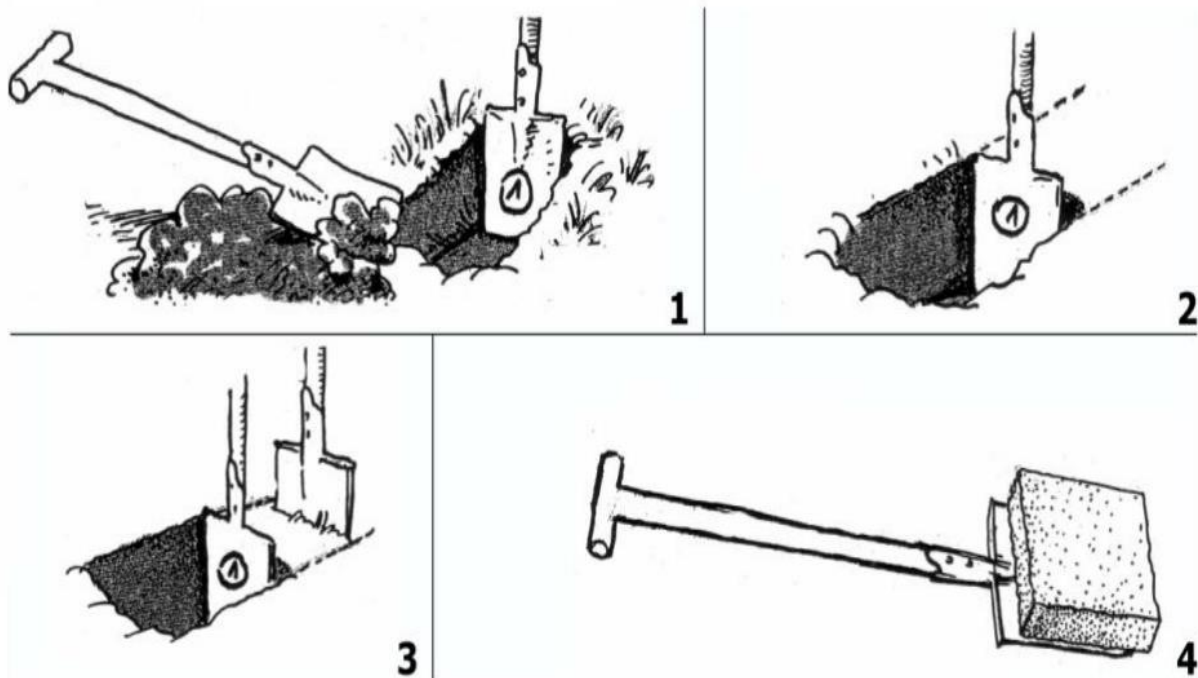


Figure 10: Représentation du mode opératoire du test à la bêche

La grille d'évaluation – voir annexe – donne une note allant de 1 (meilleure note) à 5 (moins bonne note) pour une série de 8 critères. La note globale est une moyenne des notes obtenues pour chacun des critères. Ces critères sont :

- L'aération de la surface (porosités)
- Le type d'agrégats dans la couche arable
- Le type d'agrégats dans la couche du sous-sol
- La cohésion de la bêche : décrire si la transition entre les horizons est progressive ou abrupte
- La quantité de trous et galeries
- La densité de racines saines et la présence d'obstacles à leur croissance
- La dégradation des matières organiques (résidus de culture)
- L'engorgement du sol : présence de taches rouges (rouille¹⁵) voire gris-bleu (hydromorphie¹⁶)

Cette méthode d'évaluation a pour avantages la simplicité, la rapidité et le peu de matériel nécessaire. Elle souffre néanmoins d'un inconvénient : la semi-subjectivité

¹⁵ La rouille est l'état du fer oxydé et sa présence indique une saturation occasionnelle en eau

¹⁶ Un sol est dit hydromorphe s'il montre des marques physiques d'une saturation régulière en eau, telle que des taches bleu-gris, la couleur du fer à l'état réduit

liée à l'observateur. Dans le cas de cette étude, tous les tests ont été effectués par la même personne, ce qui limite cette subjectivité. Il faut néanmoins garder à l'esprit qu'une marge d'erreur plus grande que pour d'autres types de mesures est à prendre en compte lors de l'interprétation et de la mise en contexte de ces résultats.

4. Slake test

Le slake test, traduisible par 'le test de l'infusion', connaît de nombreuses variantes (Greenland et al. 1975; de Soyza et al. 1997; Herrick et al. 2001) qui reposent toutes sur le même principe : plonger une motte de terre cultivée dans de l'eau et observer la vitesse avec laquelle elle se décompose. Ce procédé permet d'obtenir une indication rapide et très peu coûteuse de la cohésion du sol lors de son humidification, directement sur le terrain si nécessaire. L'Université d'Illinois et le Service de Conservation des Ressources Naturelles des États-Unis, dépendant du Département d'Agriculture (USDA NRCS) opposent le slake test à celui de la stabilité structurale en expliquant que si le test de stabilité structurale mesure à quel point le sol résiste à une force extérieure (celle d'une goutte d'eau s'écrasant au sol lors d'une pluie), le slake test mesure quant à lui la résistance du sol à des forces *internes*, notamment celles dues au gonflement des particules d'argile ou à l'air s'échappant des pores (Susan Andrews et al. 2011a).

Dans le cas des espèces végétales couvrant la totalité du sol peu après l'hiver, comme c'est le cas pour le froment, il est plus intéressant de se pencher sur le 'slaking' que sur la stabilité structurale : on peut en effet supposer que la majorité de l'énergie cinétique des gouttes d'eau est dissipée par l'impact sur la culture, annulant ainsi l'effet 'splash' pouvant désagréger le sol. Après être atterrie sur un plant de froment, l'eau finira néanmoins sur le sol par gravité, provoquant le gonflement du sol et peut-être sa désagrégation par slaking : c'est cet effet-là que l'on cherche à mesurer.



Figure 11: Matériel utilisé pour le slake test. Avant-plan : casier à mottes ; arrière-plan : réservoir d'eau dans lequel est plongé le casier.

Dans cette étude, le mode opératoire était celui utilisé par Regenacterre, adapté aux conditions locales. Il est le suivant :

1. Prélever des mottes de terre à la surface des parcelles choisies et les faire sécher à l'air pendant minimum 24h
2. Fragmenter à la main les mottes pour obtenir des agrégats d'environ 4-5 cm
3. Les disposer dans un casier conçu à cet effet (voir FIGURE), qui retient les blocs de terre mais laisse passer l'eau et les agrégats qui se détachent
4. Plonger ce casier dans l'eau ; les mottes doivent être entièrement immergées
5. Attendre une minute puis sortir et replonger 5 fois le casier dans l'eau
6. Observer l'état de dégradation des mottes ; noter pour chacune s'il reste moins de 10% intacts
7. Répéter les étapes 4-5-6 jusqu'à ce qu'il reste moins de 10% pour chaque motte (maximum 5 fois au total).

On peut ensuite classer chaque sol dans une catégorie selon ces critères :

Classe 1	Moins de 10% restants après 1 fois les étapes 4-5-6
Classe 2	Moins de 10% restants après 2 fois les étapes 4-5-6
Classe 3	Moins de 10% restants après 3 fois les étapes 4-5-6
Classe 4	Moins de 10% restants après 4 fois les étapes 4-5-6

Classe 5 Moins de 10% restants après 5 fois les étapes 4-5-6

Classe 6 Plus de 10% restants après 5 fois les étapes 4-5-6

5. Solvita® Field Test

Les laboratoires Woods End (USA) commercialisent un kit de mesure de la respiration des sols, le Solvita® Field Test. Le principe est de mettre une quantité donnée de sol dans un bocal hermétique et d'y placer durant 24h une sonde recouverte d'un gel dont la couleur varie en fonction de la quantité de CO₂ dans l'air (Haney et al. 2008; Haney et al. 2018). Le protocole qui a été suivi est celui décrit dans le manuel d'utilisation fourni par la société (Solvita® 2016). Pour chaque parcelle étudiée :

- Prélever 8 à 12 échantillons de sol (de 0 à 10 cm de profondeur). Dans cette étude, les prélèvements ont été effectués le long des diagonales des parcelles, qui étaient rectangulaires.
- Mélanger les sols prélevés, de manière à obtenir un grand échantillon homogène
- Tamiser cet homogénat avec une maille de 6 mm
- Disposer 90 g de ce mélange tamisé dans le bocal hermétique (240 cm³) fourni dans le kit
- Déballez la sonde et la planter dans le bocal. Le refermer et le laisser à la même température que celle de l'extérieur
- Retirer la sonde 24h plus tard et noter sa couleur
- Relier la couleur à l'émission approximative de CO₂ du sol grâce à la clé de lecture et aux données fournies dans le manuel



Figure 12: Bocal hermétique Solvita contenant un échantillon de sol et une sonde réagissant au dioxyde de carbone

La détermination exacte de la couleur d'une sonde n'étant pas toujours chose aisée, il est conseillé de comparer tous les résultats obtenus entre eux en les alignant de la plus bleue (le moins CO₂) à la plus jaune (le plus de CO₂). Il est important de réaliser les prélèvements de sol dans des conditions similaires d'humidité et de température si une comparaison entre les résultats de différentes parcelles est pratiquée. Dans notre cas, ils ont tous été faits du 26 au 28 mai 2018, dans les jours qui suivaient des pluies et le pourcentage d'humidité dans chaque sol a été mesuré par la différence 'poids frais – poids sec' d'échantillons ramenés au laboratoire dans des sachets hermétiques.

6. Teabag Index

L'objectif de cette expérience est d'obtenir des informations sur la capacité du sol – ou plutôt des microorganismes qui y vivent – à dégrader la matière organique en matière minérale. La comparaison de la décomposition en parcelle du thé vert (rapide) et du thé rooibos (lente) nous permettra d'obtenir un facteur de stabilisation et un taux de décomposition pour chaque zone étudiée. Le coefficient de stabilisation (S) représente l'effet inhibiteur de l'environnement sur la dégradation de la matière organique. Plus précisément, une partie de la fraction hydrolysable se *stabilise* dans le sol en se liant avec lui et devient récalcitrante à la dégradation. Plus le facteur de stabilisation est élevé, plus la proportion de matière organique hydrolysable sera faible. Le taux de décomposition (k) caractérise la vitesse de la matière organique *labile*, c'est-à-dire celle qui se dégrade rapidement, par opposition à la matière organique *récalcitrante*, qui a une dégradation beaucoup plus lente, sur une échelle de temps trop grande pour cette étude. Plus le taux de décomposition est élevé, plus la matière organique du sol sera dégradée rapidement. Notons également que l'on peut considérer la composition du thé dans les sachets comme étant uniforme du fait de sa production industrielle et contrôlée.

Le protocole suivi est celui préconisé par Keuskamp et al. (2013) :

- Utiliser un sachet de thé vert Lipton et un sachet de thé rooibos Lipton par répétition (4 répétitions par parcelle étudiée)
- Sécher les sachets à 70°C pendant 48h
- Les numéroter et les peser à 0,001 g près. Peser des sachets vides avec et sans leur étiquette pour déterminer le poids du sachet et de l'étiquette
- Dans chaque parcelle, enfouir 4 fois un sachet de thé vert et un sachet de thé rooibos à 8 cm de profondeur en perturbant le sol le moins possible ; laisser dépasser les étiquettes afin de retrouver les sachets ultérieurement
- Noter la date d'enfouissement et la position géographique
- Après environ 90 jours, venir récupérer tous les sachets de thé
- Retirer les racines ou agrégats à la surface des sachets et les faire sécher 48h à 70°C
- Retirer les étiquettes mais laisser la ficelle, peser le restant
- Calculer pour chaque parcelle le facteur de stabilisation (S) et le taux de décomposition (k)

a_g	Fraction décomposable du thé vert	m_{ig}	Masse initiale du thé vert (g)
a_r	Fraction décomposable du thé rooibos	m_{fg}	Masse finale du thé vert (g)
H_g	Fraction hydrolysable du thé vert	m_{ir}	Masse initiale du thé rooibos (g)
H_r	Fraction hydrolysable du thé rooibos	m_{fr}	Masse finale du thé rooibos (g)
S	Coefficient de stabilisation	W_r	Fraction massique restante du thé rooibos
k	Taux de dégradation	t	Temps d'enfouissement (jours)

H_g et H_r sont des constantes valant respectivement 0,842 et 0,552 (voir Keuskamp *et al.* (2013) pour le raisonnement). Les calculs effectués pour obtenir le S et le k sont les suivants :

$$a_g = 1 - \frac{m_{fg}}{m_{ig}}$$

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

$$a_r = H_r (1-S)$$

$$k = \frac{\ln\left(\frac{a_r}{W_r - (1-a_r)}\right)}{t} \quad \left(\text{où } W_r = \frac{m_{fr}}{m_{ir}}\right)$$

Le thé vert étant rapidement dégradé, on estime que toute sa partie décomposable aura quitté le sachet à la fin de l'expérience. On peut donc estimer cette partie dégradée (a_g) grâce au rapport du poids final et initial. De là, et connaissant la fraction hydrolysable (H_g) du thé vert, on peut déterminer le coefficient de stabilisation S , c'est-à-dire la tendance qu'a l'environnement à empêcher la matière organique de se dégrader. Munis de la valeur de S et de la fraction hydrolysable du thé rooibos (H_r), il est possible de calculer la fraction *décomposable* du rooibos (a_r), c'est-à-dire la fraction totale du thé qui pourrait se dégrader après une période assez longue, sans l'effet inhibiteur de l'environnement. En manipulant une formule de cinétique de dégradation, on peut isoler et calculer le k , tous les autres termes et facteurs de l'équation étant désormais connus.

Chapitre 6: Méthodes d'analyse statistique

Les méthodes utilisées dans ce travail pour procéder à l'inférence statistique sont expliquées selon le formalisme du cours de biométrie (Draye et Govaerts 2017). Les analyses ont été effectuées sur le logiciel *Excel* et son extension dédiée aux statistiques, *XLSTAT*.

1. Analyse des correspondances multiples (ACM)

L'ACM est une méthode permettant d'étudier les associations existantes entre des variables qualitatives, par exemple issues d'enquêtes. Elle permet notamment d'obtenir des représentations graphiques de la proximité entre les différents individus étudiés en attribuant à chacun des coordonnées multidimensionnelles. Ce type d'analyse produit également des tableaux de données numériques sur lesquelles il est possible d'utiliser d'autres méthodes statistiques, notamment des algorithmes de classification telle la CAH, expliquée ci-dessous.

L'idée générale est la suivante : l'ensemble des individus peut être représenté dans un espace à plusieurs dimensions où chaque axe représente les différentes variables utilisées pour décrire chaque individu. Dans le but de rendre ce nuage de points plus lisible, le système de coordonnées est modifié par l'ACM, représentant les individus sur deux axes. Ces axes sont ceux qui expliquent la majorité des différences dans l'échantillon. Souvent, seuls les deux ou trois premiers axes sont utilisés pour l'interprétation des données, les autres n'apportant que peu d'information supplémentaire (Lamarange 2016; Addinsoft 2017).

2. Classification ascendante hiérarchisée (CAH)

La CAH est une méthode de classification qui procède selon le principe suivant :

- Calcul de la dissimilarité entre les N objets selon un critère d'agrégation donné
- Regroupement de deux objets de façon à minimiser le critère d'agrégation, créant ainsi une classe qui comprend ces deux objets
- Calcul de la dissimilarité entre la classe ainsi créée et les N-2 objets restants
- Regroupement des deux objets (ou classes d'objets) de manière à minimiser le critère d'agrégation
- Recommencer jusqu'à ce que chaque objet fasse partie d'une classe

On dit de cette méthode qu'elle est *itérative* puisqu'il y a répétition du calcul à chaque fois qu'un objet est placé dans une classe. Tous ces regroupements mènent à la création

d'un arbre de classification appelé **dendrogramme**, qui permet de visualiser les classes, les objets qu'elles contiennent et les dissimilarités entre objets.

Dans notre cas, les objets sont les individus interrogés et leurs dissimilarités sont les distances euclidiennes entre les trois premières dimensions des coordonnées des observations issues de l'ACM. L'agrégation a été faite suivant la **méthode de Ward**, qui vise à minimiser les différences intra-classes (ce qui maximise les différences inter-classes) (Husson 2015; Addinsoft 2017b).

3. Moyennes et écarts-types

Dans le cas des mesures pour lesquelles il y a lieu de calculer des moyennes et des écarts-types, les formules utilisées sont les suivantes :

Moyenne	$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$
Ecart-type	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$

où

- i est le numéro de la répétition. Il va de 1 à n .
- x_i est la valeur mesurée à la $i^{\text{ème}}$ répétition
- n est le nombre total de répétitions
- μ est la valeur moyenne des i résultats
- σ est l'écart-type lié à la moyenne. Plus il est élevé pour une moyenne, plus les valeurs mesurées sont distribuées largement autour de cette moyenne.

4. Analyse de la variance (ANOVA 1 et test de Tukey)

ANOVA 1 est l'acronyme de l'analyse de la variance à un facteur de classification. Le principe de l'ANOVA 1 est de vérifier si les moyennes obtenues sont égales pour chaque niveau d'un facteur donné. Dans notre cas, ce facteur sera la classe dans laquelle se trouve la parcelle sur laquelle les mesures ont été faites, et le nombre de niveaux (de classes) est déterminé par la CAH. Les moyennes sont celles des mesures en champ : profondeur de la couche compactée, taux de dégradation du thé, score du slake test, ...

Le modèle général est le suivant :

$$Y_{jk} = \mu_j + \varepsilon_{jk} = \mu + \beta_j + \varepsilon_{jk}$$

avec $j = 1, \dots, w$ et $k = 1, \dots, n_j$

où

- Y_{jk} est la variable quantitative d'intérêt
- j est le niveau du facteur 'classe'
- k est le numéro de répétition, c'est la parcelle
- μ_j est la moyenne pour le niveau j du facteur 'classe'
- ε_{jk} est le résidu entre l'observation k et la moyenne μ_j . Il suit une distribution indépendante normale de variance σ^2 et de moyenne 0.
- μ est la moyenne de l'ensemble des mesures
- β_j est l'effet du niveau j du facteur 'classe'
- w est le nombre niveaux du facteur 'classe', déterminé par la CAH.

Pour vérifier si les moyennes sont égales pour tous les niveaux du facteur 'classe', l'ANOVA 1 teste l'hypothèse suivante avec un test de Fisher, avec μ_j la moyenne des résultats pour la classe de niveau j :

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

Si le test de Fisher retourne une p-valeur inférieure à 0,05, l'hypothèse H_0 peut alors être rejetée : au moins une moyenne est significativement différente des autres. On ne sait cependant pas laquelle, ou lesquelles, or il est intéressant d'avoir des informations à ce sujet.

Le **test de Tukey** permet de résoudre ce problème grâce à des comparaisons multiples de moyennes 2 à 2. Dans le cas d'un facteur à trois niveaux (1, 2 et 3), il procède de cette manière :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 ; \quad H_0 : \mu_1 = \mu_3 ; \quad H_0 : \mu_2 = \mu_3$$

On a alors une p-valeur pour chaque test : si elle est inférieure à 0,05, il existe une différence significative entre les moyennes concernées.

Troisième partie : Résultats

Dans cette partie, les données récoltées lors des entretiens seront présentées et un traitement statistique sera effectué afin de diviser l'échantillon en sous-groupes, selon les pratiques employées. Nous pourrions ainsi analyser les résultats des mesures en champ pour chaque groupe, et les comparer.

Chapitre 7: Résultats des enquêtes

Les informations obtenues au cours des interviews seront listées ci-dessous. Dans un souci de lisibilité, elles ont été séparées en trois catégories : les informations générales concernant l'exploitation, celles concernant le travail mécanique du sol et celles à propos de l'usage des couverts végétaux durant la période d'interculture.

Quatre agriculteurs ont fait la demande de tester deux de leurs parcelles de froment. Deux l'ont demandé parce qu'ils ont des pratiques différentes entre leurs parcelles, et deux étaient simplement intéressés par la répétition. Certains tableaux ne présentent pas ces dédoublements (par exemple les informations générales, qui sont les mêmes d'une terre à l'autre pour chaque agriculteur) mais d'autres bien, notamment pour les travaux du sol qui diffèrent selon les parcelles.

1. Informations générales

Au premier coup d'œil, on peut constater dans le Tableau 4 que nous avons affaire à trois types de pratiques : l'agriculture dite 'conventionnelle' (10 individus), les Techniques Culturelles Simplifiées (5 individus) et les agriculteurs en transition du conventionnel vers les TCS (2 individus). La transition signifie qu'ils ont des pratiques de TCS mais depuis moins de 3 ans. Notons que cette classification est celle que les agriculteurs utilisent eux-mêmes pour se définir, et les frontières sont parfois floues entre un exploitant pratiquant 'un peu' de TCS et un autre étant dans un système conventionnel plus 'raisonné', avec un peu moins de travail du sol. La distribution des superficies est vaste : de 31 hectares pour la plus petite exploitation à 224 pour la plus grande, pour une moyenne de 131 ha. On peut constater que la surface réservée au froment vaut en moyenne un tiers de la superficie totale de l'exploitation et que son rendement varie de 8 à 11,5 tonnes à l'hectare pour une moyenne de 10 t/ha. Un seul individu (C) a une rotation de deux ans ; celle des autres varie entre 3 et 6 ans pour une moyenne de 4 ans. Le pH des sols est bien géré : il est compris entre 6,5 et 7 chez chacun. Quant au taux de matière organique, il est compris entre 2 et 3% sauf chez M, qui culmine à 4%. Au cours de l'entretien, il a expliqué posséder un troupeau d'une centaine de bovins et épandre régulièrement du fumier sur ses terres (31 ha). Remarque : l'agriculteur B ne connaît pas le taux de matière organique de ses sols, il n'a pas demandé d'analyse depuis longtemps.

Tableau 4: Informations générales pour chaque exploitation. Transition = transition de conventionnel à TCS (Techniques Culturelles Simplifiées).

Agriculteur	Type de pratiques	Superficie de l'exploitation (ha)	Surface de blé d'hiver (ha)	Rendement moyen en blé d'hiver (t/ha)	Durée de la rotation (années)	pH	Taux de matière organique (%)
A	TCS	66	30	10	4	6,5	2,5
B	TCS	124	39	8	4	6,5	n/a
C	Transition	224	112	9	2	7	2
D	Conventionnel	85	28	10	3	6,5	2
E	TCS	100	40	9,5	6	6,5	2,5
F	Conventionnel	217	50	10	5	6,5	2
G	Transition	51	25	10	3	7	2
H	TCS	158	33	10	5	6,5	2,5
I	Conventionnel	168	60	11	4	6,5	2
J	TCS	192	51	10	5	6,5	2,5
K	Conventionnel	200	64	11	5	7	3
L	Conventionnel	144	39	11	5	7	2,5
M	Conventionnel	31	13	9,5	4	6,5	4
N	Conventionnel	94	20	10,5	3	6,5	2
O	Conventionnel	135	39	11	6	6,5	2
P	Conventionnel	90	38	10	5	6,5	2
Q	Conventionnel	142	46	11,5	3	6,5	2
Moyenne	-	131	43	10	4	6,5	2,5

Tableau 5: Informations générales pour chaque exploitation. Le tiret signifie non, ou jamais.

Parcelle	Croûte de battance	Cultures associées	Usage de glyphosate	Usage d'insecticide	Présence de bétail
A	Parfois	Oui	Systématique	-	-
B	-	Oui	Systématique	-	-
C	Parfois	-	Occasionnel	Occasionnel	-
D	-	Oui	Systématique	Systématique	Oui
E	-	Oui	-	Occasionnel	Oui
F	-	-	Occasionnel	Occasionnel	Oui
G	-	-	Occasionnel	Occasionnel	-
H	-	Oui	Occasionnel	Occasionnel	Oui
I	Parfois	-	Systématique	Occasionnel	Oui
J	-	-	Occasionnel	Occasionnel	Oui
K	Parfois	-	Occasionnel	Occasionnel	Oui
L	Parfois	-	Occasionnel	Occasionnel	Oui
M	-	-	-	Occasionnel	Oui
N	-	-	Occasionnel	Occasionnel	Oui
O	-	-	Occasionnel	-	-
P	Parfois	-	Occasionnel	Systématique	Oui
Q	Parfois	-	-	Occasionnel	-

Dans le Tableau 5, le tiret signifie 'non', ou 'jamais'. On peut voir que certains individus souffrent parfois de battance sur leur sol ; ils ne sont cependant pas majoritaires et ce n'est pas systématique.

Cinq pratiquent les cultures associées et, sans être exhaustifs, nous pouvons tout de même dégager différentes motivations. A le fait lorsqu'il cultive du colza (associé à : fenugrec et féverole, ou vesce et trèfle, ou lentille et lin), dans le but d'avoir la densité de végétation au sol la plus élevée possible et ainsi de décourager les pigeons ramiers de venir se nourrir de la culture puisqu'ils ne pourront pas se poser et décoller à l'aise. On a donc une raison surtout pratique. B, qui associe colza et féverole ou trèfle blanc,

déclare lui que « *c'est un très bon moyen pour entrer dans l'agriculture de conservation* ». De plus, « *ça permet de limiter les insecticides, les herbicides* », raison également évoquée par E. La culture associée de D elle est un méteil, mélange de céréales et protéagineux, destiné à l'alimentation du bétail. E pratique un système plus élaboré : il associe du colza précoce (10% des semences) et tardif (90%) pour lutter contre les ravages des méligèthes, et il couvre tout le sol avec de la lentille, du trèfle d'Alexandrie et de la féverole, qui gèleront en hiver, laissant un sol dépourvu d'adventices. Le système de lutte contre les dégâts de méligèthes est le suivant : le colza précoce fleurit rapidement, et son pollen attire les méligèthes qui s'en nourrissent au lieu de détruire les bourgeons floraux de la variété principale, plus productive.

Le glyphosate est largement utilisé, que ce soit de manière occasionnelle ou systématique. Q ne l'utilise que très rarement voire jamais et déclare « *Je veux bien qu'on le supprime. Pourquoi ? Parce que je laboure !* ». A l'opposé, on retrouve B, qui l'utilise systématiquement parce que « *j'ai connu trop d'échecs quand je me posais des questions. Il faut que le sol soit impeccablement propre ou désherbé avant un semis, il n'y a pas de secret.* ». Il déclare être « *pour la limitation phyto, mais le Roundup il faut tout faire pour le garder* ». À propos de l'interdiction, I, qui l'utilise systématiquement, dit néanmoins que « *ça ne serait pas trop grave, je m'adapterais* ». Globalement, l'attitude des sondés sur l'usage de glyphosate était la même que pour la plupart des autres intrants de synthèse : ne pas en utiliser quand ce n'est pas nécessaire, mais ne pas risquer une mauvaise récolte en s'abstenant. La même constatation peut être faite pour l'usage d'insecticide, qui n'est utilisé systématiquement (c'est-à-dire préventivement) que par 2 des agriculteurs.

2. Travail du sol

Le Tableau 6 reprend les travaux du sol effectués par les agriculteurs entre la fin des opérations de récolte de la culture précédente et l'implantation du **froment**. Cela ne reflète donc pas forcément leurs pratiques pour toutes les cultures, d'autant que le froment est une espèce supportant très bien un non-labour dans un système conventionnel, là où cela s'avérerait difficile pour d'autres cultures. Pour connaître le système habituel de travail du sol sur toute la rotation, il vaut mieux se référer aux catégories 'TCS' ou 'conventionnel' du Tableau 4. Par défaut, les individus n'utilisant pas le semoir à disques (SàD) utilisent un semoir à céréales classique, non repris dans ce tableau. Les informations des 21 parcelles sont reprises : B et N ont les mêmes pratiques sur leurs deux différentes parcelles tandis que C et O en ont des différentes.

Tableau 6: Travail du sol effectué avant le semis de blé d'hiver. SàD=semoir à disques, Déchaum=déchaumage, Décomp=décompactage. Rotative=herse rotative à axe vertical.

Parcelle	Labour	Cultivateur à dents	Rotative	SàD	Déchaum	Décomp	Autre
A			X				Chisel léger
B1			X			X	
B2			X			X	
C1	X		X				
C2			X			X	
D	X		X				
E				X	X		
F	X	X	X				Rouleau
G				X	X		
H				X	X		
I	X	X	X				Rouleau
J				X			
K			X			X	
L			X				
M	X		X				Vibroculteur
N1	X		X				
N2	X		X				
O1	X	X	X				Rouleau
O2			X			X	Rouleau
P	X						Chisel profond + léger
Q			X			X	
Total	9	3	16	4	3	6	

Sur ces 21 parcelles, 9 sont labourées. Lorsqu'elles ne le sont pas, le labour est remplacé par un travail au chisel léger (1), un déchaumage (3) ou un passage au décompacteur (6). J et L n'effectuent quant à eux aucune action de pseudo-labour. Les agriculteurs pratiquant le labour avant froment le font systématiquement pour les autres cultures également, tandis que la situation est plus contrastée du côté de ceux qui ne labourent pas avant froment : certains ne le font à aucun moment de leur rotation (A, B, E, H, J) et les autres le font au cas par cas, par exemple pour la tête de rotation ou si les conditions d'humidité du sol sont mauvaises à la période de semis du blé. Au cours des entretiens, il a été constaté que les agriculteurs pratiquant le labour de manière systématique ou occasionnelle lui reconnaissent des avantages ('filet de sécurité' contre les adventices ou un sol en mauvais état) comme des inconvénients (temps de travail, puissance du tracteur), tandis que les agriculteurs ne labourant jamais trouvent que cela ne vaut jamais le coup, à l'image de J qui déclare « *moi j'en suis malade quand je dois labourer parce que quand on voit la structure et l'érosion... ben ça fait mal* ».

Le cultivateur à dents est utilisé dans un outil combiné : le cultivateur et un (ou deux) rouleau brise-mottes ; ce combiné est appelé 'poussicuteur' par les agriculteurs. Chez les trois agriculteurs l'utilisant, le poussicuteur est toujours placé à l'avant du tracteur qui sème le froment (avec le semoir à l'arrière), et ce tracteur suit celui qui tire la charrue, afin de pouvoir effectuer toutes les opérations de travail du sol et de semis en une seule fois. La herse rotative à axe vertical est très largement utilisée : seuls cinq agriculteurs se passent de cet outil. Pour E, la herse rotative est à prohiber parce que « *ça bousille les mycéliums des champignons. Pas de herse rotative, c'est exclu sur ma ferme.* ». Le semoir à disques est utilisé par quatre agriculteurs (E, G, H, J). Pour trois d'entre eux, son usage est précédé par un déchaumage. Le quatrième pratique le semis direct.

En utilisant la classification proposée par Labreuche et al. (2014) (voir Différentes pratiques), on peut regrouper les opérations de travail du sol en différentes catégories :

- FRE40 : fragmentation, retournement et enfouissement de 15 à 40 cm (labour)
- ME15 : mélange et enfouissement de 3 à 15 cm (cultivateur à dents, déchaumeur, vibroculteur, herse rotative, chisel léger)
- ME40 : mélange et enfouissement de 15 à 40 cm (chisel profond)
- MinEnf : pas de mélange et minimum d'enfouissement, de 15 à 40 cm (décompacteur)
- SD : travail superficiel sur la ligne de semis, c'est-à-dire 5% de la largeur totale (semoir à disques)
- Superficiel : travail superficiel sur toute la largeur, de 0 à 3 cm (rouleau, semoir classique)

Tableau 7: Nombre d'opérations de travail du sol de chaque catégorie avant une culture de blé d'hiver. FRE40 : fragmentation, retournement et enfouissement de 15 à 40 cm. ME15 : mélange et enfouissement de 3 à 15 cm.

ME40 : mélange et enfouissement de 15 à 40 cm. MinEnf : pas de mélange et minimum d'enfouissement, de 15 à 40 cm. SD : travail superficiel sur la ligne de semis, c'est-à-dire 5% de la largeur totale. Superficiel : travail superficiel sur toute la largeur, de 0 à 3 cm. Les vides sont des zéros.

	FRE40	ME15	ME40	MinEnf	SD	Superficie 1	Total
A		2				1	3
B1		1		1		1	3
B2		1		1		1	3
C1	1	1				1	3
C2		1		1		1	3
D	1	1				1	3
E		1			1		2
F	1	2				2	4
G		1			1		2
H		1			1		2
I	1	2				2	5
J					1		1
K		1		1		1	3
L		1				1	2
M	1	2				1	4
N1	1	1				1	3
N2	1	1				1	3
O1	1	2				2	5
O2		1		1		2	4
P	1	1	1			1	4
Q		1		1		1	3

Ce tableau ne nous apprend rien de plus en substance que celui qui détaille toutes les opérations de travail du sol effectuées, mais il nous sera utile par la suite, lors du traitement statistique via une analyse des correspondances multiples.

3. Utilisation des couverts végétaux

Intéressons-nous à présent aux pratiques des agriculteurs en termes d'utilisation des couverts lors de l'interculture qui précède les cultures de printemps. Nous nous pencherons sur deux aspects déterminants dans l'usage des couverts : les espèces choisies et le mode de destruction. Ici, la distinction entre parcelles d'un même agriculteur n'est pas faite : ils ont tous les quatre des mêmes pratiques sur leurs deux champs étudiés.

1. Espèces choisies dans le couvert

Lors de l'enquête, 9 espèces sont apparues dans la composition des mélanges. Pour les 17 agriculteurs, par ordre de fréquence, on a : la phacélie (11), l'avoine (10), la vesce et le trèfle blanc (9), la féverole (6), le tournesol et le pois (5), la moutarde et le lin (4), le trèfle d'Alexandrie, le sarrasin et le radis chinois (2), la lentille et le ray-grass anglais (1).

Tableau 8: Espèces composant le couvert implanté lors de l'interculture, avant une culture de printemps.

	Phacélie	Avoine	Vesce	Trèfle blanc	Féverole	Tournesol	Moutarde	Pois	Lin	Autres
A	X	X	X			X		X	X	
B			X	X	X					Sarrasin
C		X	X		X					
D	X							X		
E	X	X	X		X	X	X	X	X	E : Trèfle d'Alexandrie, lentilles
F	X						X			
G	X	X	X	X	X	X	X			
H	X	X			X	X		X	X	
I	X			X			X			J : Trèfle d'Alexandrie
J	X	X	X						X	
K	X									K : Radis chinois
L		X	X	X				X		
M		X		X						
N	X			X						N : Radis chinois
O	X	X	X		X	X				
P				X						P : Ray-Grass anglais
Q		X	X	X						

La vesce, le trèfle blanc, la féverole, le pois et le trèfle d'Alexandrie sont des légumineuses ; en plus de l'effet couvrant et d'engrais vert, elles participent à l'enrichissement du sol en azote organique, qui sera minéralisé par les microorganismes du sol durant la croissance de la culture principale. L'utilisation de légumineuses dans les couverts permet ainsi de diminuer la quantité d'engrais minéral et/ou organique apporté à la culture. A l'exception de F et K, tous les agriculteurs en

sèment au moins une espèce. Quand leur avis à propos de l'utilisation des couverts en général (et vis-à-vis de la législation) a été demandé, la plupart ont déclaré considérer les couverts comme une opportunité plutôt que comme une contrainte, en reconnaissant toutefois que le coût des semences pouvait être élevé même si, comme le dit D, « *ça travaille le sol à votre place* ». Certains, comme K, n'ont pas attendu les lois sur les CIPAN : « *même avant la législation, on couvrait presque toute la superficie de céréales avec engrais verts pour la matière organique et l'effet restructurant* ».

C'est également le cas de A, qui ajoute qu' « *avant on mettait vite fait de la moutarde, mais on a bien vite changé d'avis quand on a vu les possibilités des autres couverts* ». Comme tous les agriculteurs rencontrés, il utilise les couverts pour l'effet sur la structure et l'apport de matière organique : « *l'objectif c'est d'avoir de la matière organique (surtout depuis qu'on n'a plus de vaches, donc plus de fumier), et de la structure. Il faut des gros couverts pour la matière organique et pour la couverture l'hiver aussi, c'est primordial. Ça permet aussi de nourrir les vers de terre et d'avoir des résidus pour les cultures de printemps pour éviter la battance.* ».

Si presque tous trouvent de l'utilité aux couverts, certains se plaignent de la législation, comme D et I qui déclarent respectivement : « *ce qui est chiant c'est les dates de labour et tout le bazar* » et « *c'est une opportunité mais on nous met des contraintes anti-agronomiques* ». Pour eux, les contraintes au niveau des dates sont trop astreignantes et pas assez basées sur la variation des conditions météorologiques, qui sont déterminantes. Enfin, on peut également retrouver un avis tout à fait discordant dans la bouche de P, qui dit que « *je suis assez dubitatif. Si on veut prendre l'ensemble je ne suis pas sûr qu'il soit positif agronomiquement et écologiquement. En plus c'est embêtant parce qu'on ne peut pas faire de désherbage mécanique pendant le couvert. Pour le chiendent, l'avoine et le vulpin c'est vraiment très embêtant.* ».

Le Tableau 9 regroupe les espèces du mélange selon leur système racinaire (classification selon Frédéric Thomas and Matthieu Archambeaud (2016)) et la quantité de légumineuses. Les systèmes racinaires peuvent être classés de cette manière (certaines espèces ayant un système 'mixte', elles se retrouveront dans plusieurs catégories) :

- Superficiel : phacélie, vesce, trèfle blanc, sarrasin, ray-grass anglais, lentilles
- Intermédiaire : phacélie, avoine, pois, trèfle blanc, sarrasin, trèfle d'Alexandrie, ray-grass anglais
- Fasciculé profond : tournesol
- Pivotant : tournesol, moutarde, féverole, lin
- Pivotant profond : radis chinois

Tableau 9: Nombre d'espèces du couvert pour chaque type de système racinaire, et proportion de légumineuses dans le mélange.

	Nombre d'espèces	Superficiel	Intermédiaire	Pivotant	Pivotant profond	Fasciculé profond	Nombre de légumineuses	%(en nombre d'espèces) de légumineuses
A	6	2	3	2		1	2	33
B	4	3	2	1			3	75
C	3	1	1	1			2	67
D	2	1	2				1	50
E	10	3	4	4		1	5	50
F	2	1	1	1				0
G	7	3	3	3		1	3	43
H	6	1	3	3		1	2	33
I	3	2	2	1			1	33
J	5	2	3	1			2	40
K	2	1	1		1			0
L	4	2	3				3	75
M	2	1	2				1	50
N	3	2	2		1		1	33
O	5	2	2	2		1	2	40
P	2	2	2				1	50
Q	3	2	2				2	67

Il convient de rappeler que le pourcentage de légumineuses dans le mélange est celui du nombre d'espèces, et pas celui du poids des semences (données non récoltées) qui est lui limité par la loi à 50%.

On peut voir dans le Tableau 9 que le nombre d'espèces varie de 2 à 10, et que la part belle est faite aux légumineuses avec 33 à 75% en nombre d'espèces (excepté pour F et

K qui n'en ont pas). Seuls 7 agriculteurs sèment des espèces avec un système racinaire profond, mais tous ont au moins une espèce au système racinaire moyen, mettant ainsi en œuvre leur volonté de structurer le sol via la couverture végétale. Ce tableau sera également utilisé dans le cadre de l'analyse des correspondances multiples.

2. Modes de destruction du couvert

Tableau 10: Moyens utilisés pour détruire le couvert végétal.

	Labour	Roulage	Broyage	Déchaumage	Glyphosate	Fauche	Autres
A	0	1	0	0	1	0	
B	0	1	0	0	0	0	
C	0	0	1	0	0	0	
D	1	0	0	0	0	1	
E	0	0	1	0	0	0	E : Pâturage par moutons
F	1	0	1	0	0	0	
G	1	0	1	0	0	0	
H	0	1	0	0	0	0	
I	1	0	0	1	0	0	
J	0	0	0	0	1	0	J : Semoir à disques
K	0	0	1	1	0	0	
L	1	0	0	0	0	2	
M	1	0	1	0	0	1	
N	1	0	0	0	0	0	
O	1	1	0	0	0	0	
P	1	0	0	0	0	2	
Q	1	0	1	0	0	0	

Tableau 11: Destination du couvert détruit. Enfoui15 = enfouissement de 3 à 15 cm, Enfoui40 = enfouissement de 15 à 40 cm, Surface = couvert laissé à la surface, formant un mulch.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Enfoui15											X						
Enfoui40				X		X	X		X			X	X	X	X	X	X
Surface	X	X	X		X			X		X							

À l'exception de N, tous les agriculteurs enfouissant leur couvert avec un labour effectuent un travail préliminaire, qu'il s'agisse d'un roulage, broyage, déchaumage ou d'une fauche afin de nourrir le bétail. Ce travail préliminaire permet de diminuer le volume de végétation (pour faciliter l'enfouissement) aussi bien que de favoriser la dégradabilité du couvert une fois enfoui.

La différence principale réside dans la destination finale du couvert : certains l'enfouissent profondément avec un labour (10) ou plus superficiellement avec un déchaumage (1) tandis que les autres le laissent en surface (6), que le couvert soit roulé (3), broyé (2) ou blessé par un semoir à disques (1). Ces différences sont résumées dans le

. Une pratique particulière découverte dans le cadre de cette enquête est, chez E, le broyage du couvert puis son pâturage par des moutons. Toute la surface de couverture broyée n'est cependant pas pâturée pour cause de troupeau trop petit.

4. Analyse statistique des réponses aux enquêtes

1. Choix des variables

Dans toutes les données récoltées lors des enquêtes, il est possible de dégager des pratiques qui sont des variables explicatives, celles qui sont supposées avoir une influence sur les variables à expliquer – c'est-à-dire les résultats des mesures, qui seront abordés ci-après. L'analyse pratiquée en premier, une analyse des correspondances multiples (ACM), demande des données catégorielles. Dans cette optique, certaines données quantitatives ont été regroupées en catégories qui semblaient les plus judicieuses. Voici les variables sélectionnées :

- Les catégories de travail du sol de chaque catégorie avant la culture de froment :
 - **FRE40** : fragmentation, retournement et enfouissement de 15 à 40 cm
 - **ME15** : mélange et enfouissement de 3 à 15 cm
 - **ME40** : mélange et enfouissement de 15 à 40 cm
 - **MinEnf** : pas de mélange et minimum d'enfouissement, de 15 à 40 cm
 - **SD** : travail superficiel sur la ligne de semis, c'est-à-dire 5% de la largeur totale
 - **Superficiel** : travail superficiel sur toute la largeur, de 0 à 3 cm
- La destination du couvert détruit :
 - **C-Enf** : couvert enfoui (labour ou déchaumage)
 - **C-Surf** : couvert laissé en surface
- Les espèces composant la couverture végétale :
 - **C-cat nbre esp** : catégorie de nombre d'espèces composant le couvert :
 - ≤ 2 espèces : catégorie 1
 - ≤ 6 espèces : catégorie 2
 - > 6 espèces : catégorie 3
 - **C-syst rac profond** : absence (0) ou présence (1) d'espèce au système racinaire profond, qu'il soit fasciculé ou pivotant
 - **% esp lég** : catégorie de proportion de légumineuses en nombre d'espèces dans le mélange :
 - 0 à 25 % : catégorie 1
 - 26 à 50% : catégorie 2
 - > 50% : catégorie 3
- Des informations générales :
 - **Taille** : catégorie de superficie totale de l'exploitation :
 - ≤ 50 ha : catégorie 1
 - 51 à 100 ha : catégorie 2
 - 101 à 150 ha : catégorie 3
 - > 150 ha : catégorie 4
 - **Durée rotation** : la durée de la rotation culturale en années
 - **Cultures associées** : absence (0) ou présence (1) d'associations pour les cultures principales
 - **Glypho** : utilisation du glyphosate : jamais (0), occasionnellement (1), systématiquement (2)
 - **Insectic** : utilisation d'insecticides : jamais (0), occasionnellement (1), systématiquement (2)
 - **Bétail** : absence (0) ou présence (1) de bétail dans l'exploitation
 - **Région agricole** : région limoneuse (1) ou sablo-limoneuse (2)

Tableau 12: Variables explicatives issues des enquêtes en vue de procéder à une Analyse des Correspondances Multiples (ACM). Abréviations et explications : voir 604. Analyse statistique des réponses aux enquêtes.

	FRE2	ME1	ME2	SD	MinEnf	Superf	C-Enf	C-Surf	C-cat nbre esp	C-syst rac profond	% esp lég
A	0	2	0	0	0	1	0	1	2	1	2
B	0	1	0	0	1	1	0	1	2	0	3
C1	1	1	0	0	0	1	0	1	2	0	3
C2	0	1	0	0	1	1	0	1	2	0	3
D	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	2
E	0	1	0	1	0	0	0	1	3	1	2
F	1	2	0	0	0	2	1	0	1	0	1
G	0	1	0	1	0	0	1	0	3	1	2
H	0	1	0	1	0	0	0	1	2	1	2
I	1	2	0	0	0	2	1	0	2	0	2
J	0	0	0	1	0	0	0	1	2	0	2
K	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1
L	0	1	0	0	0	1	1	0	2	0	3
M	1	2	0	0	0	1	1	0	1	0	2
N	1	1	0	0	0	1	1	0	2	1	2
O1	1	2	0	0	0	2	1	0	2	1	2
O2	0	1	0	0	1	2	1	0	2	1	2
P	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	2
Q	0	1	0	0	1	1	1	0	2	0	3

	Taille	Durée rotation	Cultures associées	Glypho	Insectic	Bétail	Région agricole
A	2	4	1	2	0	0	1
B	3	4	1	2	0	0	1
C1	4	2	0	1	1	0	2
C2	4	2	0	1	1	0	2
D	2	3	1	2	2	1	1
E	2	6	1	0	1	1	2
F	4	5	0	1	1	1	1
G	1	3	0	1	1	0	1
H	4	5	1	1	1	1	2
I	4	4	0	2	1	1	1
J	4	5	0	1	1	1	1
K	4	5	0	1	1	1	2
L	3	5	0	1	1	1	1
M	1	4	0	0	1	1	1
N	2	3	0	1	1	1	2
O1	3	6	0	1	0	0	1
O2	3	6	0	1	0	0	1
P	2	5	0	1	2	1	1
Q	3	4	0	0	1	0	1

2. Analyse des correspondances multiples (ACM)

L'ACM est une méthode générale d'étude de tableaux dans lesquels un échantillon d'individus est décrit par des variables catégorielles, comme c'est le cas dans ce travail. Le Tableau 12 contenant toutes les variables sélectionnées et tous les individus sondés a été soumis à une ACM. En voici les résultats les plus intéressants :

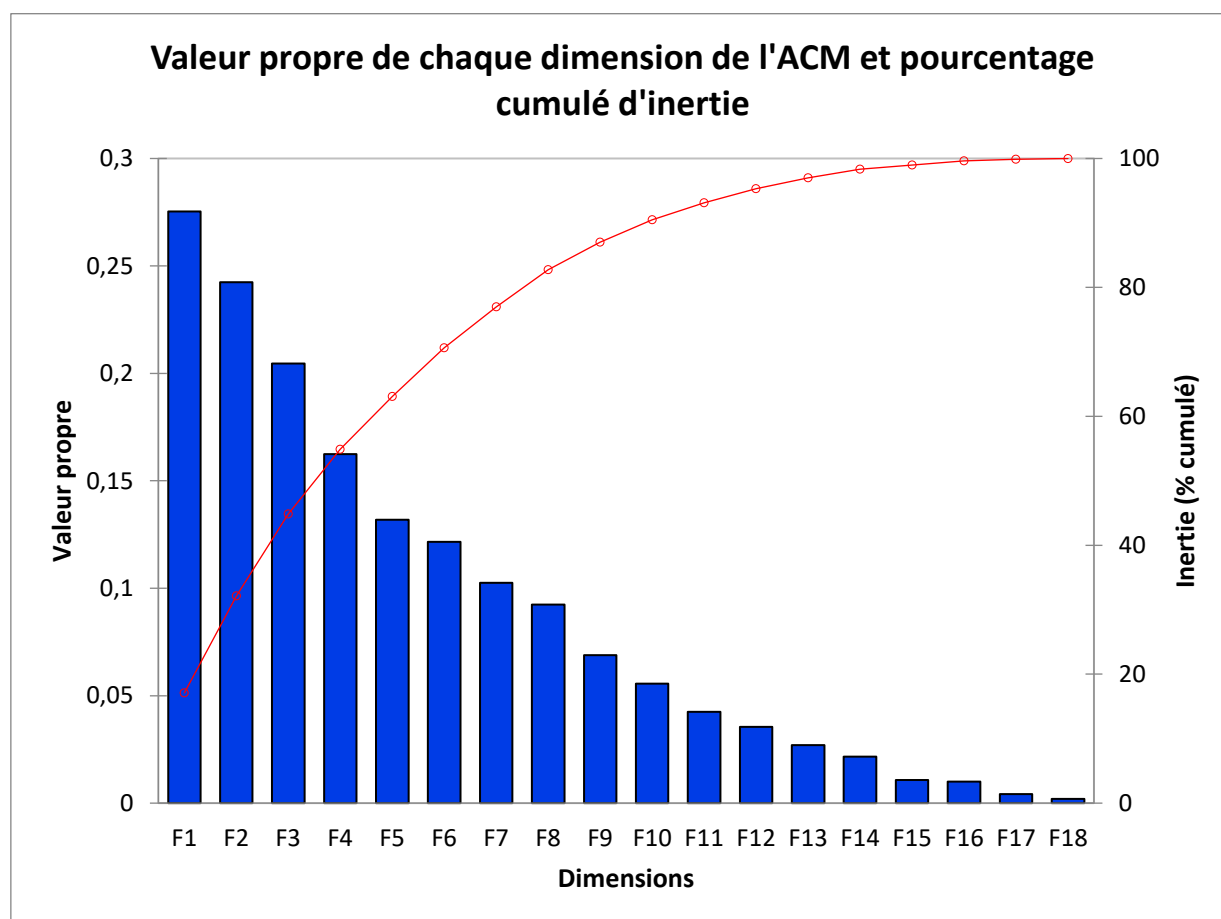


Figure 13: Valeurs propres de l'ACM et pourcentage cumulé d'inertie. Les 'F' sont les dimensions issues de l'analyse.

Tableau 13: Valeurs propres, pourcentage de variabilité expliquée et pourcentage cumulé de variabilité expliquée pour les 10 premières dimensions de l'ACM.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeur propre	0,275	0,242	0,205	0,162	0,132	0,122	0,103	0,092	0,069	0,056
Variabilité (%)	17,091	15,045	12,695	10,077	8,182	7,549	6,365	5,738	4,274	3,453
% cumulé	17,091	32,136	44,831	54,908	63,090	70,640	77,005	82,743	87,017	90,470

La Figure 13 représente la valeur propre et le pourcentage cumulé d'inertie (c'est-à-dire de variabilité expliquée) des 18 dimensions issues de l'ACM. Le Tableau 13 nous donne ces données chiffrées pour les dix premières dimensions, qui représentent 90% de la variabilité totale. L'ACM nous fournit également des cartes factorielles : celle des modalités et celle des observations.

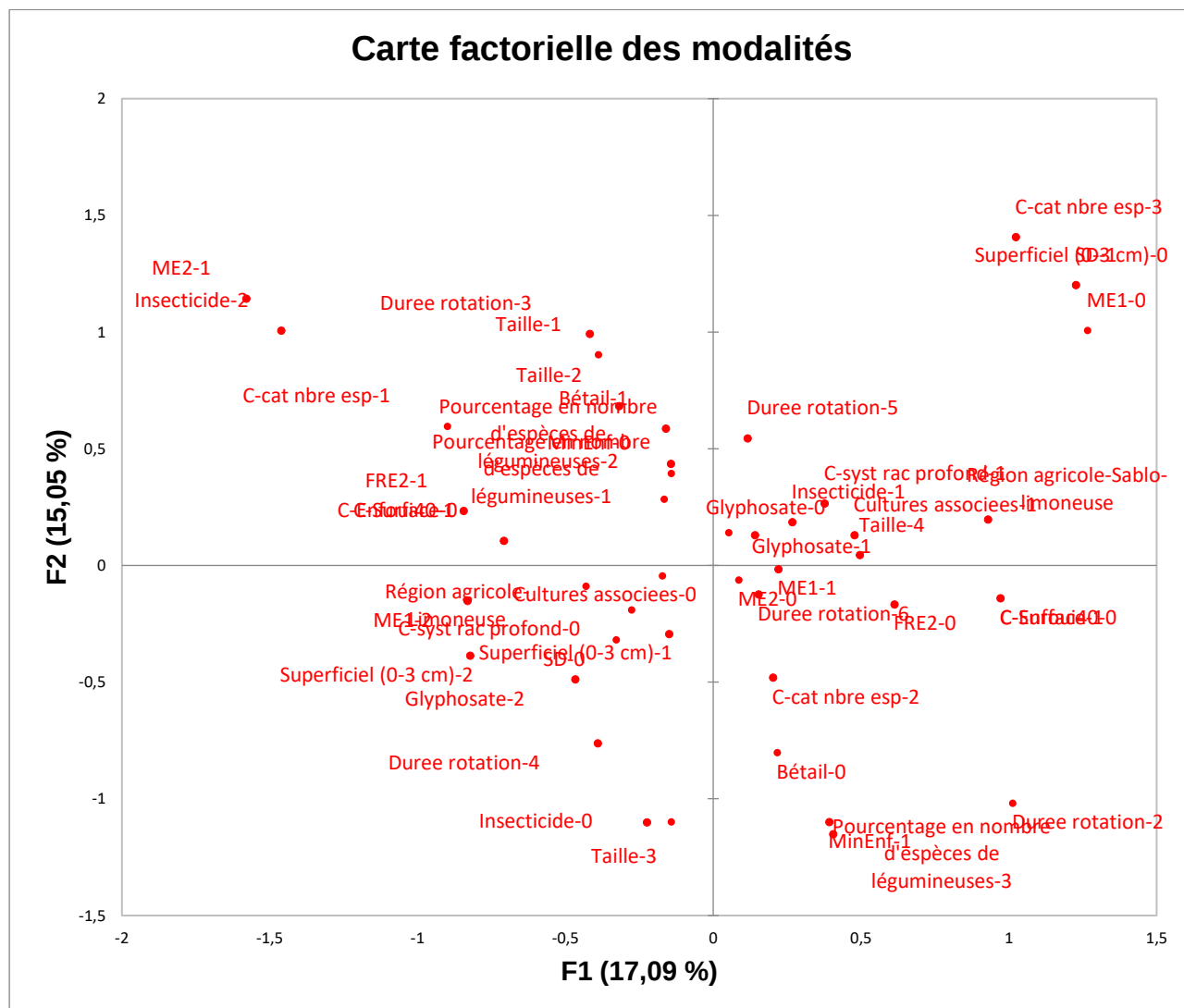


Figure 14: Carte factorielle des deux premières dimensions des modalités, produite par l'ACM

La carte des modalités (Figure 14) représente les coordonnées des variables (les différentes réponses possibles pour chaque pratique) sur les deux premières dimensions, qui expliquent respectivement 17,09% et 15,05% de la variabilité totale. La significativité des variables au seuil $\alpha = 0,05$ a été testée, et le Tableau 14 regroupe celles qui ont un effet significatif sur le positionnement des observations (les individus) dans les deux premières dimensions. Les termes 'influence négative' et 'influence positive' ne portent pas de jugement de valeur sur les pratiques, mais indiquent les modalités qui situeront les agriculteurs sur le domaine positif ou négatif des axes concernés.

Tableau 14: Effets significatifs des modalités dans les deux premières dimensions (F1 et F2).

	Influence négative	Influence positive
F1	-Labour	
	-Deux travaux de mélange et enfouissement du sol du 3 à 15 cm	-Non-labour
	-Semoir classique	-Semoir à disques
	-Couvert enfoui avec un labour	-Aucun travail superficiel du sol
	-Moins de 3 espèces dans le couvert végétal	-Couvert laissé en surface
	-Usage systématique d'insecticide	-Région sablo-limoneuse
	-Région limoneuse	
F2	-Semoir classique	-Semoir à disques
	-Décompactage	-Pas de décompactage
	-Moins de 7 espèces dans le couvert végétal	-Pas de travail superficiel
	-De 51 à 75% d'espèces de légumineuses dans le couvert	-Au moins 7 espèces dans le couvert
	-Taille de l'exploitation entre 101 et 150 ha	-De 25 à 50% d'espèces de légumineuses dans le couvert
	-Jamais d'insecticide	-Présence de bétail
	-Absence de bétail	

Ce sont donc ces pratiques agricoles qui discriminent *in fine* les individus selon les deux axes de la carte factorielle des observations (Figure 15).

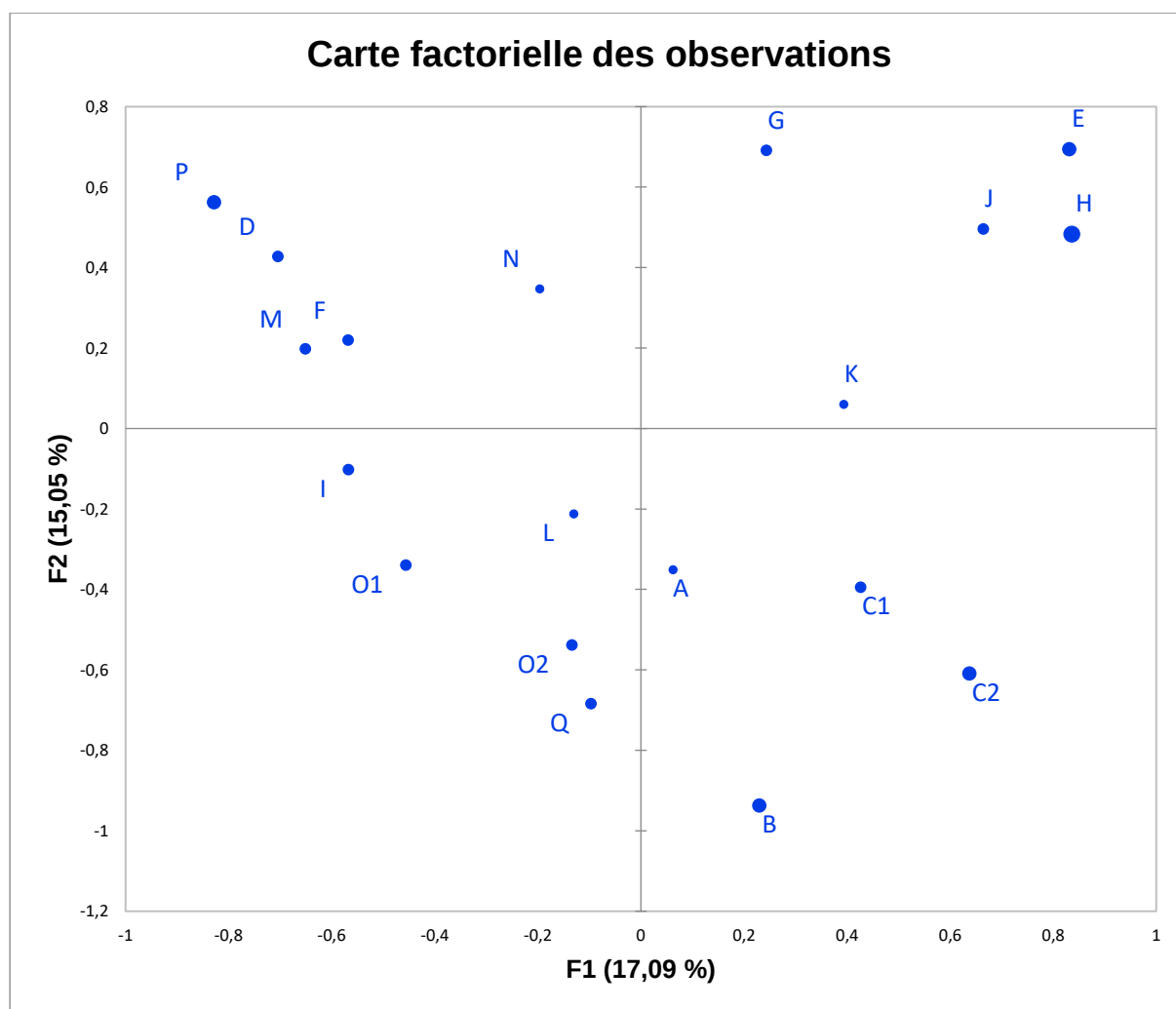


Figure 15: Carte factorielle des observations, produite par l'ACM

Au premier regard, on peut différencier les individus situés de part et d'autre de chaque axe. Il s'agit déjà d'un moyen 'intuitif' de classification : les agriculteurs pourraient être divisés en quatre groupe, un par quadrant de la carte. Il convient cependant de procéder à une analyse plus rigoureuse, qui prend également en compte d'autres dimensions que les deux premières, afin d'obtenir une classification plus solide.

Une des sorties intéressantes de cette ACM est le tableau des coordonnées principales des observations selon les dix premières dimensions (non affiché). À partir de ces coordonnées, il est possible d'établir une classification en classes d'individus. La méthode de classification utilisée dans ce cas est la classification ascendante hiérarchique (CAH).

3. Classification ascendante hiérarchique (CAH)

Cette analyse permet de répartir des individus dans des classes, sur base de leurs dissimilarités : les individus qui présentent le moins de différences entre eux seront rassemblés, de manière itérative. Dans notre cas, les dissimilarités sont mesurées grâce à la distance entre les coordonnées principales des observations ; plus précisément à l'aide de la *méthode de Ward*, qui vise à minimiser la variabilité à l'intérieur des différentes classes – et donc maximiser la variabilité inter-classes.

La CAH a été appliquée sur les trois premières dimensions des coordonnées principales des observations issues de l'ACM. Le choix de ne prendre que ces trois dimensions a été fait car elles expliquent ensemble 45% de la variabilité, ce qui est correct ; c'est également le moyen d'avoir la plus petite variabilité intra-classe (et donc la plus grande variabilité inter-classe) : des CAH à 2 et 4 dimensions ont été réalisées et elles présentent des variabilités plus grandes à l'intérieur des classes, ce qui n'est pas recherché. Voici les résultats les plus intéressants offerts par cette analyse :

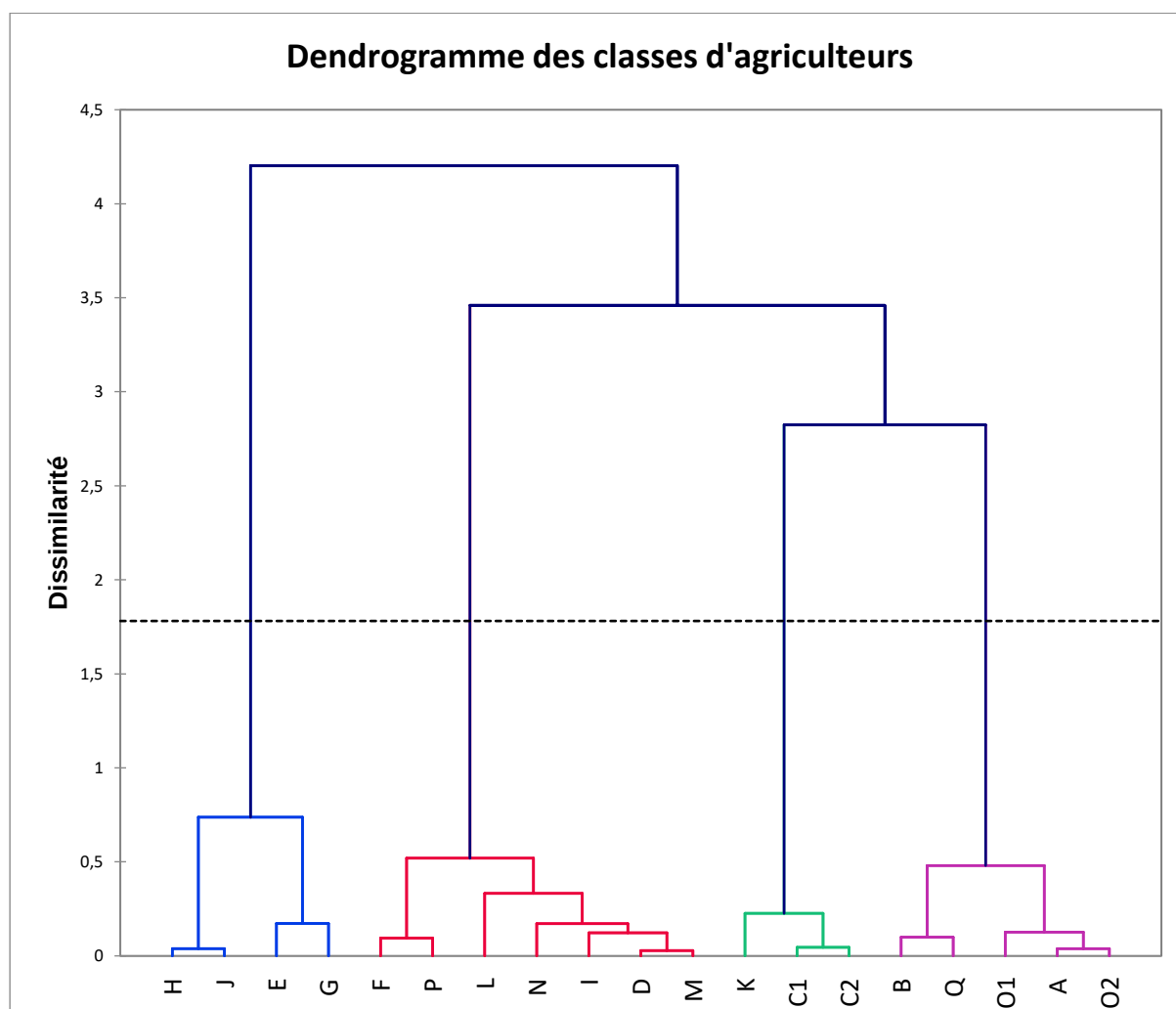


Figure 16: Dendrogramme issu de la CAH sur les coordonnées des observations de l'ACM. Quatre classes ont été établies.

Tableau 15: Classes établies par la CAH et agriculteurs en faisant partie.

Classes	Individus
1	A, B, O1, O2, Q
2	C1, C2, K
3	D, F, I, L, M, N, P
4	E, G, H, J

Le dendrogramme (Figure 16) a divisé les individus selon quatre classes :

La **classe 1** est constituée d'individus situés autour du zéro de l'axe F1 et sous zéro pour l'axe F2. Ces individus présentent donc une tendance à ne pas utiliser d'insecticide, ne pas posséder de bétail, avoir une exploitation dont la taille est comprise entre 101 et 150 ha, avoir 51 à 75% d'espèces de légumineuses dans leur couvert (composé de moins de 7 espèces au total), pratiquer le décompactage et d'utiliser un semoir à céréales classique.

La **classe 2** est constituée d'individus situés du côté positif de l'axe F1 et du côté négatif (ou sur le zéro) de l'axe F2. Ils auront tendance à ne pas labourer, ne pas travailler superficiellement (0-3 cm) le sol, laisser leur couvert en surface et être situés en région sablo-limoneuse. Ils auront également tendance à ne pas utiliser d'insecticide, ne pas posséder de bétail, avoir une exploitation dont la taille est comprise entre 101 et 150 ha, avoir 51 à 75% d'espèces de légumineuses dans leur couvert (composé de moins de 7 espèces au total) et pratiquer le décompactage.

Ce qui différencie la classe 1 et la classe 2 est leur positionnement dans la troisième dimension (F3). La classe 1 est située du côté positif de son axe tandis que la classe 2 est du côté négatif. Les facteurs significatifs déterminant la position sur l'axe F3 sont : avoir au moins 7 espèces dans le couvert (-), avoir des espèces à système racinaire profond (-) ou non (+) dans le couvert, avoir une rotation de 2 ou 5 ans (+) contre une rotation de 6 ans (-), ne jamais utiliser d'insecticide (-) et avoir une exploitation d'au moins 151 ha (+). On peut cependant constater sur le dendrogramme que ces deux classes sont les deux classes les plus proches entre elles.

La **classe 3** est globalement constituée d'individus situés dans la partie négative de l'axe F1 et positive de l'axe F2. Ils auront tendance à labourer, pratiquer deux travaux de mélange et d'enfouissement jusqu'à 15 cm, enfouir le couvert végétal (composé de 25 à 50% d'espèces de légumineuses) par labour, utiliser systématiquement de l'insecticide et être installés en région limoneuse. Ils sont également supposés éviter le décompactage et le travail superficiel (0-3 cm) ainsi que posséder du bétail.

La **classe 4** est composée d'individus situés dans la partie positive des axes F1 et F2. Ils sont supposés pratiquer le non-labour, ne pas décompacter, utiliser un semoir à disques, éviter le travail superficiel du sol (0-3 cm), laisser leur couvert végétal en surface (couvert composé d'au moins 7 espèces dont 25 à 50% de légumineuses), être installés en région sablo-limoneuse et posséder du bétail.

La répartition dans les classes des agriculteurs se définissant comme étant 'TCS' ou 'conventionnels' est la suivante :

- Classe 1 : deux en TCS (A, B), un en transition (O2) et deux en conventionnel (O1 et Q)
- Classe 2 : Deux en transition (C1, C2) et un en conventionnel (K)
- Classe 3 : Tous en conventionnel (D, F, I, L, M, N, P)
- Classe 4 : Trois en TCS (E, H, J) et un en transition (G)

Les classes 3 et 4 semblent plus représentatives de groupes distincts (conventionnel et TCS) tandis que les classes 1 et 2 sont plutôt mixtes. Le dendrogramme de la CAH (Figure 16) nous indique aussi que les classes 1 et 2 sont les plus proches entre elles, puis que la classe 3 diffère de ces deux classes ensemble. La classe 4 est encore plus éloignée et se distingue des classes 1, 2 et 3 ensemble.

Dans le Tableau 16, on peut retrouver les variances inter- et intra-classes à la suite de la CAH. La variance intra-classe a été minimisée grâce à la méthode de Ward et au choix de trois dimensions.

Tableau 16: Variances (absolues et en pourcents de la variance totale) inter- et intra-classes. Les classes sont issues d'une CAH.

	Absolue	Pourcentage
Intra-classe	0,216	28,29%
Inter-classes	0,547	71,71%
Totale	0,762	100,00%

Chapitre 8: Résultats des mesures et analyses des différences entre les classes d'agriculteurs

Dans cette section, les résultats des mesures en champ seront présentés sous cette forme :

- Graphique des moyennes et de leur marge d'erreur pour chaque classe
- Tableau chiffrant les moyennes et leur intervalle de confiance à 95%
- Tableau du test de Tukey, comparant toutes les moyennes entre elles deux à deux. La comparaison est accompagnée de la p-valeur (notée $Pr > Diff$) et de la significativité ('oui') ou non ('-') de la différence entre les moyennes comparées

1. Pénétrométrie

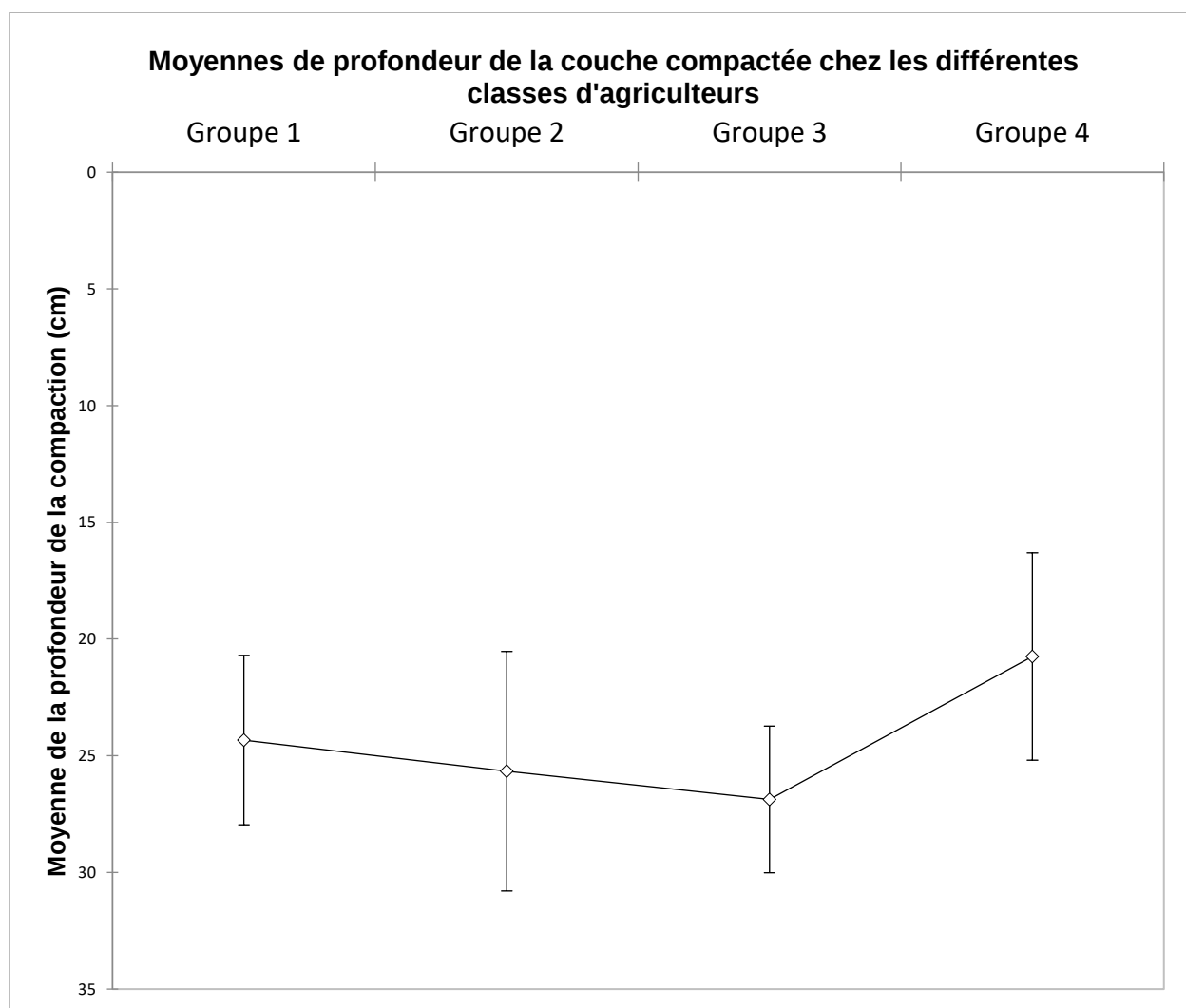


Figure 17: Moyennes de profondeur de la couche compactée par rapport à la surface chez les différentes classes d'agriculteurs.

Tableau 17: Moyennes estimées de la profondeur de la couche compactée et intervalles de confiance.

	Moyennes estimées	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Classe 3	26,875	23,733	30,017
Classe 2	25,667	20,536	30,798
Classe 1	24,333	20,705	27,961
Classe 4	20,750	16,307	25,193

La classe 3 est celle où la couche compactée est la plus profonde. À l'opposé, on retrouve la classe 4, avec une couche compactée située environ 6 centimètres plus près de la surface.

Tableau 18: Test de Tukey: comparaison des moyennes de profondeur de la couche compactée entre les différentes classes d'agriculteurs.

Contraste	Différence	Pr > Diff	Significatif
Classe 3 vs Classe 4	6,125	0,120	-
Classe 3 vs Classe 1	2,542	0,684	-
Classe 3 vs Classe 2	1,208	0,974	-
Classe 2 vs Classe 4	4,917	0,443	-
Classe 2 vs Classe 1	1,333	0,969	-
Classe 1 vs Classe 4	3,583	0,565	-

Les comparaisons des moyennes ne donnent aucun résultat significatif, mais on peut tout de même noter que les classes 3 et 4 ont la plus grande différence, et que la p-valeur de cette comparaison s'approche de 0,05

2. Test à la bêche

Le test à la bêche est divisé en huit mesures distinctes qui peuvent s'agréger pour donner un résultat total. Dans ces huit mesures, seules deux ont donné un résultat significatif : la cohésion de la bêchée et la densité de racines saines. La cohésion de la bêchée note la transition entre les horizons du sol. Une transition très progressive donnera un score optimal tandis qu'un changement abrupt dans le type d'agrégats avec la profondeur reçoit un score défavorable. La densité de racines saines note l'enracinement de la culture au niveau de sa densité, de sa profondeur et des obstacles au bon développement des racines.

Note : dans la lecture de ces résultats, il est nécessaire de garder à l'esprit que le plus petit score est le meilleur : les cotations varient de 1 (meilleur) à 5 (moins bon) pour chaque élément. Le sens des graduations de l'axe des ordonnées a été inversé afin de fournir une lecture plus intuitive, avec le meilleur score vers le haut et le moins bon vers le bas.

1. Résultats pour la cohésion de la bêchée :

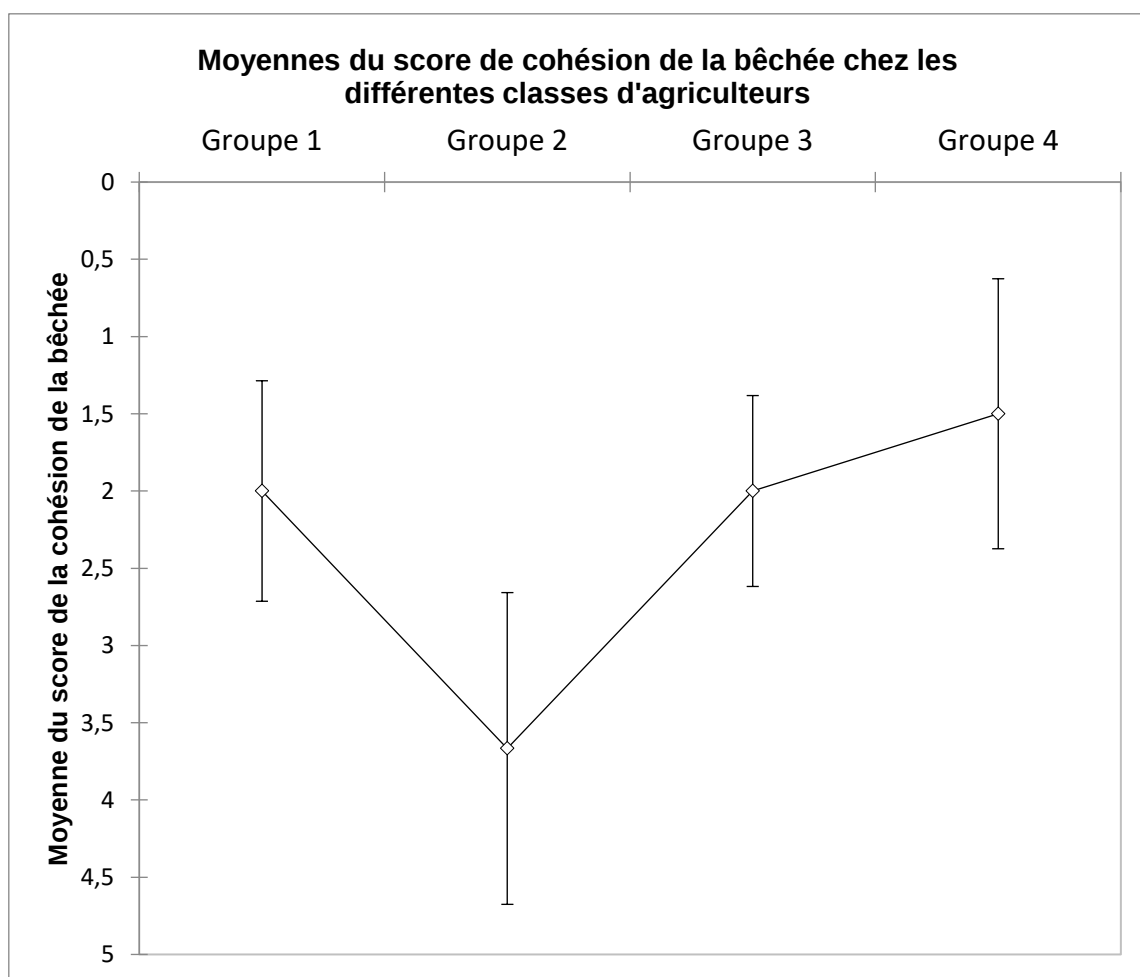


Figure 18: Moyennes du score de cohésion de la bêchée chez les différentes classes d'agriculteurs.

Tableau 19: Moyennes estimées du score de la cohésion de la bêchée et intervalles de confiance.

Modalité	Moyennes estimées	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Classe 2	3,667	2,658	4,676
Classe 1	2,000	1,286	2,714
Classe 3	2,000	1,382	2,618
Classe 4	1,500	0,626	2,374

Dans ce cas, la plus mauvaise note est attribuée à la classe 2 et la meilleure à la 4. Les classes 1 et 3 semblent équivalents en termes de cohésion de la bêchée.

Tableau 20: Test de Tukey: comparaisons du score de cohésion de la bêchée entre les différentes classes d'agriculteurs.

Contraste	Différence	Pr > Diff	Significatif
Classe 2 vs Classe 4	2,167	0,015	Oui
Classe 2 vs Classe 1	1,667	0,050	Oui
Classe 2 vs Classe 3	1,667	0,039	Oui
Classe 3 vs Classe 4	0,500	0,759	-
Classe 3 vs Classe 1	0,000	1,000	-
Classe 1 vs Classe 4	0,500	0,787	-

Le test de Tukey révèle des différences significatives entre les classes : la classe 2 se différencie de toutes les autres (score plus élevé, donc défavorable). Les autres classes ne présentent cependant pas de différence significative entre elles.

2. Résultats pour la densité de racines saines

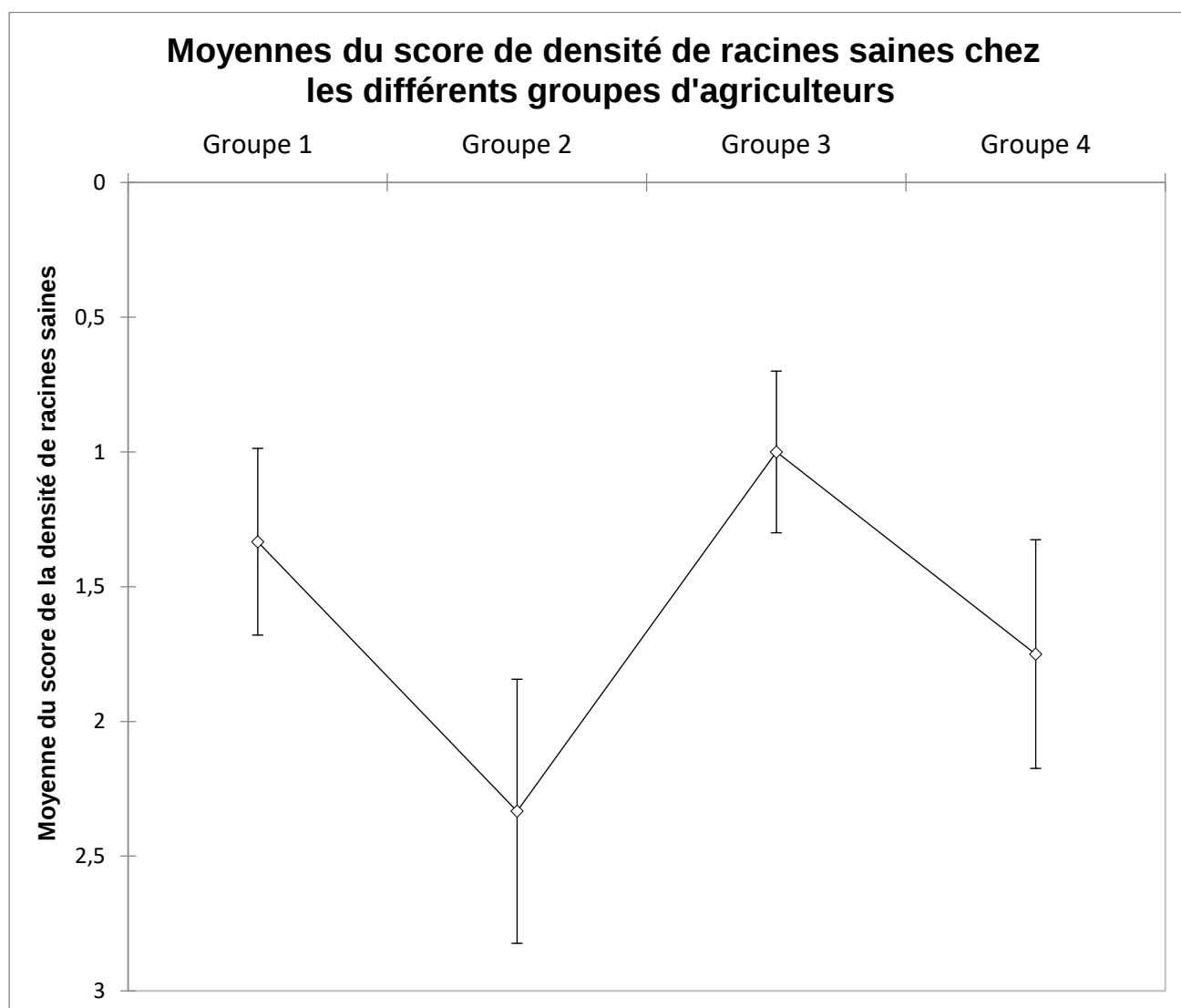


Figure 19: Moyennes du score de densité de racines saines chez les différentes classes d'agriculteurs.

Tableau 21: Moyennes estimées du score de densité de racines saines et intervalles de confiance.

Modalité	Moyennes estimées	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Classe 2	2,333	1,843	2,823
Classe 4	1,750	1,326	2,174
Classe 1	1,333	0,987	1,680
Classe 3	1,000	0,700	1,300

Lors de la mesure de la densité de racines saines, il apparaît que les classes 1 et 3 obtiennent un meilleur score que les classes 2 et 4, indiquant chez elles une meilleure densité de racines.

Tableau 22: Test de Tukey: comparaisons des moyennes du score de densité de racines saines entre les différentes classes d'agriculteurs.

Contraste	Différence	Pr > Diff	Significatif
Classe 2 vs Classe 3	1,333	0,001	Oui
Classe 2 vs Classe 1	1,000	0,013	Oui
Classe 2 vs Classe 4	0,583	0,265	-
Classe 4 vs Classe 3	0,750	0,033	Oui
Classe 4 vs Classe 1	0,417	0,402	-
Classe 1 vs Classe 3	0,333	0,440	-

Le test de Tukey confirme cette impression : la classe 2 a un score significativement meilleur que les classes 1 et 3, et la classe 4 est significativement meilleure que la classe 3.

3. Résultats globaux du test à la bêche

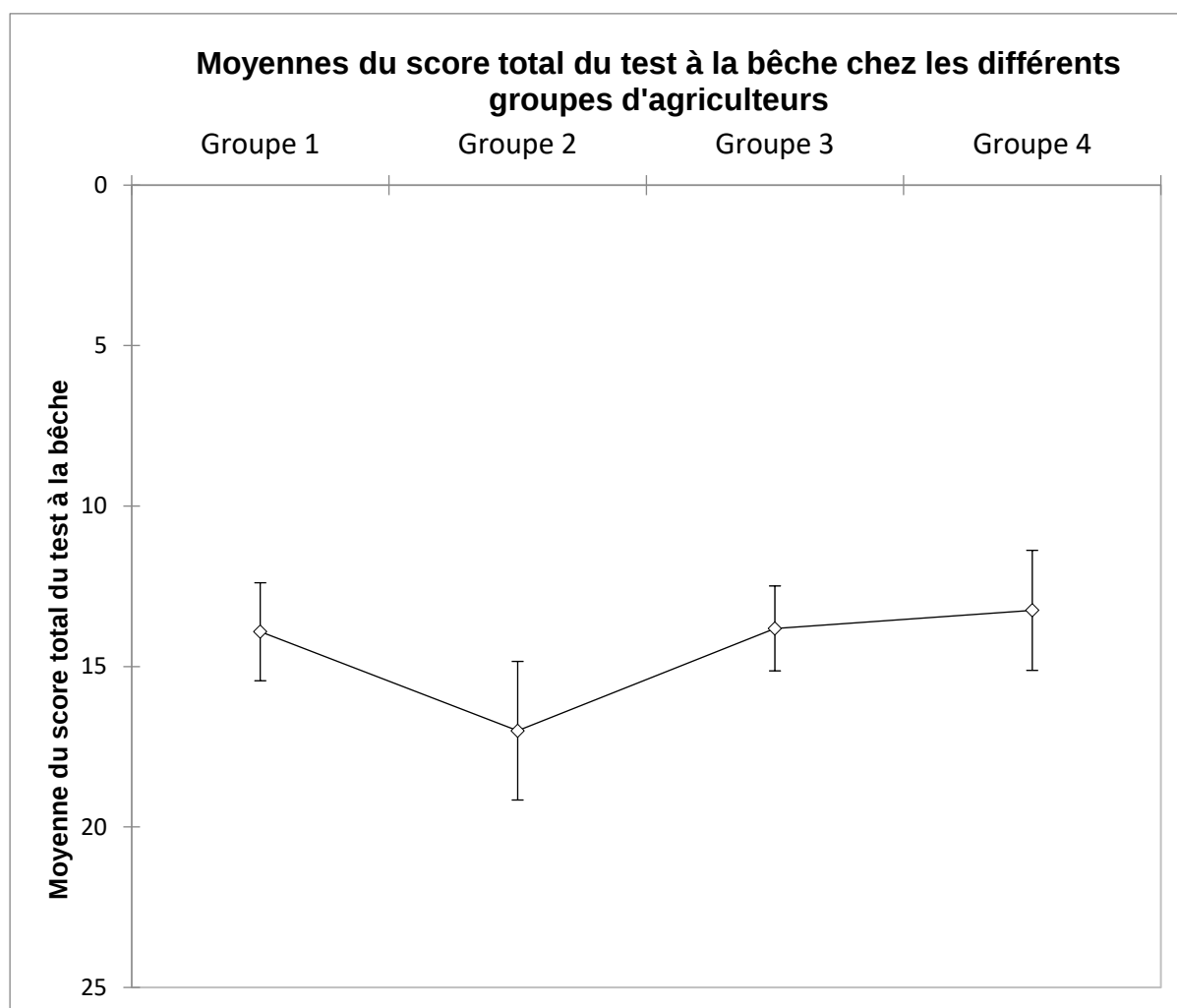


Figure 20: Moyennes du score total du test à la bêche chez les différentes classes d'agriculteurs.

Tableau 23: Moyennes estimées du score total du test à la bêche et intervalles de confiance.

Modalité	Moyennes estimées	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Classe 2	17,000	14,841	19,159
Classe 1	13,917	12,390	15,444
Classe 3	13,813	12,490	15,135
Classe 4	13,250	11,380	15,120

La différence globale entre les classes semble faible : trois ont une moyenne proche de 13 mais le quatrième (classe 2) a un score légèrement moins bon, s'élevant à 17. Il convient tout de même de relativiser ce 'mauvais' résultat qui n'en est pas un : le meilleur score possible par le test est de 8 et le pire est de 40. Toutes les classes ont donc un résultat satisfaisant en termes d'état du sol.

Tableau 24: Test de Tukey: comparaison des moyennes du score total du test à la bêche entre les différentes classes d'agriculteurs.

Contraste	Différence	Pr > Diff	Significatif
Classe 2 vs Classe 4	3,750	0,058	-
Classe 2 vs Classe 3	3,188	0,072	-
Classe 2 vs Classe 1	3,083	0,103	-
Classe 1 vs Classe 4	0,667	0,936	-
Classe 1 vs Classe 3	0,104	1,000	-
Classe 3 vs Classe 4	0,563	0,954	-

Le test de Tukey ne permet de révéler aucune différence significative, bien que deux comparaisons aient une p-valeur proche de 0,05 : la comparaison 'classe 2 vs classe 4' et celle opposant la classe 2 à la classe 3. La classe 2 semble tout de même avoir un moins bon score que les autres, malgré l'impossibilité de le confirmer au niveau statistique.

3. Slake test

Le slake test mesure la résistance des agrégats aux forces internes lors de l'humidification, simulant un sol détrempé par une forte pluie. Le meilleur résultat pour le slake test confère le score le plus élevé (classe 6) tandis que le moins bon résultat donne le score le plus faible (classe 1).

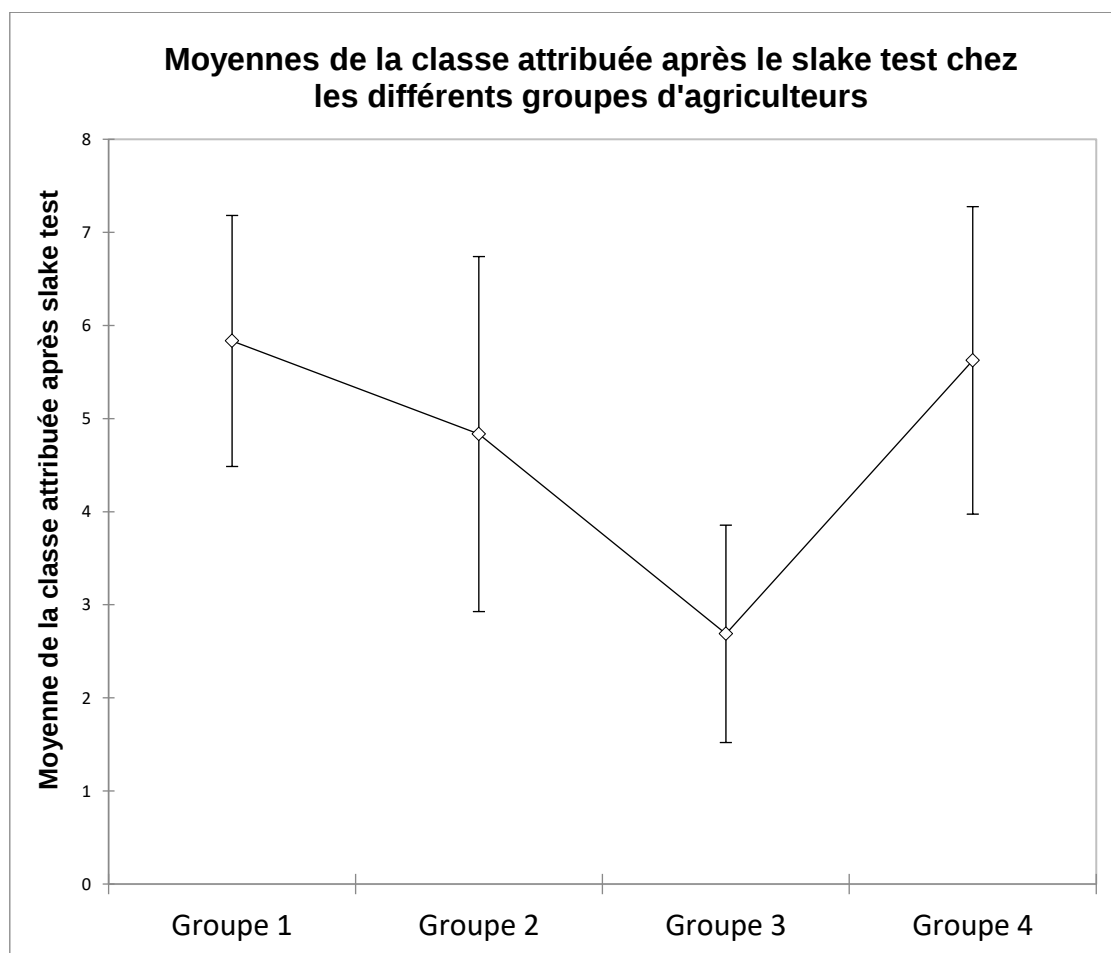


Figure 21: Moyennes de la classe attribuée après le slake test chez les différentes classes d'agriculteurs.

Tableau 25: Moyennes estimées des classes du slake test et intervalles de confiance.

Modalité	Moyennes estimées	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Classe 1	5,833	4,485	7,182
Classe 4	5,625	3,974	7,276
Classe 2	4,833	2,927	6,740
Classe 3	2,688	1,520	3,855

Tableau 26: Test de Tukey: comparaison des moyennes du slake test entre les différentes classes d'agriculteurs.

Contraste	Différence	Pr > Diff	Significatif
Classe 1 vs Classe 3	3,146	0,008	Oui
Classe 1 vs Classe 2	1,000	0,803	-
Classe 1 vs Classe 4	0,208	0,997	-
Classe 4 vs Classe 3	2,938	0,032	Oui
Classe 4 vs Classe 2	0,792	0,910	-
Classe 2 vs Classe 3	2,146	0,218	-

4. Solvita® Field Test

Cette expérience avait pour but d'obtenir des mesures relatives d'activité respiratoire dans les premiers centimètres de sol des différentes parcelles étudiées. Les échantillons de sol ont tous été prélevés et 'incubés' sur une période de trois jours, et le pourcentage d'humidité du sol de chaque parcelle a été mesuré. L'expérience s'est malheureusement avérée non informative. Comme visible sur les photos (Figure 22), les résultats étaient quasiment tous situés dans la même gamme de couleurs, et il n'a pas été possible d'établir de classement assez fiable pour pouvoir l'utiliser dans les analyses.



Figure 22: Sondes Solvita ® après 24h de réaction au dioxyde de carbone libéré par des échantillons de sol.

5. Teabag Index

1. Pour le coefficient de stabilisation S

Pour rappel, le coefficient de stabilisation représente l'effet inhibiteur de l'environnement sur la dégradation de la matière organique. Plus précisément, une partie de la fraction hydrolysable se *stabilise* dans le sol en se liant avec lui et devient récalcitrante à la dégradation. Au plus le facteur de stabilisation est élevé, au plus la proportion de matière organique hydrolysable sera faible.

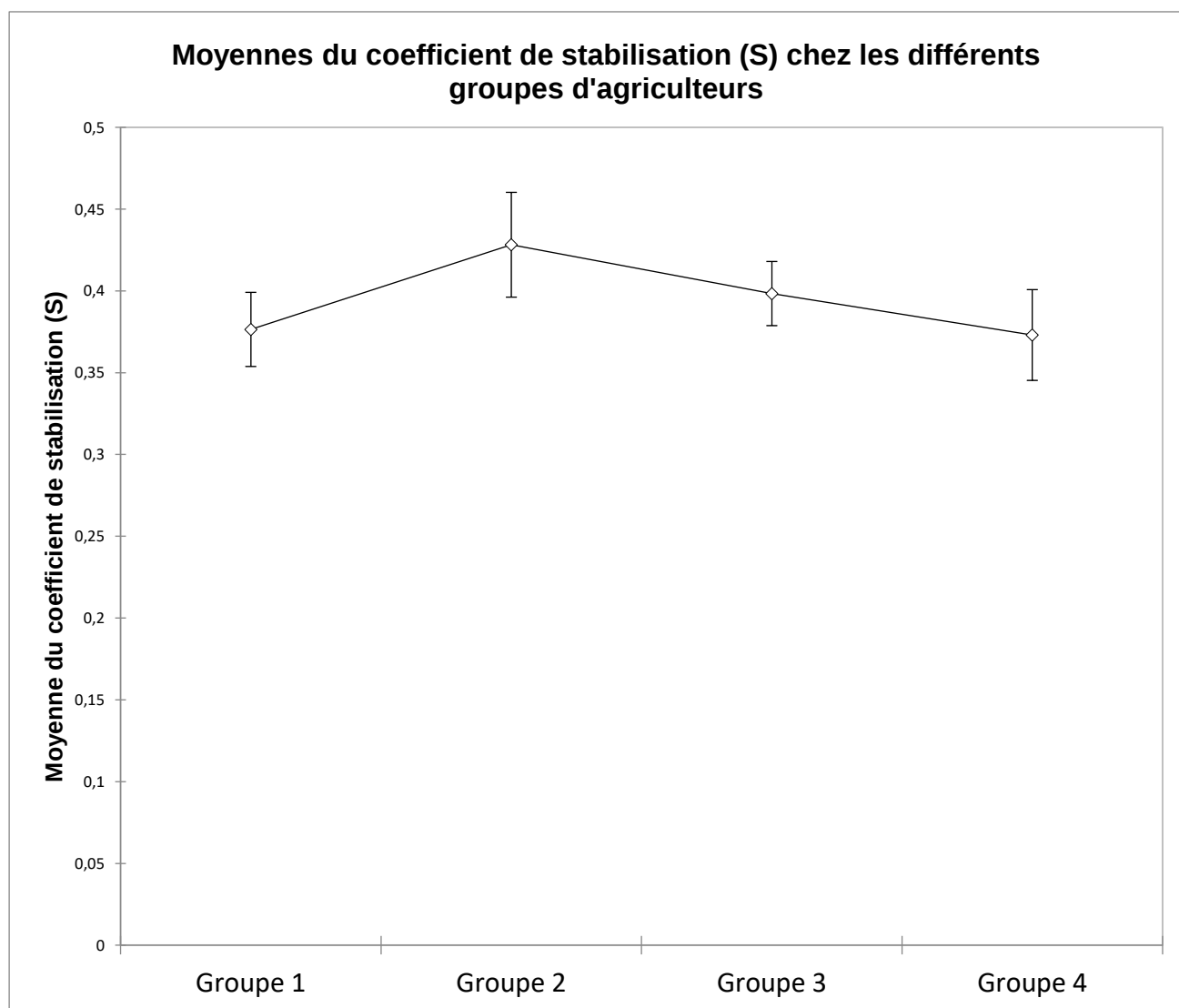


Figure 23: Moyennes du coefficient de stabilisation (S) chez les différentes classes d'agriculteurs.

Tableau 27: Moyennes estimées du coefficient de stabilisation (S) et intervalles de confiance.

Modalité	Moyennes estimées	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Classe 2	0,428	0,396	0,460
Classe 3	0,398	0,379	0,418
Classe 1	0,376	0,354	0,399
Classe 4	0,373	0,345	0,401

La classe 2 semble présenter la moyenne la plus élevée et les trois autres classes être assez similaires dans les résultats.

Tableau 28: Test de Tukey: comparaison des moyennes du coefficient de stabilisation entre les différentes classes d'agriculteurs.

Contraste	Différence	Pr > Diff	Significatif
Classe 2 vs Classe 4	0,055	0,019	Oui
Classe 2 vs Classe 1	0,052	0,031	Oui
Classe 2 vs Classe 3	0,030	0,375	-
Classe 3 vs Classe 4	0,025	0,519	-
Classe 3 vs Classe 1	0,022	0,636	-
Classe 1 vs Classe 4	0,003	0,998	-

Le test de Tukey montre une différence significative entre la classe 2 et les classes 1 et 4 : la moyenne des résultats de la classe 2 est significativement plus grande, révélant un coefficient de stabilisation plus élevé (donc à terme une plus grande résistance de la matière organique à la dégradation) chez ces agriculteurs.

2. Pour le taux de décomposition k

Une fois le coefficient de stabilisation calculé, il est possible d'obtenir le taux de décomposition de la matière organique (k) dans les différents sols. Rappelons que le k dans cette expérience représente le taux de décomposition de la matière organique *labile*, c'est-à-dire celle qui se dégrade rapidement, par opposition à la matière organique *récalcitrante*, qui a une dégradation beaucoup plus lente, sur une échelle de temps trop grande pour cette étude.

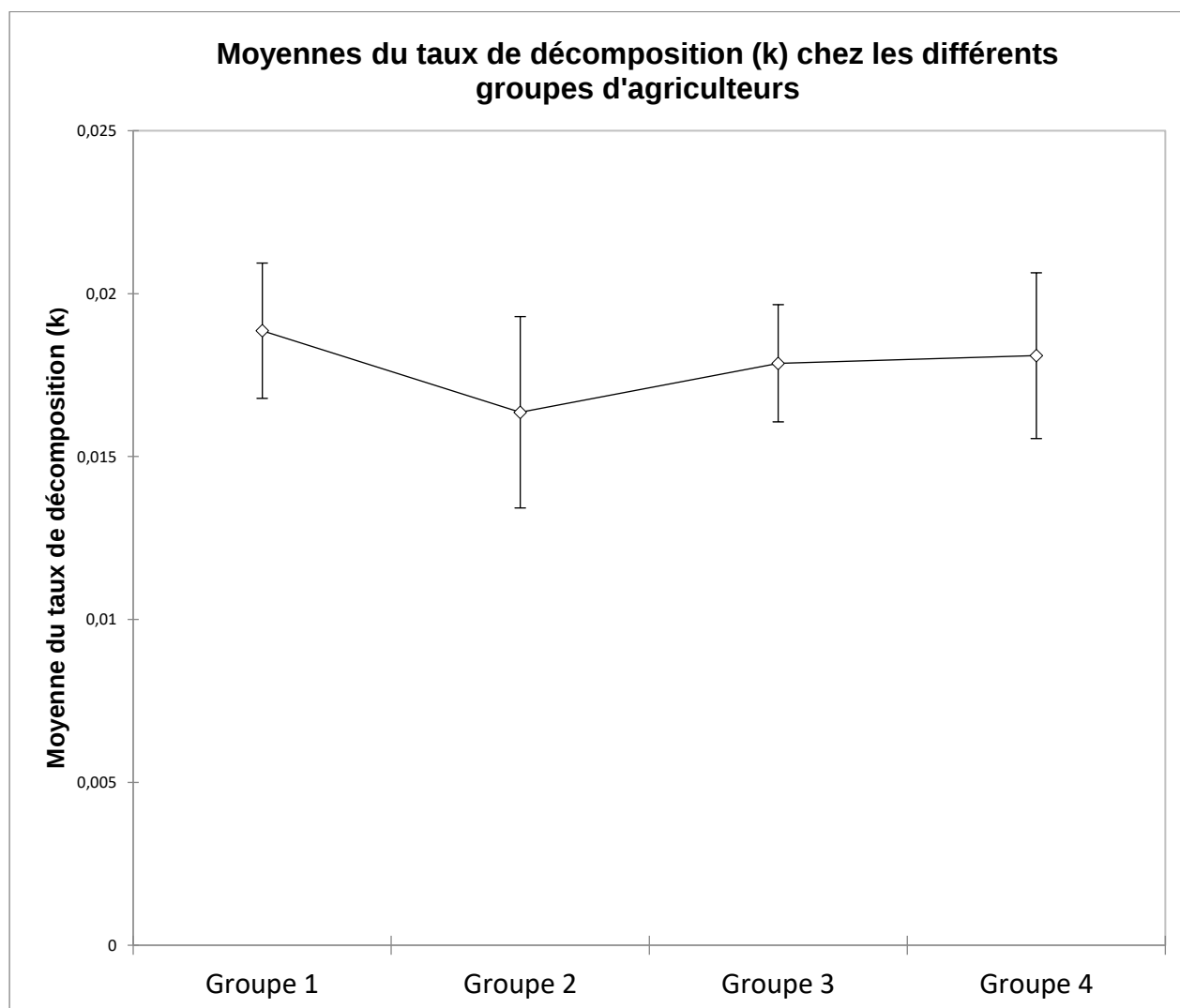


Figure 24: Moyennes du taux de décomposition (k) chez les différentes classes d'agriculteurs.

Tableau 29: Moyennes estimées du taux de décomposition (k) et intervalles de confiance.

Modalité	Moyennes estimées	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Classe 1	0,019	0,017	0,021
Classe 4	0,018	0,016	0,021
Classe 3	0,018	0,016	0,020
Classe 2	0,016	0,013	0,019

Les moyennes sont à peu près similaires dans chacune des classes, les distinctions sont très faibles.

Tableau 30: Test de Tukey: comparaison des moyennes du taux de décomposition (k) entre les différentes classes d'agriculteurs.

Contraste	Différence	Pr > Diff	Significatif
Classe 1 vs Classe 2	0,003	0,513	-
Classe 1 vs Classe 3	0,001	0,887	-
Classe 1 vs Classe 4	0,001	0,967	-
Classe 4 vs Classe 2	0,002	0,810	-
Classe 4 vs Classe 3	0,000	0,999	-
Classe 3 vs Classe 2	0,002	0,821	-

Comme attendu, le test de Tukey ne permet de révéler aucune différence significative entre les taux de dégradation des différentes classes d'agriculteurs.

6. Résumé des résultats des mesures

Tableau 31: Résumé des résultats des mesures pour les différentes classes d'agriculteurs. Les lignes 'Classe' sont constituées des moyennes estimées, et la ligne 'Tukey' indique les différences significatives entre les classes. n.s. = non significatif.

	Profondeur de compaction (cm)	Cohésion de la bêche (score)	Racines saines (score)	Score total test à la bêche	Slake test (classe)	Coefficient de stabilisation	Taux de décomposition
Classe 1	24,333	2,000	1,333	13,917	5,833	0,376	0,019
Classe 2	25,667	3,667	2,333	17,000	4,833	0,428	0,016
Classe 3	26,875	2,000	1,000	13,813	2,688	0,398	0,018
Classe 4	20,750	1,500	1,750	13,250	5,265	0,373	0,018
Tukey	n.s.	2 > 1, 3, 4	2 > 1, 3 4 > 3	n.s.	1, 4 > 3	2 > 1, 4	n.s.

On peut constater dans le Tableau 31 que certaines mesures n'ont pas fourni de résultat significatif : la profondeur de compaction, le score total du test à la bêche et le taux de décomposition du teabag index.

1. Résultats des classes pour chaque mesure significative

Pour la **cohésion de la bêche**, la classe 2 a un score significativement plus élevé (donc défavorable) que les trois autres classes.

Pour les **racines saines**, la classe 2 a un score significativement plus élevé (donc défavorable) que les classes 1 et 3, et la classe 4 a un score plus élevé que la classe 3.

Pour le **slake test**, les classes 1 et 4 sont significativement mieux notées que la classe 3, indiquant une meilleure stabilité interne des agrégats.

Pour le **coefficient de stabilisation (S)**, la classe 2 a une moyenne significativement plus élevée que celle des groupes 1 et 4, indiquant une plus grande résistance à la dégradation de la matière organique dans les sols de la classe 2.

2. Résultat des mesures significatives selon chaque classe

La **classe 1** présente la meilleure moyenne estimée pour le slake test, significativement meilleure que celle de la classe 3. Elle présente un coefficient de stabilisation plus faible que la classe 3, signifiant qu'elle pourrait stocker moins de carbone dans ses sols.

La **classe 2** présente la moins bonne cohésion de la bêche et la moins bonne densité de racines saines. Son coefficient de stabilisation est lui significativement le plus élevé, indiquant qu'elle pourrait stocker plus de carbone dans ses sols.

La **classe 3** présente une bonne densité en racines saines, significativement meilleure que celles des classes 1 et 4. Il s'agit en revanche de la classe ayant obtenu le moins bon score lors du slake test, significativement moins bon que les classes 1 et 4.

La **classe 4** a eu un bon score au slake test, significativement meilleur que la classe 3. Son coefficient de stabilisation est lui le plus faible, significativement inférieur à celui de la classe 2.

Les raisons expliquant ces différences entre classes seront discutées dans la section suivante.

Quatrième partie : Discussion

Chapitre 9: Critique de la méthodologie

1. Méthodologie des enquêtes

1. Les entretiens semi-dirigés

Le choix de la méthode d'enquête, des entretiens semi-dirigés, s'est avéré judicieux à plusieurs égards. Cette méthode, au-delà de la simple récolte de données sur les pratiques agricoles, a permis de recueillir des opinions d'agriculteurs sur différents sujets (l'utilisation – et la possible interdiction – du glyphosate et des produits phytosanitaires en général, la 'philosophie' de travail du sol, le rapport à l'environnement, la législation en matière de couverts végétaux, ...), donnant ainsi à l'enquêteur un moyen de comprendre les schémas de réflexion qui sous-tendent les choix de pratiques. Les décisions des exploitants agricoles ont toujours une part de subjectivité qui est liée à la psychologie de l'individu, et il aurait été dommage de passer à côté.

Un autre avantage de cette méthode est le contact avec l'agriculteur lors de l'entretien. En se présentant comme un étudiant qui réalise un sondage et qui a besoin de lui, l'enquêté se sent valorisé, écouté. Dans un climat de méfiance de la population vis-à-vis de l'agriculture et ceux qui la pratiquent, avoir un interlocuteur jeune, aussi neutre que possible et demandeur d'un maximum d'informations pour comprendre le 'pourquoi du comment' apporte sans doute un sentiment valorisant à des agriculteurs parfois désabusés. Ce contact avec l'agriculteur est également une grande source de richesses pour l'étudiant. À titre personnel, j'ai appris beaucoup lors de mes visites en ferme. Il est en effet beaucoup plus facile de comprendre l'utilité de chaque pratique lorsque les causes et les contraintes de terrain sont expliquées par celui qui les vit. Il était surprenant de constater à quel point la conclusion d'une réflexion théorique sur les 'bonnes pratiques' à appliquer peut être balayée par un agriculteur pour des raisons insoupçonnables avant d'aller le rencontrer chez lui. Par exemple, la problématique de la plantation d'arbres ou de haies pour remplir des critères de mesures agri-environnementales permettant d'obtenir des subsides de l'Union européenne et d'entretenir la biodiversité locale : chez soi, on se dit que c'est une bonne idée, mais quand les agriculteurs expliquent que les haies empêchent le passage de machines sur les bords de champ et que les racines des arbres bouchent les tuyaux de drainage, force est de constater qu'ils ont toutes leurs raisons de ne pas en planter.

Enfin, les entretiens semi-dirigés permettent de réorienter l'enquête en cours de réalisation. Si après quelques entretiens, on se rend compte que l'on reçoit des informations pertinentes mais non prévues dans le guide, il suffit de rajouter des questions à leur propos pour les rencontres suivantes.

2. L'échantillonnage

En choisissant les agriculteurs parmi un listing reprenant leur localisation géographique et leur système de culture (conventionnel, TCS, semis direct), il a été possible de constater l'utilisation d'une large palette de pratiques et d'outils dans une zone réduite de la Wallonie. Il est important de garder à l'esprit que ces pratiques ne représentent pas la diversité en Région wallonne mais celle du réseau d'agriculteurs de l'asbl Regenacterre : l'extrapolation des données recueillies et de leur analyse à l'ensemble des agriculteurs wallons ne fait pas partie du cadre de ce mémoire.

Il aurait cependant été utile d'interroger plus d'agriculteurs : si une redondance dans les profils de pratiques a été remarquée chez les agriculteurs 'conventionnels', cela n'a pas été le cas chez les autres. Or il n'y avait malheureusement plus d'agriculteurs adhérents à Regenacterre pratiquant les TCS ou le semis direct disponibles dans la zone géographique choisie.

2. Indicateurs choisis

Les objectifs poursuivis lors du choix des indicateurs mesurés étaient les suivants : simplicité d'utilisation (tant en matériel nécessaire qu'en connaissances requises), rapidité de l'obtention des résultats et possibilité d'appropriation de ces méthodes par les agriculteurs. Après avoir réalisé cette étude, il est possible d'affirmer que ces objectifs ont été remplis. Les protocoles sélectionnés ont également pour vocation de faire le lien entre le monde de la recherche et le monde du terrain : en utilisant des protocoles très 'visuels' et 'intuitifs' mais néanmoins reconnus scientifiquement, il est possible de contribuer à la création de ponts entre ces mondes parfois trop éloignés.

À titre personnel, je crois que le test à la bêche était le protocole le moins fiable pour comparer des agriculteurs entre eux. Malgré des efforts permanents d'objectivité (critères de classification précis, état de ressuiement du sol à peu près le même partout), force est de constater qu'un jour n'était pas l'autre et qu'il était parfois compliqué de ne pas avoir d'*a priori* dans l'évaluation de la bêchée : on a toujours tendance à voir ce que l'on s'attend à voir, et les pratiques effectuées sur chaque parcelle étaient connues avant d'aller y faire le test. Ce test reste à mon sens très utile pour les agriculteurs afin d'avoir une bonne idée de l'état de leurs sols et d'adapter leurs pratiques en conséquence, mais son utilisation dans la comparaison de mesures étalées sur plusieurs semaines peut conduire à des imprécisions.

Le slake test était lui le test le plus 'parlant'. La stabilité des agrégats est un enjeu important pour les agriculteurs s'ils veulent éviter l'érosion et la battance, et ce test permet de la visualiser en moins de dix minutes. Mon avis (visiblement partagé par beaucoup d'autres, au vu de l'expansion de l'utilisation de cette méthode dans des milieux prônant les TCS) est que cette démonstration de l'effet du travail du sol sur sa stabilité face à la pluie est beaucoup plus adaptée pour un public d'agriculteurs, qui

peuvent voir le fruit de leur travail de leurs propres yeux, que des mesures chiffrées de stabilité structurale qui suivent des protocoles plus complexes et qui peuvent paraître plus déconnectés de la réalité de terrain. La mesure de la respiration et de la compaction du sol ainsi que le test des sachets de thé paraissaient également être assez intuitifs et révélateurs de l'état de leurs sols aux agriculteurs rencontrés, tout en étant reconnus scientifiquement. C'est une bonne chose si l'on souhaite utiliser les résultats de ces mesures comme outils d'aide à la décision, puisque personne ne peut opérer les choix dans les pratiques à part l'exploitant agricole lui-même : le scientifique conseille, mais c'est l'agriculteur qui décide. Et s'il n'a pas confiance en les conseils qui lui sont fournis parce qu'il n'accorde pas de valeur aux mesures effectuées, il ne les prendra pas en compte. D'ailleurs, la plupart des agriculteurs rencontrés se sont montrés désireux de recevoir un retour après cette étude pour savoir où ils se situent par rapport aux autres en termes de résultats des mesures ; une rencontre avec eux sera normalement organisée après la présentation de ce travail.

Chapitre 10: Discussion des résultats

1. ACM et CAH

Lors de la préparation des données pour l'ACM, il a fallu faire attention à deux points : fournir des données qualitatives et ne pas avoir *trop* de modalités entrant en compte, afin d'éviter une perte en significativité de l'analyse. Ces conditions ont amené à créer des catégories pour transformer des variables quantitatives en variables qualitatives : on a ainsi des catégories de superficie, de nombre d'espèces dans le couvert et de pourcentages d'espèces de légumineuses. Afin de diminuer le nombre de modalités, les travaux du sol et la destination du couvert ont également été catégorisés. La discrimination des travaux du sol a été effectuée sur base de la littérature (Labreuche et al. 2014), en fonction de leurs effets (enfouissement, retournement, fragmentation), de la profondeur et de la largeur de travail. Même si toutes les catégorisations opérées pour procéder à l'ACM semblent pertinentes, il est indéniable qu'il y a une perte d'informations en cours de processus. La subtilité de cette analyse était de trouver le juste équilibre entre pertinence des catégories et variabilité expliquée par les premières dimensions des modalités. Dans notre cas, les trois premières dimensions, sur lesquelles a été basée la CAH, expliquent respectivement 17, 15 et 13% (arrondi à l'unité) de la variabilité, cumulant donc 45% de la variabilité totale. Ces valeurs, si elles ne sont pas décisives, sont cependant correctes et il est acceptable de baser notre interprétation sur elles. Un échantillon plus large aurait sans doute permis d'obtenir de meilleurs pourcentages. Certaines informations auraient pu être traitées comme des variables ordinales, comme la superficie, la durée de la rotation ou le nombre d'espèces dans le couvert. Cela n'aurait cependant pas été pertinent pour d'autres : il est par exemple périlleux d'établir une hiérarchie entre les différents travaux du sol, notamment à des profondeurs moyennes ou superficielles ; l'analyse aurait fourni des résultats biaisés. De plus, 9 variables sur 17 sont bimodales : rien n'aurait changé en les considérant comme ordinales au lieu de catégorielles. Compte tenu de tous ces éléments, l'ACM paraissait être le meilleur compromis entre la justesse de l'analyse et l'exploitation maximale des informations.

Lorsque l'on s'attarde sur le Tableau 14, on peut remarquer que, pour la première dimension, les modalités ayant une influence négative correspondent à un système cultural conventionnel, tandis que celles qui ont une influence positive sont des pratiques correspondant à un système de techniques culturales simplifiées (TCS). De nouveau, rappelons que la qualification de 'positif' ou 'négatif' réfère à la position sur l'axe de la dimension considérée, et ne porte pas de jugement de valeur sur les pratiques. En ce qui concerne la deuxième dimension, les modalités avec une influence positive correspondent à un système de TCS, tandis que les modalités ayant une influence négative sont plutôt des caractéristiques générales de l'exploitation qui ne

permettent pas de tirer de conclusion particulière. Muni de ces informations, nous pouvons nous attendre à retrouver dans le quadrant supérieur droit (F1 et F2 positives) les agriculteurs comptabilisant le plus de pratiques appartenant au système de TCS. Cette intuition se vérifie puisqu'on y retrouve E, G, H et J qui sont les agriculteurs les plus engagés dans ces techniques, et depuis de nombreuses années.

En examinant la carte factorielle des observations, on pourrait s'imaginer définir des classes comme fait sur la Figure 25, avec l'axe F1 séparant les points compris dans l'ellipse verte des autres points, qui sont eux séparés en deux groupes (ellipses jaune et rouge) selon l'axe F2. Il n'est toutefois pas possible d'avoir de garantie sur la pertinence de cette séparation sans procéder à une analyse plus approfondie.

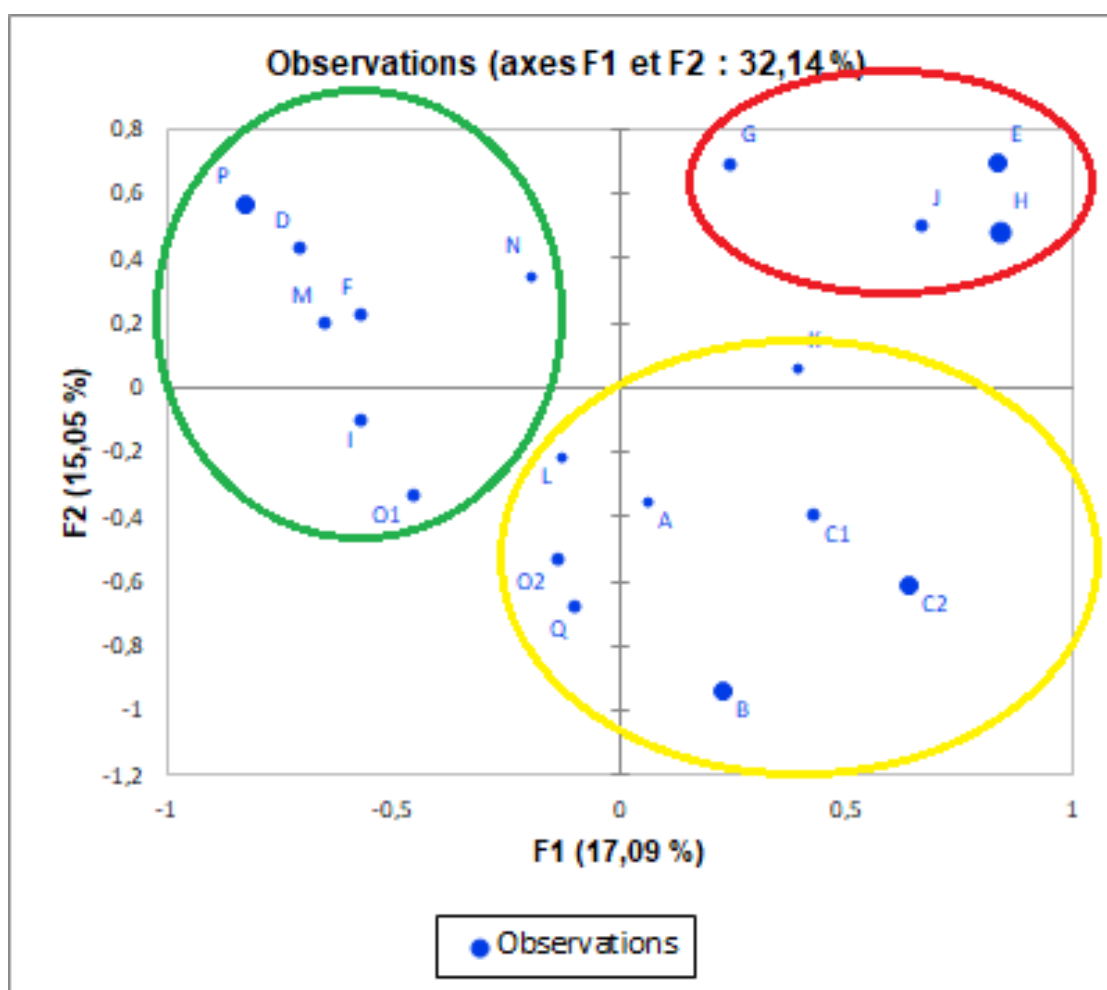


Figure 25: Classification intuitive des observations selon les deux premières dimensions de l'ACM.

L'application d'une CAH sur les coordonnées des trois premières dimensions des observations a permis de nous détromper : il y a en réalité quatre classes distinctes quand on considère trois dimensions.

Dans ces quatre classes différenciées par la CAH, l'analyse *a posteriori* des similitudes intra-classes et des différences inter-classes pour leur interprétation ne donne pas de résultats très concrets pour les classes 1 et 2, mais les classes 3 et 4 présentent des caractéristiques intéressantes, sur lesquelles nous pouvons nous attarder.

Les individus composant la **classe 3** (D, F, I, L, M, N, P) sont l'archétype des **agriculteurs conventionnels** : ils pratiquent tous le labour avant le froment (sauf L), utilisent un semoir classique et font au moins un passage de travail superficiel de mélange et d'enfouissement. Le couvert végétal est partout enfoui par labour après sa destruction. De manière moins déterminante, ils déclarent tous utiliser du glyphosate et des insecticides de manière occasionnelle ou systématique. Enfin, tous les agriculteurs de cette classe possèdent du bétail. La question n'a pas été posée durant les enquêtes mais il pourrait être intéressant de savoir si la raison pour laquelle ces agriculteurs ne pratiquent pas de TCS est qu'ils sont assurés d'avoir un apport de matière organique régulier grâce aux déjections de leur troupeau.

Les individus formant la **classe 4** (E, G, H, J) sont dans une toute autre démarche que ceux de la classe 3 en termes de pratiques : ils sont eux en plein dans le **système de TCS**. Ils ne pratiquent ni le labour, ni aucun autre travail profond du sol, préférant le laisser se structurer via les racines, la microflore et la microfaune. Trois d'entre eux sont dans ce système depuis plus de dix ans, et le quatrième (G) est lui en transition. Aucun travail superficiel de mélange et enfouissement n'est pratiqué non plus : ces agriculteurs sont également soucieux du bon développement des champignons du sol et de leur mycélium. Dans le même ordre d'idées, ils utilisent un semoir à disques plutôt qu'un semoir classique. Les couverts végétaux sont composés d'au moins cinq espèces, et E et G sont les deux seuls agriculteurs à utiliser 7 espèces ou plus (respectivement 10 et 7). Tous les couverts comprennent également des légumineuses et une espèce à système racinaire profond, sauf chez J.

La classe 4 se démarque tellement des autres que quand une CAH est pratiquée avec comme condition de créer uniquement deux classes, on se retrouve avec la classe 1 comportant E, G, H, J, et la classe 2 comprenant tous les autres agriculteurs. Cela reflète bien l'impression qui ressortait après les entretiens : ces agriculteurs sont très avancés dans leur système. Ils maîtrisent les TCS et utilisent tant que possible la biologie des sols pour 'faire le travail à leur place'.

2. ANOVA 1 et tests de Tukey : comparaison résultats-théorie

Ayant établi précédemment que les classes 3 et 4 sont celles qui représentent le mieux les systèmes conventionnel et TCS, il peut être intéressant de revenir sur les comparaisons des résultats des mesures dans ces deux classes, et de les mettre en perspective avec ce que dit la littérature à propos des impacts de ces systèmes sur le sol. Si les classes 1 ou 2 se démarquent des autres dans une analyse, des causes probables de leur différence seront toutefois recherchées.

La **profondeur de compaction** est la plus importante (plus profonde) dans la classe 3 et la plus faible dans la classe 4, sans pour autant que la différence entre les

moyennes ne soit significative (p -valeur = 0,120). Ce résultat pouvait être attendu : selon un rapport commandé par le SPW et réalisé par l'Université de Liège (Destain 2013), la résistance d'un sol cultivé sous TCS est plus élevée que celle créée par un travail du sol conventionnel ; le sol est plus 'tassé' en surface quand il ne subit pas de labour. Le labour a cependant le désavantage de créer une 'semelle de labour' sous la profondeur de travail de la charrue, c'est-à-dire une zone très fortement compactée dans le profil de sol. Les sols en TCS, même tassés, ne sont généralement pas aussi compactés qu'une semelle de labour.

Le **test à la bêche** nous fournit plusieurs résultats : la classe 2 est significativement celle ayant le moins bon score en termes de cohésion de la bêchée et de densité de racine saines. Elle est d'ailleurs la classe avec la moyenne estimée la plus faible, sans que cela ne soit significatif. Il est assez difficile de trouver une cause probable à ce phénomène : cette classe ne se distingue pas précisément des autres au niveau du travail du sol. Un autre résultat significatif est la meilleure densité racinaire chez la classe 3 (conventionnel) que chez la classe 4 (TCS), ce qui était à anticiper au vu de la différence de profondeur de compaction. Un sol labouré et plus fortement travaillé sera plus meuble, facilitant la croissance racinaire (du moins jusqu'à la semelle de labour) ; il faut cependant garder à l'esprit que ce n'est pas uniquement la profondeur des racines qui définit un bon apport en eau et nutriments, mais que cet apport dépend également des conditions biologiques et structurales du sol. De plus, un test à la bêche ne va pas plus profondément que la semelle de labour et ne nous fournit donc pas d'informations sur son effet d'obstruction à la croissance des racines à cette profondeur et à la bonne infiltration de l'eau dans le sous-sol.

Le **slake test** distingue la classe 3 des classes 1 et 4, qui ont un score significativement meilleur. La classe 3 est celle où le travail du sol le plus intensif est pratiqué, et ce résultat n'est pas surprenant. En labourant, la matière organique est diluée dans les 30 premiers centimètres du sol et elle ne participe pas tant à la formation d'agrégats stables en surface que chez les agriculteurs qui ne labourent pas, comme ceux de la classe 4 et la majorité de la classe 1.

Afin de vérifier cette hypothèse, une ANOVA 1 a été effectuée sur les résultats du slake test, avec la pratique ou non du labour comme critère de classification. Avec une moyenne estimée de 5,538 (non labour) contre 2,688 (labour), le test de Tukey a établi une différence hautement significative (p -valeur = 0,001) entre les résultats de ces deux pratiques.

Le **teabag index** nous fournit deux résultats : le coefficient de stabilisation (S) et le taux de décomposition (k). Seul le coefficient de stabilisation présente des différences significatives en fonction des classes, avec la classe 2 ayant un S plus grand que les classes 1 et 4. Ces différences reflètent l'effet de différents facteurs, notamment des conditions climatiques (Keuskamp et al. 2013) et de la texture du sol. Les trois parcelles de la classe 2 étant en région sablo-limoneuse, il s'agit peut-être là d'une piste. Une ANOVA 1 et un test de Tukey ont été effectués en comparant le coefficient de

stabilisation selon la région agricole sans indiquer de différence significative. Il aurait été très intéressant de discuter des résultats du teabag index en relation avec ceux du Solvita® Field Test, qui donne une indication de l'activité microbienne du sol, mais cette expérience n'a pas été conclusive.

3. Conclusion

Une CAH sur les coordonnées d'une ACM effectuée sur les pratiques agricoles des individus interrogés a permis de diviser les agriculteurs en quatre classes distinctes. Les classes 1 et 2 sont plutôt mixtes, comprenant des agriculteurs en TCS (ou en transition) et en conventionnel, tandis que les classes 3 et 4 sont tout à fait représentatives de groupe distincts : toute la classe 3 est composée d'agriculteurs conventionnels et toute la classe 4 est composée d'agriculteurs en TCS.

Les différences significatives entre les classes 3 et 4 dans les résultats des mesures sont les suivantes :

- La compaction est plus profonde chez les agriculteurs de la classe 3. Cette compaction plus profonde chez les agriculteurs conventionnels résulte du labour, qui fragmente, retourne et enfouit le sol sur les 20 premiers centimètres en moyenne. Les agriculteurs en TCS ne travaillent pas leur sol en profondeur et ont donc une compaction plus proche de la surface, même s'il ne s'agit pas de compaction aussi forte que celle des semelles de labour.
- Dans la partie bêchée du sol (~25 premiers centimètres), la densité racinaire est plus importante chez les agriculteurs conventionnels que chez ceux en TCS. Il est éclairant de mettre ce résultat en lien avec le travail du sol plus important chez les conventionnels : les racines rencontreront une moindre résistance mécanique à leur croissance dans un sol ameubli.
- Le slake test donne de meilleurs résultats pour la classe 4 que pour la classe 3, indiquant que les agrégats sont plus stables dans les sols sous TCS. Une ANOVA sur tous les agriculteurs a permis de confirmer (p-valeur = 0,001) que le labour est déterminant dans les résultats du test. Il est possible d'expliquer cette influence par l'action d'enfouissement et de dilution de la matière organique du labour dans les 20 à 30 premiers centimètres du sol, diminuant ainsi la stabilisation biologique des agrégats des couches supérieures, qui résisteront moins aux contraintes physiques (effet 'splash', gonflement des particules d'argiles) des événements pluvieux et seront alors plus fortement sujets à l'érosion.

Au travers de ces résultats, nous pouvons retrouver des différences majeures entre les sols sous TCS et ceux sous agriculture conventionnelle. Ces différences correspondent aux différences de philosophie et d'objectifs des agriculteurs rencontrés durant l'enquête : les agriculteurs conventionnels sont dans l'optique d'une maîtrise totale et artificialisée du système sol-plante, tandis que les agriculteurs TCS font le choix de laisser le sol se structurer de lui-même, en y favorisant l'activité biologique et la présence de matière organique.

4. Le cas du Solvita® Field Test

L'utilisation du Solvita® Field Test n'a pas apporté les résultats attendus : comme expliqué dans la partie résultats, les couleurs des sondes réagissant au CO₂ étaient presque toutes dans la même gamme de couleurs, empêchant d'établir une comparaison fiable entre les parcelles. Il a été fait part de ces résultats au support technique de la société Woods End Laboratories Inc. qui commercialise ces tests. Leur suggestion est que les sols testés sont tous très riches en matière organique, produisant ainsi beaucoup de CO₂ par respiration et 'saturant' les sondes ; il a été proposé de recommencer ces tests en prélevant moins de sol, ou en utilisant des plus grands bocal afin de diminuer la concentration en dioxyde de carbone et d'être dans une zone fiable de réponse de la sonde. Cette suggestion paraît peu réaliste : les sols échantillonnés sont issus des régions limoneuse et sablo-limoneuses, plutôt pauvres en matière organique comparativement aux autres sols wallons. A côté de cela, il a été proposé par Guillaume Sneessens, agronome travaillant à temps partiel chez Regenacterre, d'utiliser la même quantité de sol mais sans le tamiser, évitant ainsi de stimuler la respiration avec le 'mini-labour' de la manipulation du sol. Il serait intéressant d'expérimenter ces deux méthodes et de les comparer avec les résultats obtenus en suivant la méthode prescrite dans le manuel d'utilisation Solvita®.



Figure 26: Solvita® Field Test sans (gauche) et avec (droite) tamisage du sol prélevé.

Chapitre 12: Limitations d'un travail de terrain et perspectives futures

Cette enquête a permis d'aborder les pratiques agricoles des adhérents de l'asbl Regenacterre de façon assez large : des informations ont été recueillies à propos de généralités de l'exploitation, du travail du sol avant la culture de froment d'hiver, de l'usage des couverts, des intrants, de l'état des sols, ... Le tout articulé autour d'une discussion enrichissante avec les agriculteurs. Si le format de l'enquête et des mesures est tout à fait satisfaisant, on peut regretter qu'il n'ait pas été possible de la mener à plus grande échelle, avec un échantillon beaucoup plus grand et sur une période de temps plus longue. Cela n'aurait pas été possible dans le cadre d'un mémoire, mais une étude de ce genre trouverait probablement sa place dans le cadre d'une thèse ou d'un projet de recherche de plusieurs années, permettant ainsi d'analyser la variabilité des résultats en fonction des années et de les mettre en relation avec les conditions de température et de précipitation, qui restent prépondérantes dans les variations de l'activité microbienne.

Ce travail nous donne une 'photographie', un instantané des pratiques agricoles et des caractéristiques des sols ; c'est un exercice très intéressant mais il serait encore plus instructif de se pencher sur leur évolution au fil du temps et avec un approfondissement sur différentes cultures, plutôt qu'uniquement le froment. Une étude de ce genre ne semble pas avoir été réalisée en Wallonie : si beaucoup de travaux se penchent sur le pourcentage de surfaces cultivées en bio par rapport au conventionnel (signifiant ici l'agriculture utilisant des intrants de synthèses, comprenant les TCS), des chiffres sur la superficie totale de surfaces cultivées en TCS n'ont pas pu être trouvés.

À l'heure de l'avènement du *smart farming* et des *big data*, il serait intéressant de mettre en place un système de récolte automatique de données sur les interventions culturales en Wallonie. Les tracteurs modernes disposant d'un ordinateur de bord, il pourrait être envisageable d'inciter les agriculteurs à s'impliquer dans la recherche participative en envoyant en quelques clics un descriptif de leur travail du sol, des produits phytosanitaires pulvérisés, du couvert semé, etc. à chaque fois qu'ils prennent le volant. Un cadre précis de respect de l'anonymat devrait bien entendu être défini pour ne pas rebuter les agriculteurs plus 'frileux'. Une récolte de données à cette échelle, couplée à des mesures en champs chez ceux qui l'acceptent, pourrait fournir des informations très précieuses aussi bien dans l'immédiat qu'au fil du temps.

Conclusion

En Europe et en Wallonie, l'agriculture s'est très fortement intensifiée au cours du XX^e siècle avec les progrès de la génétique, l'augmentation de la puissance des machines et le développement et l'usage toujours grandissant d'intrants de synthèse, entraînant une augmentation constante des rendements agricoles. Ce système intensif, désormais qualifié d'*agriculture conventionnelle*, est toujours pratiqué par la majorité des agriculteurs wallons. Il y a néanmoins un revers à la médaille productiviste : cette intensification et artificialisation de la production agricole a un effet de dégradation à grande échelle des sols agricoles. La biodiversité et la teneur en matière organique des sols se réduisent, diminuant la stabilité des agrégats, qui sont plus fortement sujets à l'érosion hydrique. De plus, la matière organique remplit de nombreux rôles, notamment ceux de source d'éléments nutritifs et d'énergie pour les organismes vivants ainsi que de contributeurs à la fertilité du sol. Le sol pouvant être considéré comme un écosystème mettant des décennies à se régénérer, il est crucial d'agir sur la source de sa dégradation : les pratiques de travail intensif du sol.

Dans ce contexte, ce mémoire a deux objectifs principaux : recenser les différentes pratiques des agriculteurs membres de l'asbl Regenacterre, qui promeut une agriculture régénérative des sols en Belgique au moyen des techniques culturales simplifiées (TCS), et les regrouper en catégories de pratiques ; et mesurer *in situ* l'impact de ces catégories de pratiques sur la structure et le fonctionnement biologique des sols. Pour ce faire, la réalisation de cette étude a été effectuée en trois phases : une phase d'enquête chez les agriculteurs afin de collecter des données sur les pratiques, une phase de mesures sur au moins une parcelle de chaque agriculteur, et une phase d'analyse des résultats et de mise en relation avec les pratiques.

La méthode d'enquête est de pratiquer des entretiens semi-directifs, où une discussion est développée entre l'enquêteur et l'enquêté autour de sujets prédéfinis, consignés dans un guide d'entretien. Les avantages de ce mode d'entretien, au-delà du contact humain, est que la conversation peut dévier sur un sujet inattendu, soulevant ainsi des questions que l'enquêteur peut approfondir dans ses recherches futures ; il est également possible de recueillir des récits de vie, des opinions, qui peuvent être riches en enseignements à mettre en relation avec les réponses précises ou chiffrées obtenues durant l'entretien. Les données récoltées ont porté sur les informations générales des exploitations (e.g. la superficie, la présence de bétail, le type de rotation, la pratique de cultures associées), les différentes opérations de travail du sol en général et pour la culture de froment d'hiver – considérée comme référence dans ce travail –, et l'usage des couverts végétaux en interculture (e.g. le nombre d'espèces, la proportion de légumineuses, l'enfouissement ou non après destruction). L'analyse de ces données au moyen d'une analyse des correspondances multiples suivie d'une classification

ascendante hiérarchisée nous a permis de distinguer quatre classes distinctes d'agriculteurs. Les classes 1 et 2 sont plutôt 'mixtes' avec des agriculteurs aux pratiques conventionnelles ou de TCS, et sont les classes les plus proches entre elles. Viennent ensuite la classe 3, composée uniquement d'agriculteurs conventionnels, et la classe 4, regroupant uniquement des agriculteurs pratiquant des TCS.

Les mesures portaient toutes sur des paramètres de structure ou d'activité biologique du sol, et ont permis de dégager plusieurs différences significatives entre les classes.

Un test à la bêche a permis de déterminer que la classe 2 présente un changement dans la structure des agrégats du profil de sol plus abrupt que les autres classes, conférant une moins bonne cohésion à la bêchée. Ce test a également été l'occasion de constater que la classe 3 a une meilleure densité de racines saines sur la profondeur étudiée (~20 centimètres) que les classes 2 et 4. Cette différence peut s'expliquer par le travail du sol plus intensif et plus profond de la classe 3 comparée aux deux autres, ameublissant le sol sur la profondeur de travail de la charrue. La densité de racines sous la semelle de labour n'a cependant pas pu être mesurée à l'aide d'une bêche.

Dans la même logique de travail du sol, la classe 3 est celle qui a la compaction la plus profonde dans le profil (mesure effectuée au moyen d'un pénétromètre) et la classe 4 est celle qui présente une couche compactée la plus proche de la surface. Signalons toutefois que la comparaison des moyennes au moyen d'un test de Tukey n'a pas confirmé la significativité de ces différences.

Des prélèvements de sols des différentes parcelles ont été soumis à un slake test, qui a permis d'établir des différences significatives en termes de résistance des agrégats à des contraintes physiques dues à l'impact des gouttes et au gonflement des argiles. Les classes 1 et 4 ont un meilleur score que la classe 3. Ces différences trouvent leur source dans la pratique généralisée du labour chez la classe 3, travail qui enfouit et dilue la matière organique dans le sol, l'empêchant ainsi de stabiliser biologiquement les agrégats de la couche superficielle du sol.

Enfin, l'analyse de la décomposition de sachets de thé vert et rooibos enfouis dans le sol durant 60 à 70 jours nous a fourni des informations sur la différence de capacité de stockage de carbone des parcelles étudiées, avec la classe 2 qui a montré un coefficient de stabilisation de la matière organique plus élevé que les classes 1 et 4. L'étude ne permet cependant pas d'établir de lien entre les pratiques agricoles et la capacité de stockage de carbone.

En conclusion, ce mémoire nous a permis d'aborder la variété de pratiques existant chez les agriculteurs adhérant à Regenacterre. Les différences entre les effets de leurs pratiques ont été mesurées et ont donné des résultats plus ou moins significatifs selon les mesures, qu'il a souvent été possible d'expliquer par l'opposition des systèmes TCS et conventionnel.

Cinquième partie : Annexes

Guide d'entretien

- Me présenter
 - Paul Vanhove
 - AGRO UCL
 - Mémoire sur les pratiques agricoles en collaboration avec l'asbl Regenacterre
 - Anonymat garanti
 - Questions ouvertes. Si une question vous gêne ou vous semble non pertinente, n'hésitez pas à me le communiquer
 - Conversation enregistrée si pas de réticence
- Objectifs de l'entretien
 - État des lieux de ce qui se fait dans le BW en termes de durabilité des fermes via l'utilisation d'un outil de Regenacterre
 - Mais pas là pour porter un jugement ni pousser au changement
 - Certains points seront accompagnés de mesures en champ si vous le voulez bien, afin de disposer de données chiffrées

	Information désirée	Questions à poser
Questions introductives	Idée globale de son exploitation Lancer la discussion	- Disposez-vous d'un orthophotoplan de vos parcelles autour duquel nous pouvons discuter ? - Depuis combien de temps êtes-vous agriculteur ? - Avez-vous repris l'exploitation familiale ? Ou acheté, ou construit votre ferme ? De combien d'hectares disposiez-vous alors ?

		Et combien en cultivez-vous à présent ? - Quelles sont vos productions principales ? - Avez-vous des employés ?
Rotation culturale	Type de rotation	- Quelle est votre rotation classique ?
Cultures associées	S'il fait des cultures associées	- Que pensez-vous des cultures associées ? - En faites-vous ?
Travail du sol	Travail du sol autour de la culture de froment	- Pouvez-vous me donner la liste de toutes les interventions de travail du sol que vous pratiquez avant ou pendant une culture de froment d'hiver ?
Couverts végétaux	Pratiques générales	- Que pensez-vous des obligations en termes de couvertures dans le PGDA ? - Implantez-vous un CIPAN simple (p.ex : moutarde) ou un mélange ? - Que faites-vous de vos couvertures ? Uniquement CIPAN, engrais vert, fauche ? - Comment détruisez-vous votre couvert ?
Indice de diversité des productions	Proportion de chaque culture	- Pouvez-vous me donner la répartition de vos cultures en termes d'hectares ?
Diversité insectes	Diversité « qualitative » des insectes en champ	- Rencontrez-vous des problèmes avec les insectes, par exemple les pucerons ? - Passez-vous systématiquement de l'insecticide en champ ? - Certains insectes ont-ils un intérêt pour vos cultures ?

Paysage (à aborder dans la discussion sur les engrais verts)	Actif, soucieux ou indifférent	- Êtes-vous éligible pour certaines MAEC ? Lesquelles ? - Diriez-vous que votre exploitation a un impact sur le paysage rural ?
Bandes enherbées	Oui ou non	- Bandes enherbées ?
Vente directe	Oui ou non	- Vente directe ?
Rendement	Rendement en froment	- Quel est votre rendement habituel en froment d'hiver ?
Indépendance	Libre ou non	- Prenez-vous des conseils pour conduire votre exploitation ? En avez-vous fortement besoin ? - Auprès de qui ? - Pour quels aspects de votre production ? Les phytos, les engrais, les semences, ... ? - Appliquez-vous ces conseils à la lettre ou les arrangez-vous à votre sauce ?
Gasoil	Litres GO	- Savez-vous combien de litres de GO/ha vous utilisez par an ?
Glyphosate	Oui, non, raisonné	- En utilisez-vous systématiquement pour le désherbage ou la destruction de couverts ? - Avez-vous déjà testé des dosages en deçà de ceux proposés par les vendeurs de phytos ? En étiez-vous satisfait ?
Indice fréquence traitement (IFT)	- Dose appliquée de chaque produit - Surface traitée pour chaque produit	- Expliquer ce qu'est l'IFT, montrer le calcul, demander s'il est d'accord de me communiquer toutes les informations à propos de ses traitements

	- Surface de chaque parcelle où a été appliqué le produit	
Indice fréquence machine (IFM)	Poids des machines et outils Largeur des machines et outils	- Présenter le mode de calcul de l'IFM, son utilité et les infos nécessaires - Combien de fois êtes-vous passé avec quelle machine/outil sur votre champ ?
Volume bouillie	Volume bouillie par hectare	- Quand appliquez-vous les pesticides ? Dans quelles conditions météo ? - Volume bouillie/ha ?
Taux MO	Taux MO ?	- Connaissez-vous le taux en MO de vos parcelles ? - Y a-t-il apport d'intrants ? D'effluents d'élevage ?
Battance	Battance oui/non	- Faites-vous face au phénomène de battance sur vos sols ?
Compaction	Oui/non +Élaboration d'une échelle après plusieurs séries de mesures	- Y a-t-il une compaction de vos sols, passé une certaine profondeur ? Avez-vous une semelle de labour sur vos parcelles ?
pH	Valeur pH ?	- Connaissez-vous le pH de vos parcelles ?
Labour	Oui, non, occasionnel	- Quel type de travail du sol pratiquez-vous en général ? Pouvez-vous m'en donner la succession chronologique ?
Drainage	Ressuyé, collant ou plaquant	- Vos champs drainent-ils bien après une grosse pluie ?
Indice couverture du sol	Couverture du sol	- Votre parcelle est-elle couverte de végétation toute l'année ?

Grille d'évaluation du test à la bêche

Grille d'évaluation des agrégats au champ (TEST A LA BÈCHE selon Görbing)

Date : _____

Parcelle : _____

Commune : _____

notations des 8 critères

1 aération surface

2 couche sous-jacente

3

Schéma DIEZ 1991	1	2	3	4	5
Surface du sol caractéristique notes de 1 (bon) à 5 (mauvais)	favorable				
selon les circonstances, des macro-porosités grossières (2) à fines (1) et des agrégats individuels sont reconnaissables. turricules de vers de terre : abondants (1) limités (2)					

Forme des agrégats de sol : une note pour la couche arable et une note pour le sous-sol

1	2	3	4	5
Agrégats ungranuleux				
meuble compact				
Agrégat à structure assemblée ("Agréat de cohésion") relais de façon dure, maintenu serré (presque) aucune macropore				
Agréat à fragment dur				
Motte, bloc dur > 10 cm (Klumpen)				
Agréat en feuillets				
Agréat à arête vive / Eclat / Prisme / Aggrégat à Polyèdre / Eclat bords vifs, surface lisse, agrégat plus ou moins dense très fin < 0,2 (2); fin 0,2 - 0,5 cm (2½); moyen 0,5 - 2,0 (3); grossier 2 - 5 cm (3½)				

Autres caractéristiques :

Galleries, Fentes	très nombreux (1) ou nombreux (2) trous (vers ou racines) Fentes, fissures	peu de trous (3), très peu (4) ou pas (5) de trous/fissures			
Racines (enracinement)	haute densité de racines régulière aucun (1) ou presque pas (2) d'obstacles face aux racines	le feutre racinaire est irrégulier (3-4) à la surface des fissures ; feutre très irrégulier (5) racines réticées (3) racines très courbées (4), zones vides de racines (5)			
Résidus de récolte (pailles)	se décompose en aérobie (1) ou largement décomposé (2) (Attention : tenir compte de la saison où on observe !)	résidus relativement frais, "cimentés", distribués irrégulièrement (4), ou très mal répartis (5) odeur de renfermé (3), de mois (4), de putride (5) ("Matelas" de résidus = 5)			
Couleur, Odeur (aération)	couleur régulière (brune), pas de taches (1) ou un peu de tache de rouille ou noire (2), odeur de terre	Tache de rouille dispersée (3) marquée (4) ou de gris (4) gley bleuté (5) (zone de réduction), Concrétion, Odeur nauséabonde, puante			
Note	1	2	3	4	5

Note Globale
(1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8) / 8

Cumul des points

Sources : R. Schulze, Institut du Land pour les cultures Baden-Württemberg ; Révisé par C. Barbot, CA Alsace, v4 Spud-test SPATENPROBE ou "Test à la bêche"

Forme des Racines

sources : A. Delauze CA Ten

1 Racines lisses en forme de fils -> zones avec des marques d'oxydation
2,3 Racines (racines) réticées -> nodules compactes dans le profil, racines, attaques par des parasites
4,5 Racines courbées -> colonisation autour d'une pierre ou d'une motte compactée
6 Racines avec des formes d'arêtes de poisson -> forme des racines dans les fissures des sols compactés
7 Racines fortement chevelues -> se forment dans les grosses cailloux
8 Epaves de racines -> Les racines de décomposition produisent des matières organiques, attaque par des maladies parasites
source : Schéma Gerhard Haugner, IEL, d'après A. Chauvin, SIVA Suisse.

Bibliographie

- Addinsoft 2017a. Analyse des Correspondances Multiples ACM dans Excel - XLSTAT. Available at: https://help.xlstat.com/customer/fr/portal/articles/2062224-analyse-des-correspondances-multiples-acm-dans-excel?b_id=9283 [Accessed: 16 August 2018].
- Addinsoft 2017b. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) | Logiciel statistique pour Excel. Available at: <https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/classification-ascendante-hierarchique-cah> [Accessed: 16 August 2018].
- Andrén, O. and Balandreau, J. 1999. Biodiversity and soil functioning: from black box to can of worms? *Applied Soil Ecology*, p. 4.
- Anken, T. et al. 2004. Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. *Soil and Tillage Research* 78(2), pp. 171–183. doi: 10.1016/j.still.2004.02.005.
- Bairoch, P. 1989. Les Trois Révolutions Agricoles du Monde Développé : Rendements et Productivité de 1800 a 1985. *Annales. Economies, sociétés, civilisations* 44(02), pp. 317–353. doi: 10.3406/ahess.1989.283596.
- Ball, B.C. et al. 1994. Crop performance and soil conditions on imperfectly drained loams after 20–25 years of conventional tillage or direct drilling. *Soil and Tillage Research* 31(2–3), pp. 97–118. doi: 10.1016/0167-1987(94)90074-4.
- Bertin, P. 2017. LBRAI 2106, Phytotechnie.
- Brévault, T. et al. 2007. Impact of a no-till with mulch soil management strategy on soil macrofauna communities in a cotton cropping system. *Soil and Tillage Research* 97(2), pp. 140–149. doi: 10.1016/j.still.2007.09.006.
- Briat, J.-F. and Job, D. 2017. *Les sols et la vie souterraine*. Quae.
- van Bruggen, A.H.C. and Semenov, A.M. 2000. In search of biological indicators for soil health and disease suppression. *Applied Soil Ecology* 15(1), pp. 13–24. doi: 10.1016/S0929-1393(00)00068-8.
- Chambres d'agriculture de Bretagne and ARVALIS - Institut du végétal 2008. *Techniques Culturelles Sans Labour en Bretagne.*, p. 44.
- Chung, S.-O. and Horton, R. 1987. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resources Research* 23(12), pp. 2175–2186. doi: 10.1029/WR023i012p02175.
- Commission Européenne 2018a. Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, Comité économique et social européen et au Comité des régions - Stratégie thématique en faveur de la protection des sols [SEC(2006)620] [SEC(2006)1165]. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52006DC0231> [Accessed: 8 August 2018].

- Commission Européenne 2018b. The common agricultural policy at a glance. Available at: https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/key-policies/common-agricultural-policy/cap-glance_fr [Accessed: 16 August 2018].
- CSA 2008. L'agriculture belge en évolution. Politiques agro-alimentaires et intégration régionale: pour une pratique de solidarité entre l'Europe et l'Afrique, EuropeAid/124803/C/ACT/RUE.
- Dabney, S.M. et al. 2001. Using winter cover crops to improve soil and water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32(7–8), pp. 1221–1250. doi: 10.1081/CSS-100104110.
- Delcour, A. et al. 2014. État des lieux des flux céréaliers en Wallonie selon différentes filières d'utilisation. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, p. 12.
- Destain, J.-P. et al. 2010. Les cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN) et engrais verts: protection de l'environnement et intérêt agronomique. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, p. 6.
- Dictionnaire de l'Académie Française. 2018. Available at: <https://academie.atilf.fr/> [Accessed: 8 August 2018].
- Dominique King et al. 2008. *Gestion durable des sols*. Editions Quae.
- Doran, J.W. 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88(2), pp. 119–127. doi: 10.1016/S0167-8809(01)00246-8.
- Döring, T.F. et al. 2005. Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes. *Field Crops Research* 94(2–3), pp. 238–249. doi: 10.1016/j.fcr.2005.01.006.
- FAO 2016. Produire plus avec moins: 3. La santé des sols. Available at: <http://www.fao.org/ag/save-and-grow/fr/3/index.html> [Accessed: 25 July 2018].
- FAOSTAT. 2018. Available at: <http://www.fao.org/faostat/fr/#data> [Accessed: 8 August 2018].
- Franzluebbers, A.J. and Arshad, M.A. 1996. Water-stable aggregation and organic matter in four soils under conventional and zero tillage. *Canadian Journal of Soil Science* 76(3), pp. 387–393. doi: 10.4141/cjss96-046.
- Frédéric Thomas and Matthieu Archambeaud 2016. *Les couverts végétaux : gestion pratique de l'interculture*. 2nd ed. Paris: Editions France Agricole.
- FRIEDEL, J.K. et al. 1996. Soil microbial properties and the assessment of available soil organic matter in a haplic luvisol after several years of different cultivation and crop rotation., p. 10.
- Goidts, E. and van Wesemael, B. 2007. Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in Southern Belgium (1955–2005). *Geoderma* 141(3–4), pp. 341–354. doi: 10.1016/j.geoderma.2007.06.013.
- Greenland, D.J. et al. 1975. Determination of the structural stability class of English and Welsh soils, using a water coherence test. *Journal of Soil Science* 26(3), pp. 294–303. doi: 10.1111/j.1365-2389.1975.tb01953.x.

- Griffiths, B.S. et al. 2000. Ecosystem response of pasture soil communities to fumigation-induced microbial diversity reductions: an examination of the biodiversity-ecosystem function relationship. *Oikos* 90(2), pp. 279–294. doi: 10.1034/j.1600-0706.2000.900208.x.
- Haney, R.L. et al. 2008. Soil CO₂ respiration: Comparison of chemical titration, CO₂ IRGA analysis and the Solvita gel system. *Renewable Agriculture and Food Systems* 23(02). Available at: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S174217050800224X [Accessed: 9 April 2018].
- Haney, R.L. et al. 2018. The soil health tool—Theory and initial broad-scale application. *Applied Soil Ecology* 125, pp. 162–168. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.07.035.
- Herrick, J.. et al. 2001. Field soil aggregate stability kit for soil quality and rangeland health evaluations. *CATENA* 44(1), pp. 27–35. doi: 10.1016/S0341-8162(00)00173-9.
- Husson, F. 2015. Classification ascendante hiérarchique (CAH). Laboratoire de mathématiques appliquées - Agrocampus Rennes.
- Jean-Claude Kaufmann 2016. *L'entretien compréhensif*. Armand Colin.
- Jean-Michel Gobat et al. 2010. *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols*. 3e ed. PPUR Presses polytechniques.
- Joseph Lamarange 2016. Analyse des correspondances multiples (ACM). Available at: <http://lamarange.github.io/analyse-R/analyse-des-correspondances-multiples.html> [Accessed: 16 August 2018].
- Joseph Pousset 2012. *Traité d'agroécologie. Pour une agriculture naturelle*. France Agricole.
- Juarez, S. et al. 2013. Soil carbon mineralisation responses to alterations of microbial diversity and soil structure. *Biology and Fertility of Soils* 49(7), pp. 939–948. doi: 10.1007/s00374-013-0784-8.
- Karlen, D.L. et al. 2001. Soil quality: Current concepts and applications. In: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 1–40. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065211301740291> [Accessed: 29 July 2018].
- Kay, B.. and VandenBygaart, A.. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research* 66(2), pp. 107–118. doi: 10.1016/S0167-1987(02)00019-3.
- Keuskamp, J.A. et al. 2013. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. Muller-Landau, H. ed. *Methods in Ecology and Evolution* 4(11), pp. 1070–1075. doi: 10.1111/2041-210X.12097.
- Kinyangi, J. 2007. Soil health and soil quality: a review. Draft publication., p. 16.
- Kirkby, M. J. et al. 2003. Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map Version 1., p. 30.
- Krüger, I. et al. 2017. Integrating biological indicators in a Soil Monitoring Network (SMN) to improve soil quality diagnosis – a study case in Southern Belgium (Wallonia). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* , p. 12.

- L. García-Torres et al. 2010. *Conservation agriculture: environment, farmers experiences, innovations, socio-economy, policy*. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Labreuche, J. et al. 2007. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans Labour (TCSL) en France. doi: 10.13140/rg.2.2.34727.65444.
- Labreuche, J. et al. 2014. *Faut-il travailler le sol ? : Acquis et innovations pour une agriculture durable*. Éditions Quae. Available at: <https://books.google.be/books?id=9Fi9BgAAQBAJ>.
- Lavelle, P. 2002. Functional domains in soils. *Ecological Research* 17(4), pp. 441–450. doi: 10.1046/j.1440-1703.2002.00509.x.
- Lavelle, P. et al. 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology* 42, pp. S3–S15. doi: 10.1016/j.ejsobi.2006.10.002.
- Le centre provincial de l'agriculture et de la ruralité (CPAR) 2016. Chiffres clés de l'agriculture du Brabant Wallon., p. 2.
- M.-F. Destain 2013. *La compaction des sols agricoles en Wallonie*. ULg - Gembloux Agro-Bio Tech., p. 54.
- Morris, N.L. et al. 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review. *Soil and Tillage Research* 108(1–2), pp. 1–15. doi: 10.1016/j.still.2010.03.004.
- Mueller, L. et al. 2009. Visual assessment of soil structure: Evaluation of methodologies on sites in Canada, China and Germany. Part I: Comparing visual methods and linking them with soil physical data and grain yield of cereals. *Soil and Tillage Research* (103), pp. 178–187.
- Nicola Gallai et al. 2009. Evaluation de la contribution économique du service de la pollinisation à l'agriculture européenne. *Bulletin Technique Apicole* 36(3), pp. 110–116.
- Pédro, G. and Académie des Sciences eds. 2007. *Les microorganismes, clé des recyclages biogéochimiques*. In: *Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux. Chapitre 7*, 265–296. Les Ulis: EDP Sciences.
- PROTECT'eau asbl 2018a. Protecteau: CIPAN et SIE. Available at: <https://protecteau.be/fr/nitrate/agriculteurs/couvert/cipan-sie> [Accessed: 18 August 2018].
- PROTECT'eau asbl 2018b. Protecteau: Couverts végétaux. Available at: <https://protecteau.be/fr/nitrate/agriculteurs/couvert> [Accessed: 14 August 2018].
- PROTECT'eau asbl 2018c. Protecteau: Zone vulnérable. Available at: <https://protecteau.be/fr/agriculteurs/legislations/zone-vulnerable> [Accessed: 18 August 2018].
- Rasmussen, K.J. 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil and Tillage Research* 53(1), pp. 3–14. doi: 10.1016/S0167-1987(99)00072-0.

- Rhoton, F.E. et al. 2002. Runoff and soil loss from midwestern and southeastern US silt loam soils as affected by tillage practice and soil organic matter content. *Soil and Tillage Research* 66(1), pp. 1–11. doi: 10.1016/S0167-1987(02)00005-3.
- Richard, G. et al. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science* 52(1), pp. 49–58. doi: 10.1046/j.1365-2389.2001.00357.x.
- Richard J. MacEwan and Martin R. Carter 1996. *Soil quality is in the hands of the land manager: advances in soil quality for land management : science, practice and policy : proceedings of an international symposium, 17-19 April 1996 University of Ballarat, Victoria*. Ballarat, Vic.: Centre for Environmental Management, University of Ballarat.
- Rosillon, D. et al. 2018. Sécheresse 2018 : Situation météorologique et impact sur les cultures., p. 5.
- Sarkar, S. and Singh, S. 2007. Interactive effect of tillage depth and mulch on soil temperature, productivity and water use pattern of rainfed barley (*Hordium vulgare* L.). *Soil and Tillage Research* 92(1–2), pp. 79–86. doi: 10.1016/j.still.2006.01.014.
- Sébillotte, M. 1974. Agronomie et agriculture: essai d'analyse des tâches de l'agronome., p. 23.
- Shailendra Singh, G.G. 2015. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): Current and Future Prospects for Development of Sustainable Agriculture. *Journal of Microbial & Biochemical Technology* 07(02). Available at: <https://www.omicsonline.org/open-access/plant-growth-promoting-rhizobacteria-pgpr-current-and-future-prospects-for-development-of-sustainable-agriculture-1948-5948-1000188.php?aid=51029> [Accessed: 8 August 2018].
- Solvita® 2016. Solvita® Soil Master Kit Manual.
- de Soyza, A.G. et al. 1997. Sensitivity Testing of Indicators of Ecosystem Health. 3, p. 10.
- SPW Agriculture 2018a. Érosion hydrique des sols. Available at: <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/SOLS%203.html> [Accessed: 15 August 2018].
- SPW Agriculture 2018b. *L'agriculture wallonne en chiffres - 2018*. Available at: <https://agriculture.wallonie.be/documents/20182/21858/FR-2015.pdf/591e9fba-odf8-43a3-ac3a-042aeb83714c>.
- SPW Agriculture 2018c. Matière organique dans les sols agricoles. Available at: <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/SOLS%202.html> [Accessed: 15 August 2018].
- SPW Géomatique 2018. WalOnMap. Available at: <http://geoportail.wallonie.be/walonmap/#BBOX=66012.62319024638,255322.37680975362,49268.85217170434,134597.14782829565> [Accessed: 17 August 2018].
- Susan Andrews et al. 2011a. Soil Quality: Indicators: Slaking. Available at: <http://soilquality.org/indicators/slaking.html> [Accessed: 7 August 2018].

- Susan Andrews et al. 2011b. Soil Quality: Indicators: Soil Structure and Macropores. Available at: http://soilquality.org/indicators/soil_structure.html [Accessed: 15 August 2018].
- Uroz, S. et al. 2015. The Mineralosphere Concept: Mineralogical Control of the Distribution and Function of Mineral-associated Bacterial Communities. *Trends in Microbiology* 23(12), pp. 751–762. doi: 10.1016/j.tim.2015.10.004.
- Vacheron, J. et al. 2013. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Frontiers in Plant Science* 4. Available at: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2013.00356/abstract> [Accessed: 8 August 2018].
- West, T.O. and Post, W.M. 2002. Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation: A Global Data Analysis. *SOIL SCI. SOC. AM. J.* 66, p. 17.
- Wikimedia Commons 2016. Diagramme triangulaire de la texture des sols. Available at: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triangle-texture-sols.png> [Accessed: 17 July 2018].
- Xavier Draye and Bernadette Govaerts 2017. LBIRA 2101 : Biométrie: analyse de la variance.

Classification des agriculteurs membres de l'asbl Regenacterre selon leurs pratiques agricoles et comparaison des caractéristiques structurales et biologiques des sols de ces différentes classes

Résumé L'agriculture intensive (qualifiée de 'conventionnelle'), basée le travail profond du sol et l'usage d'intrants de synthèses, est pratiqué par la majorité des agriculteurs wallons. Les rendements sont plus élevés que jamais mais cette intensification et artificialisation de la production de nourriture a un effet de dégradation à grande échelle des sols agricoles. La biodiversité et la teneur en matière organique des sols se réduisent, diminuant la fertilité des sols et leur résistance à l'érosion hydrique. Le sol pouvant être considéré comme un écosystème mettant des décennies à se régénérer, il est crucial d'agir sur la source de sa dégradation.

Dans ce contexte, ce mémoire a deux objectifs principaux : recenser les différentes pratiques des agriculteurs membres de l'asbl Regenacterre, qui promeut une agriculture régénérative des sols en Belgique au moyen des techniques culturales simplifiées (TCS), et les regrouper en catégories de pratiques ; et mesurer in situ l'impact de ces catégories de pratiques sur la structure et le fonctionnement biologique des sols par des techniques simples de diagnostic. Pour ce faire, la réalisation de cette étude a été effectuée en trois phases : une phase d'enquête chez les agriculteurs afin de collecter des données sur les pratiques, une phase de mesures sur au moins une parcelle de chaque agriculteur, et une phase d'analyse des résultats et de mise en relation avec les pratiques.

L'analyse des correspondances multiples suivie d'une classification ascendante hiérarchique a permis de répartir les agriculteurs en quatre classes selon leurs pratiques. Les classes 1 et 2 sont plutôt 'mixtes' mais les classes 3 et 4 sont respectivement constituées uniquement d'agriculteurs conventionnels et d'agriculteurs en système de TCS.

Les différences principales entre les mesures effectuées pour les différentes classes d'agriculteurs confirment l'impact du travail (ou non-travail) du sol sur sa structure et son fonctionnement biologique. Les agrégats les moins résistants aux contraintes physiques ont été retrouvés chez les agriculteurs de la classe 3, résultat de l'enfouissement de la matière organique lors des travaux profonds. Des différences de structure et de compaction influençant la croissance verticale des racines ont également été mises en évidence entre des classes pratiquant des travaux du sol différents.

Si la plupart des résultats sont en accord avec la littérature à propos des effets des pratiques agricoles sur les caractéristiques des sols, il paraît important de continuer la recherche sur la pratique des TCS en Wallonie. Des données concernant les surfaces exploitées en TCS n'ont en effet pas pu être trouvées, alors qu'il s'agit d'un mode d'agriculture qui semble capable de répondre aux défis et contraintes d'aujourd'hui et de demain, aussi bien en termes de productivité que de restauration durable de la qualité des sols cultivés.