

Faculté des bioingénieurs

Impact des pratiques culturelles sur les services écosystémiques à travers une étude participative dans la région sablo-limoneuse du Brabant wallon

Auteurs : Grégoire Dehaye

Joachim Dumont de Chassart

Promoteur(s) : Prof. Pierre Bertin (UCLouvain/ELI/ELIA)

Lola Leveau (doctorante UCLouvain/ELI/ELIA)

Lecteur(s) : Prof. Charles Bielders (UCLouvain/ELI/ELIE)

Hugues Falys (UCLouvain)

Année académique 2021-2022

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

Bioingénieur : sciences agronomiques

Remerciements

Remerciements généraux :

Ce travail collaboratif n'aurait pas pu être mené à bout sans l'aide et les conseils précieux de nombreuses personnes.

Tout d'abord un grand merci à nos promoteurs Pierre Bertin et Lola Leveau pour le suivi de notre mémoire, les réponses à nos nombreuses questions ainsi que les remarques constructives qui ont permis de mener à bien notre travail. Nous voulions remercier particulièrement Lola pour sa grande disponibilité, ses conseils si précieux et tout le temps qu'elle nous a accordé sans lesquels la réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible.

Ensuite, nous tenons à remercier tous les autres membres du laboratoire PEPA qui ont participé de près ou de loin au mémoire pour leur bon accueil ainsi que leur sympathie lors des quelques échanges que nous avons pu avoir, et particulièrement :

Thomas Dagbert pour ses conseils techniques, le prêt de matériel ainsi que pour l'aide qu'il a apporté pour les expériences,

Xavier Draye pour sa bonne humeur et sa disponibilité pour répondre à nos questions,

Nicolas Biot pour les nombreuses fois où notre matériel encombrait son bureau,

et enfin Pierre Van Thorre pour son aide précieuse pour le recensement des adventices et pour son expertise en cidre, vanneries...

Nous remercions également Alain Guillet du SMCS pour les conseils qui ont contribué à l'analyse statistique de nos résultats.

Enfin, nous voulons remercier tous les agriculteurs du réseau de nous avoir fourni les parcelles afin de réaliser nos expériences ainsi que pour les échanges très fructueux que nous avons pu avoir avec certains.

Remerciements particuliers de Joachim :

Merci d'abord à Grégoire pour la fine équipe que nous formons, aussi bien dans les études qu'au Semeur et aux soirées ! Ta complémentarité (rigoureux vs idées farfelues) m'a finalement permis d'arriver là où je suis aujourd'hui.

Merci à toute ma famille qui m'a soutenu durant ces cinq ans d'études et particulièrement pendant la réalisation de ce mémoire. Merci aussi de m'avoir encouragé à entreprendre et poursuivre ces études.

Merci tout particulièrement à Hélène pour son soutien quotidien depuis cinq ans.

Remerciements particuliers de Grégoire :

Mes premiers remerciements sont pour Joachim, merci pour toutes ces années d'études passées ensemble, merci pour les nombreux cours, travaux mais aussi soirées qu'on a pu partager et puis merci pour tout le travail que nous avons mené en binôme cette année afin d'arriver au bout de notre mémoire.

Encore un tout grand merci à toi Lola pour les heures que tu as passées pour nous, ta motivation et ta bienveillance.

Je tiens également à remercier toute ma famille - mes parents, mon frère et mes sœurs - pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté pendant le mémoire mais aussi durant les cinq années d'études. Toutes les années n'ont pas été faciles, surtout avec l'arrivée du Cov..., mais grâce à votre soutien j'ai pu arriver jusqu'à l'aboutissement. Merci aussi à toi Victoria de m'accompagner quotidiennement.

Résumé

En plus de devoir faire face aux changements climatiques, l'agriculture moderne doit répondre à de nombreux enjeux : diminuer les intrants de synthèse, nourrir une population en augmentation, faire face aux sécheresses et aux périodes humides... Pour y répondre, les agriculteurs sont amenés bien souvent à changer leurs pratiques. Afin d'orienter leur décisions, de nombreuses études évaluent l'impact des pratiques agricoles sur l'agroécosystème. Dans ce mémoire, il a été décidé d'évaluer l'impact des pratiques culturales sur la fourniture de services écosystémiques par les champs. Ces services sont considérés comme des alternatives permettant de diminuer les intrants issus de ressources non renouvelables ; notamment grâce à l'amélioration de la structure, de l'activité biologique et de la fertilité des sols.

Ce mémoire représente la deuxième année de récolte de données d'une étude participative plus globale dont la recherche expérimentale s'étale sur trois années. Chaque année, des agriculteurs mettent à disposition 20 parcelles cultivées en froment ou en épeautre pour l'étude. Pour chacune des parcelles, une récolte de l'historique des pratiques culturales est effectuée en prenant l'historique des dix années précédentes afin de créer un set d'indicateurs. Ensuite, les fournitures de services écosystémiques des 20 champs sont mesurées sur le terrain afin de créer un deuxième set d'indicateurs. Sur les résultats, des analyses statistiques descriptives ont été réalisées afin d'identifier les corrélations entre les deux types d'indicateurs. Les principales corrélations positives (+) et négatives (-) observées sont les suivantes : l'activité des vers de terre et la stabilité des agrégats sont corrélées (+) avec la présence de matières organiques sur le sol et (-) avec l'intensité et la fréquence des travaux de sol. La sensibilité du sol à la battance par la pluie est corrélée (+) avec l'intensité et la fréquence des travaux de sol. La présence d'adventices est corrélée (-) avec la fréquence du labour. Après cela, la question de la durée d'historique idéale à récolter pour l'identification des corrélations entre pratiques culturales et services écosystémiques a été abordée. Des nouveaux sets d'indicateurs ont été créés pour des durées d'historiques de 2 et 5 ans. Cela a permis de montrer des similitudes entre les classifications réalisées sur cinq et dix ans qui mènent à croire que la récolte de donnée pourrait être réalisée sur cinq ans et non dix. Elles ont également permis d'émettre l'hypothèse que la durée d'historique à récolter va dépendre de la dynamique des services écosystémiques observés.

Table des matières

Introduction	1
1. État de l'art.....	2
1.1. Défis et perspectives de l'agriculture moderne.....	2
1.1.1. Agriculture du XXe siècle	2
1.1.2. Limites et conséquences de l'agriculture du XXe siècle.....	3
1.1.3. Perspectives de l'agriculture.....	4
1.2. Services écosystémiques	5
1.2.1. Définition et description.....	5
1.2.2. Services écosystémiques au service des agriculteurs	7
1.3. Services écosystémiques intrants étudiés.....	9
1.3.1. Dynamique de la matière organique.....	10
1.3.1.1. Activité des vers de terre	10
1.3.1.2. Teneur en matière organique.....	11
1.3.2. Structure du sol	12
1.3.2.1. Stabilité structurale du sol	13
1.3.2.2. Sensibilité à la battance	14
1.3.2.3. Compaction du sol	15
1.3.3. Contrôle des adventices comme ennemis de la culture	17
1.4. Pratiques culturales.....	19
1.4.1. Impact des pratiques culturales sur les services écosystémiques.....	19
1.4.2. Indicateurs de pratiques culturales.....	21
1.4.3. Durée optimale de récolte de l'historique cultural.....	22
1.5. Objectif du mémoire.....	24
2. Matériels et méthodes	26
2.1. Travaux antérieurs au mémoire	26
2.1.1. Création d'un réseau d'agriculteurs.....	26
2.1.2. Sélection des indicateurs de services écosystémiques et protocoles liés	26
2.1.3. Mémoires antérieurs.....	27
2.2. Organisation générale	28
2.2.1. Choix des parcelles	28
2.2.2. Organisation temporelle des expérimentations.....	29
2.2.3. Contact avec les agriculteurs	29
2.2.4. Organisation du travail de terrain.....	30

2.3.	Collecte de l'itinéraire culturel et indicateurs utilisés.....	30
2.4.	Création des plans d'expérience	31
2.5.	Description des protocoles et des indicateurs de service écosystémique associés	34
2.5.1.	Services écosystémiques liés au sol	34
2.5.1.1.	Incorporation de la matière organique.....	34
2.5.1.2.	Teneur en carbone organique	36
2.5.1.3.	Stabilité des agrégats	38
2.5.1.4.	Évolution de la croûte de battance.....	39
2.5.1.5.	Compaction du sol	45
2.5.2.	Service écosystémique lié aux ennemis de la culture	46
2.5.2.1.	Pression des adventices	46
2.6.	Analyses statistiques	48
3.	Résultats.....	50
3.1.	Introduction	50
3.2.	Résultats des analyses des indicateurs de pratiques culturelles.....	50
3.3.	Résultats des analyses des indicateurs de service écosystémique.....	50
3.3.2.1.	Incorporation de la matière organique (T_...).....	53
3.3.2.2.	Teneur en carbone stable et labile (C_...).....	54
3.3.2.3.	Stabilité des agrégats (U)	54
3.3.2.4.	Évolution de la croûte de battance (B_...)	55
3.3.2.5.	Compaction du sol (V).....	58
3.3.2.6.	Pression en adventices (A_...)	58
3.4.	Analyses multivariées	58
3.4.1.	Matrices de corrélation	58
3.4.1.1.	Matrice de corrélation des indicateurs de service écosystémique.....	58
3.4.1.2.	Matrice de corrélation des services écosystémiques et des pratiques culturelles.....	60
3.4.1.3.	Variable supplémentaire.....	64
3.4.2.	Clustering hiérarchique	65
3.4.2.1.	Clustering hiérarchique sur base des services écosystémiques.....	65
3.4.2.2.	Clustering hiérarchique sur base des pratiques culturelles.....	67
3.5.	Durée de récolte de l'historique culturel.....	69
3.5.1.	Récolte de l'historique sur cinq ans	69
4.	Discussion.....	74
4.1.	Introduction	74
4.2.	Indicateurs de pratiques culturelles.....	74

4.3.	Indicateurs de services écosystémiques.....	75
4.3.1.	Incorporation de la matière organique	75
4.3.2.	Teneur en carbone organique.....	78
4.3.3.	Stabilité des agrégats.....	78
4.3.4.	Évolution de la croûte de battance	79
4.3.4.1.	Données pluviométriques	79
4.3.4.2.	Discussion des protocoles	80
4.3.4.3.	Discussion des résultats	82
4.3.5.	Compaction du sol.....	83
4.3.6.	Pression en adventices	84
4.3.7.	Discussion sur les méthodes de mesure.....	84
4.4.	Analyses multivariées	85
4.4.1.	Liens entre les services écosystémiques	85
4.4.1.1.	Dendrogramme des services écosystémiques	85
4.4.1.2.	Matrice de corrélation des services écosystémiques.....	87
4.4.2.	Lien entre services écosystémiques et pratiques culturelles.....	89
4.4.2.1.	Matrice de corrélation des services écosystémiques et des pratiques culturelles	89
4.4.2.2.	Comparaison des corrélations entre services et pratiques avec les données de l'an passé	91
4.4.3.	Impact des nouvelles variables	92
4.4.3.1.	Date de semis	92
4.4.3.2.	Durée entre le semis et la première pluie	92
4.4.4.	Durée d'historique cultural.....	93
4.4.4.1.	Dendrogramme pour dix ans d'historique récoltés.....	93
4.4.4.2.	Comparaison des durées de récolte de l'historique cultural	95
	Conclusion	98
	Bibliographie	100

Index des figures

Figure 1 : Évolution relative au niveau mondiale des principaux types de cultures et de bétails entre 1960 et 2010	2
Figure 2 : Effet de différentes pratiques alternatives sur le contenu du sol en carbone et en azote au cours du temps.....	4
Figure 3 : Classifications des services écosystémiques selon un rapport du Mapping and Assessment of Ecosystem and their Services	6
Figure 4 : Exemple de classification du Common International Classification of Ecosystem Services pour le service d’approvisionnement d’une céréale comme le blé	7
Figure 5 : Représentation des intrants (SE et commerciaux) et des SE produits dans le système champ	8
Figure 6 : Stabilité structurale du sol en fonction du temps	14
Figure 7: Relation schématique entre les propriétés initiales du sol, les forces appliquées sur celui-ci et ses propriétés finales.....	16
Figure 8 : Calendrier des expériences réalisées lors de l’année 2021-2022.....	29
Figure 9 : Exemple de carte représentant les contraintes liées à l’installation des carrés expérimentaux	31
Figure 10 : Plan expérimental classique pour une parcelle sans contraintes.....	32
Figure 11 : Plan expérimental dont la forme a été modifiée.....	33
Figure 12 : Plan expérimental comportant des zones à exclure.....	33
Figure 13 : Visualisation de turricules de vers de terre	35
Figure 14 : Visualisation de cabanes de vers de terre	35
Figure 15 : Exemple d’installation d’une placette de battance	39
Figure 16 : État initial du sol de la parcelle 24	41
Figure 17 : État du sol de la parcelle 24 après un travail manuel	41
Figure 18 : Exemple des quatre plus petits agrégats utilisés pour calculer le Dmin.....	41
Figure 19 : Exemple d’une placette de battance et des gabarits utilisés pour la détermination du Dmin <i>via</i> le logiciel GIMP	42
Figure 20 : Distribution initiale des calibres d’agrégats de la placette 1 du champ 23	43
Figure 21 : Histogrammes des indicateurs de service écosystémique.....	52
Figure 22 : Pluie cumulée par station météo sur la durée de l’expérience d’observation de la battance du sol par la pluie.....	55

Figure 23 : Boite de Tukey permettant de visualiser les valeurs de B_Dmin de chaque parcelle	55
Figure 24 : Boite de Tukey permettant de visualiser les valeurs de B_Dlim de chaque parcelle	56
Figure 25 : Distribution de la surface initiale des placettes couverte par les différentes catégories de calibres d'agréats	57
Figure 26 : Matrice de corrélation des 19 indicateurs de service écosystémique	59
Figure 27 : Matrice de corrélation des 19 indicateurs de services écosystémiques et des 50 indicateurs de pratiques culturelles	61
Figure 28 : Matrice de corrélation représentant les indicateurs de battance et la variable plu-trav.....	65
Figure 29 : Dendrogramme de la répartition des parcelles par groupes à partir des 19 indicateurs de services écosystémiques.....	66
Figure 30 : Dendrogramme de la répartition des parcelles par groupes à partir de 34 indicateurs de pratiques culturelles récoltés sur une durée de dix ans	68
Figure 31 : Dendrogramme de la répartition des parcelles par groupes à partir de 34 indicateurs de pratiques culturelles récoltés sur une durée de cinq ans	70
Figure 32 : Dendrogramme de la répartition des parcelles par groupes à partir de 33 indicateurs de pratiques culturelles récoltés sur une durée de deux ans	70
Figure 33 : Comparaison des indicateurs de vers de terre	77

Index des tableaux

Tableau 1 : Services écosystémiques (SE) intrants étudiés dans le cadre du mémoire, avec les fonctions et propriétés de l'écosystème liées et les SE correspondants avec Le Roux <i>et al.</i> (2008).....	9
Tableau 2 : Nombre d'adventices par mètre carré suffisantes pour diminuer le rendement des céréales à paille de cinq pourcents pour différentes espèces classiques des grandes cultures	18
Tableau 3 : Services écosystémiques étudiés, indicateurs utilisés et méthodes de mesures liées.....	27
Tableau 4 : Score de stabilité des agrégats obtenu après immersion dans l'eau distillée.....	38
Tableau 5 : Distance entre les parcelles expérimentales et la station météo du réseau Pameseb la plus proche.	40
Tableau 6 : Classes de surface de sol battu utilisées pour l'évaluation de la surface de plaque.	44
Tableau 7 : Évolution du pourcentage de la surface de plaque au cours du temps	44
Tableau 8 : Partie du tableau de la classification VESS	46
Tableau 9 : Représentation des coefficients de compétitivité en fonction du stade phénologique des adventices.....	48
Tableau 10 : Résumé des indicateurs de services écosystémiques sous forme de paramètres statistiques standards.....	51
Tableau 11 : Description et justification des indicateurs non-utilisés pour la réalisation du clustering hiérarchique	67
Tableau 12 : Résumé des influences des indicateurs de services écosystémiques et de pratiques culturales sur les classifications faites sur les champs de l'étude pour l'année 2021-2022	71
Tableau 13 : Comparaison des principales corrélations entre les services écosystémiques et les pratiques culturales obtenues lors des années 2020-2021 et 2021-2022	91

Abréviations

AB = Agriculture Biologique

ACP = Analyse en Composantes Principales

ASBL = Association Sans But Lucratif

CASIMIR = CARactérisation SIMplifiée des pressions biotiques et des Régulations biologiques

CICES = *Common International Classification of Ecosystem Services*

CIRAD = Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CO = Carbone Organique

CRAW = Centre de Recherche Agronomique en Wallonie

ELIA = *Earth and Life Institute*

FAO = Food and Agriculture Organisation

GPS = Global Positioning System

HCPC = Classification Hiérarchique sur Composantes Principales

IFT = Indice de Fréquence de Traitement

INRA = Institut National de la Recherche Agronomique

IRM = Institut Royal Météorologique

MAES = *Mapping and Assessment of Ecosystem and their Services*

MO = Matière Organique

OPVT = Observatoire Participatif des Vers de Terre

PC = Pratique Culturelle

PEPA = *Plant Ecology, eco-Physiology and sustainable Agronomy*

PVC = Polychlorure de vinyle

RGPD = Règlement Général sur la Protection des Données

SE = Service Écosystémique

SMCS = Support en Méthodologie et Calcul Statistique

SPW = Service Public de Wallonie

TCS = Technique Culturelle Simplifiée

USDA = United State Department of Agriculture

VDT = Vers De Terre

VESS = Visual Evaluation of Soil Structure

Thèse de Lola Leveau

« Les pratiques innovantes actuelles des fermes de grandes cultures wallonnes permettent-elles de remplacer des intrants issus de ressources non renouvelables par des services écosystémiques ? »

Contexte

Lorsqu'il est question de la transition vers des systèmes agricoles plus durables, le remplacement des intrants issus de ressources non renouvelables par des fonctions et processus de l'agroécosystème est souvent cité comme l'une des pistes dans la littérature scientifique. Certains agriculteurs wallons sont déjà engagés dans une transition vers plus de durabilité depuis de nombreuses années, via l'application de différents principes et modèles : agriculture biologique, agroécologie, agriculture de conservation, agroforesterie...

Cependant, les initiatives de recherche visant à évaluer à quel point ces différents systèmes cultureux parviennent effectivement à diminuer leur dépendance aux intrants en les remplaçant par des services agro-écosystémiques sont encore rares, et elles se concentrent souvent sur quelques niveaux classiques d'une pratique précise – le travail du sol, les couverts, la fertilisation... -, tout le reste étant égal par ailleurs, ou sur un nombre réduit de fermes « modèles » des différents systèmes agricoles. De plus, malgré le caractère systémique et multidisciplinaire du sujet, les recherches se concentrent généralement pour des questions de moyens et de temps sur l'étude de résultats liés à une discipline scientifique donnée – ennemis des cultures, pollinisateurs, physique du sol...

En parallèle des études scientifiques, les agriculteurs et les conseillers techniques engagés dans un modèle agricole particulier ont tendance à créer leur propre définition et système d'évaluation de la durabilité afin de vérifier les impacts de leurs choix. Ils utilisent notamment des méthodes de mesure développées par des centres de recherche, choisies en fonction de leurs domaines d'intérêt.

D'un côté, les différences existant dans les définitions de la "qualité" ou de la "durabilité" entre modèles cultureux rendent difficile la communication entre les agriculteurs et la comparaison objective des systèmes agricoles innovants. Mais d'un autre côté, la prolifération d'outils d'évaluation sur le terrain montre que les agriculteurs et leurs conseillers techniques cherchent des réponses concernant l'efficacité de leurs pratiques. Cette dynamique est une opportunité pour mener une recherche collaborative permettant une évaluation objective des différents systèmes agricoles existants, sur la base d'indicateurs multidisciplinaires pertinents, et à l'aide de méthodes d'analyse simples et proches du terrain.

Objectif de la thèse

L'objectif général de la thèse est d'identifier, via une approche collaborative et multidisciplinaire, si certains systèmes de grandes cultures appliqués actuellement dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse wallonnes se rapprochent effectivement de l'objectif théorique de remplacement des intrants issus de ressources non renouvelables par des

services agro-écosystémiques, tout en maintenant au même niveau ou en améliorant la rentabilité de la rotation.

Plan de la recherche complet

Pour les régions limoneuse et sablo-limoneuse wallonnes, un échantillon de parcelles intégrant au maximum la diversité actuelle des pratiques observables en grandes cultures, notamment au niveau de l'agriculture de conservation, a été constitué. Ces parcelles sont analysées en collaboration avec leurs gestionnaires afin de mesurer l'impact des pratiques qui y sont appliquées sur deux dimensions :

- les services écosystémiques que les parcelles fournissent
- l'aspect économique de la rotation (en fonction des flux entrants et sortants du champ)

Ces mesures sont répétées trois années de suite, à chaque fois sur des parcelles différentes. Pour augmenter l'homogénéité de l'échantillon, toutes les parcelles ont des sols limoneux à drainage favorable et toutes les mesures ont lieu durant une culture de froment d'hiver ou d'épeautre.

PHASE 1 : PREPARATION (2019-2020)		
Création du réseau de parcelles	Choix des indicateurs	Choix des méthodes de mesure
Création du réseau de fermes initial	Bibliographie et consultation d'experts	Bibliographie et consultation d'experts
Analyse du réseau de fermes initial et ajout des profils manquants	Enquêtes auprès des agriculteurs du réseau	Enquêtes auprès des agriculteurs du réseau
Choix des parcelles à analyser dans chaque ferme du réseau	Sélection du set final d'indicateurs	Evaluation en champs de certaines méthodes de mesure
		Sélection du set final de méthodes de mesure

PHASE 2 : ANALYSE DES PARCELLES DU RESEAU (2020-2023)
Dans les parcelles des <u>agriculteur-rices</u>
Mesure en champ des services écosystémiques
Enquêtes sur l'itinéraire cultural
Identification intermédiaire des liens existant entre les services écosystémiques et l'itinéraire cultural
Calcul des indicateurs économiques

PHASE 3 : ANALYSE DES RESULTATS (2023-2024)	
Apports scientifiques	Impacts pour les <u>agriculteur-rices</u> du réseau
Identification des liens entre les résultats agronomiques et les résultats économiques	Présentation des résultats complets
Identification de liens existant entre les pratiques appliquées et la théorie du remplacement des intrants par les services écosystémiques.	Enquête sur l'impact de l'étude auprès des <u>agriculteur-rices</u> du réseau.

Les cellules en bleu sont les étapes dans lesquelles Grégoire et Joachim sont intervenus lors de leur mémoire en 2021-2022.

Contextualisation du mémoire

Ce mémoire s'inscrit dans un travail de recherche de plus grande envergure qui est la thèse de doctorat de L. Leveau, dont les explications sont présentes ci-dessus. Il participe à la deuxième année de la deuxième phase de la thèse qui est la phase d'expérimentation en champ. Cette phase a pour objectif la récolte de données sur la fourniture en services écosystémiques des champs afin d'identifier les liens existant entre les pratiques culturales et ces services écosystémiques. Nous avons donc participé aux mesures en champ, à l'enquête chez les agriculteurs afin de récolter les historiques cultureux ainsi qu'à la détermination de liens existant entre les pratiques et les services.

Dans le cadre de la thèse de L. Leveau, d'autres mémoires ont été réalisés précédemment.

Lors de l'année 2019-2020, Nicolas Biot a réalisé son mémoire sous la supervision de L. Leveau et de P. Bertin. Son travail a porté sur la comparaison de méthodes de mesures de la qualité structurale des sols limono-sableux de Belgique. Son objectif était de trouver un set d'indicateurs et de méthodes de mesure qui permettent d'évaluer l'impact de différentes pratiques culturales sur la fourniture du service écosystémique de la qualité structurale du sol. Les outils proposés par Biot sont utilisés dans ce mémoire pour la mesure du service de qualité structurale notamment les méthodes VESS (mesure de la compaction du sol) et USDA (mesure de la stabilité structurale des agrégats).

Lors de l'année 2020-2021, Xavier Belin et Aline Fockedey ont réalisé un mémoire collégial. Ils ont fait partie de la première année de recherche expérimentale de la deuxième phase de la thèse de L. Leveau. Ils ont donc participé à la mise en place et à l'amélioration des protocoles d'expériences qui sont utilisés dans ce mémoire. Ils ont également fourni des conseils d'améliorations qui ont été pris en compte lors des expériences de cette année. Leur objectif était d'identifier les liens existant entre l'itinéraire cultural et la fourniture en services écosystémiques intrants sur des parcelles de grandes cultures brabançonnaises à sol limoneux (Aba).

Introduction

Avec la croissance des systèmes culturels alternatifs et l'émergence de nouvelles pratiques des agriculteurs, la recherche agronomique en collaboration avec les acteurs du milieu agricole devient essentielle afin de répondre aux enjeux de durabilité auxquels le monde fait face aujourd'hui. C'est dans ce but que des recherches participatives comme la thèse de L. Leveau sont mises en place.

Ce mémoire est subdivisé en quatre parties :

L'« État de l'art » est une synthèse de l'état actuel des connaissances à propos des services écosystémiques et des pratiques culturelles. Les services écosystémiques y sont d'abord exposés d'une manière large pour ensuite donner plus de détails sur les services qui sont étudiés dans ce mémoire. Ensuite, une partie est consacrée aux pratiques culturelles qui vont être comparées aux services écosystémiques dans la suite du mémoire. Finalement, on peut retrouver l'objectif général du mémoire ainsi que les sous-objectifs spécifiques associés.

Dans la partie « Matériels et méthodes » est décrit dans les détails tout ce qui a été mis en place dans le mémoire. D'abord, tous les travaux antérieurs sont expliqués brièvement. Ensuite, l'organisation générale est commentée et quelques explications sur la collecte de l'historique culturel auprès des agriculteurs sont apportées. Ensuite, les plans et les protocoles d'expériences sont détaillés. Enfin, les analyses statistiques qui sont réalisées sur les résultats obtenus sont citées.

Dans la partie « Résultats » sont décrites les données obtenues concernant les pratiques culturelles et les services écosystémiques. Les analyses multivariées montrant ces données et les liens qui existent entre elles sont exposées.

La « Discussion » porte sur une réflexion autour des résultats obtenus. Ils sont comparés à d'autres études et aux résultats des mémoires antérieurs. Un regard critique est porté sur les protocoles et des pistes d'améliorations sont proposées.

Le mémoire se termine par une conclusion qui reprend les principaux résultats récoltés ainsi que des commentaires généraux sur l'étude réalisée.

1. État de l'art

1.1. Défis et perspectives de l'agriculture moderne

1.1.1. Agriculture du XXe siècle

Dans un contexte d'après-guerre, le XXe siècle a été marqué par de grands changements, notamment dans l'agriculture afin de nourrir le monde en reconstruction. La pénurie alimentaire a souvent été évoquée par le passé, mais à la sortie de la deuxième guerre mondiale les préoccupations de famines ont été encore plus grandes. C'est d'ailleurs une des raisons de la création de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) (Griffon, 2002) et de l'apparition du concept de « sécurité alimentaire » (Simon, 2012).

Historiquement, l'augmentation de la production agricole était effectuée principalement *via* une augmentation des surfaces cultivées. Dans le courant du XXe siècle, l'accès à la terre est devenu une contrainte pour les agriculteurs, tout comme l'accès à la technologie et la garantie de revenus (Hazell and Wood, 2008). Pour répondre aux contraintes, la révolution verte est arrivée en proposant aussi bien des évolutions technologiques que les politiques qui y sont liées (Griffon, 2002). Grâce aux nombreuses améliorations technologiques et à la révolution verte, l'agriculture a permis d'apporter la majorité des besoins alimentaires de la population mondiale et cela malgré un doublement de la population sur les quatre dernières décennies (Hazell and Wood, 2008; Tilman, 1998). Les deux graphiques de la figure 1 montrent l'évolution relative au niveau mondial des principaux types de cultures et de bétails entre 1960 et 2010. On peut y voir que ces différentes productions ont au minimum été augmentées de 50 pourcents en un demi-siècle (Godfray *et al.*, 2010).

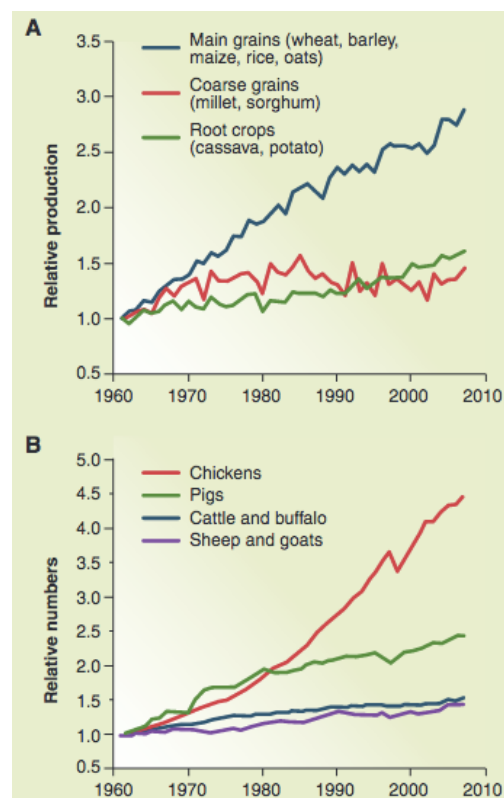


Figure 1 : Évolution relative au niveau mondiale des principaux types de cultures et de bétails entre 1960 et 2010 (Godfray *et al.*, 2010)

A côté de cette augmentation de la demande en nourriture, les producteurs sont soumis à de fortes compétitions. Non pas uniquement pour l'accès la terre mais aussi pour les ressources comme l'eau, l'énergie mais aussi les différents intrants nécessaires pour les cultures (engrais, pesticides...). Ces ressources sont présentes en quantité limitée sur terre, il faudra donc les utiliser de manière efficiente et équitable si on veut continuer à assurer la sécurité alimentaire mondiale.

1.1.2. Limites et conséquences de l'agriculture du XXe siècle

L'augmentation croissante de la productivité agricole tend à montrer ses limites. Celle-ci est limitée aussi bien au niveau des rendements que des surfaces cultivables.

Un plafonnement des rendements est apparu assez vite. On peut donner plusieurs explications à cela. Par exemple, dans les régions d'Afrique où la révolution verte est apparue plus tôt, la salinisation des sols due à l'excès d'irrigation ou la réduction des doses d'engrais due à la hausse des prix peuvent expliquer le plafonnement (Griffon, n.d.).

L'augmentation de la surface mondiale cultivée est aussi limitée par la surface disponible qui arrive à sa fin et par la compétitivité pour la terre avec d'autres activités non-agricoles (Godfray *et al.*, 2010).

Pour arriver à une augmentation de la production agricole mondiale *via* la révolution verte, il y a eu un certain coût environnemental. Ce prix à payer comprend la contamination des eaux souterraines par les engrais et pesticides, une production de gaz à effet de serre, une perte de diversité génétique, une eutrophisation des milieux aquatiques... (Tilman, 1998) On peut résumer tous les effets négatifs de l'agriculture du XXe siècle sur l'environnement en 5 points (Hazell and Wood, 2008):

- la déforestation ou dégradation des forêts
- une réduction de la disponibilité en eau et une dégradation des terres irriguées
- une dégradation des sols
- une perte de biodiversité
- un changement climatique à toutes les échelles.

Une question se pose donc sur le temps que nous tiendrons à ce rythme. Est-il viable de continuer à pratiquer l'agriculture intensive comme pratiquée depuis la fin de la seconde guerre mondiale ? En un demi-siècle, des changements ont été constatés : notamment, la baisse de la fertilité des sols, l'érosion des sols, l'augmentation de l'impact des maladies sur les cultures et le bétail ainsi que les demandes croissantes associées en énergie et en intrants chimiques. Ces exemples ne font que valider le fait qu'il est difficile de croire qu'il est possible de maintenir le rythme de production actuel de l'agriculture intensive (Tilman, 1998).

En outre, une grande contradiction sur la production croissante au niveau mondial est que, depuis le milieu du XXe siècle, la production à l'échelle mondiale dépasse la consommation. Ce qui veut dire que nous sommes dans un phénomène de surproduction qui est notamment favorisé par les pays industrialisés. La problématique de nourrir le monde n'est donc plus un problème de production mais est plutôt un souci de répartition de cette production entre les régions du monde (Hazell and Wood, 2008).

1.1.3. Perspectives de l'agriculture

Les estimations prédisent que la population mondiale devrait continuer à augmenter pour atteindre 9 milliards d'humains en 2050. Comme pour la population, la consommation va aussi augmenter pour au moins les 40 années à venir (Godfray *et al.*, 2010). Le monde agricole est donc encore et toujours plus sous pression.

A côté de l'augmentation de la population, une prise de conscience par la société de la nécessité de préserver les ressources naturelles et l'environnement fait changer les mentalités. Ce changement influence la consommation de la population et par conséquent la manière de produire. Il ne s'agit plus de produire toujours plus mais de produire mieux. Respecter l'environnement est d'ailleurs une fonction qui est aujourd'hui, par obligation et socialement, attribuée à l'agriculture (Capillon, 2007). Il n'est plus essentiel de favoriser la productivité mais il devient essentiel de respecter l'environnement dans son ensemble, en ce compris la biodiversité, les ressources fossiles, la qualité des sols... Non pas uniquement parce que l'environnement produit des biens publics mais aussi parce que la génération actuelle n'a pas le droit de priver les générations futures d'un environnement « sain » (Godfray *et al.*, 2010; Tilman, 1998).

Cette situation entraîne un changement dans les pratiques culturales au niveau européen : le travail est simplifié, les dépenses sont réduites et les intrants sont économisés. La manière de produire est adaptée et de nouveaux systèmes plus écologiques voient le jour. Pour atteindre un développement plus durable de l'agriculture, il y a deux voies d'évolution à suivre simultanément. A court terme, il est important de poursuivre les adaptations techniques qui assurent une qualité et une moindre atteinte à l'environnement. A moyen terme, les nouveaux systèmes devront être conçus pour minimiser les pratiques polluantes en misant sur les relations écologiques (Capillon, 2007a).

Des pratiques alternatives voient le jour, parmi celles-ci se trouvent l'agroécologie,

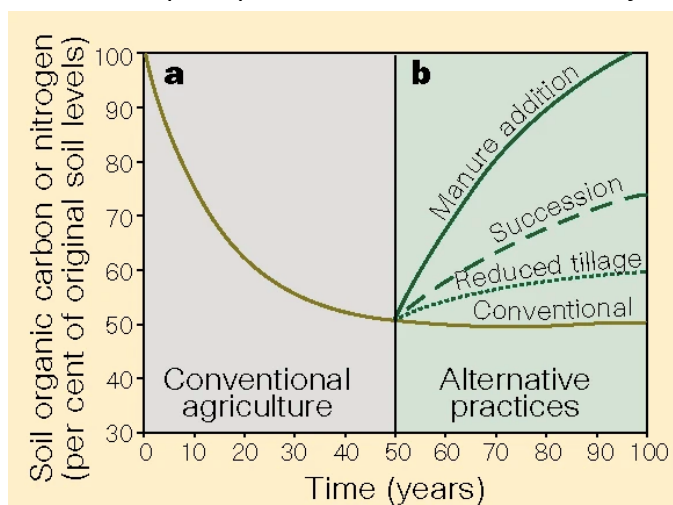


Figure 2 : Effet de différentes pratiques alternatives sur le contenu du sol en carbone et en azote au cours du temps. « Manure addition » = apport de fumier, « Succession » = processus par lequel les champs abandonnés sont graduellement envahis par la végétation et les animaux pour atteindre le stade final de « climax », « Reduced tillage » = réduction du travail du sol (Tilman, 1998).

l'agroforesterie ou les systèmes assurant une couverture végétale permanente du sol. Ces pratiques ne sont pas unanimement définies ce qui prouve la diversité des pratiques mais aussi leur caractère récent et donc encore en évolution (Capillon, 2007). On observe que les pratiques alternatives ont un réel rôle à jouer notamment sur le contenu en carbone et en azote du sol. La réduction du labour ou l'apport de matière organique (MO) peuvent réellement augmenter ces contenus qui n'ont jusqu'alors pas été la priorité de l'agriculture conventionnelle (Figure 2, Tilman, 1998).

Les agriculteurs pionniers qui expérimentent et apportent de nouvelles techniques sont très importants pour le développement des pratiques alternatives. Ces agriculteurs orientent les travaux de recherche des scientifiques, il est donc important qu'une bonne relation soit mise en place entre ces deux acteurs du monde agricole. De nombreuses perspectives sont offertes par la recherche et il est important qu'un regard nouveau soit porté sur les pratiques actuelles (Capillon, 2007b).

Comme résumé de la littérature, la recherche de nouvelles méthodes de production plus respectueuses de l'environnement est pleinement dans l'air du temps. Et ces recherches devront permettre de diriger les agriculteurs vers une agriculture durable non seulement sur le plan écologique, mais également sur les plans économique et social. Afin d'identifier les méthodes de production respectueuses de l'environnement, l'analyse des liens entre, d'une part, les méthodes de productions *via* les pratiques culturelles (PC) et d'autre part, l'impact sur l'environnement *via* les services écosystémiques (SE) est une solution prometteuse. Ce travail et plus globalement la thèse dans laquelle il s'inscrit participent à cette recherche de liens entre les PC et les SE.

1.2. Services écosystémiques

1.2.1. Définition et description

Le concept de SE est souvent utilisé lorsqu'on parle d'agriculture et/ou de climat mais il semble utile de revenir sur la définition de ce concept. Une des plus récentes définitions décrit les SE comme les contributions directes et indirectes de l'écosystème au bien-être humain (TEEB, 2010). Les SE sont vus comme un pont entre économie et écologie car ils permettent de mettre une valeur économique sur des éléments écologiques (Braat and de Groot, 2012). Il existe différentes définitions qui donnent plus ou moins d'importance au côté écologique ou au côté économique des SE. Ces définitions sont donc constamment sujettes à discussions et à modifications.

La définition citée plus haut fait référence aux bénéfices pour l'humain (TEEB, 2010). Pourtant, tous les organismes vivants et l'écosystème lui-même sont bénéficiaires des SE. Cependant, cette définition permet de faire prendre conscience à la population de l'importance de ces services en tant que bénéficiaires finaux. En effet, cette notion moderne des SE date des années 1970 et a été utilisée de plus en plus pour attirer l'attention des populations sur le déclin de la biodiversité (Braat and de Groot, 2012). Depuis 2013, la Commission européenne a fourni plusieurs rapports techniques portant sur le *Mapping and Assessment of Ecosystem and their Services (MAES)*. Ces rapports ont pour objectif d'aider les Etats à évaluer, cartographier et quantifier les écosystèmes, la biodiversité et les SE sur leurs territoires respectifs afin de pouvoir recueillir des informations globales et uniformes au niveau européen (European Commission, 2022). Ceci montre l'importance de la notion de SE dans la sphère politique de ces dernières années.

Dans les rapports du MAES, plusieurs classifications des SE ont été proposées :

La première classification, souvent utilisée, répartit les SE en trois catégories selon leur fonction (Millennium Ecosystem Assessment (Program), 2005) :

- services d’approvisionnement : nourriture, bois, carburant, eau fraîche...
- services de régulation : régulation du climat, des inondations, des maladies...
- services culturels : esthétiques, spirituels, d’éducation...

La deuxième classification répartit les SE en fonction du type de bien-être qu’ils apportent (Millennium Ecosystem Assessment (Program), 2005) :

- sécurité
- besoins de base pour une bonne vie
- santé
- relations sociales

Les liens entre ces deux classifications sont repris à la figure 3.

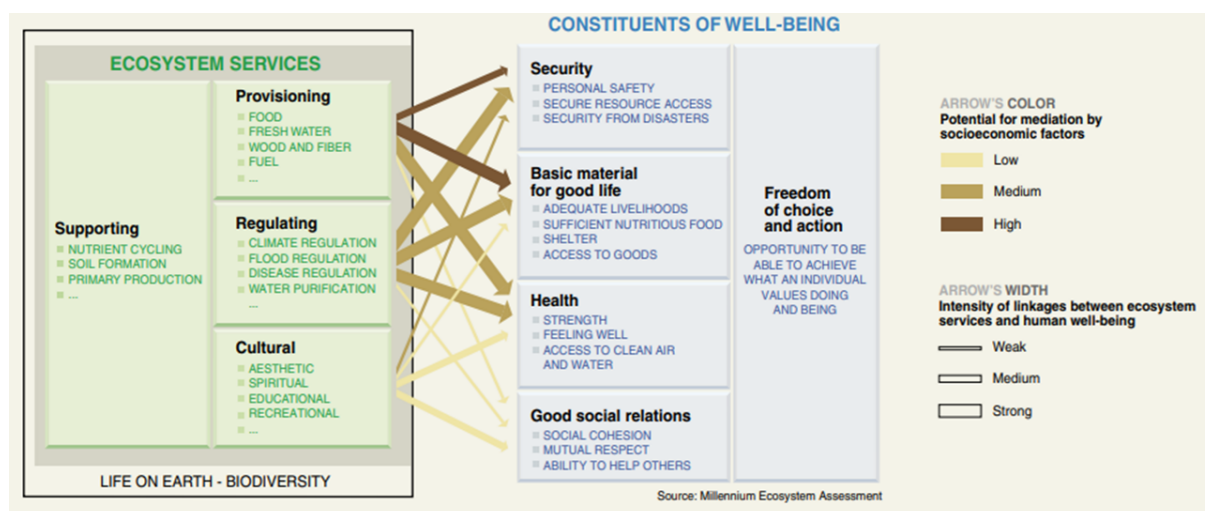


Figure 3 : Classifications des services écosystémiques selon un rapport du Mapping and Assessment of Ecosystem and their Services (Millennium Ecosystem Assessment (Program), 2005)

D’autres classifications propres à chaque pays existent et rendent l’étude des SE très compliquée. C’est pourquoi, l’agence européenne pour l’environnement a créé une structure nommée *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES)* afin de standardiser les méthodes de classifications au niveau mondial. Elle permet donc d’uniformiser les classifications mais offre aussi des tables d’équivalence avec d’autres classifications comme la classification américaine *US-EPA Final Ecosystem Goods and Services Classification System (FEES-CS)*. Un exemple de la structure de la classification CICES pour le service d’approvisionnement d’une céréale comme le blé est présenté à la figure 4. Le premier niveau de classification du système CICES utilise les trois mêmes catégories que celles évoquées dans le MAES (services d’approvisionnement, de régulation et culturels)(European Environment Agency, 2022).

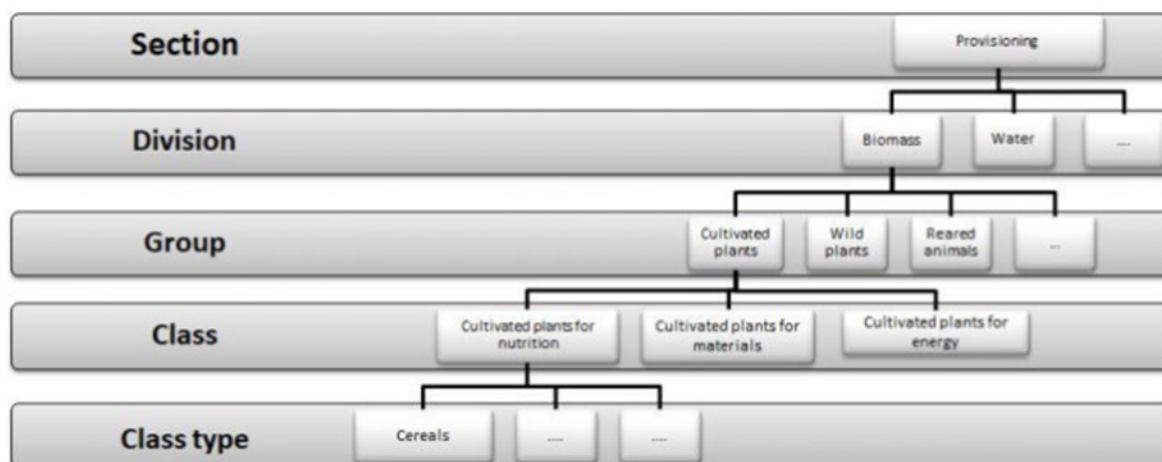


Figure 4 : Exemple de classification du Common International Classification of Ecosystem Services pour le service d'approvisionnement d'une céréale comme le blé (European Environment Agency, 2022)

Afin de mieux tenir compte des variabilités des écosystèmes au niveau des pays ou des régions, certains pays comme la Belgique (classBE) ou le Royaume-Uni (NEA) ont adapté le système CICES à leurs besoins. La structure générale reste la même jusqu'au niveau « Class type » qui a été modifié (Haines-Young *et al.*, 2013).

Un aperçu global de la classification CICES se trouve à l'annexe 1. Cet aperçu est subdivisé en SE dépendants d'organismes vivants (biotique) ou non dépendants d'organismes vivants (abiotique).

1.2.2. Services écosystémiques au service des agriculteurs

Comprendre le rôle des SE dans nos agroécosystèmes est indispensable pour sensibiliser les agriculteurs aux bénéfices qu'ils peuvent leur apporter. Certaines publications scientifiques évoquent la protection des SE comme si ceux-ci représentaient une fin en soi (Norris and Congreves, 2018). Souvent, l'agriculture est vue comme une pratique dégradant les écosystèmes et donc les SE. Il est pourtant indispensable de comprendre que ces services ont un impact en retour sur les pratiques agricoles en remplaçant certains intrants chimiques et/ou travaux mécaniques. Il faut repartir de la définition de SE qui les exprime comme des contributions au bien-être humain (TEEB, 2010). Comprendre comment et dans quelle mesure ils y contribuent permet de mieux les valoriser aux yeux des citoyens. Par exemple, la régulation de la qualité des sols est un service qui n'est pas l'objectif final. L'objectif final est d'avoir un sol de qualité pour fournir des aliments aux humains. De ce point de vue, le rôle des SE est directement compris et cela permet de sensibiliser la population à la protection de ceux-ci.

Certains SE procurent principalement des services aux agriculteurs (Power, 2010; Shahane and Shivay, 2021):

- la régulation des quantités d'eau (éviter les sols inondés grâce à des sols drainants et favoriser la rétention d'eau lors de périodes plus sèches)

- le biocontrôle des ravageurs des cultures
- la capacité du sol à fournir des nutriments
- les services de production de végétaux

D'autres services concernent tous les êtres humains y compris les agriculteurs :

- la préservation des paysages
- l'aspect récréatif (observation de la faune et de la flore...)
- le captage de CO₂ atmosphérique dans les sols

La préservation des paysages est souvent vue comme un service pour les touristes qui se promènent dans les campagnes le weekend. Cependant, les agriculteurs vivent et travaillent au milieu de ces paysages et sont donc les premiers à en profiter sans compter ceux et celles qui développent du tourisme à la ferme et qui sont donc très dépendants des paysages. Cet exemple démontre que même les services qui semblent écartés des préoccupations des agriculteurs, les concernent tout autant.

Les SE peuvent également être illustrés comme à la figure 5 où sont représentés les intrants (SE et commerciaux) qui sont bénéfiques pour les cultures ainsi que les SE de production fournis par le système champ. On distingue les SE de production qui participent au revenu agricole et ceux qui n'y participent pas mais qui sont généralement au bénéfice de l'ensemble de la société (Le Roux *et al.*, 2008). Les SE intrants, qui font d'ailleurs l'objet de ce mémoire, sont vus comme une alternative pour remplacer les intrants commerciaux souvent néfastes pour l'environnement.

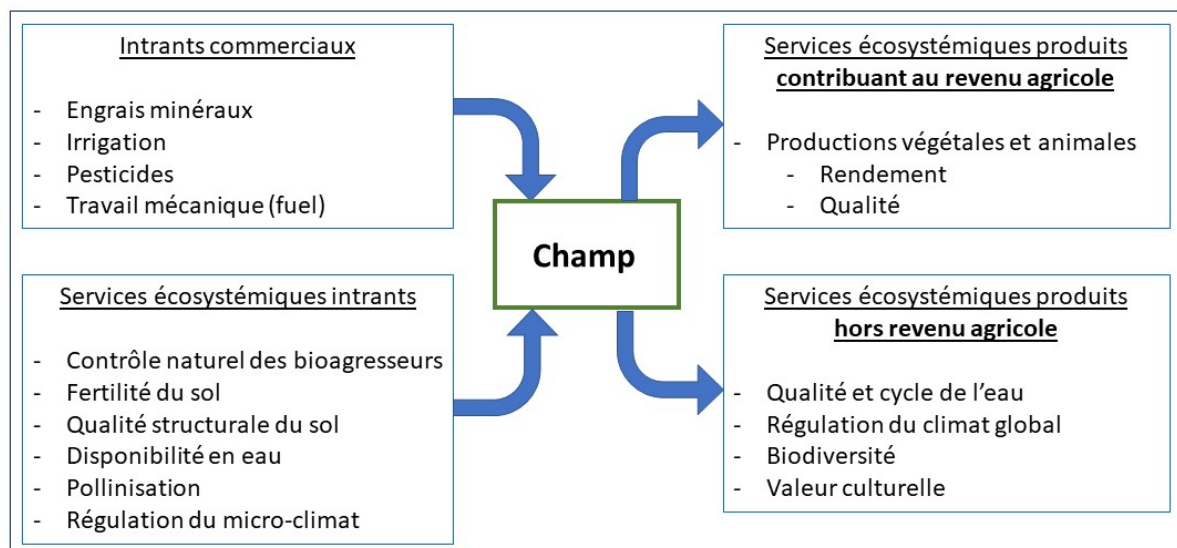


Figure 5 : Représentation des intrants (SE et commerciaux) et des SE produits dans le système champ (Adapté de Le Roux *et al.* (2008))

D'après ce schéma, la production agricole (alimentation, fibre, énergie...) est aussi un SE. Il s'agit d'un service de production contribuant au revenu de l'agriculteur. Les SE participants au revenu sont souvent mis en opposition par rapport aux autres SE comme s'il n'était pas

possible de concilier les deux. Il y a généralement des compromis à faire entre les différents SE mais une gestion réfléchie des PC permet de réduire fortement ces compromis. (Power, 2010).

Les agriculteurs sont parfois amenés à prendre des décisions qui favorisent d'avantage des services de productions participant à leur revenu (rendement) plutôt que ceux ne participant pas à leur revenu (qualité de l'eau, régulation du climat...), de même avec les services d'ordre culturels ou liés à la biodiversité. Cette décision est souvent liée à la vision des services au niveau de l'espace, du temps et de la réversibilité. L'agriculteur va généralement privilégier des services qui lui rapportent à court ou moyen terme (temps) et qui ont un impact à l'échelle de la parcelle ou de la ferme (espace). Concernant l'aspect de la réversibilité, celle-ci peut influencer les décisions dans les deux sens. En effet, si l'on considère la perte de biodiversité, une fois qu'elle a atteint un seuil très bas, il faut mobiliser beaucoup de ressources pour recréer des habitats pour la faune et la flore. Une fois que l'environnement est favorable, il faut beaucoup de temps avant que la biodiversité se redéveloppe et que l'écosystème se rééquilibre (relation proie-prédateur, plante-milieu, plante-animal...). On peut donc considérer la perte de biodiversité comme un phénomène quasi irréversible sur une échelle de temps humaine. La non-considération de cet aspect de réversibilité peut mener à une négligence envers certains SE et à contrario, en considérant la non-réversibilité de certains phénomènes cela permet de mieux justifier leur protection (Power, 2010).

Dans ce contexte, l'évaluation de l'impact des PC sur les SE pourrait permettre de donner de meilleurs outils aux agriculteurs pour prendre les bonnes décisions lorsque des compromis doivent être faits entre différents services.

1.3. Services écosystémiques intrants étudiés

Pour ce mémoire, il a été décidé de représenter les SE étudiés selon un modèle inspiré de Le Roux *et al.* (2008). Le tableau 1 reprend les SE intrants étudiés avec les fonctions et propriétés de l'écosystème mesurées expérimentalement en champ dans le cadre de ce mémoire. Seuls ces SE sont étudiés car ils font partie de la sélection de SE effectuée par L. Leveau et que leur mesure coïncide avec la période de réalisation du mémoire. Les correspondances

Tableau 1 : Services écosystémiques (SE) intrants étudiés dans le cadre du mémoire, avec les fonctions et propriétés de l'écosystème liées et les SE correspondants avec Le Roux *et al.* (2008). MO = Matière Organique

SE intrants étudiés	Fonctions et propriétés de l'écosystème	Correspondance avec les SE de Le Roux <i>et al.</i> (2008)
Dynamique de la MO	Incorporation de la MO	Fertilité des sols
	Décomposition de la MO	
Structure du sol	Stabilité des agrégats	Stabilité structurale du sol (contrôle de l'érosion, résistance à la compaction)
	Sensibilité à la battance	
	Compaction	
Contrôle des ennemis de la culture	Présence d'adventices	Contrôle des bioagresseurs

avec Le Roux *et al.* (2008) sont également présentées. Cette classification a pour but d'être simple, abordable et facilement applicable aux parcelles des agriculteurs car un objectif de la thèse de L. Leveau est que les protocoles testés puissent ultérieurement être utilisés par les agriculteurs eux-mêmes sur leurs parcelles pour évaluer la fourniture en SE.

Dans la suite de cette section, les processus liées aux SE mesurés dans ce mémoire seront abordés.

1.3.1. Dynamique de la matière organique

La MO est un élément important de la fertilité d'un sol. La fertilité peut être définie comme la capacité inhérente d'un sol à fournir des éléments nutritifs aux plantes en quantité adéquate et dans des proportions appropriées (Syers and Springett, 1984). La MO est composée de débris organiques végétaux ou animaux à différents stades de décomposition (Monnier, 1965). Les cellules et les tissus des organismes du sol ainsi que leurs sécrétions font également partie de la MO. La MO a des effets positifs sur les propriétés physiques et chimiques des sols. Elle est souvent vue comme un élément principal pour estimer la qualité d'un sol (Jangir *et al.*, 2019).

La MO d'un sol est toujours en évolution. L'oxydation des molécules organiques en dioxyde de carbone et la dégradation des matières organiques par les macro- et microorganismes contribuent à la diminution des stocks de carbone dans les sols. Cependant, ces macro- et microorganismes contribuent également à stabiliser les molécules organiques et à incorporer les matières organiques au sol. Ils peuvent donc être considérés comme des catalyseurs qui accélèrent le cycle du carbone des sols (Fritz, 2015).

1.3.1.1. Activité des vers de terre

Parmi les macroorganismes participant à la dégradation et à l'incorporation de la MO se trouvent les vers de terre (VDT). Ils font partie du groupe coelomate, sous-classe des Oligochètes, ordre des Haplotaxida et sous-ordre des *Lumbricina*. Leur activité est un bon indicateur de la fertilité des sols. Une différence significative est observable entre une plante cultivée sur un sol avec ou sans VDT. Plusieurs mécanismes peuvent expliquer l'effet bénéfique des VDT (Syers and Springett, 1984) :

- augmentation de l'incorporation de MO
- amélioration de l'aération du sol
- effet direct des produits métaboliques des vers sur la croissance des plantes

Grâce aux VDT, la MO est plus facilement accessible aux microorganismes (bactéries et champignons), les vers favorisent donc en plus leur activité. Les microorganismes contribuent à la dégradation de la MO afin de rendre les nutriments qu'elle contient plus disponibles pour les plantes (EcoBioSoil, 2022).

Les VDT permettent également une bonne circulation de l'eau et des nutriments dans le sol grâce à leurs galeries et sont capables de remonter des nutriments enfouis profondément. Les galeries, avec la MO incorporée, permettent une bonne aération du sol et facilitent le développement racinaire des plantes. Les VDT sont aussi capables de dégrader des polluants comme certains pesticides (EcoBioSoil, 2022; Odile *et al.*, 2013).

Les déjections des VDT à la surface du sol - les turricules - contribuent à la formation d'agrégats et à la texture grumeleuse du sol. L'auxine produite par les bactéries des turricules est un régulateur de la croissance des plantes qui stimule leur croissance racinaire et donc indirectement la production de biomasse (Agapit, 2018; Chauhan, 2014; Odile *et al.*, 2013).

Les populations de VDT peuvent être influencées par plusieurs facteurs. Certains facteurs influencent positivement les vers :

- épandage de chaux (Syers and Springett, 1984)
- bon drainage (Syers and Springett, 1984)
- bon apport et teneur élevée en MO des sols (fertilisants organiques) (Chauhan, 2014)
- résidus de culture avec un rapport carbone/azote faible (Chauhan, 2014)

D'autres facteurs ont un impact négatif sur les vers :

- travail du sol important (Chauhan, 2014; Jangir *et al.*, 2019)
- sol trop compacté (Jangir *et al.*, 2019)
- certains pesticides (Jangir *et al.*, 2019)

A l'opposé des fertilisants organiques qui sont bénéfiques pour les vers, la réponse n'est pas aussi évidente pour les fertilisants minéraux. D'une part, ils acidifient le sol et diminuent l'activité des vers. D'autre part, ils favorisent la croissance des végétaux, ce qui produit de la MO disponible et favorable pour les vers. En fonction des situations, l'impact peut donc être positif ou négatif (Chauhan, 2014).

Les conditions d'humidité, de température et de pH ont aussi un impact sur la vie des VDT. Ils respirent par leur peau qui doit être humide, ils apprécient les sols avec des taux d'humidité allant de 60 à 70%. Cependant, un excès d'eau peut mener à une anoxie et à la mort des vers. L'activité des vers est optimale à des températures entre 10 et 15°C et ils supportent des pH allant de 5 à 8, mais un pH neutre est optimal pour leur bien-être (Chauhan, 2014).

1.3.1.2. Teneur en matière organique

La MO d'un sol peut être divisée en MO stable et en MO labile car ces deux types de MO ont des rôles différents dans le sol.

La fraction stable ou passive est composée majoritairement de molécules organiques fabriquées lors des processus de décomposition de la MO. Ces molécules sont pauvres en nutriments et, à cause de leur stabilité, peu de microorganismes savent les dégrader. Elles jouent cependant un rôle important dans la capacité d'échange cationique du sol. Elles se

lient aux nutriments ce qui évite leur lixiviation et permet de les garder disponibles pour les plantes. Enfin, la fraction stable se lie aux argiles et forme des complexes argilo-humiques qui constituent les agrégats. La fraction stable correspond aux particules de MO inférieures à 20 micromètres de diamètre (Jangir *et al.*, 2019).

La fraction labile ou active représente la MO jeune, apportée en moyenne depuis moins de cinq ans, qui sert d'alimentation aux organismes du sol. Pour la mesurer, on mesure la MO particulaire qui correspond à la MO microbienne active et qui est fortement influencée par les pratiques agricoles (Jangir *et al.*, 2019). Cette MO microbienne active correspond, à l'inverse de la fraction stable, aux particules de MO supérieures à 20 micromètres de diamètre (Six *et al.*, 2000; Vincent *et al.*, 2019).

La fraction labile, qui correspond à la matière la plus récemment apportée au sol, réagit plus rapidement aux changements de pratiques que la fraction stable. Le rapport fraction labile sur fraction stable est donc un bon indicateur de l'évolution des pratiques. Un sol dont le rapport « labile sur stable » est élevé est en phase d'augmentation du contenu en carbone et inversement pour un rapport faible (Vincent *et al.*, 2019).

Les termes « matière organique » et « carbone organique » (CO) sont régulièrement confondus. Le premier est composé de l'ensemble de la matière, comprenant ainsi les atomes de carbone mais aussi les autres éléments de constitution de la matière (hydrogène, oxygène, azote...). Le second ne comprend que les atomes de carbone et est donc en quantité plus faible que la MO dans le sol. La teneur en CO de la MO varie peu et se trouve autour de 58 pourcents, le rapport MO/CO est considéré comme égal à 1,72 dans la littérature (Baize, 2017; Marsden, 2014). Il est donc possible d'obtenir l'un à partir de l'autre et inversement. Comme il est plus facile de mesurer la teneur en CO du sol, de nombreuses études vont la mesurer pour calculer la MO du sol (Vincent *et al.*, 2019).

1.3.2. Structure du sol

Cette partie est axée sur le sol et sa structure. Les notions de stabilité structurale de sol, de sensibilité à la battance et de compaction du sol seront abordées. Le terme structure peut être défini comme la façon dont les constituants élémentaires du sol sont disposés les uns par rapport aux autres (Monnier, 1965).

La structure du sol est très importante en agriculture, elle permet notamment une bonne germination des graines, le passage des engins agricoles, la diminution de l'érosion, le stockage d'eau et de minéraux... Comme l'a dit Hillel en 1988 : « Le développement et le maintien d'une structure du sol désirable et optimale pour la croissance des plantes sont des exigences éternelles en agriculture » (Odile *et al.*, 2013).

La structure n'est pas figée dans le temps, ni identique sur une épaisseur de sol. Elle dépend par exemple des conditions saisonnières due aux variations climatiques. Elle peut également évoluer lentement *via* l'action de facteurs naturels (vie du sol, action des racines...) ou encore

plus ou moins rapidement *via* l'action de facteurs anthropiques (travaux du sol, passage d'engins...). La structure change avec la profondeur en fonction de la granulométrie, de l'activité biologique du sol, des racines mais surtout en fonction des machines agricoles. En milieu agricole cultivé, la structure du sol dépend principalement des pratiques culturales mais également des alternances de gel/dégel ou humectation/dessiccation. Elle est donc très dépendante de moments où l'observation est réalisée (Destain, 2013; Odile *et al.*, 2013).

1.3.2.1. Stabilité structurale du sol

La stabilité structurale se définit comme l'aptitude des agglomérats terreux à résister aux actions de dégradation, au premier rang desquelles se place celle des excès d'eau (Monnier, 1965).

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer la qualité de la structure du sol ce qui prouve à la fois l'intérêt de sa mesure et l'absence d'une méthode standard pour l'évaluation (Bissonnais, 1995).

Les agglomérats terreux, couramment appelés agrégats, résultent de l'arrangement et de l'organisation de particules minérales et organiques du sol. Ils sont des volumes naturels individualisés. Ils se divisent en deux types en fonction du phénomène par lequel ils ont été constitués (Odile *et al.*, 2013):

- agrégats « mécaniques » : formés à partir de la séparation physique d'un matériau initialement massif
- agrégats « construits » : formés par l'action d'organismes vivants qui produisent des substances permettant la cohésion d'éléments du sol

Dans les horizons de surface, le processus de dégradation des agrégats par l'eau est influencé par deux éléments : l'éclatement qui est provoqué par une compression de l'atmosphère interne *via* capillarité et une diminution de la cohésion des assemblages terreux par gonflement et parfois dispersion des argiles. Dans les deux cas, lorsque la pression interne devient supérieure aux forces de cohésions, il y a éclatement de l'agrégat (Boiffin, 1984; Monnier, 1965; Odile *et al.*, 2013).

Le même phénomène peut se reproduire en laboratoire. L'éclatement se produit lorsque l'agrégat sec est plongé dans l'eau ou est rapidement humecté. Il peut se produire sans agitation mais est accéléré par celle-ci. Les agrégats humides sont moins sensibles à l'éclatement dû à la plus faible quantité d'air piégée car l'eau a remplacé l'air. Par opposition aux sols sableux, les sols argileux ont une porosité réduite et une plus grande affinité pour l'eau, ils sont donc moins sujets à l'éclatement (Bissonnais, 1995).

La stabilité des agrégats est donc influencée par la porosité interne qui est affectée par la compaction du sol. La MO et l'efficacité des agents de cohésion ont également leur rôle à jouer dans la stabilité des agrégats (Destain, 2013; Monnier, 1965; Odile *et al.*, 2013).

Au niveau de l'observation des MO, les expériences menées par Monnier (1965) font apparaître trois types de stabilisation par les matières organiques en phases successives (Figure 6):

- développement d'agents microbiens : action très intense sur la stabilité mais de courte durée
- formation de produits pré-humiques : action sur la stabilité et durée moyenne
- élaboration d'humus stable : action lente sur la stabilité mais de longue durée

A chaque phase est attribuée un exemple type de MO agricole couramment utilisée qui participe à la stabilisation, respectivement : les engrais verts, la paille bien enfouie et le fumier très décomposé.

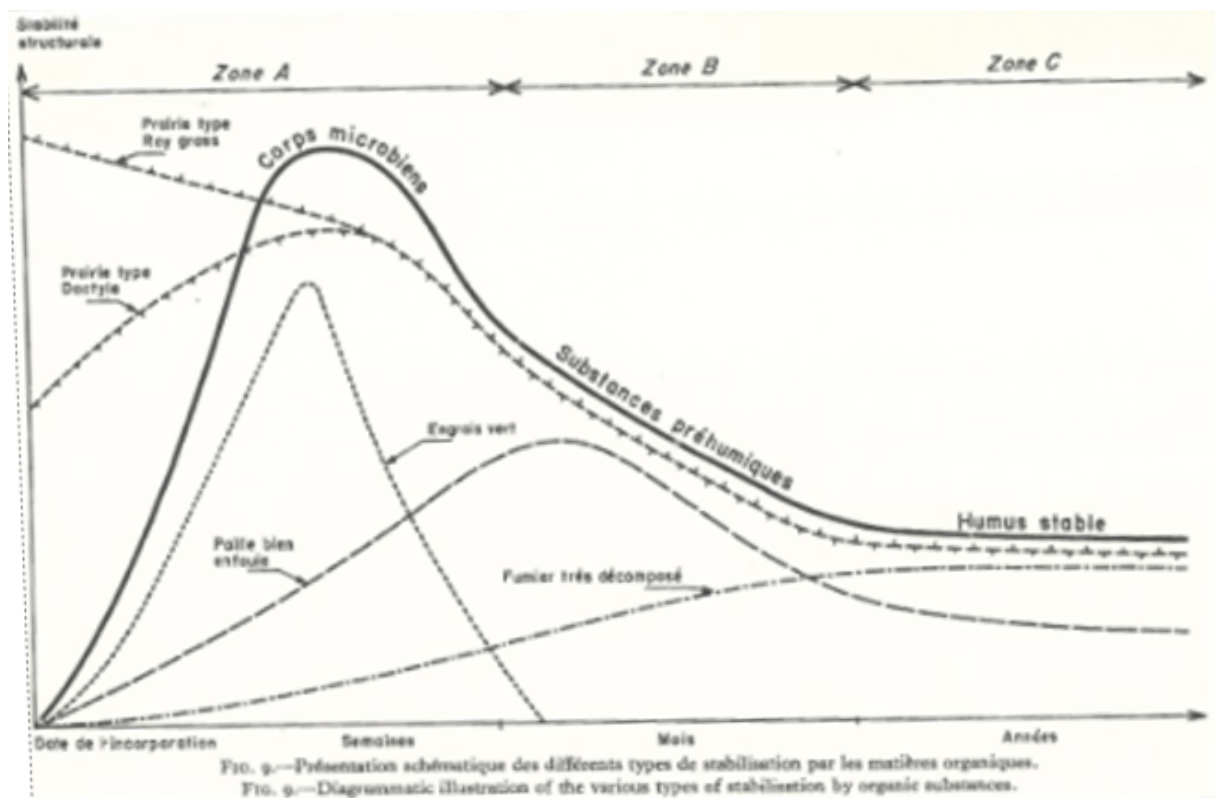


Figure 6 : Stabilité structurale du sol en fonction du temps selon une représentation schématique des trois types de stabilisation par les matières organiques (agents microbiens, produits pré-humique et humus stable) en phases successives, avec des exemples types de matières organiques agricole ayant un impact sur la stabilisation (engrais verts, paille bien enfouie et fumier très décomposé) (Monnier, 1965)

1.3.2.2. Sensibilité à la battance

Le terme « battance » est couramment utilisé pour parler de la dégradation de la structure des couches superficielles du sol par la pluie. Cette dégradation des couches superficielles se traduit par le passage d'un sol à l'état fragmentaire, poreux et meuble à un sol plus continu, plus compact et cohérent (Boiffin, 1984).

Les couches superficielles du sol sont le lien entre les cultures végétales et l'environnement physique qui les entoure, composé de l'atmosphère et du sol. Du fait de leur position, ces

couches sont continuellement soumises à des perturbations, qu'elles soient climatiques, biologiques ou anthropiques (Boiffin, 1984).

Le phénomène de battance est expliqué par les trois facteurs principaux (Bissonnais, 1995; Boiffin, 1984) que sont :

- agents externes (ici, la pluie) : les gouttes de pluie et leur impact peuvent avoir l'effet de fragmenter les agrégats et surtout de détacher les particules de surface mais cela nécessite une certaine énergie variable selon les sols.
- état fragmentaire initial : il est lié à l'intensité du travail du sol. Plus le sol est travaillé finement et plus le sol sera sensible à la battance.
- propriétés physique du sol : les propriétés physiques pouvant influencer la battance sont le type de sol (texture et composition) et l'état hydrique au moment de l'action de l'agent externe. Un sol saturé en eau a une résistance mécanique face aux gouttes de pluie moins importante. Ce qui provoque un détachement plus rapide des particules et une accélération du phénomène de battance.

La battance a un effet défavorable pour les activités agricole avec notamment (Bissonnais, 1995; Boiffin, 1984) :

- baisse de la conductivité des couches superficielles pour l'eau et le gaz
- diminution de la vitesse de réchauffement du sol
- augmentation du ruissellement induisant une érosion
- obstacle à la croissance ou à la levée impactant les rendements

L'action de la pluie qui conduit à la combinaison du détachement et du déplacement des particules de sol est souvent considérée comme la seule raison pouvant expliquer le phénomène de battance. Cependant, certains sols peuvent subir la désagrégation et la battance sans l'impact des gouttes de pluie, et cela *via* l'humectation du sol par d'autres phénomènes que la pluie (Bissonnais, 1995).

1.3.2.3. Compaction du sol

La compaction du sol peut se définir comme un réarrangement des constituants du sol, qui donne lieu à la formation de couches denses et à une modification de la géométrie des pores, sous l'effet d'une charge telle que les engins agricoles (Destain, 2013).

La compaction du sol peut aussi être exprimée par les termes « tassement » ou « compactage du sol ». Bien que certains auteurs voient une différence entre ces différents termes, une idée commune est que la pression exercée sur le sol tend à modifier la structure du sol (Odile *et al.*, 2013).

Certains sols sont plus sensibles à la compaction que d'autres par leur texture, leur teneur en eau (état hydrique), leur structure ou leur contenu en MO. De manière générale, la compaction des sols cultivés est influencée par les pratiques agricoles, principalement en ce qui concerne les horizons supérieurs. Les pratiques ont un impact sur les propriétés initiales du sol mais aussi sur les véhicules utilisés, ce qui va influencer les propriétés finales du sol (Figure 7). En Wallonie, la période sèche – d'avril à septembre – et la période humide – d'octobre à mars – ne présentent pas les mêmes sensibilités à la compaction (Derdour *et al.*, 1994; Destain, 2013; Odile *et al.*, 2013).

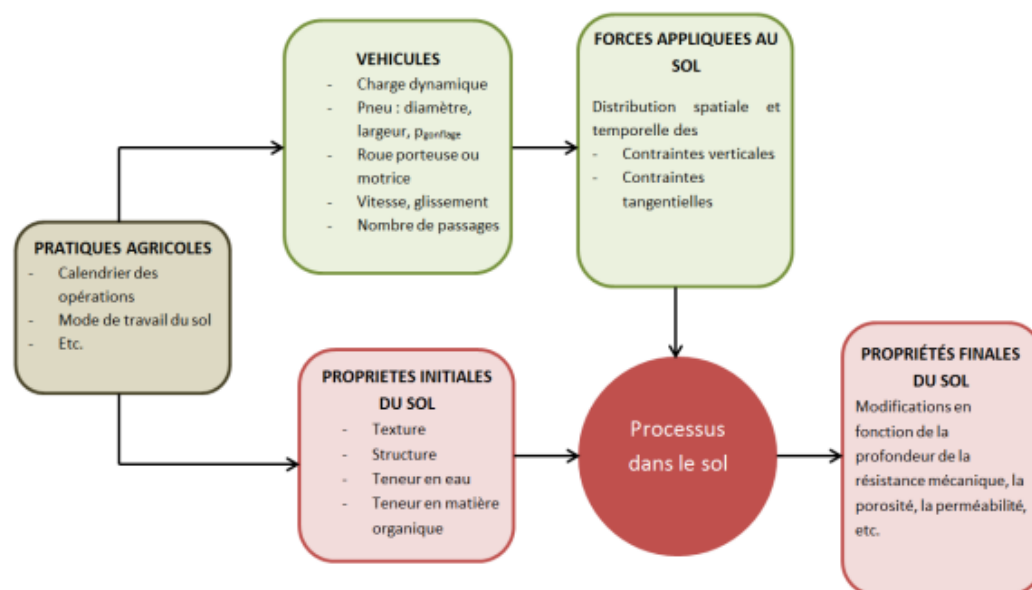


Figure 7: Relation schématique entre les propriétés initiales du sol, les forces appliquées sur celui-ci et ses propriétés finales (Destain, 2013)

La mesure de la compaction n'est pas aisée, couramment elle est identifiée *via* son opposé qui est la porosité du sol car l'atmosphère du sol sera le premier élément du sol affecté (Derdour *et al.*, 1994). L'intérêt de l'utilisation de la porosité pour mesurer la compaction est que l'espace entre les particules de sol est observable à l'œil nu, du moins les macropores (Odile *et al.*, 2013).

Une diminution de la porosité du sol conduit à des conséquences au niveau des cultures agricoles. Sans aération du sol, il n'y a pas de vie microbienne donc pas de minéralisation de la MO, un développement racinaire moindre avec des difficultés pour capter l'eau et les nutriments, une infiltration de l'eau réduite avec des conséquences de ruissellement et d'érosion. Cela conduit à une diminution des rendements ; ce qui est négatif pour les agriculteurs (Destain, 2013; Odile *et al.*, 2013).

Le phénomène de compaction est difficilement réversible par régénération naturelle mais la porosité des horizons supérieurs peut être rétablie par les travaux du sol. L'Union européenne considère la compaction comme un facteur majeur de la dégradation physique des sols (Destain, 2013; Odile *et al.*, 2013).

Il est tout de même plus facile d'éviter la compaction que de la résoudre. La prévention de la compaction pour la conservation des sols repose sur quatre piliers : les possibilités techniques (exemple : le télégonflage), la limitation de la charge des engins agricoles, l'adaptation des méthodes de travail (exemple : éviter de passer sur les champs lorsqu'ils sont détrempés) et la maîtrise de l'état physique des sols (exemple : *via* l'utilisation de couverts). Le Service public de Wallonie (SPW) a partagé un guide de bonnes pratiques pour éviter la compaction des sols agricoles wallons. Les idées clés de ce guide sont présentées à l'annexe 2. L'annexe comprend les caractéristiques d'un sol sensible à la compaction, les conséquences de la compaction d'un sol et les solutions afin de l'éviter (Destain, 2013).

1.3.3. Contrôle des adventices comme ennemis de la culture

Le contrôle des ennemis de la culture concerne tous les organismes qui peuvent avoir un impact négatif sur la culture, en ce compris les adventices. Seule la problématique liée aux adventices sera développée dans cette section car aucune mesure de SE liés aux organismes pathogènes n'est réalisée dans ce mémoire. Le terme adventice, ou mauvaise herbe dans le langage commun, se dit d'une « plante qui pousse spontanément dans une culture et dont la présence est plus ou moins nocive à celle-ci » (Larousse, 2022).

L'impact des adventices sur les cultures peut être qualifié de direct lorsqu'il concerne le potentiel de rendement, ou indirect lorsqu'il concerne par exemple une contamination de la récolte *via* des résidus d'adventices (Bonin *et al.*, 2019). Le principal impact direct des adventices sur les cultures est la compétition pour les ressources : l'eau, les nutriments et la lumière. Cette compétition peut mener à des baisses de rendement (Larbi, 2016). Selon Bonin *et al.* (2019), chaque espèce d'adventice impacte la culture à sa manière. Le tableau 2 reprend, pour différentes espèces classiques des grandes cultures, le nombre d'adventices par mètre carré suffisantes pour diminuer le rendement des céréales à paille de cinq pourcents. Les données se basent sur des études réalisées en Angleterre et en France dans les années 1980. Elles sont cependant à prendre avec prudence car elles dépendent fortement du climat, du potentiel de rendement et de la période de concurrence. Tout en étant liée aux dates de levée de la culture et des adventices. Les chiffres sont donc indicatifs et peuvent donner une bonne indication sur la possibilité de faire l'impasse sur l'un ou l'autre traitement herbicide à court terme. Mais le pouvoir multiplicateur des adventices est tel qu'à plus long terme, celles-ci affecteront le rendement (Bonin *et al.*, 2019).

Tableau 2 : Nombre d'adventices par mètre carré suffisantes pour diminuer le rendement des céréales à paille de cinq pourcents pour différentes espèces classiques des grandes cultures (Bonin *et al.*, 2019)

Nom vernaculaire de l'adventice	Nom binominal de l'adventice	Densité d'adventice impactant le rendement de la culture de 5% [plantes/m ²]
Gaillet	<i>Galium sp.</i>	1,8
Avoine folle	<i>Avena fatua</i>	5,3
Coquelicot	<i>Papaver rhoeas</i>	22
Camomille	<i>Matricaria recutita</i>	22
Ray-Grass	<i>Lolium sp.</i>	25
Vulpin	<i>Alopecurus myosuroides</i>	26
Stellaire	<i>Stellaria holostea</i>	26
Véronique de Perse	<i>Veronica persica</i>	26
Véronique à feuilles de lierre	<i>Veronica hederifolia</i>	44
Lamier	<i>Lamium sp.</i>	44
Myosotis	<i>Myosotis sp.</i>	66
Pensée	<i>Viola arvensis</i>	133
Alchémille	<i>Alchemilla vulgaris</i>	133

Au-delà de l'impact direct sur le rendement de la culture cultivée durant le relevé, il est important de prendre en compte également le pouvoir multiplicateur de la plupart des adventices pour évaluer leur impact sur la production agricole à plus long terme. Ces plantes ont généralement été naturellement sélectionnées pour se multiplier très fortement (plusieurs milliers de graines par plante) et rapidement (Bonin *et al.*, 2019).

Au niveau des impacts indirects, il faut donc retenir l'augmentation du stock de semences d'adventices pouvant limiter la capacité de production future. Il y a également la contamination des récoltes par des résidus d'adventices, les difficultés de récolte notamment avec des engins non adaptés aux adventices et enfin la capacité de certaines adventices à servir d'hôtes à des organismes pathogènes pour la culture (Bonin *et al.*, 2019).

Les terres agricoles sont très propices au développement des adventices. En effet, si les conditions sont idéales pour le développement des cultures (bon travail du sol et assez de nutriments), elles le sont également pour les adventices (Chauvel *et al.*, 2018). Le travail du sol influence donc les populations d'adventices. Le labour par exemple empêche le développement d'espèces ligneuses et herbacées à souches comme le Rumex (*Rumex sp.*) mais a moins d'effet sur les plantes annuelles qui ont leurs semences enfouies puis remontées à la surface au labour suivant dans des conditions idéales de germination. L'absence de travail du sol comme en semis direct diminue la présence d'adventices car les graines ne sont pas mises dans des conditions idéales de germination. Le type de sol, la compaction et les teneurs en éléments minéraux influencent le type d'adventice qui va se développer car chaque espèce est différente et a ses préférences (Chauvel *et al.*, 2018). Certaines cultures peuvent diminuer fortement les populations d'adventices, notamment par le recouvrement rapide et prolongé du sol. C'est le cas des prairies temporaires et surtout de la luzerne (*Medicago sativa*) (Munier-Jolain *et al.*, 2012).

Les pratiques de désherbage sont multiples et diffèrent entre l'agriculture biologique (AB) et l'agriculture dite « conventionnelle ». En AB, l'utilisation d'herbicides de synthèse est interdite. Les agriculteurs ont alors recours au désherbage mécanique ou thermique. En agriculture conventionnelle, le désherbage se fait généralement de manière chimique même si les désherbages mécaniques sont aussi utilisés notamment avec la méthode du faux semis¹ ainsi qu'occasionnellement les désherbages manuels.

1.4. Pratiques culturales

Les agriculteurs se classent souvent, eux-mêmes, selon le système de culture qu'ils mettent en place, qui correspond généralement au conventionnel, au biologique, à la conservation des sols ou encore à l'agroécologie apparue plus récemment. A l'intérieur de ces systèmes, un itinéraire technique est suivi par les agriculteurs et celui-ci est composé de PC (Robin, 2014). Les PC, ou pratiques agricoles, correspondent donc à l'ensemble des manières concrètes d'agir des agriculteurs (date de semis, profondeur de travail du sol, labour ou non, machines utilisées, choix des espèces implantées, ...). Elles ne sont pas réductibles à des règles mais sont bien des choix des agriculteurs en fonction de leurs objectifs et de leur situation propre (Milleville, 1987).

1.4.1. Impact des pratiques culturales sur les services écosystémiques

L'intensification des pratiques agricoles a un effet non négligeable sur la biodiversité et plus globalement sur l'écosystème qui est à l'origine des SE. La gestion des cultures représente donc un levier important pour la préservation et l'amélioration des SE (Chabert, 2017).

En fonction des PC, les fournitures de SE varient mais il est difficile d'établir des généralités même si des tendances existent. Une étude de Sandhu *et al.* (2015) observant les effets des SE de contrôle biologique des ravageurs et de minéralisation de l'azote a indiqué que la mesure de la fourniture de ces deux services était plus élevée en AB qu'en conventionnel. Le contrôle des ravageurs n'a d'ailleurs pas montré d'impact en conventionnel car les ravageurs y sont gérés chimiquement (Sandhu *et al.*, 2015). Selon une autre étude de Chabert (2020), les rendements (SE de provision) sont plus faibles en AB qu'en agriculture de conservation avec de très grandes variabilités au sein des parcelles en agriculture de conservation. La présence de bétail et par conséquent, l'utilisation d'effluents d'élevage, atténue les impacts négatifs de l'agriculture conventionnelle sur les SE (Chabert *et al.*, 2020).

Les impacts des PC sur les SE ont été confirmés par de nombreuses études. Un travail rassemblant les résultats de 113 études méta-analytiques concernant l'impact des pratiques sur des indicateurs de durabilité a identifié les impacts suivants (Young *et al.*, 2021):

- Un schéma de rotation culturale optimal (succession de cultures de printemps et d'hiver, diversité d'espèces dans la rotation...) et un travail du sol adapté (faux semis,

¹ Le faux semis consiste à travailler le sol de manière à favoriser la germination des adventices afin de venir les détruire par la suite.

désherbage mécanique...) permettent de réduire l'utilisation des pesticides, tout en évitant le développement de ravageurs.

- Les apports de matières organiques ainsi que l'utilisation de légumineuses et de céréales dans la rotation permettent d'améliorer la fertilité, la résilience² et la qualité structurale du sol. Ils permettent également de diminuer l'utilisation de fertilisants minéraux, de diminuer le lessivage de l'azote et d'augmenter le stock de carbone dans les sols.
- Le maintien d'une couverture du sol, la restitution des résidus de culture et la faible perturbation du sol permettent d'augmenter les teneurs en CO des sols, de diminuer la compaction et d'augmenter la biodiversité dans les sols.

Toujours selon la même étude, les pratiques ayant le plus d'impact sur les SE sont:

- La bonne gestion de la fertilisation par la règle des quatre R (right source, right rate, right timing, right placement) semble avoir le plus gros impact sur les rendements (SE de production végétale) ainsi que sur la volatilisation et la lixiviation de l'azote.
- L'application de biochar a le plus gros impact sur la teneur en CO du sol (SE de qualité structurale du sol et de fertilité du sol) mais il n'est pas utilisé dans ce mémoire car il n'est pas ou peu utilisé par les agriculteurs du réseau.
- L'utilisation de fertilisants organiques est le deuxième facteur ayant le plus d'impact sur la teneur en CO du sol (SE de qualité structurale du sol et de fertilité du sol). Il a également des effets positifs sur le rendement (SE de production végétale) mais ceux-ci sont visibles uniquement à partir de la deuxième année de culture sur laquelle ils sont appliqués à cause de la dynamique de décomposition de la MO.

Cette synthèse d'études a identifié une grande variabilité en fonction des contextes géographiques des méta-analyses utilisées (Young *et al.*, 2021). Dans ce mémoire, la région géographique et le type de sol ont été restreints afin de diminuer cette variabilité.

La plupart des pratiques citées entraînent des répercussions positives sur les SE mais elles peuvent parfois engendrer des diminutions de production. Dans de nombreux cas, les pratiques de conservation des sols ont par exemple montré des diminutions de rendement. Ce résultat doit tout de même être nuancé car certaines études travaillent sur des périodes d'expérimentations de deux ou trois années alors que les effets positifs des pratiques de conservation des sols peuvent mettre plus de temps à se concrétiser (Young *et al.*, 2021).

Il est utile de rajouter que, inversement, pratiquement tous les SE peuvent avoir un impact sur les cultures. Il est malheureusement très difficile de quantifier cet impact voir même de classer les SE en fonction de celui-ci. En effet, le climat, le type d'agriculture (conventionnel, conservation, biologique ...) et le type de sol exercent une influence sur le niveau d'impact des SE sur les cultures (Sandhu *et al.*, 2015).

² La résilience d'un sol est définie comme la capacité d'un sol à récupérer son intégrité structurale et fonctionnelle après une perturbation (Seybold *et al.*, 1999).

1.4.2. Indicateurs de pratiques culturelles

Comme dit précédemment, les agriculteurs sont souvent classés en fonction du système cultural qu'ils pratiquent (AB, conventionnelle, conservation...). Cependant cette classification ne prend pas en compte les choix individuels des agriculteurs et donc la variabilité au sein des systèmes (variabilité observée dans les données récoltées d'historique cultural). Pour se rapprocher au mieux de la réalité du terrain, il est important de tenir compte des pratiques culturelles précises des agriculteurs et non uniquement de leur système cultural.

Afin d'identifier les liens existants entre les pratiques culturelles et les SE, une solution est l'utilisation d'indicateurs qui permettent de mettre en chiffre ces pratiques. Ces indicateurs ont pour but d'évaluer le niveau d'intensification des pratiques des agriculteurs et cela à l'échelle souhaitée (de l'exploitation, de la parcelle...) (Chabert, 2017).

Il existe une grande diversité d'indicateurs mais il y a cependant un consensus (Chabert, 2017):

- Il n'y a pas d'ensemble unique d'indicateurs, leur choix dépend de l'usage que l'on veut en faire.
- Il est important de tenir compte du contexte des indicateurs.

Dans un contexte tel que celui de ce mémoire, le choix des indicateurs dépend de la disponibilité de l'information auprès des agriculteurs et de leur pertinence vis-à-vis de l'impact qu'ils ont sur les SE. La sensibilité des indicateurs par rapport aux pratiques qu'ils représentent doit donc être suffisante pour identifier des différences entre agriculteurs (Bockstaller *et al.*, 2008). Évidemment, dans l'idéal, les indicateurs doivent être faciles et pas trop chers à mesurer (Jangir *et al.*, 2019).

Les indicateurs sont calculés sur base d'informations fournies par les agriculteurs. Plusieurs données peuvent constituer un seul indicateur et de même, une donnée peut servir à calculer plusieurs indicateurs (Chabert, 2017). La donnée « fréquence de retour des cultures dont on récolte les parties souterraines dans la rotation » donne, par exemple, de l'information sur la diversité des espèces cultivées mais aussi sur l'intensité de travail du sol. En effet, ces cultures sont souvent récoltées dans des conditions météorologiques plus humides et causent des perturbations au niveau de la structure du sol comme du tassement et la formation de boue pouvant mener à un manque d'oxygène pour les microorganismes du sol (Cheesman, 2004). Ces perturbations sont liées aux fortes précipitations, à la faible évaporation de l'eau du sol et la faible évapotranspiration des cultures en automne rendant le sol plus humide et donc plus sensible aux passages d'engins agricoles³. De plus, les machines de récolte sont de plus en plus lourdes, déplacent d'importants volumes de terre et exportent une partie de la couche arable du sol pour extraire la production (Ruysschaert *et al.*, 2006).

³ Il est important de noter que des cultures récoltées hors sol en automne comme le maïs peuvent également avoir un impact sur la structure du sol si elles sont récoltées dans des conditions humides.

1.4.3. Durée optimale de récolte de l'historique cultural

Après avoir choisi des indicateurs, il faut décider le nombre d'années d'historique cultural à récolter auprès des agriculteurs. Il est donc légitime de se poser la question de la durée optimale de récolte d'historique permettant d'obtenir des résultats cohérents tout en diminuant au maximum la charge de travail liée à la collecte de ces données. Il existe peu de réponses à cette question dans la littérature. Généralement, les études définissent la durée de collecte de données en fonction de la longueur des rotations culturales, en fonction des premières données disponibles pour la zone étudiée ou en fonction du temps disponible pour l'expérience. La question du choix de la période de récolte de données est donc rarement approfondie et de grosses variabilités sont observées (Boeraeve, 2018; Chabert, 2017; Filser *et al.*, 2002; Moore, 1994).

Aucune étude concernant le nombre d'année d'historique agricole à collecter pour évaluer l'impact des pratiques sur les SE n'a été trouvée en réalisant la revue de la littérature pour ce mémoire. Cette question nécessite selon nous de considérer deux variables parallèlement :

- 1) **Le nombre d'années de collecte nécessaire pour être représentatif du « type » de pratiques appliquées dans un champ.** Par exemple, si un agriculteur a les mêmes types d'itinéraires techniques depuis 50 ans, il n'est probablement pas nécessaire de collecter 50 ans de données pour représenter ses pratiques agricoles typiques *via* des indicateurs. Un nombre d'années inférieur peut être largement suffisant. A l'extrême inverse, collecter une seule année de données rendra probablement les indicateurs de pratiques trop dépendants de l'espèce cultivée cette année-là. Ces indicateurs risquent de ne pas être représentatifs de l'itinéraire technique appliqué sur le champ à d'autres moments de la rotation.
- 2) **Le nombre d'années s'écoulant entre la mise en place d'une nouvelle pratique agricole et l'apparition de modifications quantifiables des flux de SE dues à ce changement.** Il est nécessaire de connaître la dynamique des processus liés aux SE pour connaître ce nombre d'années, qui changera en fonction de la pratique et du SE concernés. Les durées d'expériences en champ d'essai concernant l'impact des pratiques agricoles sur le fonctionnement de l'écosystème peuvent donner une idée du temps nécessaire pour observer ces changements dans les processus biologiques et donc le nombre d'années d'historique à récolter au minimum. Une constatation est que la plupart des études sur le sujet ont des durées d'expériences de cinq à dix ans (Filser *et al.*, 2002; Moore, 1994; Wardle *et al.*, 1999). Une étude australienne montre qu'après la mise en culture d'un écosystème naturel, la plus grosse diminution de carbone du sol se termine après environ dix ans mais ne se stabilise qu'après une cinquantaine d'années (Luo *et al.*, 2010).

Le choix de la durée de collecte la plus longue entre les deux variables citées ci-dessus devrait assurer le fait d'avoir des indicateurs de PC représentatifs de l'itinéraire technique des agriculteurs et reliables aux fournitures de SE mesurées en champ.

Le problème de ce raisonnement est qu'il se base sur le fait que l'agriculteur ne change pas ses pratiques pendant une certaine durée. Cependant, les agriculteurs améliorent continuellement leurs pratiques. Par exemple, par le simple fait de renouveler leur matériel, le travail du sol, l'application de produits phytosanitaires et la compaction due au poids du matériel vont changer. De plus, on voit en Wallonie une réelle envie des agriculteurs d'améliorer leurs pratiques. A titre d'exemple, l'asbl Greenotec qui a pour objectif de rechercher de nouvelles techniques culturales par et pour les agriculteurs a vu son nombre de membres passer de 10 en 2006 à plus de 230 en 2012 (Greenotec, 2022). Cette envie de changement se marque aussi en AB où le nombre d'exploitations bio est passé de 47 en 1990 à 1816 en 2019 (SPW, 2020). Dans les faits, il est donc très compliqué de trouver des champs cultivés de la même manière depuis de nombreuses années, *a fortiori* lorsqu'on s'intéresse aux pratiques agricoles alternatives et innovantes.

1.5. Objectif du mémoire

Comme ce mémoire s'inscrit dans la thèse de Lola Leveau, l'objectif du mémoire fait partie de l'objectif plus général de sa thèse qui vise à « identifier *via* une approche collaborative et multidisciplinaire si certains systèmes de grandes cultures appliqués actuellement dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse wallonne se rapprochent du modèle conceptuel théorique du remplacement des intrants issus de ressources non renouvelables par des SE, tout en maintenant au même niveau ou en améliorant les aspects liés aux dimensions économiques et sociales du métier d'agriculteur.rice». Lors de la thèse, 60 parcelles durant 3 années serviront pour les expérimentations. Ce mémoire s'intéresse aux 20 parcelles de la deuxième année.

De nombreux travaux ont été réalisés afin de comparer les systèmes culturaux (conventionnel, biologique, conservation des sol...). Ils ont permis de montrer les forces et les faiblesses de chacun des systèmes avec généralement pour objectif de favoriser un changement de système vers les systèmes plus écologiques et durables. Ces travaux ne prennent généralement pas en compte la diversité des agriculteurs au sein même des systèmes. Certains agriculteurs se trouvent dans un système mais sont, lorsque l'on observe les PC qu'ils mettent en place sur leurs parcelles, très proches d'un autre système. C'est pourquoi ce mémoire s'intéresse spécifiquement aux PC mises en place par les agriculteurs.

Afin de comparer les PC au niveau de leur fourniture en SE, une récolte de l'historique cultural des parcelles est nécessaire ainsi qu'une évaluation sur le terrain des différents SE.

Actuellement, très peu de recherches ont été réalisées afin de déterminer le nombre d'années d'historique cultural qu'il faut récolter pour être représentatif de l'impact des pratiques sur l'état actuel des SE. Le temps d'historique cultural à récolter dépend peut-être du SE observé ou de la rotation mise en place par l'agriculteur. Des éléments de réponse sont apportés dans ce mémoire.

L'objectif général du mémoire est d'identifier les liens existants entre les PC et les SE intrants sur les parcelles de culture du Brabant wallon avec un type de sol limoneux (Aba). Cet objectif général peut être décomposé en trois sous-objectifs spécifiques:

- quantification sur les parcelles des SE intrants *via* une méthodologie simple et utilisable ultérieurement par les agriculteurs
- analyse des liens existants entre les PC et les SE
- détermination du nombre d'années d'historique cultural à récolter auprès des agriculteurs afin d'observer les liens entre les PC et les SE

2. Matériels et méthodes

2.1. Travaux antérieurs au mémoire

2.1.1. Création d'un réseau d'agriculteurs

Lors de l'année 2019-2020, un réseau de 20 agriculteurs a été créé par L. Leveau dans le cadre de sa thèse. Les agriculteurs ont été choisis afin d'avoir une diversité maximale de systèmes de grandes cultures représentée dans le réseau. L'ensemble des systèmes utilisés en Wallonie y sont représentés : l'agriculture conventionnelle, biologique, raisonnée ou encore l'agriculture de conservation des sols et le non-labour.

Les objectifs de la création de ce réseau étaient, d'une part de créer un groupe collaboratif pour participer à la sélection des indicateurs et des méthodes de mesure des flux de SE, et d'autre part de fournir un ensemble de parcelles agricoles qui seront un support pour les expériences réalisées dans la thèse de L. Leveau.

Les agriculteurs du réseau se sont donc engagés à mettre à disposition chaque année une de leur parcelle cultivée en blé afin de réaliser des expériences et observations pendant 3 années consécutives. Ils ont également accepté de fournir les données complètes d'historique de ces parcelles ainsi que des informations générales sur leur exploitation. En échange, L. Leveau s'est engagée à fournir les résultats des expériences et observations réalisées sur les parcelles à tous les agriculteurs du réseau annuellement, à faire une réunion collective en fin de projet et à assurer l'anonymat des résultats. Il a aussi été convenu d'avertir les agriculteurs avant les passages en champ ainsi que de faire le minimum de dégât possible lors des passages.

2.1.2. Sélection des indicateurs de services écosystémiques et protocoles liés

Le point de départ pour la sélection des indicateurs de SE est une concertation entre L. Leveau, N. Biot, les agriculteurs du réseau et des scientifiques. Cela a permis d'identifier les indicateurs les plus intéressants pour les agriculteurs et les plus appropriés pour une évaluation sur le terrain *via* des mesures expérimentales (Leveau, 2020).

La méthode participative choisie est inspirée de la méthode décrite par Lebacqz *et al.* (2013). Grâce à cette méthode, 12 indicateurs de SE ont été sélectionnés. Certains d'entre eux sont mesurés cette année dans ce mémoire (Tableau 3). C'est le cas de :

- incorporation de MO en surface
- stabilité des agrégats dans l'eau
- résistance du sol à la compaction
- présence d'une croûte de surface
- compétitivité des adventices
- contenu du sol en carbone stable et labile

Les autres indicateurs seront calculés et mesurés par L. Leveau et J. Van den Broeck (mémoire UCLouvain).

Tableau 3 : Services écosystémiques étudiés, indicateurs utilisés et méthodes de mesures liées correspondantes de la thèse de L. Leveau. MO = Matière Organique

Services écosystémiques	Indicateurs sélectionnés	Méthodes de mesures correspondantes (Référence principale)
Fertilité du sol	Incorporation de matière organique (MO) en surface	Surveillance de cages à vers de terre (OPVT, 2015)
	Décomposition de MO incorporée	Taux de décomposition de sachets de thé (Keuskamp et al., 2013)
Qualité structurale du sol	Stabilité des agrégats dans l'eau	Test USDA d'immersion dans l'eau (Protensols, 2018)
	Résistance du sol à la compaction	Évaluation visuelle de la structure du sol (test VESS) (Guimaraes et al., 2011)
	Présence d'une croûte de surface (battance du sol par la pluie)	Surveillance de l'évolution d'une croûte de surface due à la pluie (Boiffin, 1984)
Régulation des ennemis de la culture	Prédation de graines d'adventices	Carte de prédation (graines de <i>Poa annua</i>) (Westerman et al., 2003)
	Compétitivité des adventices	Comptage des adventives (Cellier et al., 2017)
	Présence de maladies	Collecte de céréales et évaluation du taux de maladie (Protocole de la Clinique des Plantes de
Production culturale	Rendement en grain et en paille	Récolte et battage de la céréale mature (Boerave, 2018)
Régulations climatiques	Contenu du sol en carbone stable et labile	Fractionnement granulométrique de la MO à 20 µm (van Wesemael et al., 2019)
	Évolution du contenu en carbone	Collecte des analyses de sol existantes
Conservation de la diversité	Diversité cultivée (espèces et variétés)	Collecte de l'historique cultural des dix dernières années

Sur ce tableau, les méthodes et protocoles utilisés pour mesurer les SE sont également représentés. En plus de leur pertinence, les méthodes ont également été choisies avec l'objectif d'être pratiques et facilement utilisables par un agriculteur. Elles sont donc simples, peu coûteuses et rapides. Tous ces protocoles ont été sélectionnés par L. Leveau sur base des critères énoncés.

2.1.3. Mémoires antérieurs

Précédemment et également dans le cadre de la thèse de L. Leveau, deux autres mémoires ont été réalisés.

Lors de l'année 2019-2020, N. Biot a réalisé son mémoire de fin d'étude dont le sujet était la comparaison de méthodes d'évaluation du SE de la stabilité structurale des sols limoneux et sablo-limoneux de Belgique. Son objectif était de trouver un set d'indicateurs et de méthodes de mesure permettant d'évaluer l'impact des PC sur la fourniture de ce SE. Il a donc évalué la précision de méthodes de mesure liées à la structure du sol, il a notamment testé les méthodes VESS et USDA qui ont servies dans le cadre de ce mémoire pour mesurer la compaction du sol et la stabilité des agrégats (Biot, 2020).

Lors de l'année 2020-2021, Belin et Fockedey ont réalisé un mémoire collégial sur l'étude de l'impact des pratiques agricoles sur les SE dans la région limoneuse et sablo-limoneuse de Wallonie. Leur objectif était d'identifier les liens existants entre l'itinéraire cultural et la fourniture en SE intrants sur des parcelles de grandes cultures brabançonnaises. Ils sont intervenus lors de la première année de recherche expérimentale sur les parcelles du réseau d'agriculteurs de la thèse. Avec l'aide de L. Leveau et sur base des données fournies par Biot dans son mémoire, ils ont mené les expériences de cette première année en mettant au point ou en améliorant les protocoles d'expérience disponibles dans la littérature. Ces protocoles ont servi de base pour réaliser les expériences de ce mémoire qui fait partie de la deuxième année d'expérience de la thèse de L. Leveau (Belin and Fockedey, 2021).

2.2. Organisation générale

2.2.1. Choix des parcelles

Lors d'entretiens en automne 2021 chez chacun des agriculteurs du réseau, une parcelle a été sélectionnée afin d'avoir 20 parcelles expérimentales emblavées en froment d'hiver ou épeautre pour l'année 2021-2022. Certains des 20 agriculteurs du réseau de départ n'ont pas souhaité continuer la collaboration après la première année d'expérience. En plus de cela, lors de l'année 2020-2021, la proportion d'agriculteurs « conventionnels », par opposition aux agriculteurs plutôt « alternatifs » (*i.e.* agriculteurs n'étant pas en conventionnel), était trop grande. Afin de conserver 20 parcelles par année mais également de conserver une diversité d'agriculteurs, il a été demandé à certains agriculteurs « alternatifs » de fournir deux parcelles à la place d'une comme souhaité à l'élaboration du protocole d'expérience et un nouvel agriculteur est venu se joindre au réseau. Un tableau reprenant les numéros des parcelles ainsi que le système cultural selon lequel elles sont cultivées se trouve à l'annexe 3.

Les parcelles ont été choisies selon une série de critères :

- Se situer à moins de 40 minutes en voiture de Louvain-la-Neuve. Cela permet de passer un temps raisonnable sur la route entre les parcelles ; ce qui permet d'avoir plus de temps pour les expériences.
- Être assez grande que pour contenir un carré d'expérience d'une surface de 1 hectare, sachant que le carré ne peut se trouver à moins d'une largeur de pulvérisateur du bord des parcelles, ce qui correspond à la fourrière du champ. A ces endroits, il pourrait y avoir un double passage du pulvérisateur ce qui veut dire une double dose de produit ou d'engrais, ce qui apporterait un biais dans les expériences. Les bords de champs sont également un endroit où il y a un passage plus fréquent des engins agricoles et donc un tassement plus important.
- Être emblavée en froment d'hiver (*Triticum aestivum*) ou en épeautre (*Triticum spelta*)
- Posséder un historique cultural d'au moins dix ans de la parcelle.

Les carrés d'expériences ont été choisis selon des critères supplémentaires :

- Avoir un type de sol « Aba » : sols limoneux à horizon B textural et à drainage favorable selon la carte numérique des sols de Wallonie (SPW, 2015)
- Avoir une pente inférieure à 10% afin d'éviter les zones trop érodées amenant à une composition du sol différente
- Ne pas comporter de zone hétérogène connue par l'agriculteur (zone humide, zone du tas de betterave, zone anormalement tassée...)

2.2.2. Organisation temporelle des expérimentations

Travaillant sur des cultures de froment d'hiver ou d'épeautre, les expérimentations ont démarré lors des semis - de mi-octobre à fin novembre - et se terminent à la récolte - fin juillet à début août. Pour des raisons d'échéances, ce mémoire se termine avec les expériences d'avril, celles qui suivent jusqu'à la récolte ne sont pas incluses. La figure 8 reprend toutes les expériences et tâches réalisées dans ce mémoire.

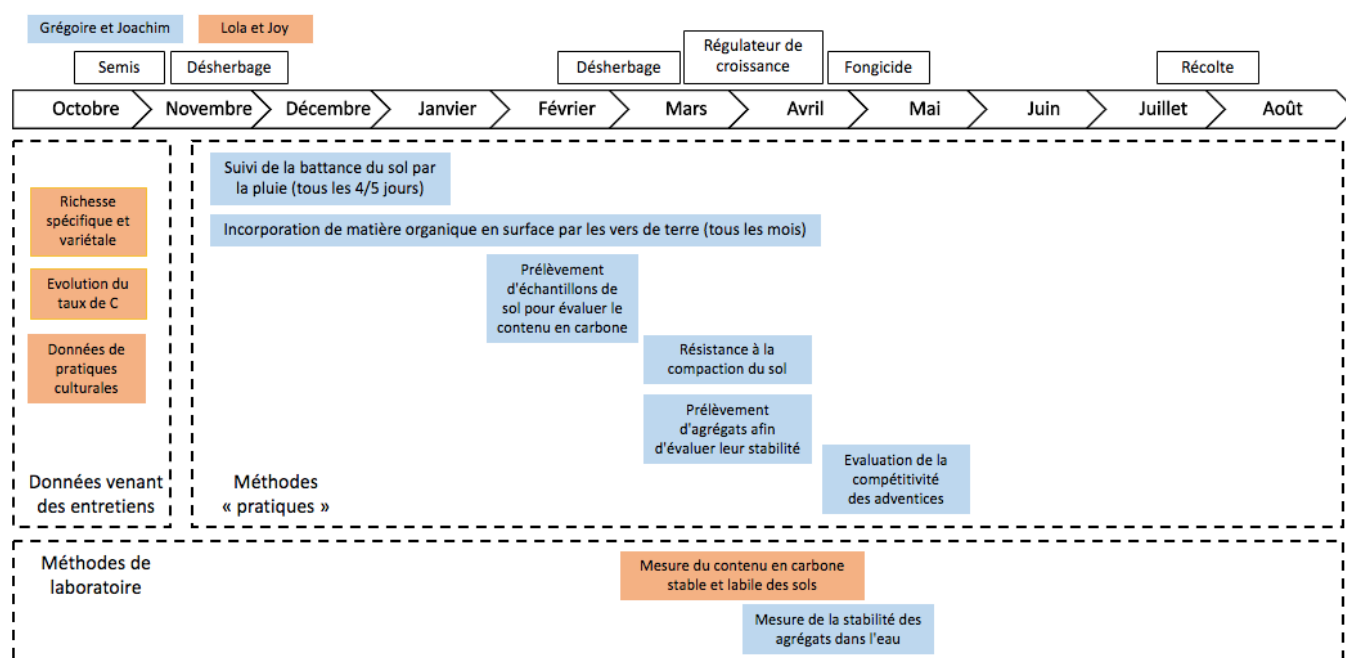


Figure 8 : Calendrier des expériences réalisées lors de l'année 2021-2022 avec les personnes en charge. Les principales actions qui sont réalisées sur la culture de céréale sont placées sur la ligne du temps (adapté de L. Leveau (2020))

2.2.3. Contact avec les agriculteurs

Le premier contact de l'année 2021-2022 avec les agriculteurs a été fait par L. Leveau afin de partager les résultats de l'année 2020-2021 avec ceux-ci et prendre le premier rendez-vous afin de choisir les parcelles pour l'année à venir. Ce premier rendez-vous a été réalisé en collaboration avec L. Leveau. Lors de celui-ci, en plus de choisir la parcelle de l'année, certaines informations étaient demandées comme la date du semis, la largeur du pulvérisateur, les zones à éviter dans la parcelle pour placer la zone d'expérience ou toute autre remarque que l'agriculteur jugeait bon de partager. En plus, une petite enquête de

satisfaction sur l'organisation de l'année précédente est réalisée. Il est également demandé que les agriculteurs préviennent dès que leur parcelle a été semée car il est important de placer les premières expériences juste après le semis (particulièrement la mesure de battance).

Le contact a été gardé tout au long de l'année afin que les chercheurs soient prévenus de tout problème avec la culture, par exemple un nouveau semis pour cause de levée anormale. Les agriculteurs ont également été prévenus avant chaque passage en champ des chercheurs.

Un deuxième rendez-vous a été prévu lors de la saison creuse de l'hiver afin de collecter l'historique cultural des dix dernières années. Ce dernier a été réalisé en collaboration avec L. Leveau et J. Van den Broeck.

2.2.4. Organisation du travail de terrain

Ce mémoire est réalisé en binôme, les expériences ont donc été réalisées en collaboration. Pour éviter un éventuel biais qui serait dû à un changement d'expérimentateur, il a été décidé que chaque expérience impliquant des analyses visuelles serait réalisée par une seule personne.

2.3. Collecte de l'itinéraire cultural et indicateurs utilisés

La collecte des données de l'historique cultural auprès des agriculteurs a été effectuée par L. Leveau. Celle-ci consiste principalement en la récolte de toutes les interventions effectuées sur la parcelle au cours d'une durée fixée, et des dates de ces interventions. La collecte de données est faite pour les dix années de culture avant le semis du froment ou de l'épeautre. Elle commence avec le premier travail de sol effectué pour l'implantation de la culture.

Les données récoltées suivantes couvrent une période de dix ans :

- type et profondeur des travaux du sol
- produits phytosanitaires utilisés
- type de couverts végétaux en interculture, en plantes compagnes ou en couverts semi-permanents, dates et méthodes de semis et de destruction
- ensemble des espèces cultivées
- fertilisants et amendements minéraux et organiques

Pour les agriculteurs qui ne pratiquent plus le labour, l'année du dernier labour est demandée même si celle-ci est antérieure aux dix ans d'historique collectés avec précision. D'autres informations complémentaires sont collectées comme l'année de conversion en AB pour les agriculteurs bio ou la présence de mesures agro-environnementales sur le champ.

Un tableau reprenant tous les indicateurs de PC calculés dans ce mémoire se trouve à l'annexe 4. Il s'y retrouve le nom des indicateurs ainsi que leur nom abrégé, le type de donnée obtenue, les unités et enfin la méthode de calcul afin d'arriver à ces indicateurs.

2.4. Création des plans d'expérience

La création des plans d'expérience a été inspirée du mémoire de Belin et Fockedey (2021). Les plans d'expériences sont réalisés *via* le logiciel QGIS (version 3.16). Ce logiciel permet de créer des plans expérimentaux. Dans le cadre de ce mémoire, il a été utilisé pour disposer les coins et le centre du carré expérimental ainsi que les différentes expériences. Le logiciel permet d'extraire les coordonnées GPS de ces points afin de les encoder dans un GPS de terrain pour les positionner sur la parcelle.

La première étape consiste à placer un carré expérimental de 100m de côté sur les parcelles en tenant compte des conditions citées au point 2.2.1. Pour ce faire, les données de la parcelle contenant les zones à éviter sont consultées (Figure 9). Le carré est généralement disposé de manière à être facile d'accès, même si ce n'est pas possible dans tous les cas. Dans la mesure du possible, sur base des vues satellites et de la largeur du pulvérisateur de l'agriculteur, les passages de roue sont dessinés afin d'éviter d'y installer des expériences.

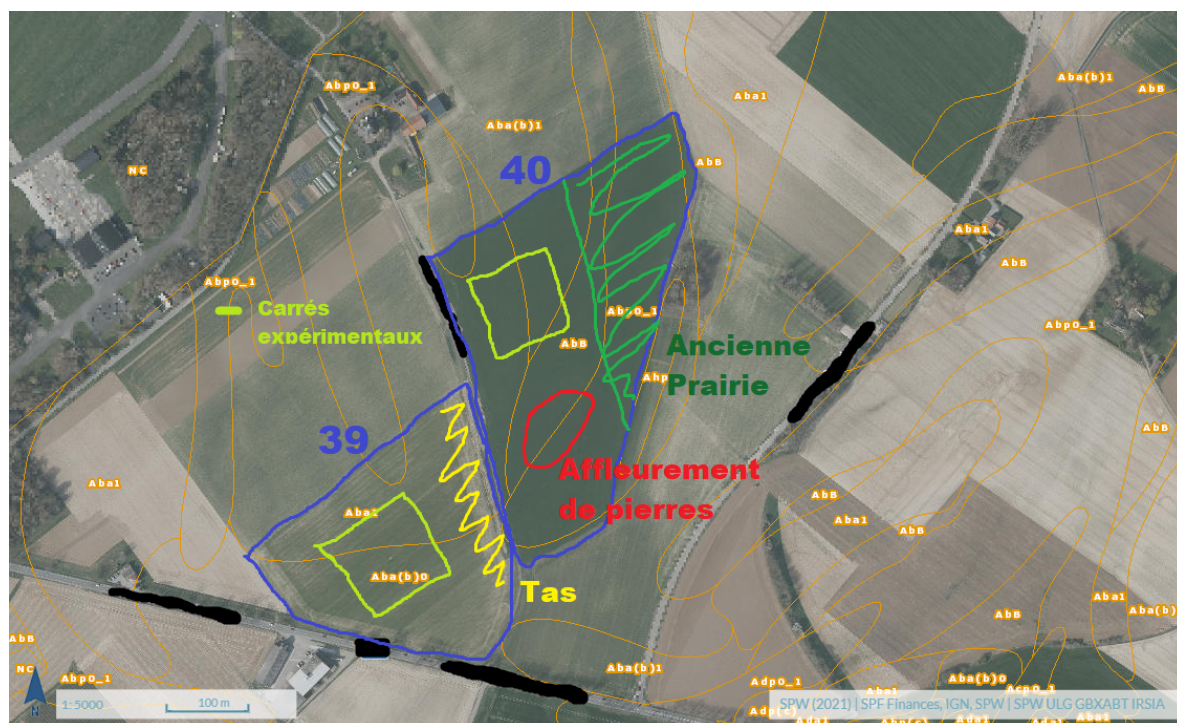


Figure 9 : Exemple de carte représentant les contraintes liées à l'installation des carrés expérimentaux dans les parcelles d'étude. Ces contraintes viennent des informations fournies par les agriculteurs. La localisation des parcelles est anonyme pour des raisons de RGPD (SPW, 2015)

Ensuite les expériences sont disposées de manière à être réparties le plus uniformément possible dans le carré. Les expériences sont placées de la même manière (triangle, carré, dans chaque coin, lignes parallèles ...) sur chaque carré afin de savoir les retrouver facilement sur le terrain (Figure 10). Pour les premières expériences réalisées dès l'automne (battance et VDT), elles ont été placées précisément sur le plan et cela à plus de 5 mètres des traces de pulvérisation car la précision du GPS est de 3 mètres. Lorsque les traces du pulvérisateur n'étaient pas encore marquées ni visibles, l'emplacement des traces a été estimé sur base des photos aériennes antérieures et des informations fournies par l'agriculteur. Les autres expériences ont été disposées directement sur le terrain sans l'utilisation du GPS en prenant comme repère les cages de VDT et les coins du carré expérimental. Cependant, elles sont reportées également sur les plans expérimentaux afin d'avoir une idée de la répartition dans l'espace et des numéros d'expérience en fonction de la position au sein du carré.

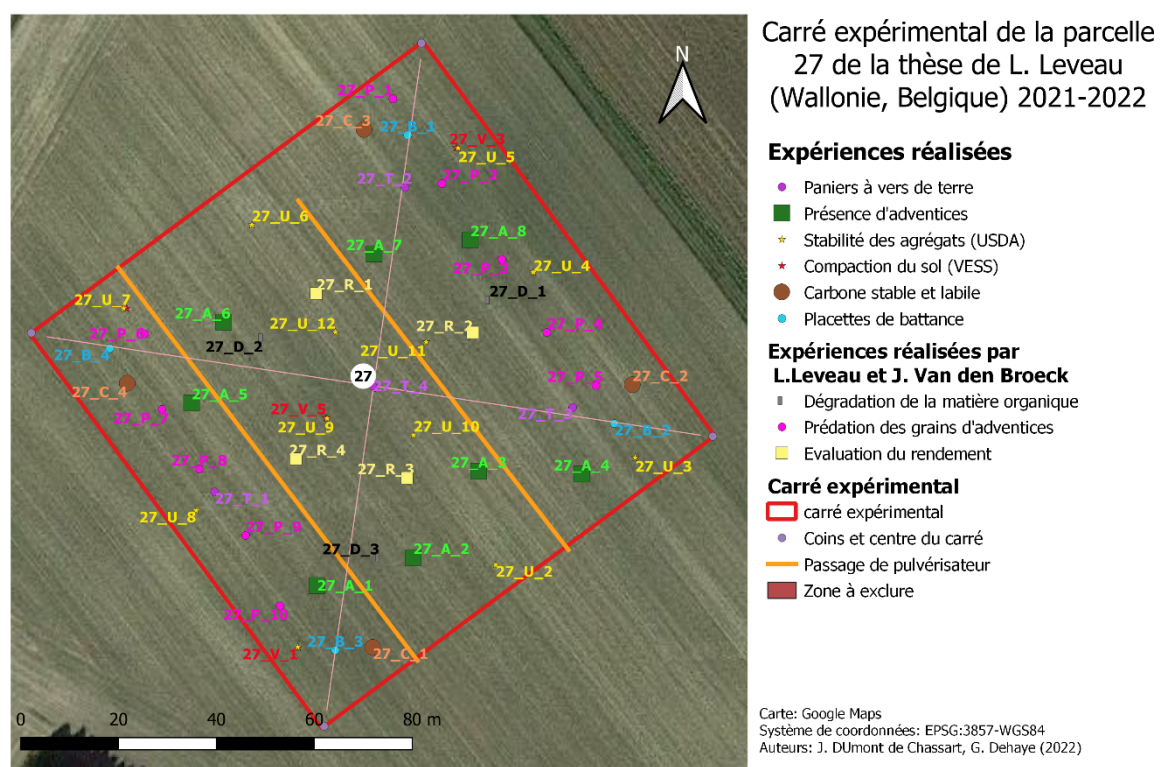


Figure 10 : Plan expérimental classique pour une parcelle sans contraintes. Les différentes expériences et leur position sont retrouvées. La position géographique de la parcelle n'est pas communiquée pour des raisons de RGPD.

Lorsqu'il n'était pas possible de respecter tous les critères de positionnement des carrés expérimentaux, une solution a été de changer la forme du carré et de l'allonger tout en gardant la surface de 1 hectare (Figure 11). Les parcelles 22 et 26 sont concernées par cette modification. Des zones nommées par l'agriculteur comme « à éviter » sont également présentes sur certains plans d'expérience lorsqu'il n'était pas possible de placer le carré autre part sur la parcelle (car un autre critère n'était pas respecté) (Figure 12). Ces zones modifient légèrement la répartition des placettes de prise de mesure par rapport aux carrés d'expériences complets.

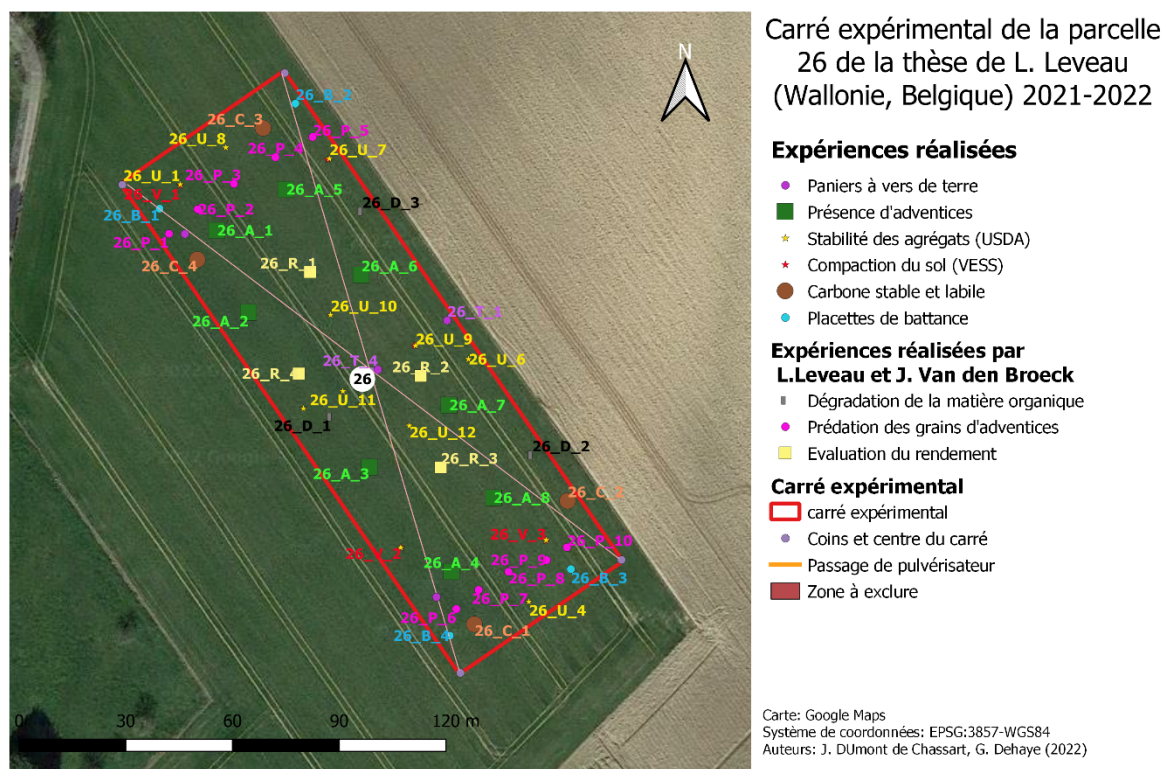


Figure 11 : Plan expérimental dont la forme a été modifiée en raison de bandes enherbées correspondant à des mesures agroenvironnementales. La position géographique de la parcelle n'est pas communiquée pour des raisons de RGPD.

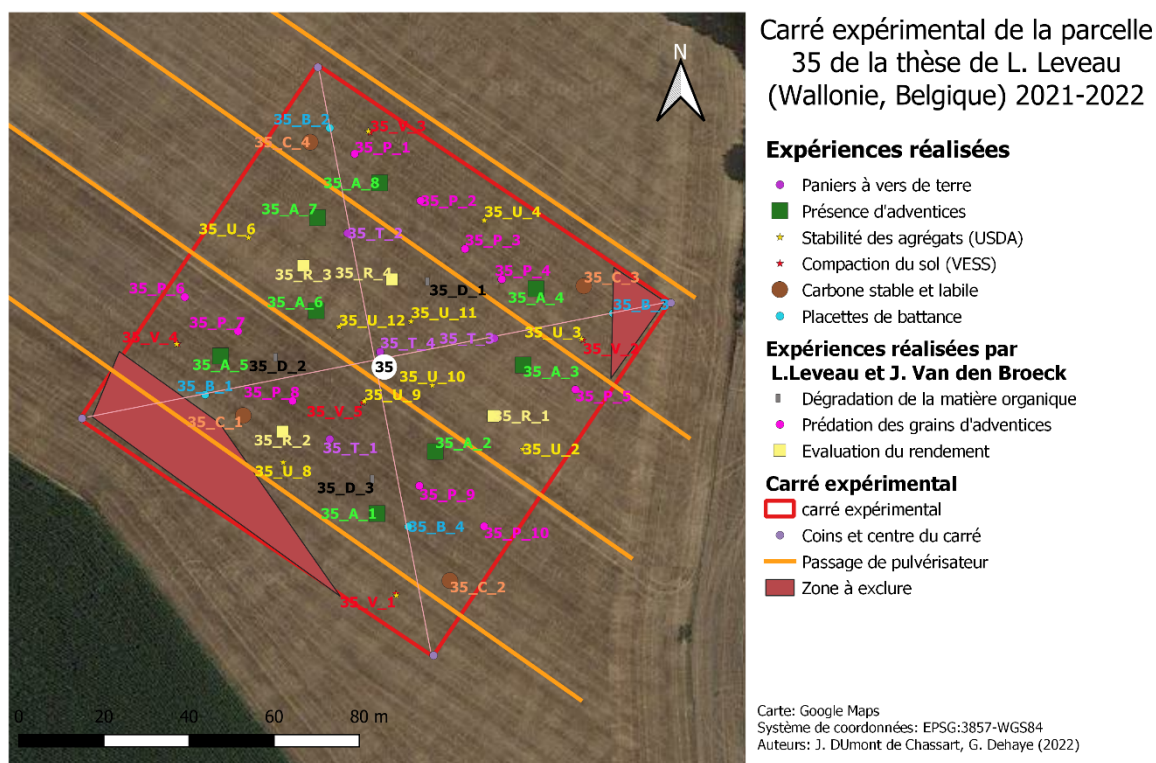


Figure 12 : Plan expérimental comportant des zones à exclure. Dans ce cas, il s'agit de zones trop proches des bords de parcelle. La position géographique de la parcelle n'est pas communiquée pour des raisons de RGPD.

L'optimisation du temps passé sur les parcelles lors d'une mesure est très important car cela permet de passer sur plus de parcelles sur une journée et donc la durée et la longueur des parcours. Pour s'y retrouver plus facilement dans les expériences, il a été décidé d'installer des piquets d'un mètre de haut aux coins et au centre du carré expérimental. Le même type de piquet a ensuite été utilisé pour indiquer l'emplacement des expériences sur les parcelles bio afin d'éviter que les agriculteurs n'endommagent celles-ci lors des désherbages mécaniques. Pour que le coût de ces piquets soit le plus faible possible, ils ont été fabriqués avec des gaines pour câbles électriques en PVC. Les piquets sont blancs et la partie supérieure a été peinte en rouge afin qu'ils soient visibles en début d'expérience lorsque la culture est vert foncé et en fin d'expérience lorsque le blé est jaune. Ces gaines ont été achetées en longueur de trois mètres et ont été coupées en tronçons d'un mètre. Un mètre de hauteur permet de les voir même lorsque la culture est totalement développée. Cependant, certains agriculteurs étaient gênés par les piquets pour leurs pulvérisations. Pour résoudre ce problème, les piquets ont été coupés en deux nouveaux piquets de 50 centimètres qui ne gêneront plus le pulvérisateur.

2.5. Description des protocoles et des indicateurs de service écosystémique associés

Les protocoles présents dans cette partie sont brièvement expliqués. Ceux-ci ont été créés par L. Leveau à partir des travaux de sa thèse afin de constituer une base de données interne du laboratoire "Protocoles PEPA" (Annexe 5). Les protocoles ont été améliorés lors de l'année d'expérience 2020-2021 (Belin et Fockedey, 2021). Des pistes d'amélioration ainsi que des fiches de terrain proposées par ces derniers ont été prises en considération dans ce mémoire. Les éventuelles améliorations apportées aux différents protocoles sont détaillées.

2.5.1. Services écosystémiques liés au sol

2.5.1.1. Incorporation de la matière organique

a. Objectif de la mesure

Pour mesurer l'incorporation de la MO dans le sol, le protocole utilisé est celui développé par l'observatoire participatif des VDT (EcoBioSoil, 2022b) . Il a été modifié l'année passée par Belin et Fockedey (Belin et Fockedey, 2021). Même si l'incorporation de MO dépend de plusieurs processus, ce protocole mesure l'incorporation de paille par les VDT à l'aide de plusieurs indicateurs.

b. Protocole

Le protocole OPVT prévoit l'installation à la surface du sol de quatre paniers à VDT par parcelle, disposés en ligne, à un mètre d'intervalle. Ces paniers sont réalisés avec un grillage à maille carrée d'environ 1 centimètre de côté, qui permet l'entrée des VDT, mais ni celle des oiseaux, ni celle des rongeurs. Les dimensions de ces paniers sont d'environ 50x30x10cm. Un des quatre paniers est un panier témoin, c'est-à-dire un panier dont les mailles de 2mm ne

permettent pas aux VDT de rentrer. Lors du mémoire de Belin et Fockedey (2021), il a été décidé d'espacer les paniers et de les disposer en forme de triangle équilatéral avec le panier témoin au centre. Cette disposition permettait d'être plus représentatif de l'ensemble du carré expérimental. A la fin de l'expérience, il avait été constaté que les paniers témoins n'apportaient pas d'information supplémentaires. Ils ont donc été remplacés par un quatrième panier expérimental, à maille de 1 cm, cette année. La disposition en triangle avec le quatrième panier au centre a été gardée.

Lors de l'installation sur la parcelle, les paniers ont été remplis avec cinquante grammes de paille coupée en tronçons de cinq centimètres. Cette longueur de paille permet à la fois de bien répartir la paille à plat dans les paniers mais aussi d'identifier facilement les cabanes sans pour autant que la paille ne sorte trop facilement du panier. La paille vient de parcelles en AB de la ferme expérimentale de l'UCLouvain (centre Alphonse de Marbaix).

Les mesures sur le terrain sont initialement réalisées tous les quinze jours à partir du semis de la céréale jusqu'à mi-avril (EcoBioSoil, 2022b). Lors de la campagne de mesures 2020-2021, les différences observées à chaque passage étaient minimales. C'est pourquoi cette année, les mesures ont donc été faites à un mois d'intervalle. Les mesures réalisées sont les suivantes :

- comptage du nombre de cabanes de VDT. Les cabanes sont sous forme de petites huttes de paille avec souvent un petit amas de terre au centre (Figure 13)
- comptage du nombre de turricules de VDT. Les turricules sont généralement reconnaissables à leur forme grumeleuse et peu anguleuse (Figure 14)
- surface du panier recouverte de paille



Figure 13 : Visualisation de cabanes de vers de terre
(J. Dumont de Chassart)



Figure 14 : Visualisation de turricules de vers de terre
(J. Dumont de Chassart)

Concernant les classes de la surface de recouvrement du panier par la paille, les dix classes de 10% d'écarts créées par Belin et Fockedey (2021) ont été utilisées. Une aide visuelle pour l'évaluation des classes de recouvrement a été créée et se trouve à l'annexe 6.

La mesure de la masse finale de paille a été rajoutée au protocole en cours d'expérience lors de l'année 2020-2021. La paille n'avait donc pas été séchée à l'étuve au préalable. Cette

année, afin de ne pas sécher les 50 grammes de paille des 80 paniers et d'éviter que la paille ne reprenne de l'humidité entre le séchage et la pesée, seulement trois sacs de cinquante grammes ont été séchés à l'étuve à 40°C pendant 48 heures. Une première pesée a été effectuée après 24 heures et une seconde après 48 heures afin d'observer si la paille était bien sèche. La paille n'a pas perdu de masse entre ces deux mesures, la paille a donc été considérée sèche après 24 heures. Les résultats ont montré que les trois sachets ont perdu environ 4 grammes chacun après séchage. Tous les paniers ont donc été remplis avec cinquante-quatre grammes de paille non séchée, correspondant approximativement à cinquante grammes de paille sèche. En fin d'expérience, la paille a été récoltée, séchée à l'étuve et puis pesée.

c. Indicateurs

Les indicateurs obtenus *via* le protocole des paniers à VDT sont les suivants :

- somme des cabanes des deux premiers mois (**T_cab2**)
- somme des cabanes des quatre premiers mois (**T_cab4**)
- somme totale des cabanes sur la période de récolte de données (**T_cabF**)
- somme des turricules des deux premiers mois (**T_tur2**)
- somme des turricules des quatre premiers mois (**T_tur4**)
- somme totale des turricules sur la période de récolte de données (**T_turF**)
- surface du panier recouverte de paille en fin d'expérience (**T_surf**)
- masse de paille restante en fin d'expérience (**T_poids**)

2.5.1.2. Teneur en carbone organique

a. Objectif de la mesure

Le protocole utilisé pour mesurer les teneurs en carbone organique (stable et labile) du sol est celui développé par le projet CARBIOSOL (Vincent *et al.*, 2019). Le carbone labile est le carbone récemment apporté et directement disponible pour les organismes du sol alors que le carbone stable est généralement plus ancien et est moins disponible pour les organismes. Cette mesure permet *via* le rapport carbone labile/stable d'évaluer si la parcelle est en phase d'augmentation ou de diminution de son contenu en carbone.

b. Protocole

Cette mesure ne dépend pas de la saison mais elle a été effectuée au printemps avant l'application des fertilisants sur la culture car certains agriculteurs (particulièrement en bio) appliquent des fertilisants organiques sur les terres. Ces fertilisants peuvent mener à un biais dans la mesure du CO.

Quatre échantillons de sols composites d'environ un litre ont été prélevés par parcelle. Chaque échantillon est composé de cinq prélèvements effectués en croix dans un cercle de

quatre mètres de diamètre, avec quatre prélèvements au bord du cercle et un au milieu de la croix. Le sol a été séché à l'air libre puis tamisé à 2 mm afin de ne garder que la terre fine.

Les prélèvements devaient initialement être faits à la tarière pédologique afin de constituer un échantillon composite mélangé dans un seau duquel on retire environ un litre de sol. Pour la suite des analyses, la densité apparente du sol devait être calculée. Suite aux remarques de B. Hardy (CRAW) lors de la défense de mémoire de Belin et Fockedey, il semble que la méthode de calcul de densité apparente apporte un biais dans le calcul des teneurs en CO des sols. Les prélèvements ont donc été effectués cette année à l'aide d'une gouge de diamètre connu (25mm) permettant directement de calculer la densité du sol *via* le volume prélevé. Les prélèvements ont été effectués sur une profondeur de trente centimètres. Le volume total par échantillon est donc d'environ 1,3 litres et aucun sous échantillon n'a dû être réalisé.

La suite du protocole a été réalisée en laboratoire par L. Leveau.

La terre fine a été divisée en deux fractions grâce à un tamisage à l'eau des échantillons de sol à travers un tamis de 20 μm . Chacune des fractions a ensuite été séchée à 70°C durant une semaine. Le contenu en carbone total de chaque fraction a été mesuré par combustion sèche avec la méthode Vario Max (MOCA, 2021). La présence de carbone inorganique dans les sols a été vérifiée en versant sur les échantillons une solution d'acide chlorhydrique. Le contenu en carbone inorganique des sols ayant réagi a ensuite été mesuré à l'aide d'un calcimètre à pression (MOCA, 2021). Les contenus en CO des deux fractions de sol ont été calculés en soustrayant le contenu en carbone inorganique du contenu en carbone total. Ce protocole permet de distinguer deux fractions de CO dans la terre fine :

- carbone stable, contenu dans le sol passé à travers le tamis de 20 μm
- carbone labile, contenu dans le refus du tamis (> 20 μm)

Le rapport carbone labile/carbone stable ($C_q = C_l/C_s$) permet de donner de l'information sur la dynamique de la MO dans le sol. Cela permet notamment d'identifier si le sol est en phase d'augmentation ou de diminution de son contenu en carbone. Un C_q élevé indique une augmentation du contenu en carbone du sol car cela signifie qu'il y a beaucoup de MO jeune apportée (C_l élevé) ou peut aussi être lié à un C_s faible. Dans le cas d'un changement de pratiques agricoles afin d'augmenter le contenu en carbone du sol, l'objectif va être d'augmenter fortement le C_q et cela en apportant de la MO qui va faire monter le C_l . Ensuite, le C_q va diminuer petit à petit car le carbone va se stocker et donc le C_s va augmenter.

c. Indicateurs

On obtient trois indicateurs :

- Contenu en CO stable du sol (**C_s [g/100g sol sec]**)
- Contenu en CO labile du sol (**C_l [g/100g sol sec]**)
- Rapport entre le carbone labile et le carbone stable, indicateur de la dynamique de la MO dans le sol (**C_q [-]**)

2.5.1.3. Stabilité des agrégats

a. Objectif de la mesure

La méthode utilisée est la méthode USDA décrite dans le projet Prosensols (UE-FEDER, n.d.). Celle-ci a été testée par Biot en 2020 (Biot, 2020) et améliorée par Belin et Fockedey lors de l'année 2020-2021 (Belin and Fockedey, 2021). Elle permet de mesurer la cohésion interne des agrégats en condition humide par le phénomène d'éclatement, ce qui est un bon indicateur de la structure du sol (Bissonnais, 1995).

b. Protocole

Le principe général de la méthode consiste à observer le comportement des agrégats de sol lors de leur immersion dans l'eau.

La méthode demande de prélever 12 agrégats d'un calibre de 0,5 à 1 cm par parcelle. Ils doivent être collectés à une profondeur comprise entre 0 et 1,5 cm de la surface du sol. En pratique les agrégats ont été prélevés sous la croûte de battance, leur profondeur variait donc entre 1 et 3 cm en fonction de l'épaisseur de cette croûte.

Les agrégats ont été séchés à température ambiante dans le laboratoire PEPA durant une semaine. Leur stabilité a été évaluée après une ou plusieurs immersions dans de l'eau distillée avec l'aide d'une classification attribuant à chaque agrégat un score de 0 (très instable) à 8 (très stable) (Tableau 4). Afin d'affiner la classification, deux classes ont été ajoutée par Biot (2020) au protocole initial dont le tableau se trouve à l'annexe 7.

Tableau 4 : Score de stabilité des agrégats obtenu après immersion dans l'eau distillée (adapté de Protensols (2012))

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

c. Indicateur

L'indicateur obtenu par la méthode USDA:

- score de la stabilité des agrégats dans l'eau (**U[-]**)

2.5.1.4. Évolution de la croûte de battance

a. Objectif de la mesure

Pour mesurer l'évolution de la croûte de battance, le protocole adapté de Boiffin (1984) a été utilisé. Il a pour but de caractériser au cours du temps l'état structural de la couche superficielle du sol qui subit l'action de la pluie. Cette couche superficielle a des effets au niveau agricole et environnemental qu'il est important de pouvoir contrôler ou anticiper.

b. Protocole

Sur chaque parcelle d'un hectare, quatre placettes de 35x50 cm destinées à la mesure de la battance ont été installées. L'installation consiste au placement de quatre piquets-cross aux coins d'un cadre en bois de 35x50 cm de dimension interne (Figure 15). Comme dit précédemment, celles-ci doivent être installées juste après le semis et avant la première pluie afin de pouvoir observer l'état fragmentaire initial du sol. En plus de cet état fragmentaire, le protocole de Boiffin nécessite des surfaces d'étude qui sont dépourvues de végétation et qu'aucun travail du sol ne soit réalisé entre le début et la fin des observations. C'est pourquoi, lors de la levée de la culture en place, un désherbage manuel est réalisé. Sachant qu'il est nécessaire pour les agriculteurs en AB de faire des désherbages mécaniques au printemps, l'observation des placettes se termine lorsque le premier passage est effectué.



Figure 15 : Exemple d'installation d'une placette de battance (G. Dehaye)

Cette année, le suivi des placettes de battance a été réalisé entre le 16 octobre 2021 et le 9 février 2022. Un passage a été effectué environ une fois par semaine et cela en fonction des épisodes pluvieux. Lors des périodes de fortes précipitations, un passage était effectué tous les 3-4 jours et lors des périodes plus sèches tous les 15 jours, voire plus s'il ne pleut toujours

pas. Lors de chacun des passages, une photo des 4 placettes était prise. Afin de faciliter les analyses ultérieures des photos, la placette a été divisée en 10 zones correspondant à 10% de la surface totale par de la fine corde (Figure 15). Les quatre zones dans le bas de la photo correspondent à des surfaces de 5% et sont donc groupées par deux afin d'avoir les 10 zones de 10%.

Les mesures réalisées *via* cette expérience sont les suivantes: (1) la répartition initiale des calibres d'agrégats, (2) l'évolution de la surface de plaque, (3) l'évolution du diamètre (mm) du plus petit agrégat non incorporé à la plaque (Dmin). En plus de ces mesures, la récolte des données pluviométriques est nécessaire.

En effet, le protocole demande une récolte des données pluviométriques afin de caractériser l'évolution de la croûte de battance en fonction de la pluie cumulée. Pour ce faire, le CRA-W a créé et mis à disposition du public en 2020 un outil en ligne permettant d'avoir accès à des données météorologiques et celui-ci a été utilisé pour ce mémoire. La plateforme en ligne s'appelle Agromet (CRA-W, 2022) et est utilisable gratuitement pour tous les agriculteurs, les étudiants ou toute autre personne à des fins non professionnelles. Il est notamment possible d'y trouver des historiques de données pluviométriques appartenant au réseau de station météo Pameseb. Il est possible d'exporter les données aux dates souhaitées sous format Excel ou csv qui seront utilisables par la suite par le logiciel de statistique R. Pour chaque parcelle, les données pluviométriques qui seront utilisées seront celles de la station météo la plus proche. La distance entre les parcelles et la station la plus proche ainsi que le nom de cette station se trouvent dans le tableau 5.

Tableau 5 : Distance entre les parcelles expérimentales et la station météo du réseau Pameseb la plus proche.

Parcelles	Station Pameseb	Distance (km)
21	Baisy-Thy	13,55
22	Baisy-Thy	7,93
23	Leuze	8,39
24	Louvain-la-Neve	1,81
25	Leuze	8,89
26	Baisy-Thy	9
27	Baisy-Thy	1,28
28	Roux-Miroir	3,12
29	Leuze	9,96
30	Baisy-Thy	9,96
31	Roux-Miroir	5,17
32	Sombreffe	4,15
33	Sombreffe	2,33
34	Roux-Miroir	5,22
35	Roux-Miroir	6,29
36	Louvain-la-Neve	4,54
37	Louvain-la-Neve	6,37
38	Louvain-la-Neve	1,21
39	Roux-Miroir	2,81
40	Roux-Miroir	3,07

Le protocole demande que l'état initial du sol soit fragmentaire afin d'observer correctement l'évolution de la battance du sol par la pluie. Certains agriculteurs du réseau, notamment ceux travaillant en agriculture de conservation des sols, sèment leurs froments selon la technique du semis direct. Les champs semés avec cette technique ne sont pas travaillés lors du semis et ne présentent donc pas un état fragmentaire (Figure 16). Afin de simuler un travail du sol, les placettes destinées à l'observation de la battance sur ces champs ont été travaillées manuellement (Figure 17). Il en est de même pour les parcelles sur lesquelles il n'a pas été possible de placer l'expérience avant la première pluie.



Figure 16 : État initial du sol de la parcelle 24 (G. Dehaye)



Figure 17 : État du sol de la parcelle 24 après un travail manuel (G. Dehaye)

c. Evolution de B_Dmin

Le premier élément calculé est Dmin, il représente le diamètre (mm) du plus petit agrégat distinct de la croûte de battance encore présent à la surface du sol. La méthode utilisée a été adaptée de la thèse de Boiffin (1984).

Lors de chaque passage en champ, le Dmin de chaque placette est calculé *via* l'utilisation d'un pied à coulisse. Afin de faciliter la détermination du Dmin, certains critères ont été déterminés au niveau de la forme et la position de l'agrégat.

- forme: l'agrégat doit se démarquer nettement des surfaces alentours *via* au moins un de ses cotés
- position: les agrégats situés à l'abris de la pluie pour une raison quelconque ne sont pas pris en compte

Pour évaluer le Dmin, il faut trouver au moins quatre agrégats de même calibre présents sur la placette (Figure 18). Lorsqu'il n'est pas possible de trouver ces quatre agrégats, la moyenne des quatre plus petits agrégats est prise en compte. La mesure se termine lorsqu'il n'y a plus d'évolution du Dmin pendant trois passages consécutifs malgré les pluies, lorsque l'agrégat le plus petit dépasse un diamètre de 40 mm ou encore lorsqu'il n'y a plus quatre agrégats distincts sur la placette.

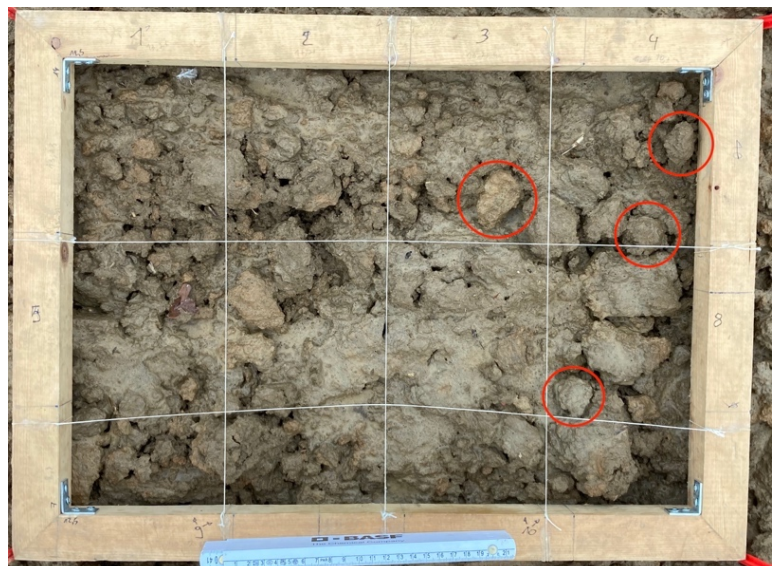


Figure 18 : Exemple des quatre plus petits agrégats utilisés pour calculer le Dmin (G. Dehaye)

Cette année, la mesure n'a pas été réalisée en champ comme le suggère Boiffin (1984) mais à posteriori *via* les photos prises sur le terrain car les conditions climatiques de l'hiver

rendaient difficile la mesure en direct. L'analyse des photos a été réalisée *via* le logiciel GIMP (Version 2.10.30) à l'aide d'un jeu de gabarit (Figure 19). Il a été considéré que le plus petit agrégat visible a un diamètre minimum de 1mm. Pour chaque photo, le calibre des 4 plus petits agrégats a été mesuré. La moyenne de ceux-ci a été calculée et est considérée comme représentative du Dmin de la placette au moment de la prise de la photo. Un exemple du tableau d'encodage des données pour Dmin se trouve à l'annexe 8.



Figure 19 : Exemple d'une placette de battance et des gabarits utilisés pour la détermination du Dmin *via* le logiciel GIMP (G. Dehaye)

Les valeurs de Dmin obtenues tout au long de l'expérience pour chaque placette ont été mises en relation avec la pluie cumulée dans un graphique. Les points pour lesquels Dmin est supérieur à 40 mm sont supprimés ainsi que les points dont la pente faible faisait supposer à un effet de plateau. Une droite de régression de la courbe obtenue pour chaque placette est ensuite tracée. La pente de la droite de régression est calculée afin de donner l'indicateur B_Dmin unique pour chaque placette qui s'exprime en mm d'agrégat par mm de pluie.

d. Calcul de B_Dlim

Le deuxième élément lié à la battance qui est calculé dans le cadre de ce mémoire est Dlim. Il correspond au diamètre (mm) du dernier agrégat incorporé dans la croûte de battance au moment de l'observation.

Contrairement à la méthode directe pour calculer Dmin, la méthode utilisée pour calculer Dlim est une méthode indirecte. Pour le calculer, il est nécessaire de calculer deux éléments : la surface couverte par les différents calibres d'agrégats de l'état initial du sol et l'évolution de la surface de la plaque de battance au cours de l'expérience. Ces deux éléments sont détaillés aux points suivants.

i. Répartition initiale des calibres d'agrégats

Pour caractériser l'état initial du sol, une mesure de la répartition des différents calibres d'agrégats présents à la surface du sol a été réalisée. Pour ce faire, la proportion de la surface couverte par des calibres d'agrégats inférieurs ou égaux à 2, 5, 10, 20, 30, 40 et 50 mm a été évaluée.

Sur le champ, lors du placement des placettes d'expériences, les proportions d'agrégats inférieurs à 2, 5 et 10 mm ont été estimées, avec l'aide du cadre en bois divisant la surface en zones de 10% et d'un gabarit divisant chaque zone en surface de 1%.

Plus tard, les photos de l'état initial du sol ont été analysées visuellement avec l'aide du logiciel GIMP (Version 2.10.30) afin de déterminer les autres proportions de calibres d'agrégats. Les mêmes gabarits que ceux utilisés pour calculer Dmin ont été employés (Figure 19). Cette mesure étant très chronophage, il a été décidé de ne calculer la répartition des agrégats que sur 50% de la surface (un rectangle sur deux), sachant que ces 50% sont suffisamment représentatifs de l'ensemble de la placette.

Afin de compléter le travail de Boiffin (1984), certaines classes ont été ajoutées l'année passée (Belin et Fockedey, 2021). Les classes ajoutées sont: "NA" (Non-Agrégat), "A1.0" et "E" (Erreur). La classe NA est divisée en 3 sous-classes: "NS" (surface sombre), "NL" (surface lisse) et "NM" (surface de MO). Ces dernières ont été rajoutées afin de pouvoir calculer la surface des zones non couvertes par des agrégats. La classe A1.0 représente tous les agrégats plus petits que 10 mm de calibre. L'erreur (E) a aussi été rajoutée afin de mesurer le pourcentage de la placette qui n'aurait pas été pris en compte lors des analyses. Cette dernière est calculée en faisant la différence entre A1.0 et S1. Lorsque celle-ci était plus grande que 0,75%, une nouvelle analyse de la répartition initiale des agrégats était réalisée. Un tableau reprenant toutes les classes se trouve à l'annexe 9.

Un exemple de courbe de la distribution initiale des calibres d'agrégats pour la placette 1 du champ 23 se trouve à la figure 20. Sur le graphique, un point est pris pour exemple afin de montrer comment cette courbe permet de déterminer le Dlim avec l'aide de la surface de plaque. La suite de l'exemple se trouve au point suivant.

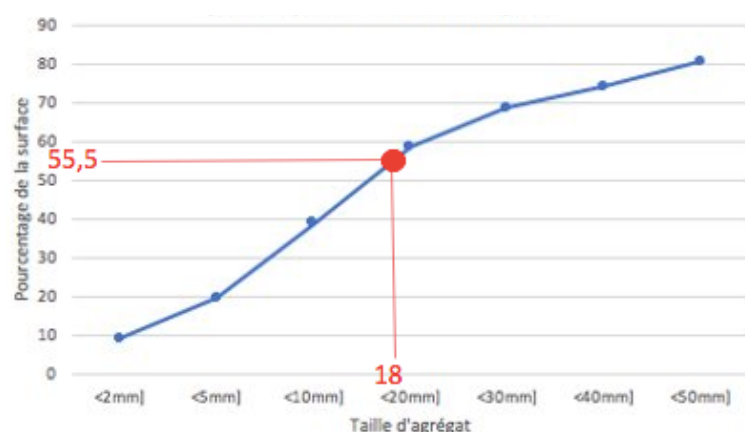


Figure 20 : Distribution initiale des calibres d'agrégats de la placette 1 du champ 23. Avec un exemple de détermination de Dlim via le graphique.

ii. Évolution de la surface de plaque

La mesure de la surface de plaque au cours du temps a pour objectif, avec la répartition initiale des calibres d'agrégats, de calculer Dlim. Le calcul de la surface de plaque a été réalisé à partir des photos. La plaque se caractérise par une zone homogène de la surface du sol où les agrégats ont "fondu" et se sont associés pour former ensemble cette plaque.

Tableau 6 : Classes de surface de sol battu utilisées pour l'évaluation de la surface de plaque (L. Leveau, 2020)

Classe	Surface de sol battu [%]	Valeur médiane
0	0 à 5	2,5
1	6 à 25	15,5
2	26 à 50	38
3	51 à 75	63
4	76 à 95	85,5
5	96 à 99	97,5
6	100	100

Cette mesure a été mise en place et réalisée par L. Leveau. La méthode se base sur un système de classes (Tableau 6) avec une aide visuelle dont un exemple se trouve à l'annexe 10. Chacun des 10 rectangles correspondants à 10% de la surface de la placette ont été évalués indépendamment *via* le logiciel GIMP. Pour chacun des rectangles, une classe est déterminée et la valeur

médiane de la classe est attribuée au rectangle. Ensuite, la moyenne des rectangles permet de calculer la valeur de la surface de plaque pour la placette et ceci est réalisé pour chaque photo prise aux différents passages en champ (une photo correspond à un passage et donc une date).

Il est donc possible avec cette méthode de calculer le pourcentage de la surface de la placette couverte par une plaque au cours du temps pour la placette 1 du champ 23 (Tableau 7). Considérant que les petits agrégats présents à la surface fondent plus rapidement pour former la plaque, il est possible de lier la courbe de distribution initiale des calibres d'agrégats (Figure 20) et les valeurs de pourcentage de surface de plaque (Tableau 7) afin de calculer Dlim. Par exemple, la surface de plaque de 55,5 pourcents correspond au calibre du dernier agrégat incorporé dans la plaque de 18 mm. Les valeurs de Dlim dans le tableau 7 sont des estimations faites pour l'exemple.

Tableau 7 : Évolution du pourcentage de la surface de plaque au cours du temps pour la placette 1 du champ 23. Avec l'estimation des Dlim correspondant calculés à partir de la figure 20.

Date	Champ	Pacette	Pourcentage de la surface couverte par un plaque	Estimation de Dlim
17/11/21	23	1	3,8	1
24/11/21	23	1	3,8	1
28/11/21	23	1	10,3	3
3/12/21	23	1	55,5	18
8/12/21	23	1	75,2	42
17/12/21	23	1	88,05	50
27/12/21	23	1	88,55	50
18/01/22	23	1	92,25	50

Une fois les valeurs de Dlim obtenues, la procédure est la même que celle utilisée avec Dmin. Les valeurs de Dlim sont mises en relation avec la pluie cumulée pour obtenir une courbe unique par placette. Les points dont la valeur du Dlim est supérieur à 40 mm et lorsqu'un effet de plateau était supposé ont été retirés. Sur base des courbes obtenues, une droite de

régression a été tracée pour chaque placette et la pente de cette droite a donné l'indicateur B_Dlim qui s'exprime en mm d'agrégat/mm de pluie, ce qui correspond donc à la vitesse de progression de la croûte de battance.

e. Indicateurs

Les deux indicateurs de battance obtenus sont :

- évolution de la taille du plus petit agrégat non-incorporé à la croûte de battance en fonction de la quantité de pluie (**B_Dmin [mm d'agrégat/mm de pluie]**)
- évolution de la taille du plus grand agrégat incorporé à la croûte de battance en fonction de la quantité de pluie (**B_Dlim [mm d'agrégat/mm de pluie]**)

2.5.1.5. Compaction du sol

a. Objectif de la mesure

Pour mesurer la compaction du sol, la méthode utilisée est la méthode VESS. Son nom vient de l'anglais "Visual Evaluation of Soil Structure". Comme son nom l'indique, elle permet de faire une évaluation de la structure du sol, donc pas uniquement de la compaction, *via* une approche visuelle. La méthode a été mise au point par Guimarães *et al.* (2011), qui se sont inspirés de Ball *et al.* (2007).

b. Protocole

Sur chaque parcelle, cinq prélèvements ont été effectués (un à chaque coin et un au centre) et cela en dehors des passages de roues où le sol est anormalement compacté.

A l'aide d'une bêche, un bloc de terre de 10 x 20 cm de surface et 30 cm de profondeur a été extrait et couché sur un sac blanc afin de bien le distinguer du sol. Ce bloc a été divisé en couches de composition homogène. La profondeur des couches a été mesurée et une cote, en fonction du type de structure, a été attribuée à chaque couche selon la classification VESS⁴. La méthode VESS prévoit une classification des sols en cinq classes, allant d'un sol friable avec la cote de 1 à un sol compact avec la cote de 5 (Tableau 8, Annexe 11). Il a été décidé d'inclure des classes intermédiaires (1,5 ; 2,5 ; 3,5 ; 4,5) afin d'affiner la précision de la cote. Les critères utilisés sont la friabilité (facilité à briser la couche), la porosité, la forme des agrégats et l'apparence générale du sol et des agrégats.

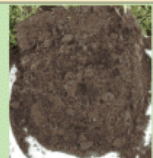
La notion de couche de composition homogène est assez abstraite. Il a donc été décidé que, dès lors qu'une des distinctions suivantes était retrouvée, les couches étaient considérées comme différentes :

⁴ Il existe également une application développée par l'HEPIA (haute école de Genève) qui apporte une aide à l'évaluation visuelle de la structure du sol. Elle est disponible sous android et iOS et se nomme "VESS - Évaluation visuelle structure du sol". Celle-ci n'a pas été utilisée cette année.

- une séparation physique entre les couches se marque lorsque le bloc est couché sur le sac
- une différence de couleur est observable
- une pression manuelle permet de séparer les couches
- une observation visuelle et manuelle permet de distinguer les couches au niveau de la composition granulométrique et de la résistance à la séparation des agrégats

Après avoir obtenu une cote par couche, la moyenne pondérée des cotes en fonction de la profondeur des couches a été calculée pour chaque bloc extrait à la bêche. Ensuite, la moyenne par parcelle a été calculée.

Tableau 8 : Partie du tableau de la classification VESS montrant les caractéristiques d'un sol de score 1. Le tableau en entier est présent à l'annexe 11 (Ball *et al.*, 2007 ; Guimarães *et al.*, 2011)

Qualité de la Structure	Taille et Apparence des Agrégats	Porosité Visible et Racines	Apparence après rupture : divers sols	Apparence après rupture : même sol, différentes modalités de travail du sol	Traits distinctifs	Apparence des fragments (naturels ou obtenus par rupture) de ≈ 1.5 cm de diamètre
Sq1 Friable Agrégats friables entre les doigts	La plupart des agrégats < à 6mm après émiettement.	Très poreux. Les racines ont colonisé le sol.			 Agrégats Fins	 L'action de briser le bloc est suffisante pour les relever. Les gros agrégats sont composés de plus petits, maintenus par les racines.

c. Indicateur

L'indicateur obtenu pour la méthode VESS est le suivant :

- classe représentant la compaction du sol selon la méthode VESS (**V[-]**)

2.5.2. Service écosystémique lié aux ennemis de la culture

2.5.2.1. Pression des adventices

a. Objectif de la mesure

L'objectif de cette mesure est de mesurer l'efficacité des PC dans la gestion des adventices. Le protocole utilisé est inspiré du projet CASIMIR (CAractérisation SIMplifiée des pressions biotiques et des Régulations biologiques) développé par l'INRA (Cellier *et al.*, 2017). Il a été modifié par Belin et Fockedey (2021) et réadapté cette année.

b. Protocole

Le protocole prévoit l'observation des adventices sur huit placettes de 16 mètres carrés dans chaque parcelle. Il propose également d'évaluer des surfaces d'un mètre carré au sein de ces placettes lorsque la densité d'adventices est trop élevée pour les compter sur seize mètres carrés. Lors de la période de floraison de la culture, le protocole prévoit de récolter et peser la biomasse de la culture et des adventices séparément pour évaluer la compétition entre celles-ci. Cette dernière mesure n'a pas été réalisée car elle intervient trop tardivement dans la récolte de données et est trop compliquée à mettre en place logistiquement à cause des grandes quantités de biomasse à faire sécher.

Le protocole CASIMIR propose d'effectuer deux observations, une en sortie d'hiver et une deuxième au printemps :

La première observation a pour but d'évaluer le taux d'infestation potentiel avant tout traitement herbicide (mécanique ou chimique) et permet d'identifier le type d'adventices dans la banque de graines. Cette observation a été faite lors de la campagne de mesures 2020-2021 mais n'a pas été répétée cette année. En effet, certains agriculteurs effectuent des traitements herbicides déjà en automne, ce qui empêche de réaliser une mesure avant traitement.

La deuxième observation permet d'identifier la densité, la diversité, l'espèce et le stade phénologique des adventices après les traitements herbicides, afin d'évaluer l'efficacité des PC pour gérer les adventices mais aussi afin d'estimer la compétition entre les adventices et la culture.

Concernant l'indicateur de densité des adventices sur les parcelles, le protocole initial (Cellier *et al.*, 2017) prévoit d'employer des classes de densité pour faciliter les comptages. Cependant, vu les faibles densités d'adventices présentes dans la plupart des parcelles étudiées, des valeurs exactes de densité ont été utilisées à la place des classes afin d'être plus précis. La densité est mesurée par espèce et l'indicateur de densité totale représente la somme des densités de chaque espèce par placette.

Pour calculer l'indicateur de diversité des adventices, les espèces sont simplement additionnées pour chaque placette. Afin d'observer la variabilité entre placettes, le nombre d'espèce est calculé par placette. Et pour les analyses statistiques, en vue d'évaluer les corrélations avec les PC, le nombre d'espèces différentes est calculé par parcelle.

L'indicateur de compétition, quant à lui, est calculé sur base d'un coefficient de compétitivité qui dépend du stade phénologique des adventices. Cet indicateur a été créé par Belin et Fockedey (2021). Cependant, les coefficients ont été modifiés cette année pour mieux tenir compte de la compétitivité des jeunes plantes car les coefficients ne prenaient que le potentiel d'ensemencement en compte (Tableau 9).

L'indicateur de compétitivité représente la compétition entre la culture et les adventices pour les nutriments mais aussi le risque d'ensemencement pour les années futures. En effet, une adventice au stade plantule fin avril a peu de chance de produire des graines fertiles avant la récolte de la culture ; soit parce que son cycle de croissance est trop long, soit parce qu'elle sera étouffée par la culture qui se développe fortement à partir du mois de mai. Le coefficient "repousse" a été supprimé cette année car il n'apportait pas d'information sur la gestion des adventices. Les repousses sont donc comptées cette année parmi les autres adventices. Un coefficient plante compagne a été ajouté car ces plantes ne sont volontairement pas détruites par l'agriculteur. Ces plantes ne sont pas prises en compte lors du calcul de densité et de diversité des adventices. Elles sont par contre comptabilisées selon leur stade phénologique et prises en compte lors du calcul de l'indicateur de compétitivité.

Tableau 9 : Représentation des coefficients de compétitivité en fonction du stade phénologique des adventices. La colonne orangée représente les coefficients de l'année 2020-2021 qui ont été modifiés (Belin et Fockedey, 2021).

Classes phénologiques	Stade phénologique	Coefficient de compétitivité proposés cette année	Anciens coefficients de compétitivité (Belin et Fockedey, 2021)
CO	Plante compagne	Voir stade phénologique	Repousse = 0
A	Plantule	0	0
B	Jeune plante	0,2	0
C	Plante adulte	0,6	0.5
D	Floraison	1	1
E	Grenaison	1	1

La compétitivité des adventices est calculée en faisant la moyenne du produit de la densité d'adventices par le coefficient de compétitivité associé à leur stade de développement pour les huit placettes d'un champ.

$$A_{comp}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{j=8} A_{den}(ij) \cdot CoefficientPhéno(ij)}{8} \quad [\text{plante compétitive /m}^2]$$

c. Indicateurs

On obtient les trois indicateurs suivants :

- densité des adventices (**A_den [plante/m²]**)
- diversité d'adventices (**A_div [plante]**)
- compétitivité des adventices (**A_com [plante/m²]**)

2.6. Analyses statistiques

Tous les indicateurs obtenus ont été d'abord visualisés *via* Excel et ensuite analysés par le logiciel de statistique R.

Premièrement, des analyses descriptives des indicateurs de PC ont été réalisées. Pour cela, des histogrammes ont été construits pour visualiser la distribution des indicateurs de PC.

Deuxièmement, les indicateurs de SE ont également fait l'objet d'analyses descriptives afin de visualiser la distribution générale des résultats ainsi que la distribution par parcelle de l'ensemble des indicateurs de SE.

Troisièmement, des analyses multivariées ont été réalisées sur l'ensemble des indicateurs. Ces analyses permettent de classer les données et d'identifier les liens existants entre les indicateurs. D'abord, une analyse uniquement sur les indicateurs de SE a permis d'observer les corrélations entre ceux-ci. Ensuite, une analyse sur l'ensemble des indicateurs - SE et PC - a permis de calculer les corrélations existantes. Pour visualiser celles-ci, trois types d'analyses ont été réalisées : des analyses en composantes principales (ACP), des classifications hiérarchiques sur composantes principales (HCPC) et des matrices de corrélations. Les ACP sont des méthodes d'analyse fréquemment utilisées qui permettent d'étudier des ensembles

de données multidimensionnelles avec des variables quantitatives. En pratique, il s'agit d'une méthode qui projette les observations d'un espace à p dimensions avec p variables vers un espace à k dimensions ($k < p$), appelées composantes principales, de manière à conserver le maximum d'information (variance totale) des dimensions initiales (XLstat, 2022). Les HCPC consistent en la réalisation d'un clustering (rassembler les individus avec des caractéristiques communes) sur base de la position des individus dans l'espace dont les dimensions sont les composantes principales de l'ACP. Enfin, une matrice de corrélation est, tout simplement, une matrice des coefficients de corrélation statistiques calculés sur plusieurs variables prises deux à deux (Baudot, 2022).

Pour terminer, les indicateurs de PC ont été calculés pour des durées de cinq et deux ans. Ces indicateurs seront comparés avec ceux obtenus pour une durée d'historique cultural de dix ans *via* une analyse descriptive. Pour cela, des ACP, des HCPC et des matrices de corrélations ont à nouveau été réalisées pour chaque période d'historique cultural afin d'identifier si les classifications évoluent avec le nombre d'années d'historique récoltées.

3. Résultats

3.1. Introduction

Les résultats présentés dans cette partie correspondent à des statistiques descriptives et non inférentielles. Les résultats ne permettent donc pas de tirer des conclusions à une échelle plus globale que le réseau d'agriculteur qui a servi pour les observations. Cependant, les résultats obtenus devraient permettre dans le cadre plus large de la thèse de L. Leveau d'observer des tendances et pourraient participer dans les années à venir à d'autres études qui permettront de tirer des conclusions plus globales.

3.2. Résultats des analyses des indicateurs de pratiques culturales

Représenter les indicateurs de PC, calculés pour une durée d'historique cultural de dix ans, sous forme d'histogramme (Annexe 12) permet de bien visualiser les données quantitatives pour l'ensemble des champs.

De manière générale, il y a une grande variabilité dans les résultats pour chaque indicateur. Ceux-ci sont comparés aux indicateurs de SE par la suite.

3.3. Résultats des analyses des indicateurs de service écosystémique

Dans cette section, les indicateurs de SE seront observés et décrits. D'abord, d'un point de vue général et ensuite, tous les indicateurs seront analysés indépendamment.

3.3.1. Visualisations des résultats

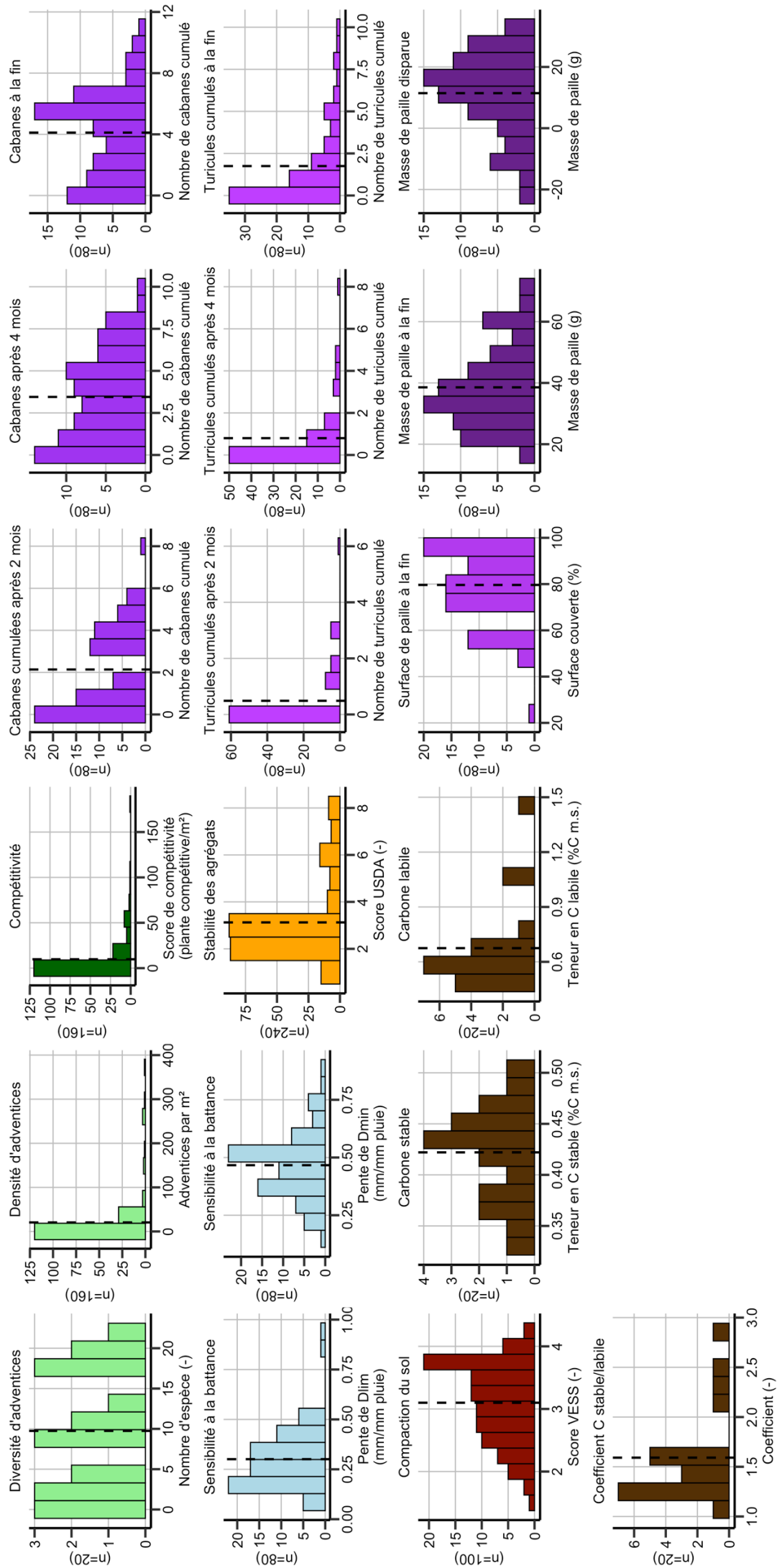
Tous les indicateurs de SE sont représentés dans le tableau 10 ci-dessous. Ils y sont décrits avec des paramètres statistiques standards : minimum, maximum, médiane, moyenne, quartiles, nombres de relevés et écart-type. Dans l'ensemble, les données sont distribuées selon une assez grande variabilité, tant au niveau des résultats par indicateurs (Tableau 10) qu'au niveau des distributions des données sur les histogrammes (Figure 21).

La figure 21 montre tous les indicateurs de manière plus visuelle *via* des histogrammes. Cette représentation est complétée par l'annexe 13 qui présente les boîtes de Tukey, où on peut voir la variation interne des parcelles, et par l'annexe 14 qui montre les QQ-plots, qui permettent de tester la normalité des données. Les deux annexes n'utilisent que les indicateurs qui ont plus d'une répétition par parcelle, ce qui exclut les indicateurs de carbone et l'indicateur de diversité d'adventices. Ces graphiques ainsi que le tableau 10 sont utilisés dans la suite pour l'analyse descriptive indépendante de chaque indicateur.

Tableau 10 : Résumé des indicateurs de services écosystémiques sous forme de paramètres statistiques standards. Chaque couleur est associée à une expérience. Le total de relevés (n) correspond au produit du nombre de parcelles (20) par le nombre de répétitions par parcelle.

Services écosystémiques	Indicateurs	Abréviations	Total des relevés	Minimum	Quantile1	Médiane	Quantile3	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Pression en adventices	Score de compétition des adventices [plante/m²]	A_com	160	0	0	0,24	8,4	180,8	9,8	22,9
	Score de densité des adventices [plante/m²]	A_den	160	0	0,063	0,88	18,5	372,1	20,4	54,6
	Score de diversité d'adventices [plante]	A_div	20	0	3	8,5	17,3	22,0	9,8	7,1
Evolution de la croute de battance	Taux d'augmentation de Dlim [mm d'agrégat/mm de pluie]	B_dlim	80	0,044	0,188	0,275	0,373	0,899	0,301	0,149
	Taux d'augmentation de Dmin [mm d'agrégat/mm de pluie]	B_dmin	80	0,152	0,373	0,482	0,539	0,891	0,467	0,144
Stabilité des agrégats	Score de stabilité des agrégats [-]	U	240	1	2	3	3	8	3,1	1,7
Compaction du sol	Score de compaction du sol [-]	V	100	1,5	2,6	3,1	3,7	4,2	3,1	0,6
Teneur en carbone organique du sol	Teneur en carbone labile [% C m.s.]	C_l	20	0,47	0,53	0,59	0,68	1,44	0,67	0,25
	Coefficient labile/stable [-]	C_qfrac	20	1,07	1,25	1,49	1,61	2,85	1,59	0,49
	Teneur en carbone stable [% C m.s.]	C_s	20	0,33	0,39	0,43	0,45	0,51	0,42	0,05
	Nombre de cabanes apparues en 2 mois [cabane]	T_cab2	80	0	0	2	4	8	2,1	2,0
Incorporation de la MO par les vers de terre	Nombre de cabanes apparues en 4 mois [cabane]	T_cab4	80	0	1	3	5	10	3,5	2,7
	Nombre de cabanes apparues en fin d'expérience [cabane]	T_cabf	80	0	1	4	6,3	11	4,1	3,0
	Poids de paille disparue en fin d'expérience [g de paille]	T_delta	80	-19,7	4,1	13,5	22,0	35,2	11,4	13,6
	Poids de paille en fin d'expérience [g de paille]	T_poids	80	14,8	28,0	36,6	45,9	69,7	38,6	13,6
	Surface du panier recouverte de paille en fin d'expérience [%]	T_surf	80	20	70	80	92,5	100	79,6	16,6
	Nombre de turricules apparues en 2 mois [turricule]	T_tur2	80	0	0	0	0	6	0,5	1,1
	Nombre de turricules apparues en 4 mois [turricule]	T_tur4	80	0	0	0	1	8	0,8	1,4
	Nombre de turricules apparues en fin d'expérience [turricule]	T_turf	80	0	0	1	2,3	10	1,8	2,4

Figure 21 : Histogrammes des indicateurs de service écosystémique. La ligne verticale en pointillé correspond à la moyenne. Chaque couleur est associée à une expérience (voir tableau 10). Le total de relevés (n) correspond au produit du nombre de parcelles (20) par le nombre de répétitions par parcelle.



Grâce aux boîtes de Tukey de l'annexe 13, il est observable que les moyennes entre parcelles sont bien différentes pour l'ensemble des indicateurs de SE. Cette observation est confirmée par un test de Kruskal-Wallis, test d'égalité des moyennes entre parcelles, qui nous dit que la moyenne d'au moins une parcelle est significativement différente d'une autre ($p\text{-val} < 0,05$) (Annexe 15).

3.3.2. Résultats par expérience

Les résultats seront repris dans cette partie par expérience et également situés par rapport aux valeurs présentes dans les protocoles lorsque celles-ci sont disponibles, sachant bien évidemment que les conditions d'expérience sont différentes des conditions dans lesquelles les protocoles ont été réalisés.

3.3.2.1. Incorporation de la matière organique (T_...)

Les indicateurs utilisés pour caractériser l'incorporation de la MO par les VDT sont au nombre de neuf. Les trois premiers portent sur les cabanes, les trois suivants sur les turricules et les derniers sur la surface de paille et le poids de paille en fin d'expérience.

A propos des indicateurs de cabane, les valeurs sont assez aléatoires. Les tendances au niveau des boîtes de Tukey de l'annexe 13 qui peuvent s'observer avec T_cab2 se retrouvent avec T_cab4 et T_cabf. Cela veut dire qu'une parcelle n'ayant pas de cabane après deux mois ne va pas en avoir beaucoup en fin d'expérience et inversement, une parcelle ayant beaucoup de cabanes après deux mois, en aura encore beaucoup en fin d'expérience car c'est un résultat cumulatif. Ce résultat cumulatif provoque que la moyenne de T_cabF est plus grande que celle de T_cab4, qui est également plus grande que T_cab2. La variabilité à l'intérieur des parcelles est moyenne mais est très faible lorsqu'il y a peu de cabanes.

Les indicateurs concernant les turricules ont une distribution assez similaire, avec des valeurs en moyenne assez faibles pour la majorité des parcelles et quelques outliers⁵. Tout comme pour les cabanes, les moyennes augmentent au cours du temps ce qui est dû au résultat cumulatif. La moyenne de T_turf est plus grande que T_tur4, qui est plus grande que T_tur2, ce qui est encore une fois normal. Lorsque le nombre de turricules par parcelle augmente, la variabilité dans la parcelle augmente également.

L'indicateur de surface de paille en fin d'expérience n'est pas d'une grande variabilité, la majorité des paniers se trouvent autour de la moyenne qui est d'environ 80 pourcents. Il y a cependant une grande différence entre le minimum (20%) et le maximum (100%), même si les paniers avec une surface de paille de moins de 50 pourcents en fin d'expérience sont très peu nombreux.

⁵ Un outlier vient de l'anglais et correspond à une valeur aberrante (pas nécessairement liée à une erreur de mesure).

Il y a deux indicateurs qui concernent le poids de paille : la masse de paille en fin d'expérience (T_{poids}) et la masse de paille disparue en fin d'expérience ($T_{\text{delta}} = 50 - T_{\text{poids}}$). Ces deux indicateurs sont très liés car l'un est calculé à partir de l'autre. Selon l'annexe 14, ils suivent une distribution normale. Il y a une grande variabilité dans les données entre les parcelles, alors que celle-ci est assez faible à l'intérieur des parcelles. On peut voir dans le tableau 10 une valeur négative de -19,7 grammes pour le minimum de la masse de paille disparue et une valeur de 69,7 grammes pour le maximum de la masse de paille alors que la masse de paille initiale est de 50 grammes. Ces deux indicateurs sont donc à prendre avec des pincettes pour certaines parcelles.

3.3.2.2. Teneur en carbone stable et labile ($C_{\text{...}}$)

Sur les quatre répétitions par parcelle, uniquement une par parcelle a pu être mesurée en laboratoire dans le délai du mémoire. Sur les 20 échantillons, on peut voir que la teneur en carbone stable (C_{s}), fraction fine, varie entre 0,33 et 0,51 g/100g de sol sec avec une moyenne de 0,42. Cette gamme de valeur correspond, selon le rapport Carbiosol (Annexe 16 – Figure 7), à des valeurs allant de très faibles à très élevées (Vincent *et al.*, 2019). Le C_{s} suit une distribution pratiquement normale et a un écart-type assez faible.

La teneur en carbone labile (C_{l}), fraction grossière, varie entre 0,47 et 1,44 g/100g avec une moyenne de 0,67, ce qui correspond, selon le rapport Carbiosol (Annexe 16 – Figure 8), à des valeurs allant de moyennes à très élevées (Vincent *et al.*, 2019). Le C_{l} possède un écart-type plus élevé que C_{s} et sa distribution est plus hétérogène avec quelques outliers qui tirent la moyenne vers les valeurs hautes.

La somme du carbone stable et labile donne la teneur en CO totale qui varie de 0,84 à 1,95 g/100g. Toujours selon le rapport Carbiosol (Annexe 16 – Figure 9), cela correspond pour des sols en région sablo-limoneuse à des valeurs allant de très faibles à très élevées (Vincent *et al.*, 2019).

La teneur en carbone labile est en moyenne plus haute que la teneur en carbone stable pour toutes les parcelles. Le coefficient labile/stable (C_{qfrac}) est par conséquent en moyenne supérieur à 1, les résultats sont compris entre 1,07 et 2,85. Tout comme C_{l} , la distribution de C_{qfrac} possède également des outliers vers les valeurs hautes.

3.3.2.3. Stabilité des agrégats (U)

Les 12 agrégats récoltés par parcelle ont été observés et un score leur a été attribué suivant les huit classes de stabilité (1 = très instable ; 8 = très stable). Le grand nombre de répétitions permet d'avoir une bonne fiabilité de la mesure.

Tous les scores sont rencontrés au moins une fois mais les scores de 2 et 3 sont très majoritairement représentés comme on le voit sur l'histogramme (Figure 21). Les autres scores sont présents en quantité assez uniforme. L'écart-type est assez élevé et il y a dans certaines parcelles une grande variabilité interne qui est observable grâce aux boîtes de Tukey (Annexe 13).

3.3.2.4. Évolution de la croûte de battance (B_...)

3.3.2.4.1. Données pluviométriques

Les données pluviométriques ont été récoltées entre le 16 octobre 2021 et le 18 janvier 2022, ce qui correspond à la durée de l'expérience d'observation de l'évolution de la croûte de battance. La pluie cumulée depuis le début de l'expérience, calculée sur base des données des stations météo du réseau Pameseb, est représentée sur la figure 22. Les courbes ont une allure assez similaire mais la quantité de pluie cumulée totale est assez différente entre les stations.

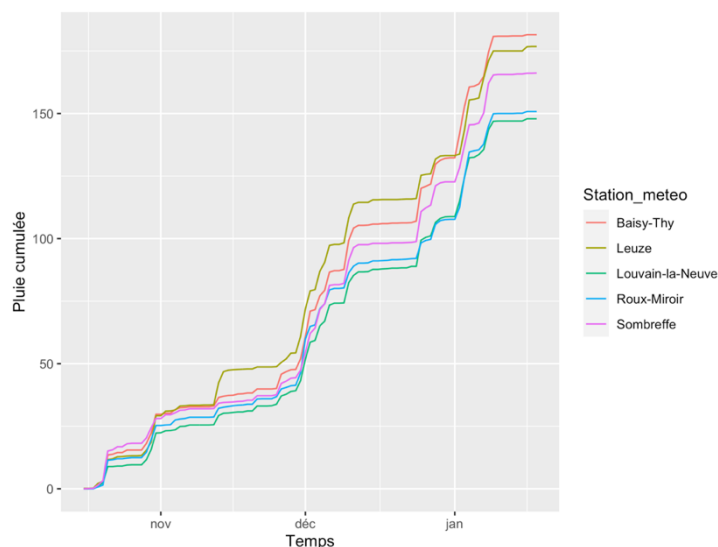


Figure 22 : Pluie cumulée par station météo sur la durée de l'expérience d'observation de la battance du sol par la pluie (CRA-W, 2022).

3.3.2.4.2. Indicateur B_Dmin

L'indicateur B_Dmin obtenu à partir de Dmin (le plus petit calibre d'agrégat distinct) et de la pluie cumulée est représenté *via* les boîtes de Tukey de la figure 23. On voit que les parcelles se situent globalement dans la même gamme de valeur, allant de 0,152 à 0,891 mm d'agrégats/mm de pluie, avec quelques points plus éloignés comme pour la parcelle 39.

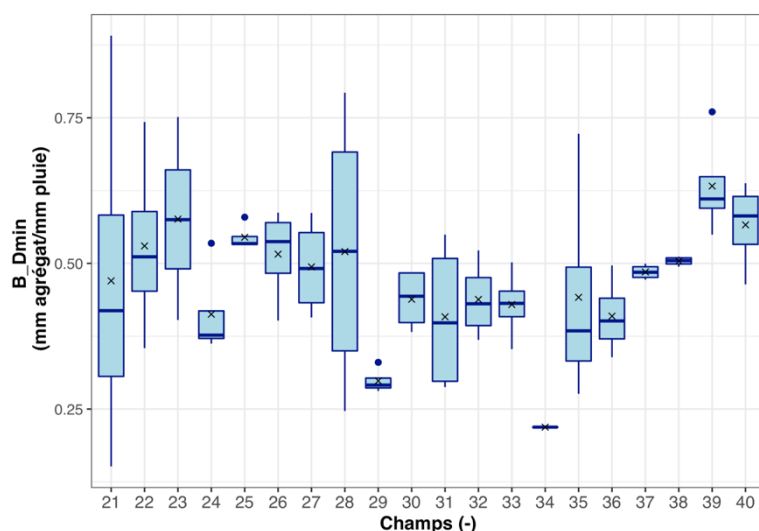


Figure 23 : Boîte de Tukey permettant de visualiser les valeurs de B_Dmin de chaque parcelle ainsi que la variabilité interne des parcelles. Les points dont la valeurs de Dmin dépassait 40 mm ainsi que les points plateaux ont été retirés. Rectangle = deuxième et troisième quartile ; barre = médiane ; croix = moyenne ; points = outliers ; extrémité de la barre verticale ou point extrême = minimum ou maximum

Il y a cependant certaines parcelles qui sortent du lot comme le 29 et particulièrement le 34, dont les valeurs de B_Dmin sont bien plus basses que la majorité des autres parcelles. Pour rappel, une valeur basse signifie que ces parcelles ont une sensibilité à la battance plus faible.

L'histogramme de la figure 23 montre que l'indicateur B_Dmin suit une distribution normale centrée sur la moyenne de 0,467, ce qui est confirmé par le QQ-plot de l'annexe 14.

3.3.2.4.3. Indicateurs B_Dlim

Comme dit précédemment dans la partie Matériels et méthodes, l'indicateur B_Dlim est obtenu à partir de la pente de la droite de régression obtenue pour les courbes calculées à partir de Dlim (le plus grand calibre d'agrégat incorporé dans la croûte de battance) et de la pluie cumulée. Le Dlim est mesuré à partir de deux éléments que sont la distribution initiale des calibres d'agrégats (Annexe 17) et l'évolution de la surface de plaque (Annexe 18). Les résultats de ces deux éléments sont présentés aux points suivants.

Une fois calculé, Dlim peut être représenté en fonction de la pluie cumulée (Annexe 19). Sur les courbes obtenues sont tracées des droites de régression dont les pentes ont servi d'indicateurs (B_Dlim) de sensibilité à la battance du sol par la pluie (Annexe 20).

Maintenant que l'indicateur B_Dlim est calculé, il peut être représenté par parcelle, comme sur la figure 24. On peut y voir une certaine diversité dans les mesures avec quelques points outliers, notamment pour la parcelle 21. Les valeurs de B_Dlim obtenues cette année varient entre 0,044 et 0,899 mm d'agrégats/mm de pluie. Pour comparaison, les valeurs obtenues par Boiffin (1984) dans sa thèse sont comprises entre 0,12 et 0,35 mm/mm de pluie et sont donc en moyenne plus faibles (Boiffin, 1984).

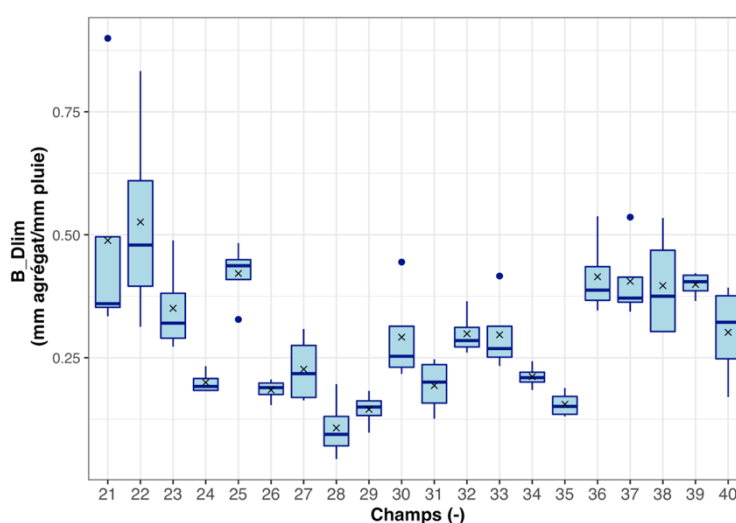


Figure 24 : Boîte de Tukey permettant de visualiser les valeurs de B_Dlim de chaque parcelle ainsi que la variabilité interne des parcelles. Les points dont la valeur de Dlim dépassait 40 mm ainsi que les points plateaux ont été retirés. Rectangle = deuxième et troisième quartile ; barre = médiane ; croix = moyenne ; points = outliers ; extrémité de la barre verticale ou point extrême = minimum ou maximum

a. Distribution initiale des calibres d'agrégats sur les placettes

Les boîtes de Tukey de la figure 25 représentent la proportion de la surface couverte par les différentes classes d'agrégats pour l'ensemble des parcelles, après le travail d'implantation de la céréale et avant la première pluie. On peut y voir une certaine quantité d'outliers mais ceux-ci sont particulièrement présents dans les catégories de surface lisses et de surface couvertes par des MO. Les données de cette figure 25 ont été manipulées avant de calculer Dlim. Le pourcentage de la surface couverte par des surfaces lisses et sombres a été considéré comme le pourcentage de la surface de plaque initiale et est représenté sur le graphique de l'annexe 17 par la taille d'agrégats de calibre 0. Ensuite, les valeurs de surface de MO ont été étalées proportionnellement sur toutes les autres catégories de calibre en considérant que la présence de cette MO était anormale, car le protocole de Boiffin (1984) demande que les placettes de battance soient non couvertes par des végétaux. L'annexe 17 montre les

données de surface cumulées des calibres d'agrégats par placette après que les données aient été manipulées.

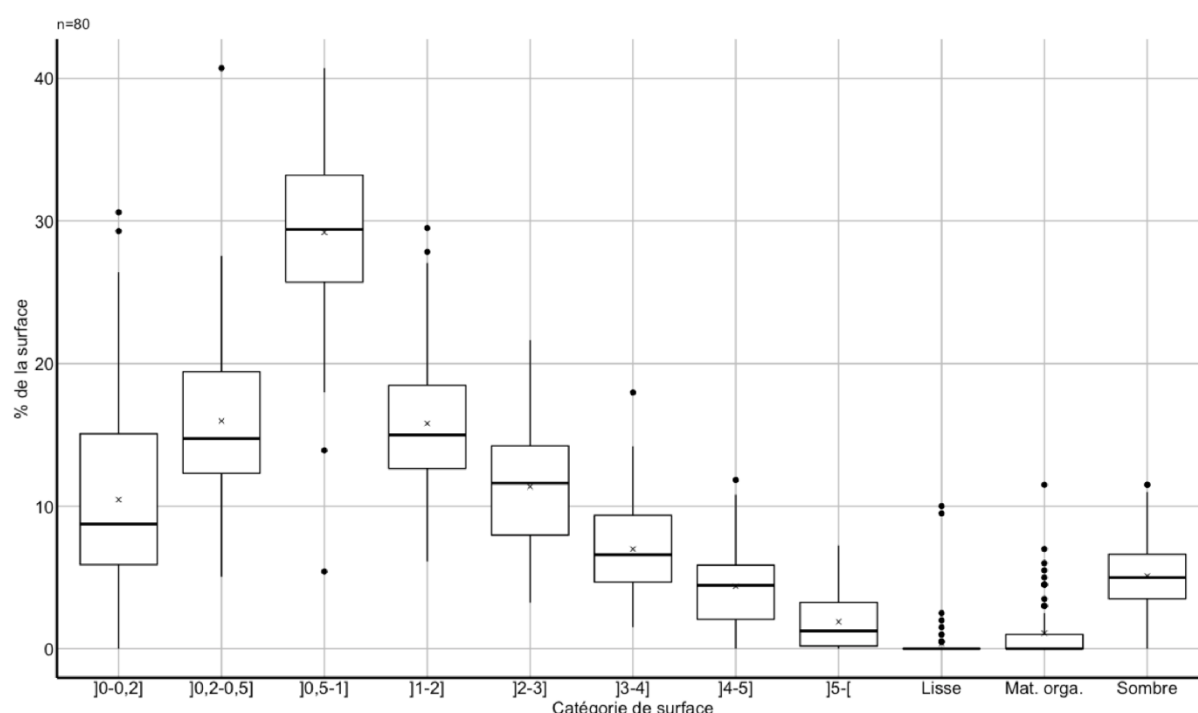


Figure 25 : Distribution de la surface initiale des placettes couverte par les différentes catégories de calibres d'agrégats et « autres » pour toutes les parcelles simultanément. Les « autres » catégories sont les surfaces lisses, couvertes par des matières organiques et sombres. Rectangle = deuxième et troisième quartile ; barre noire = médiane ; croix = moyenne ; points = outliers ; extrémité de la barre verticale ou point extrême = minimum ou maximum. Les valeurs de catégories de calibres d'agrégats sont exprimées en centimètres.

Cette figure est complétée par un tableau avec des informations chiffrées à l'annexe 21 qui reprend la moyenne et l'écart-type des catégories par parcelle. On peut y voir que la catégorie d'agrégats de 0,5 à 1 centimètres est en moyenne majoritaire sur les parcelles à hauteur de 29,2 pourcents de la surface des placettes. En moyenne, 89,7 pourcents de la surface est couverte par des agrégats de calibre inférieur à cinq centimètres.

b. Évolution de la surface de plaque

Les graphiques de l'annexe 18 montrent l'évolution de la surface de plaque au cours du temps, le premier avec les points de plateau et le second sans. Il y a deux fortes augmentations de la surface battue qui sont observables : la première entre mi-octobre et début novembre et la deuxième de fin novembre à début décembre. Une raison à cela pourrait être le passage d'un épisode pluvieux à ces dates, ce qui est confirmé par la figure 22. Pour la majorité des placettes, un plateau est atteint à la mi-décembre. Avec des exceptions comme pour les courbes bleues (parcelle 34) qui atteignent un plateau très rapidement, dès fin octobre, et a contrario, d'autres n'atteindront pas de plateau durant l'expérience. De manière générale, au moins 75 pourcents de la surface des placettes est couverte par une croûte à la fin de l'expérience. Les points de plateau sont supprimés pour le calcul de Dlim.

3.3.2.5. Compaction du sol (V)

Selon les résultats obtenus, le score de compaction moyen est d'environ 3 et cela avec cinq répétitions par parcelle. L'ensemble des résultats se situent entre 1,5 et 4,2. Pour rappel, le score de 1 est attribué à un sol friable et le score de 5 à un sol compact. La distribution des données est assez bien centrée sur la moyenne et proche d'une distribution normale avec une exception entre 3,5 et 3,75 (Figure 21).

Les boîtes de Tukey de l'annexe 13 montrent une grande variabilité entre les parcelles mais aussi pour certains à l'intérieur des parcelles. On peut également y voir que les parcelles 32, 33, 36, 37 et 38 ont des scores bien plus élevés que la moyenne en étant supérieurs à 3,5.

3.3.2.6. Pression en adventices (A_...)

Les indicateurs de densités et de compétition des adventices, calculés *via* les huit répétitions par parcelle, sont d'une assez grande variabilité inter-parcelle. On l'observe quand on regarde les écart-types qui sont bien supérieurs aux moyennes mais également lorsque l'on compare les maximums et les minimums pour chacun des deux indicateurs. Les graphiques de distribution des valeurs montrent que pour les deux indicateurs, les valeurs sont assez faibles pour la majorité des résultats. La variabilité des données intra-parcelle est relativement faible et un lien évident est observable entre la densité et la compétition des adventices lorsque l'on compare les boîtes de Tukey des deux indicateurs à l'annexe 13.

L'indicateur de diversité, qui est calculé sur base d'une seule valeur par parcelle, est moins variable que les deux indicateurs précédents. La distribution des données est très aléatoire, le nombre d'espèces d'adventices par parcelle varie de 0 à plus de 20.

3.4. Analyses multivariées

3.4.1. Matrices de corrélation

Les matrices de corrélation permettent d'observer des corrélations entre les indicateurs un à un. Les corrélations peuvent également être observées sur un graphique de type « cercle de corrélations » issu d'une ACP. Dans ce cercle, les indicateurs sont représentés par des flèches et cela en deux dimensions qui sont les composantes principales calculées pour effectuer les classifications du point 3.4.2. Ces cercles de corrélations pour les indicateurs de SE et de PC pour dix ans d'historique sont représentés respectivement aux annexes 22, 23 et 24.

3.4.1.1. Matrice de corrélation des indicateurs de service écosystémique

La matrice de corrélation à la figure 26 présente les coefficients de corrélations entre les 19 indicateurs de SE mesurés expérimentalement. Ces indicateurs proviennent de six expériences différentes. La p-valeur utilisée pour supprimer les corrélations non significatives est de 0,01. Les coefficients de corrélation affichés sont des pourcentages, un signe positif et une couleur bleue signifient une corrélation positive alors qu'un signe négatif et une couleur rouge signifient une corrélation négative. Les coefficients de corrélation sont repris ci-dessous à partir de 50 pourcents de corrélation (sauf exception), qu'ils soient positifs ou négatifs, et

par expérience. Uniquement ces corrélations seront commentées dans la partie discussion. Les corrélations supérieures à 75 pourcents sont considérées comme fortes.

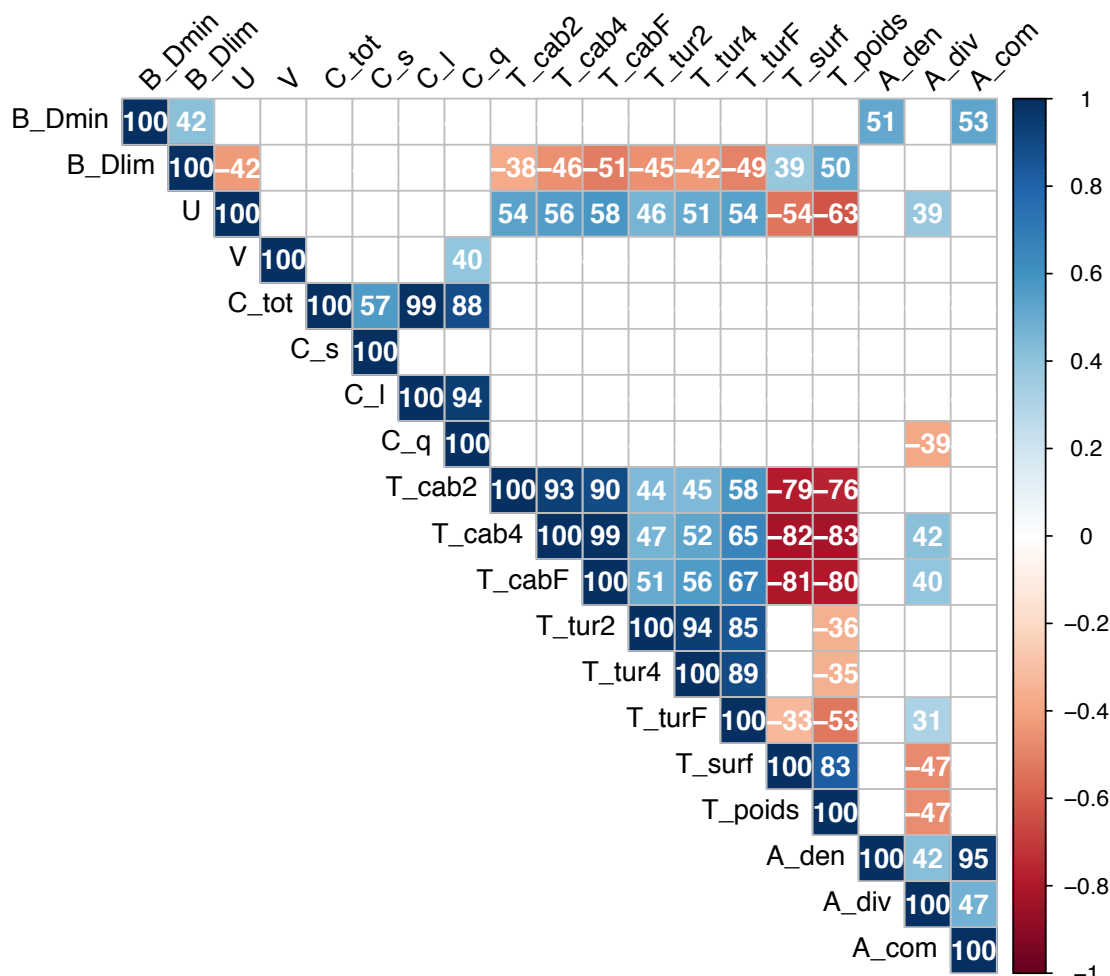


Figure 26 : Matrice de corrélation représentant le pourcentage de corrélation entre les 19 indicateurs de service écosystémique. Ces indicateurs viennent des six expériences réalisées sur les 20 parcelles expérimentales. Les coefficients de corrélation sont représentés en pourcentage. La couleur bleue représente une corrélation positive et la couleur rouge une corrélation négative. Les corrélations non significatives ont été retirées et la p-valeur utilisée pour les supprimer est de 0,01. B_Dmin et B_Dlim représentent la sensibilité du sol à la battance ; U représente la stabilité des agrégats ; V représente la compaction du sol ; C_tot, C_s, C_l et C_q représentent respectivement le carbone total du sol, le carbone stable, le carbone labile et le rapport carbone labile sur carbone stable. Les indicateurs T_... sont liés à l'activité des vers de terre : cab pour cabanes, tur pour turricules, surf pour surface de paille, poids pour poids final de paille. La mention 2, 4 et F signifie : après 2 mois, 4 mois et finale. Les indicateurs A_den, A_div et A_com représentent respectivement la densité, la diversité et la compétitivité des adventices. La signification détaillée des abréviations des indicateurs se trouve dans le tableau 10.

Les indicateurs de turricules de VDT sont fortement corrélés (+) entre eux, ils sont corrélés (+) aux indicateurs de cabanes et corrélés (-) avec le poids de paille final. Les indicateurs de cabanes de VDT sont fortement corrélés (+) entre eux et également fortement corrélés (-) avec les indicateurs de surface et de poids de paille en fin d'expérience. Ces derniers sont aussi fortement corrélés (+) entre eux. Les corrélations entre ces indicateurs semblent confirmer la fiabilité de la méthode car en théorie ils représentent tous l'activité des VDT. Il

est étonnant de ne pas constater de corrélations entre les indicateurs de VDT et l'indicateur de compaction comme suggéré au point 1.3.1.1.

L'indicateur de carbone stable est corrélé (+) avec le carbone total mais n'est pas corrélé avec les autres indicateurs de carbone. Les trois autres indicateurs de carbone sont fortement corrélés (+) entre eux. C'est étonnant car le carbone stable est repris dans le calcul de l'indicateur « carbone labile divisé par le carbone stable ».

L'indicateur de stabilité des agrégats (U) est corrélé (+) aux indicateurs de turricules et de cabanes et corrélé (-) aux indicateurs de surface et de poids de paille. La stabilité des agrégats est donc de manière générale corrélée avec une activité élevée des VDT. Ceci semble cohérent car, comme cité dans l'état de l'art, les VDT contribuent à la stabilité des agrégats.

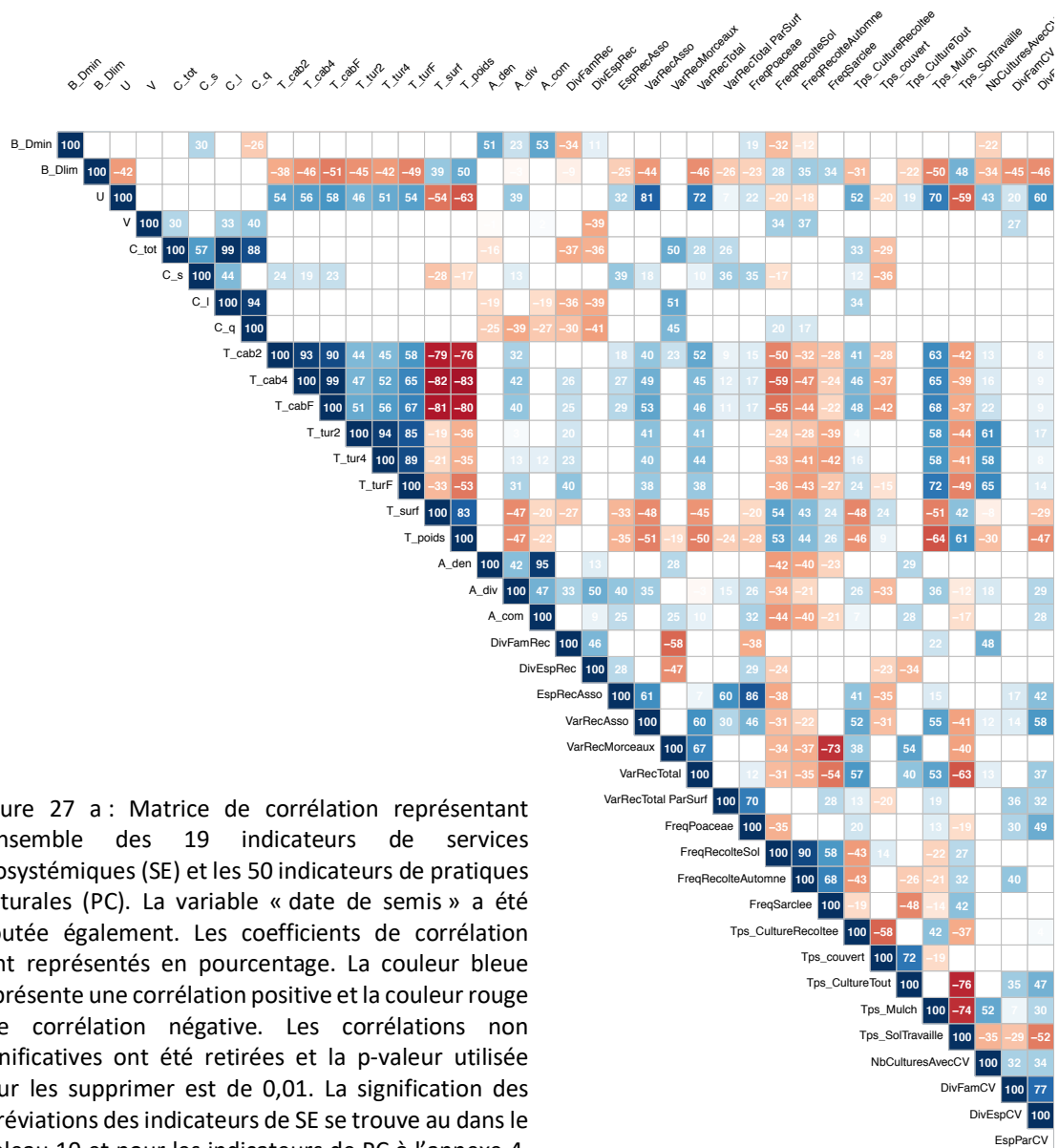
L'indicateur B_Dlim est corrélé avec tous les indicateurs de VDT. Il est également faiblement corrélé (-) avec l'indicateur de stabilité des agrégats (U) (-42%). Cela veut dire qu'un sol sensible à la battance est lié à une stabilité faible des agrégats. Ce sont deux indicateurs de la qualité structurale, il est donc intéressant de voir cette corrélation. L'indicateur B_Dmin, quant à lui, est corrélé (+) avec la densité et la compétitivité des adventices. Il est important de noter ici qu'il n'y a pas de corrélation supérieure à 50 pourcents entre B_Dlim et B_Dmin (42%). Il sera donc intéressant de renouveler les deux mesures pour valider cette observation.

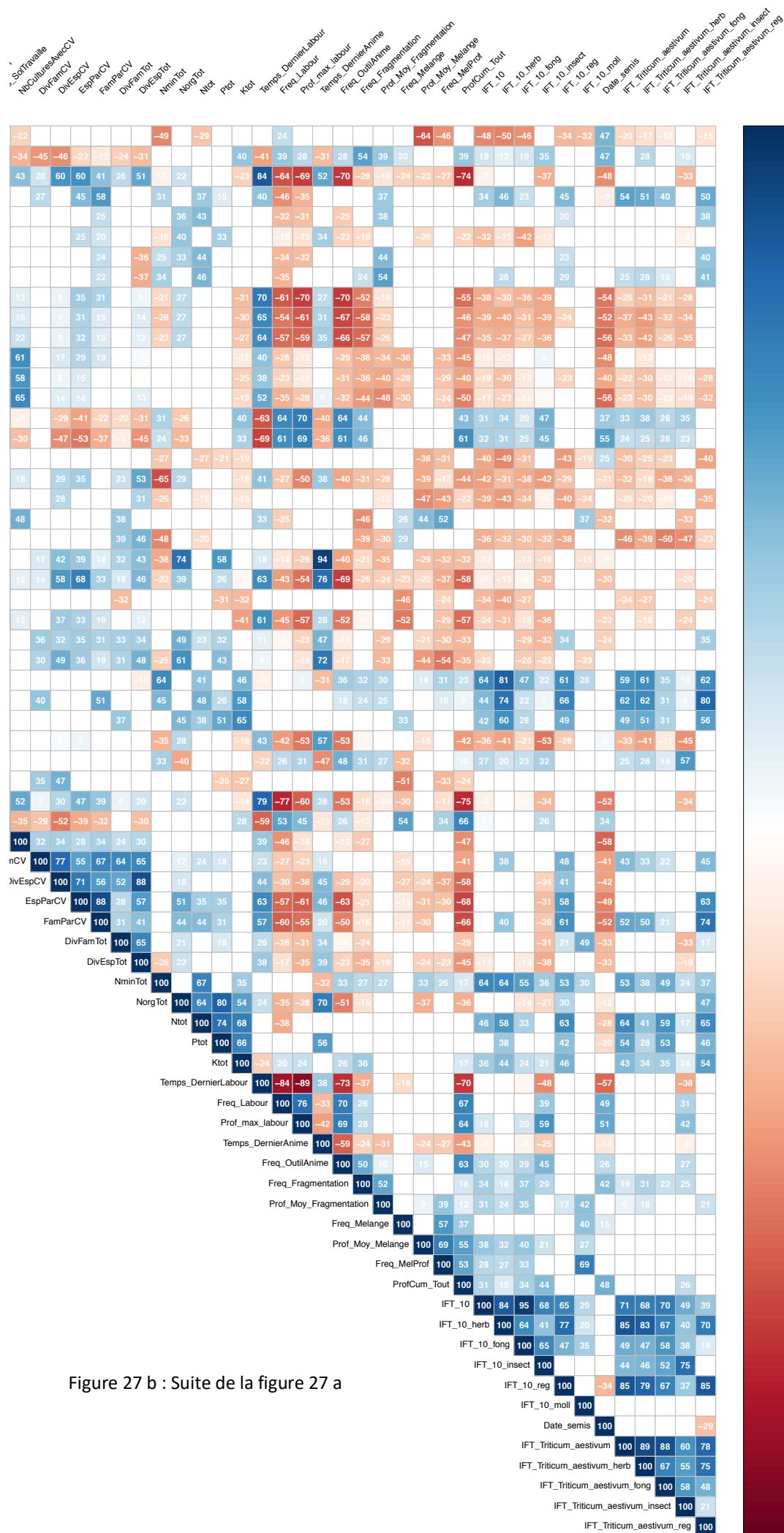
L'indicateur de densité d'adventices (A_den) est fortement corrélé (+) avec l'indicateur de compétitivité (A_com). Cela vient du fait que la compétitivité est calculée à partir de la densité. Ils ne sont par contre pas corrélés à plus de 50 pourcents avec l'indicateur de diversité d'adventices (A_div).

3.4.1.2. Matrice de corrélation des services écosystémiques et des pratiques culturelles

La matrice de corrélation reprise à la figure 27 reprend l'ensemble des 19 indicateurs de SE, les 50 indicateurs de PC ainsi qu'une nouvelle variable « date de semis » qui sera comparée avec les indicateurs de SE. Cette nouvelle variable correspond à la date du semis de la céréale de l'année 2021-2022. Comme pour la matrice de corrélation des SE, la p-valeur utilisée pour supprimer les corrélations non-significatives est de 0,01. Les coefficients de corrélation affichés sont des pourcentages. Un signe positif et une couleur bleue montrent une corrélation positive, un signe négatif et une couleur rouge montrent une corrélation négative.

La présentation des résultats reprendra uniquement les corrélations supérieures à 50 pourcents et seules les corrélations entre PC et SE seront évoquées. Par exemple, une corrélation négative de 73 pourcents entre le nombre de variétés récoltées par morceaux (parcelle divisée en plusieurs morceaux récoltés séparément) et la fréquence de cultures sarclées (deux indicateurs de PC) est significative mais pas pertinente dans le cadre de ce mémoire. Les corrélations entre SE évoquées au point 3.4.1.1 ne sont donc pas reprises.





Les corrélations entre SE et PC de la figure 27 a et b sont reprises par expérience :

- incorporation de la MO (T ...) : Pour cette expérience, il est important de noter que les indicateurs ne sont pas à interpréter dans le même sens. Une forte activité des VDT se traduit par un nombre élevé de cabanes et de turricules mais une valeur faible pour la surface et le poids de paille.

Le temps durant lequel le sol est recouvert de mulch⁶ est corrélé (+) avec tous les indicateurs d'incorporation de la MO (T...). Ceci était attendu car le mulch mort sert d'alimentation aux VDT et permet de garder l'humidité du sol favorable également aux populations de VDT comme cité au point 1.3.1.1.

Les indicateurs de turricules sont tous corrélés (+) avec le nombre de cultures associées avec des couverts de type plantes compagnes. L'indicateur de turricules en fin d'expérience est corrélé (+) avec le nombre d'années passées depuis le dernier labour et corrélé (-) avec la profondeur cumulée des travaux de sol ainsi que la date de semis 2021.

Les indicateurs de cabanes de VDT (+) et de poids de paille (-) sont corrélés avec le nombre moyen de variétés récoltées par saison culturale et la fréquence des associations de variétés pour les espèces récoltées. Le nombre de cultures récoltées sous le sol sur dix ans est corrélé (-) avec les indicateurs de cabanes et (+) avec les indicateurs de surface et de poids de paille. La fréquence et la profondeur maximum du labour ainsi que la fréquence d'utilisation d'outils animés sont corrélés (+) avec une faible activité des VDT selon les indicateurs de cabanes, de surface et de poids de paille. Les indicateurs de cabanes sont également corrélés (-) avec la fréquence de fragmentation du sol.

L'indicateur de poids de paille est corrélé (+) avec le nombre de jours durant lesquels le sol est à l'état « travaillé » sur dix ans, la profondeur cumulée des travaux de sol et la date de semis en 2021. Il est aussi corrélé (-) avec la diversité d'espèces par couvert, ce qui correspond au nombre moyen d'espèces par couvert.

Globalement, les indicateurs d'activité des VDT semblent corrélés négativement avec les travaux de sol et cela confirme à nouveau les propos du point 1.3.1.1.

- sensibilité à la battance (B ...) : L'indicateur B_Dmin est corrélé (-) avec la profondeur moyenne des travaux qui mélangent le sol sans le retourner. L'indicateur B_Dlim est corrélé (+) avec la fréquence des travaux de fragmentation du sol sans retournement ni mélange, ce qui correspond au nombre de fragmentations sur dix ans.
- stabilité des agrégats (U) : L'indicateur U est corrélé (+) avec le nombre moyen de variétés récoltées par saison culturale, la part du temps durant lequel le sol est couvert de mulch, la diversité et le nombre moyen d'espèces dans les couverts, la durée sur dix ans durant laquelle le sol est couvert par une culture destinée à être récoltée, la diversité d'espèces totale (cultures et couverts) implantées durant les dix ans et le nombre

⁶ Dans le cadre de ce mémoire, le mulch représente la matière végétale morte non enfouie, à la surface du sol. Il peut s'agir de résidus de couverts d'intercultures ou de résidus de culture (paille, feuilles de betteraves...).

d'années depuis le dernier travail animé du sol. La stabilité des agrégats est aussi fortement corrélé (+) avec la fréquence des associations de variétés pour les espèces récoltées et le nombre d'années passées depuis le dernier labour. Ensuite, l'indicateur U est corrélé (-) avec le nombre d'utilisations d'outils animés sur dix ans, la profondeur cumulée des travaux de sol, la fréquence et la profondeur maximum du labour et la durée sur dix ans durant laquelle le sol est nu (sans végétaux ou mulch mort) après un travail mécanique. Ces corrélations peuvent être expliquées par la corrélation entre la stabilité des agrégats et l'activité des VDT. En effet, les corrélations citées ici pour la stabilité des agrégats sont pour la plupart identiques à celles observées pour l'activité des VDT.

- compaction du sol (V) : L'indicateur V est corrélé (+) avec le nombre moyen de familles par couvert et avec certains indices de fréquences de traitement (IFT) triticum (total, herbicide et régulateur).
- teneur en CO (C ...) : Le seul indicateur ayant une corrélation pertinente et supérieure à 50 pourcents est l'indicateur carbone labile/stable qui a une corrélation (+) avec la profondeur moyenne de fragmentation du sol.
- présence d'adventices (A ...) : Le seul indicateur présentant des corrélations supérieures à 50 pourcents est l'indicateur de diversité des adventices (A_div). Il est corrélé (+) avec la diversité d'espèces totale (cultures et couverts) implantées durant les dix ans. Il est corrélé (-) avec l'azote minéral total apporté en dix ans et la profondeur maximum du labour. Il est quand même intéressant de noter que la densité d'adventices est faiblement (-49%) corrélée (-) avec l'IFT herbicide.

3.4.1.3. Variable supplémentaire

À la suite de discussions avec des agriculteurs de l'étude, il semblerait qu'un sol travaillé doit sécher en surface avant la première pluie afin d'éviter qu'une croûte de battance ne se forme trop rapidement. Une variable représentant le nombre de jour entre le semis et la première pluie de plus de 0,5 litres par mètre carré par jour a donc été créée et analysée. Lorsque les expérimentateurs ont dû travailler le sol lors de l'installation des placettes de battance car il avait déjà plu depuis le semis, la date de semis a été remplacée par la date d'installation des placettes de battance. Cette variable est nommée « plu-trav » dans la figure 28.

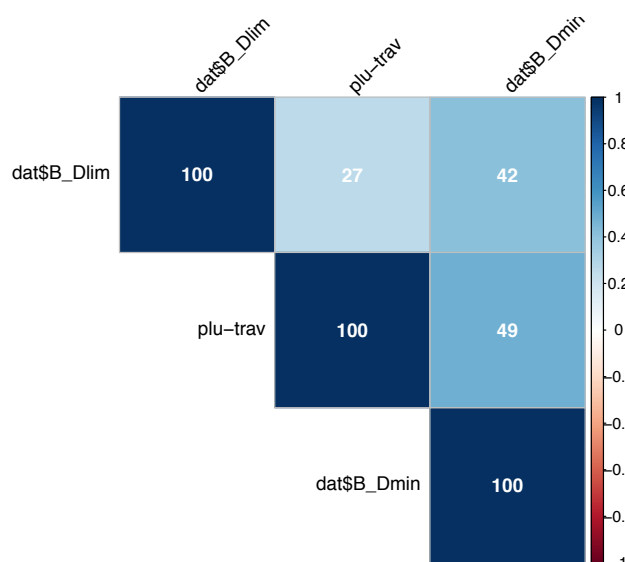


Figure 28 : Matrice de corrélation représentant les indicateurs de battance (B_Dmin et B_Dlim) ainsi que la variable plu-trav qui représente le nombre de jours entre le semis et la première pluie d'intensité supérieure à 0,5 litres par mètre carré par jour. Les coefficients de corrélation sont représentés en pourcentage. La couleur bleue représente une corrélation positive et la couleur rouge une corrélation négative. La signification des abréviations des indicateurs se trouve au tableau 10.

Aucune corrélation ne dépasse les 50 pourcents mais on remarque que l'indicateur B_Dmin est plus corrélé (+) avec la variable plu-trav qu'avec l'indicateur B_Dlim.

3.4.2. Clustering hiérarchique

Le clustering hiérarchique réalisé dans ce mémoire permet d'identifier si des tendances peuvent être observées entre les agriculteurs, aussi bien au niveau des PC qu'au niveau des SE. Ce clustering est réalisé sur base d'une ACP. Cette analyse permet de représenter l'ensemble des résultats en fonction de plusieurs composantes ou axes. Dans ce cas-ci, le nombre de composantes principales générées pour l'analyse des SE et des PC est respectivement de quatre et deux. Ce nombre a été défini en utilisant la fonction « fviz_nbclust » du package « factoextra » dans le logiciel R. Une visualisation de la contribution des indicateurs aux composantes principales de l'analyse ainsi que la répartition des parcelles en fonction de ces composantes se trouvent aux annexes 22 et 23 pour les indicateurs de SE et à l'annexe 24 pour les indicateurs de PC.

3.4.2.1. Clustering hiérarchique sur base des services écosystémiques

La figure 29 représente la classification des parcelles expérimentales sur base de quatre composantes principales réalisées avec les 19 indicateurs de SE en tant que variables actives. Les variables dites « actives » sont les variables qui sont utilisées pour créer les composantes principales. L'interprétation des groupes de parcelles se fait sur base d'une description des variables par groupe fournis par la fonction « \$desc.var » du logiciel R (SMCS⁷). Sur les différents dendrogrammes présentés par la suite, la hauteur entre les embranchements représente l'amplitude des différences entre chaque branche. Plus la hauteur est élevée, plus les branches sont différentes l'une de l'autre (Minitab, 2022).

⁷ Le Support en Méthodologie et Calcul Statistique (SMCS) est un service de conseil en analyse de données lié directement à l'UCLouvain (SMCS, 2022).

Les parcelles 32 et 39 ont été retirées de l'échantillon car elles présentaient chacune pour un indicateur de SE une valeur très éloignée des autres parcelles. Il a donc été préférable de les retirer afin d'éviter de perdre de l'information sur les autres indicateurs.

La parcelle 32 a la particularité d'avoir un teneur en CO anormalement élevée (environ deux fois supérieure à la moyenne). La parcelle 39 a une très forte densité d'adventices (environ dix fois supérieure à la moyenne). Ces deux éléments avaient pour effet de perturber le clustering. Ils seront cependant considérés lors de la discussion au sujet des résultats.

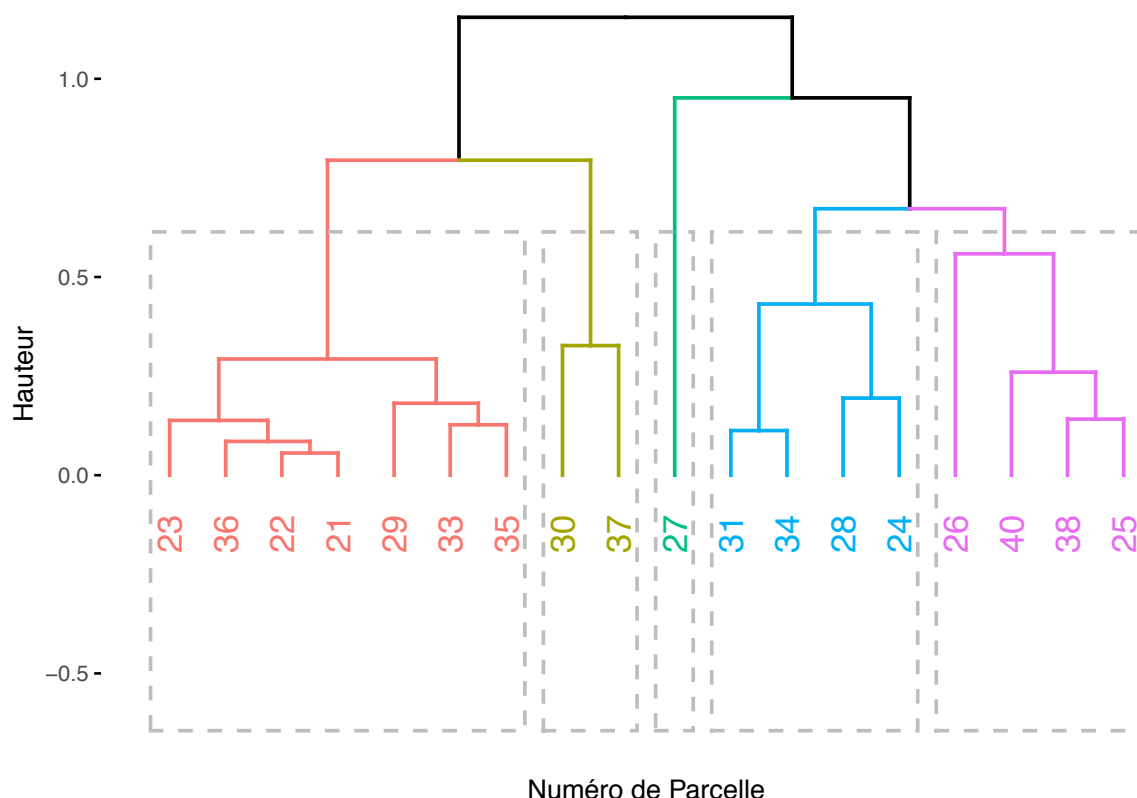


Figure 29 : Dendrogramme de la répartition des parcelles par groupes sur base de quatre composantes principales réalisées à partir des 19 indicateurs de services écosystémiques mesurés. La hauteur correspond à l'amplitude des différences entre les branches du dendrogramme. Les parcelles 32 et 39 ont été retirées de l'échantillon à causes de leurs valeurs extrêmes pour respectivement le taux de carbone et la densité d'adventices.

Les principales caractéristiques des groupes sont les suivantes :

- Le premier groupe (orange), contenant entre autres la parcelle 23, est caractérisé par une faible activité des VDT et une faible diversité et densité d'adventices.
- Le deuxième groupe (kaki), contenant entre autres la parcelle 30, est caractérisé par une teneur en carbone élevée.
- Le troisième groupe (vert, parcelle 27), est caractérisé par une quantité élevée de turricules et une forte densité d'adventices.
- Le quatrième groupe (bleu), contenant entre autres la parcelle 31, est caractérisé par une forte activité des VDT et une faible sensibilité à la battance.
- Le cinquième groupe (rose), contenant entre autres la parcelle 26, est caractérisé par une diversité et une densité d'adventices élevés.

3.4.2.2. Clustering hiérarchique sur base des pratiques culturales

La figure 30 représente la classification des parcelles d'expérience sur base de deux composantes principales réalisées avec 34 des 50 indicateurs de PC. Certains indicateurs ont été retirés pour les analyses en composantes principales et les dendrogrammes soit car il y a des redondances entre les indicateurs soit car ils semblent moins intéressants pour notre étude. Ces indicateurs sont repris dans le tableau 11.

Tableau 11 : Description et justification des indicateurs non-utilisés pour la réalisation du clustering hiérarchique

Indicateur	Explication indicateur	Justification
NbCulturesAvecCV	Nombre de cultures cultivées en association avec un couvert végétal pendant dix ans	Très peu de parcelles étaient concernés
VarRecMorceaux	Nombre de variétés récoltées par morceaux	Pas pertinent pour caractériser les pratiques culturales d'un agriculteur
VarRecTotal ParSurf	Nombre de variétés récoltées divisé par la surface de la parcelle	Pas plus d'information que le nombre de variétés récoltées (VarRecTotal)
FreqRecolteAutomne	Fréquence de récolte en automne	Redondant avec la fréquence de cultures dont les parties racinaires sont récoltées (FreqRecolteSol) (seule la culture de maïs diffère)
Tps_CultureTout	Temps durant lequel le sol est recouvert par une culture et/ou un couvert sur la durée de récolte de l'historique	Redondant avec deux autres indicateurs : le temps durant lequel le sol est recouvert par un couvert (Tps_couvert) et le temps durant lequel le sol est recouvert par une culture (Tps_CultureRecoltee)
Temps_DernierLabour	Temps depuis le dernier labour	Représente moins bien les pratiques culturales des agriculteurs que la fréquence de labour (Freq-Labour) (certains agriculteurs ont arrêté le labour mais ont exceptionnellement labouré l'année précédant l'année d'expérience)
Prof_max_labour	Profondeur maximum de labour	Ne varie pas fortement et les variations dépendent généralement de l'estimation visuelle de la profondeur par l'agriculteur
Temps_DernierAnime	Temps depuis le dernier travail du sol animé	Ne concerne qu'une seule parcelle (parcelle 26)
Freq_Fragmentation	Fréquence de fragmentation du sol	Représentent les travaux de sol qui ne font que de la fragmentation (pas de mélange ni de retournement). Il s'agit uniquement des outils de type « décompacteurs » qui sont utilisés presque exclusivement avec une herse rotative et par conséquent, un mélange du sol est aussi effectué simultanément. Ceci rend ces deux indicateurs non pertinents
Prof_Moy_Fragmentation	Profondeur moyenne de fragmentation	
Prof_Moy_Melange	Profondeur moyenne de mélange du sol	Comme pour le labour, la profondeur indiquée par les agriculteurs est une estimations visuelle difficile à vérifier en pratique
IFT_Triticum	Cinq indices de fréquence de traitements liés aux cultures de céréales	Les données sont arrivées trop tardivement pour les inclure dans les analyses multivariées décrites par la suite

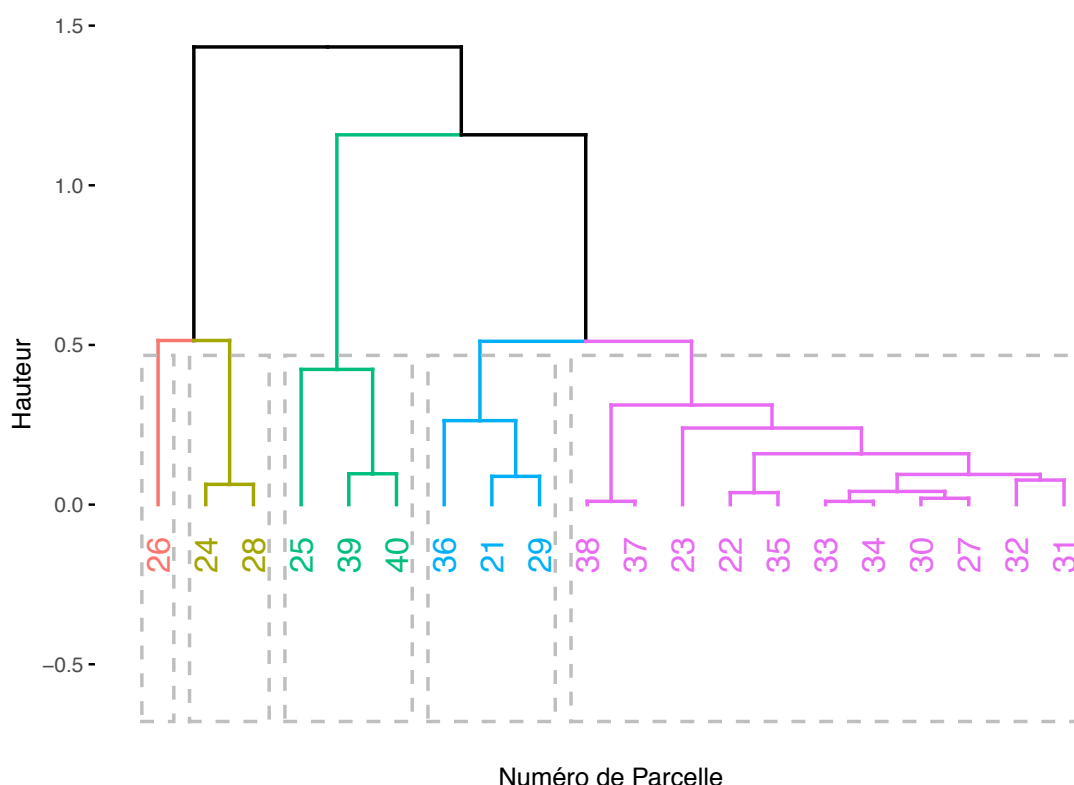


Figure 30 : Dendrogramme de la répartition des parcelles par groupes sur base de deux composantes principales réalisées à partir de 34 indicateurs de pratiques culturales récoltés sur une durée de dix ans. La hauteur correspond à l'amplitude des différences entre les branches du dendrogramme.

Le nombre d'indicateurs est très élevé et il est donc difficile d'identifier exactement les caractéristiques de chaque groupe. Cependant, certaines caractéristiques évidentes ont été identifiées :

- Le premier groupe (orange, parcelle 26) est caractérisé par un nombre élevé d'espèces récoltées en association, une quantité élevée d'azote organique apporté et une fréquence d'utilisation d'outils animés faible en nombre de passage sur dix ans.
- Le deuxième groupe (kaki), contenant entre autres la parcelle 24, est caractérisé par un nombre de variétés récoltées totales et en association élevé ainsi qu'une fréquence d'utilisation d'outils animés faible. Ce groupe est également caractérisé par une période durant laquelle le sol est à l'état « travaillé » faible et à l'état recouvert de mulch mort élevé.
- Le troisième groupe (vert), contenant entre autres la parcelle 25, est caractérisé par des IFT pour les traitements herbicides, régulateurs et totaux faibles ainsi qu'une quantité d'azote minérale et totale apportée faible.
- Le quatrième groupe (bleu), contenant entre autres la parcelle 36, est caractérisé par une profondeur cumulée de travail du sol et une fréquence de labour élevée ainsi qu'une fréquence élevée de cultures dont les parties souterraines sont récoltées. Ce groupe est aussi caractérisé par des IFT élevés et une durée sur dix ans durant lequel le sol est recouvert de mulch mort faible.
- Le cinquième groupe (rose), contenant entre autres la parcelle 38, est caractérisé par une fréquence de labour légèrement plus faible que la moyenne.

3.5. Durée de récolte de l'historique cultural

Pour rappel, un objectif spécifique de ce mémoire est de trouver le nombre d'années optimal d'historique cultural à récolter afin d'observer les liens entre les PC et les SE. Dans le cadre de sa thèse, L. Leveau a choisi de récolter l'historique sur 10 ans. Dans ce mémoire, il a été choisi, en plus des 10 ans, de calculer des indicateurs de PC pour des durées de 5 et 2 ans afin de les comparer aux indicateurs obtenus pour une récolte de données sur 10 ans. Les indicateurs ont été calculés de la même manière que pour 10 ans (Annexe 4), en prenant toutes les PC à partir de la récolte (non comprise) de la culture précédant les 2 ou 5 années d'historique.

Afin de comparer ces indicateurs, des clustering ont été réalisés sur les parcelles comme au point 3.4.2.2 mais cette fois-ci en utilisant les indicateurs calculés sur 5 et 2 ans afin de pouvoir observer si les groupes créés sont proches. Des matrices de corrélations comme celle réalisée au point 3.4.1.2 et des cercles de corrélations ont été créés également mais ne sont pas discutées dans ce mémoire. Ceux-ci se trouvent aux annexes 25 à 28 afin de pouvoir être utilisés dans d'éventuelles études futures.

Le nombre de composantes principales utilisées pour réaliser le clustering est de deux afin d'avoir le même nombre de composantes que pour le clustering sur dix ans d'historique. Les indicateurs utilisés sont les mêmes que pour dix ans (voir 3.4.2.2) sauf le nombre d'espèces récoltées en association (EspRecAsso) qui a été retiré pour le clustering de deux ans car il était égal à zéro pour toutes les parcelles.

3.5.1. Récolte de l'historique sur cinq ans

La première durée de récolte d'historique est de 5 ans, cette durée a été choisie parce qu'elle correspond à la moitié de la durée de récolte initiale. Le dendrogramme de la figure 31 permet de visualiser la classification des parcelles en différents groupes selon les indicateurs de PC calculés sur cinq ans d'historique. Les indicateurs qui ont la plus grande influence sur la classification sont repris dans le tableau 12. Ce tableau reprend également les classifications avec les indicateurs de SE ainsi que les indicateurs de PC calculés pour une durée d'historique de dix et deux ans. Cette visualisation permet de comparer les indicateurs de chaque parcelle entre les différentes classifications par durée d'historique. Elle permet également pour chaque parcelle, de comparer les indicateurs de SE mesurés en champ avec les PC de chaque classification.

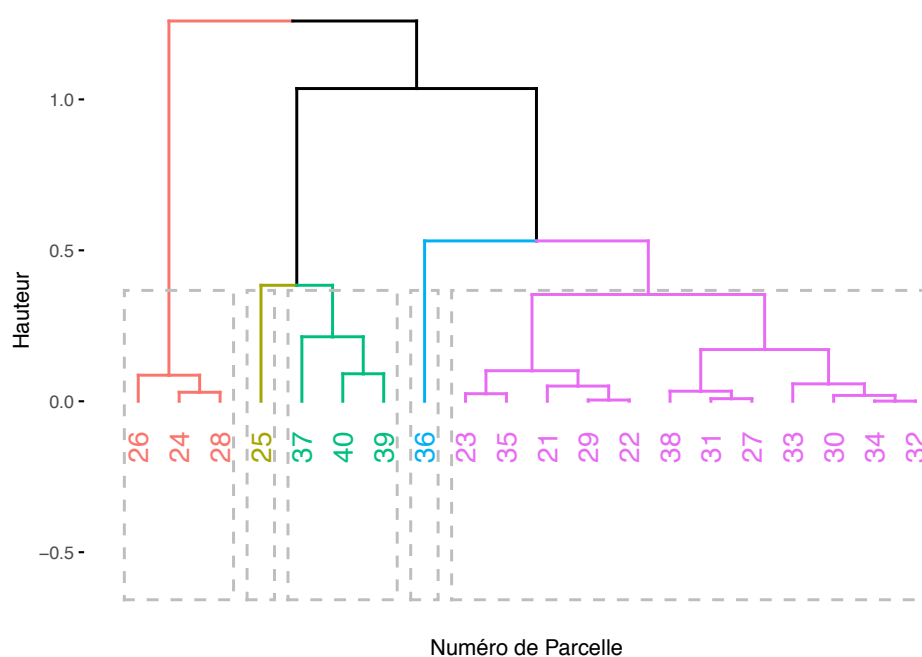


Figure 31 : Dendrogramme de la répartition des parcelles par groupes sur base de deux composantes principales réalisées à partir de 34 indicateurs de pratiques culturelles récoltés sur une durée de cinq ans. La hauteur correspond à l'amplitude des différences entre les branches du dendrogramme.

3.5.2. Récolte de l'historique sur deux ans

La deuxième durée de récolte de données est de 2 ans, cette durée a été choisie car généralement sur deux années il y a une culture souterraine et une culture aérienne. Le dendrogramme de la figure 32 permet de visualiser la classification des parcelles en différents groupes selon les indicateurs de PC calculés sur deux ans d'historique. Les indicateurs qui ont la plus grande influence sur la classification sont repris dans le tableau 12.

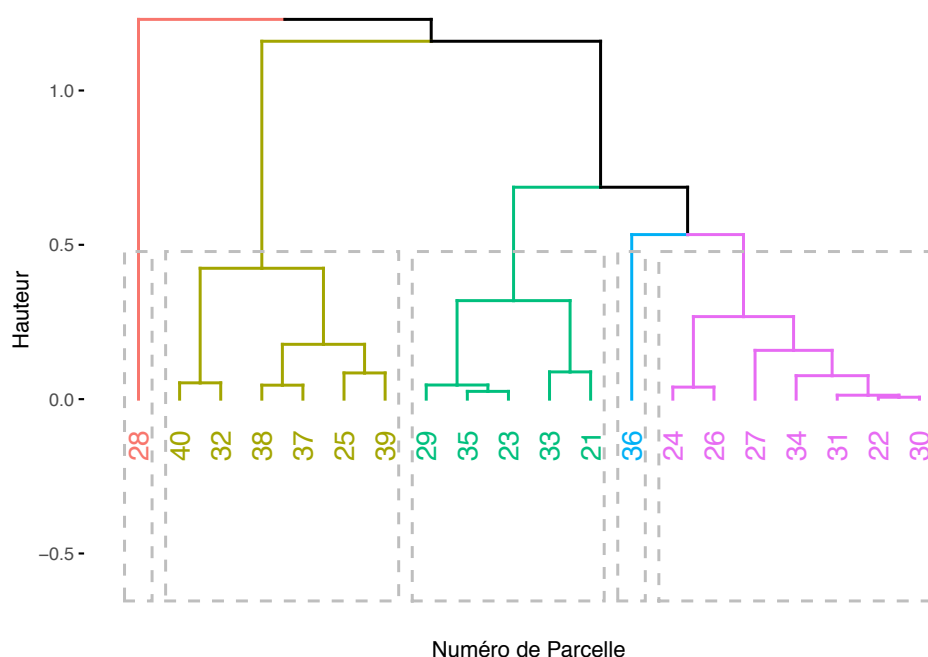


Figure 32 : Dendrogramme de la répartition des parcelles par groupes sur base de deux composantes principales réalisées à partir de 33 indicateurs de pratiques culturelles récoltés sur une durée de deux ans. La hauteur correspond à l'amplitude des différences entre les branches du dendrogramme.

Tableau 12 : Résumé des influences des indicateurs de services écosystémiques et de pratiques culturales sur les classifications faites sur les champs de l'étude pour l'année 2021-2022. Les indicateurs les plus importants de chaque groupe sont repris ici par champ ; avec donc les mêmes indicateurs pour les champs d'un même groupe. Les couleurs sont à regarder par colonne et chaque couleur correspond à un groupe. Les champs 32 et 39 ont été retiré de la classification en fonction des services écosystémiques, c'est pourquoi il n'y a aucune couleur pour les cases correspondantes. IFT = Indice de Fréquence de Traitement.

Champs	Service écosystémique	Pratiques culturales sur 10 ans	Pratiques culturales sur 5 ans	Pratiques culturales sur 2 ans
21	- Faible activité des VDT - Faible densité et diversité d'adventices	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de labour - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT - Courte période avec un sol couvert de mulch mort	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence des travaux de mélange du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grand IFT herbicide
22	- Faible activité des VDT - Faible densité et diversité d'adventices	- Assez faible fréquence de labour	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Longue période avec un sol couvert de mulch - Grande quantité d'azote apportée - Grande diversité d'espèces de couvert - Faible fréquence de mélange profond du sol - Faible profondeur cumulée des travaux de sol - Courte période avec un sol à l'état travaillé
23	- Faible activité des VDT - Faible densité et diversité d'adventices	- Assez faible fréquence de labour	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence des travaux de mélange du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grand IFT herbicide
24	- Forte activité des VDT - Faible sensibilité à la battance	- Grand nombre de variétés récoltées - Faible fréquence d'utilisation d'outils animés - Courte période avec un sol est à l'état travaillé - Longue période avec un sol couvert de mulch	- Grand nombre de variétés récoltées en association - Grand nombre d'espèces par couvert - Grande diversité d'espèces et de familles récoltées - Longue période avec un sol couvert de mulch - Faible profondeur cumulée des travaux de sol - Faible fréquence d'utilisation d'outils animés	- Longue période avec un sol couvert de mulch - Grande quantité d'azote apportée - Grande diversité d'espèces de couvert - Faible fréquence de mélange profond du sol - Faible profondeur cumulée des travaux de sol - Courte période avec un sol à l'état travaillé
25	- Forte densité et diversité d'adventices	- Faibles IFT (herbicide/régulateur/total) - Faible quantité d'azote apportée	- Faible IFT herbicide - Grande diversité d'espèces et de familles de couverts	- Grande diversité d'espèces récoltées - Longue période avec un sol à l'état travaillé - Grande fréquence de travaux de mélange du sol - Grande fréquence de récolte de cultures sarclées - Faible quantité d'azote minéral apportée - Faible diversité de famille par couvert - Faible IFT herbicide
26	- Forte densité et diversité d'adventices	- Grand nombre d'espèces récoltées en association - Grande quantité d'azote organique apportée - Faible fréquence d'utilisation d'outils animés	- Grand nombre de variétés récoltées en association - Grand nombre d'espèces par couvert - Grande diversité d'espèces et de familles récoltées - Longue période avec un sol couvert de mulch - Faible profondeur cumulée des travaux de sol - Faible fréquence d'utilisation d'outils animés	- Longue période avec un sol couvert de mulch - Grande quantité d'azote apportée - Grande diversité d'espèces de couvert - Faible fréquence de mélange profond du sol - Faible profondeur cumulée des travaux de sol - Courte période avec un sol à l'état travaillé
27	- Grande quantité de turricules - Forte densité d'adventices	- Assez faible fréquence de labour	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Longue période avec un sol couvert de mulch - Grande quantité d'azote apportée - Grande diversité d'espèces de couvert - Faible fréquence de mélange profond du sol - Faible profondeur cumulée des travaux de sol - Courte période avec un sol à l'état travaillé
28	- Forte activité des VDT - Faible sensibilité à la battance	- Grand nombre de variétés récoltées - Faible fréquence d'utilisation d'outils animés - Courte période avec un sol est à l'état travaillé - Longue période avec un sol couvert de mulch	- Grand nombre de variétés récoltées en association - Grand nombre d'espèces par couvert - Grande diversité d'espèces et de familles récoltées - Longue période avec un sol couvert de mulch - Faible profondeur cumulée des travaux de sol - Faible fréquence d'utilisation d'outils animés	- Grande nombre de variétés récoltées - Faible fréquence d'utilisation d'outils animés - Faible fréquence de récolte de cultures sarclées
29	- Faible activité des VDT - Faible densité et diversité d'adventices	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de labour - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT - Courte période avec un sol couvert de mulch mort	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence des travaux de mélange du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grand IFT herbicide
30	- Forte teneur en carbone	- Assez faible fréquence de labour	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Longue période avec un sol couvert de mulch - Grande quantité d'azote apportée - Grande diversité d'espèces de couvert - Faible fréquence de mélange profond du sol - Faible profondeur cumulée des travaux de sol - Courte période avec un sol à l'état travaillé

31	- Forte activité des VDT - Faible sensibilité à la battance	- Assez faible fréquence de labour	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Longue période avec un sol couvert de mulch - Grande quantité d'azote apportée - Grande diversité d'espèces de couvert - Faible fréquence de mélange profond du sol - Faible profondeur cumulée des travaux de sol - Courte période avec un sol à l'état travaillé
32	- Très forte teneur en carbone	- Assez faible fréquence de labour	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Grande diversité d'espèces récoltées - Longue période avec un sol à l'état travaillé - Grande fréquence de travaux de mélange du sol - Grande fréquence de récolte de cultures sarclées - Faible quantité d'azote minéral apportée - Faible diversité de famille par couvert - Faible IFT herbicide
33	- Faible activité des VDT - Faible densité et diversité d'adventices	- Assez faible fréquence de labour	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence des travaux de mélange du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grand IFT herbicide
34	- Forte activité des VDT - Faible sensibilité à la battance	- Assez faible fréquence de labour	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Longue période avec un sol couvert de mulch - Grande quantité d'azote apportée - Grande diversité d'espèces de couvert - Faible fréquence de mélange profond du sol - Faible profondeur cumulée des travaux de sol - Courte période avec un sol à l'état travaillé
35	- Faible activité des VDT - Faible densité et diversité d'adventices	- Assez faible fréquence de labour	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence des travaux de mélange du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grand IFT herbicide
36	- Faible activité des VDT - Faible densité et diversité d'adventices	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de labour - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT - Courte période avec un sol couvert de mulch mort	- Grand apport en phosphore - Longue période avec des couverts sur le sol	- Grands IFT (surtout régulateur)
37	- Forte teneur en carbone	- Assez faible fréquence de labour	- Faibles IFT (régulateur/herbicide/total) - Faible quantité d'azote minérale	- Grande diversité d'espèces récoltées - Longue période avec un sol à l'état travaillé - Grande fréquence de travaux de mélange du sol - Grande fréquence de récolte de cultures sarclées - Faible quantité d'azote minéral apportée - Faible diversité de famille par couvert - Faible IFT herbicide
38	- Forte densité et diversité d'adventices	- Assez faible fréquence de labour	- Grande profondeur cumulée des travaux de sol - Grande fréquence de mélanges profonds du sol - Grande fréquence d'utilisation d'outils animés - Grande fréquence de récolte de cultures souterraines - Grands IFT (herbicide/fongicide/total) - Grande quantité d'azote minéral apportée - Faible densité d'espèces totale	- Grande diversité d'espèces récoltées - Longue période avec un sol à l'état travaillé - Grande fréquence de travaux de mélange du sol - Grande fréquence de récolte de cultures sarclées - Faible quantité d'azote minéral apportée - Faible diversité de famille par couvert - Faible IFT herbicide
39	- Très forte densité d'adventices	- Faibles IFT (herbicide/régulateur/total) - Faible quantité d'azote apportée	- Faibles IFT (régulateur/herbicide/total) - Faible quantité d'azote minérale	- Grande diversité d'espèces récoltées - Longue période avec un sol à l'état travaillé - Grande fréquence de travaux de mélange du sol - Grande fréquence de récolte de cultures sarclées - Faible quantité d'azote minéral apportée - Faible diversité de famille par couvert - Faible IFT herbicide
40	- Forte densité et diversité d'adventices	- Faibles IFT (herbicide/régulateur/total) - Faible quantité d'azote apportée	- Faibles IFT (régulateur/herbicide/total) - Faible quantité d'azote minérale	- Grande diversité d'espèces récoltées - Longue période avec un sol à l'état travaillé - Grande fréquence de travaux de mélange du sol - Grande fréquence de récolte de cultures sarclées - Faible quantité d'azote minéral apportée - Faible diversité de famille par couvert - Faible IFT herbicide

4. Discussion

4.1. Introduction

Cette partie porte sur une analyse des différents résultats obtenus dans ce mémoire. Premièrement, nous présentons une réflexion sur les indicateurs de PC qui ont été calculés à partir des historiques culturels récoltés auprès des agriculteurs. Deuxièmement, les différents indicateurs de SE et les protocoles expérimentaux sont commentés et discutés en comparaison avec d'autres études. Troisièmement, les analyses multivariées sont également commentées. Enfin, nous terminons par une réflexion sur la durée d'historique culturel à récolter afin d'être représentatif des SE mesurés en champ.

Tous les résultats sont commentés sur base de la littérature en général ou spécifiquement sur base des résultats obtenus dans les deux mémoires antérieurs liés à la thèse de L. Leveau (Belin et Fockede, 2021; Biot, 2020). Il y a plusieurs comparaisons faites avec le mémoire de fin d'étude de Fabulet (2021). Son travail avait pour objectif de montrer les effets des pratiques de conservation des sols sur la santé des sols limoneux des Pyrénées-Atlantiques (France) et cela *via* l'acquisition et la valorisation de références locales sur maïs avec l'outil Biofunctool⁸. L'outil qu'elle a utilisé propose des protocoles d'expérience afin de comparer les pratiques et les effets sur la santé des sols. Ces effets sur la santé des sols peuvent être mis en correspondance avec les SE étudiés dans ce mémoire. Le travail réalisé étant donc fort similaire à celui-ci et ayant certains protocoles identiques, il a semblé intéressant de comparer les résultats (Fabulet, 2021).

4.2. Indicateurs de pratiques culturelles

Les indicateurs de PC n'ont pas été analysés en profondeur dans ce travail car l'objet de l'étude est principalement d'identifier l'impact de ces PC sur les SE. Ce sont donc les SE et les liens entre PC et SE qui ont été étudiés dans les détails.

Pour rappel, les PC ont été récoltées sur une durée de 10 ans car cela permet d'être certain d'inclure au moins une rotation complète chez tous les agriculteurs avec pour objectif d'être le plus représentatif possible des pratiques mises en place. Sur cette durée, nombreux sont les agriculteurs qui ont adapté leurs pratiques ou même changé de système culturel (passage de conventionnel à bio, abandon du labour,...). Afin de prendre en compte ces changements mais aussi de vérifier s'il est possible de réduire la charge de travail liée à l'enquête sur les pratiques, il a été décidé de créer des indicateurs sur des durées d'historique culturel plus courtes (2 et 5 ans) et de les comparer. Une discussion à ce sujet sera faite au point 4.4.4.2.

⁸ Biofunctool est un outil qui a été créé par le CIRAD afin d'évaluer trois fonctions du sol portées par les assemblages biologiques du sol : la dynamique du carbone, le cycle des nutriments et le maintien de la structure.

4.3. Indicateurs de services écosystémiques

Cette section contient une discussion concernant les liens entre les résultats des mesures de SE et les résultats obtenus dans d'autres études similaires. Certaines remarques sont faites concernant les protocoles et des pistes d'améliorations sont proposées. La presque totalité des résultats sont comparés avec ceux du mémoire de Belin et Fockedey (2021). Il faut cependant tenir compte du fait que les parcelles étudiées, l'année et les conditions météorologiques ne sont pas similaires, un regard critique est donc nécessaire.

4.3.1. Incorporation de la matière organique

Le protocole utilisé pour cette mesure (EcoBioSoil, 2022b) est destiné initialement aux particuliers. Par conséquent, aucune autre étude utilisant ce protocole n'a été trouvée dans la littérature. De plus, les résultats des indicateurs de l'incorporation de la MO sont difficiles à comparer avec d'autres études car les valeurs obtenues sont liées au protocole. Les résultats peuvent cependant être comparés avec ceux obtenus par Belin et Fockedey (2021).

Les valeurs obtenues pour l'indicateur de cabanes en fin d'expérience oscillent entre 0 et 11 cette année contre 0 à 32 l'année passée. Au niveau des turricules, ces valeurs sont de 0 à 10 contre 0 à 93 l'année précédente. La surface de paille finale se situe entre 20 et 100 pourcents alors qu'elle était entre 10 et 90 pourcents l'année passée. Enfin, pour le poids de paille restant, les valeurs oscillent entre 15 et 70 grammes contre 15 et 49 grammes lors du mémoire de Belin et Fockedey (2021). Il faut toutefois noter que l'année passée la paille a été lavée avant d'être séchée et pesée, alors que cette année elle a été séchée mais pas lavée car il a été supposé que le lavage n'avait pas beaucoup d'effet sur la mesure. Par conséquent, la paille de cette année était contaminée avec de la terre. Les indicateurs de cabanes et de turricules semblent montrer une moindre activité d'enfouissement par les VDT cette année en comparaison avec l'année 2020-2021. Cette différence d'activité peut être liée à l'échantillon de parcelle qui est différent mais aussi aux paramètres météorologiques de l'année. En effet, comme cité au point 1.3.1.1, la température et l'humidité du sol impactent fortement le développement des VDT. Il est également probable qu'il y ait un biais lié à l'expérimentateur entre les deux années de mesure. Au sein d'une seule année, ce biais n'existe pas car le même expérimentateur a effectué toutes les observations de VDT.

La différence au niveau du nombre de turricules entre les deux années peut s'expliquer par le choix qui a été fait cette année de ne faire qu'un passage en champ tous les mois à la place d'un tous les quinze jours. En effet, sachant que les précipitations ont été intenses entre les mois d'octobre et de février, il est fort probable que les turricules aient fondu avec la pluie entre les différents passages en champ. De plus, le comptage des turricules a été effectué par photo au lieu de sur place ce qui rend l'observation des turricules cachés sous la paille plus compliquée.

Concernant l'indicateur des cabanes de VDT, nos observations de terrain ont montré que même si des corrélations entre le poids, la surface et les cabanes sont observées, les VDT peuvent construire peu de cabanes et incorporer beaucoup de matière. Au contraire, ils peuvent également construire beaucoup de cabanes (lieux de captages de la matière) en « déménageant » régulièrement sans pour autant incorporer beaucoup de MO. De plus lorsque qu'il ne reste qu'une faible quantité de paille, les cabanes sont difficiles à identifier même si les vers continuent à incorporer la paille.

L'indicateur de poids de paille en fin d'expérience comporte quelques données aberrantes. En effet, on retrouve des poids de paille supérieurs à 50 grammes alors que seulement 50 grammes avaient été introduits dans les paniers au départ. D'après les observations faites lors de la pesée, il semble que ces erreurs soient dues à de la terre mélangée à la paille. A priori, ces valeurs aberrantes ne concernent que les parcelles 21, 22, 23 et 29 car ce sont les seules parcelles dans lesquelles le poids final de paille est supérieur à 50 g (Annexe 13). Cependant, d'autres parcelles pourraient être affectées par ces erreurs sans pour autant dépasser 50 grammes de paille car une bonne partie de celle-ci aurait été enfouie.

Afin d'identifier si ces erreurs sont généralisées à toutes les parcelles, un graphique représentant le nombre de cabanes, le poids et la surface de paille en fin d'expérience a été réalisé (Figure 33). Les indicateurs ont été modifiés dans les graphiques pour avoir des échelles similaires (de 0 à 100). L'indicateur de surface a donc été maintenu, l'indicateur de poids a été multiplié par deux et l'indicateur de cabanes a subi la transformation suivante : $T_{cabf} = 100 - (T_{cabf} \times 5)$. Dans certains cas, l'erreur est évidente lorsque le poids dépasse la valeur 100 comme pour les parcelles 21 à 23. Pour d'autres parcelles, outre le dépassement de la valeur 100, un décalage régulier est observé entre l'indicateur poids et les autres indicateurs comme pour la parcelle 29. Lorsque l'écart entre le poids et les autres indicateurs n'est pas très marqué, l'écart avec les autres valeurs poids de la parcelle est regardé. Par exemple, pour la placette 3 du champ 35, l'indicateur poids n'est pas très écarté de l'indicateur de cabanes mais il est nettement au-dessus des autres indicateurs poids de la parcelle 35. Les indicateurs de cabanes et de surface étant relativement stables au sein de la parcelle, il est fort probable qu'il y ait eu une contamination de l'échantillon par de la terre.

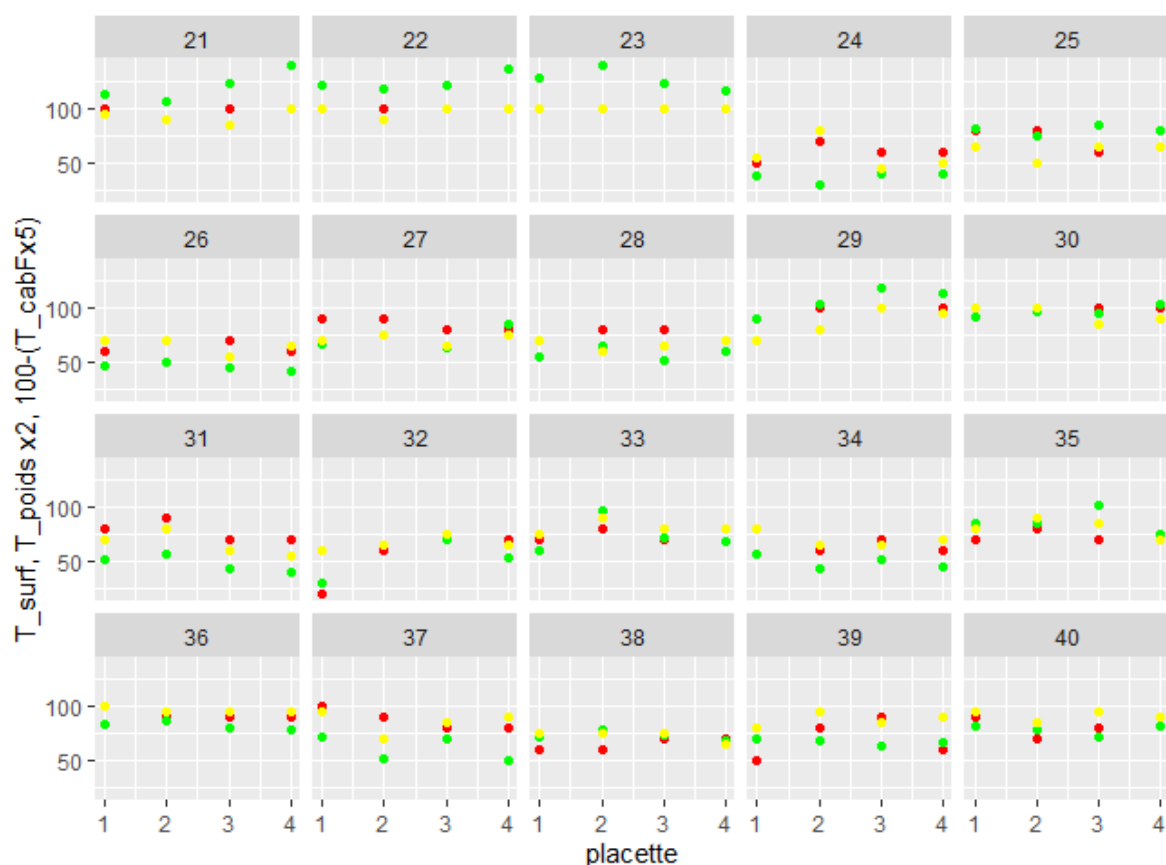


Figure 33 : Comparaison des indicateurs de vers de terre. Indicateurs de poids de paille (vert), de surface de paille (rouge) et de cabanes de vers de terre (jaune) en fin d'expérience. Les valeurs ont été modifiées pour être mises sur des échelles similaires (0-100). (poids = poids*2, cabanes = 100-cabanes*5).

Le graphique de la figure 33 confirme que ces erreurs concernent principalement les parcelles 21, 22, 23 et 29. Pour d'autres parcelles, certaines placettes uniquement semblent être affectées par une erreur (placette 3 du champ 35). Ce graphique démontre également l'existence de corrélations entre les différents indicateurs émettant l'idée que certains pourraient être supprimés pour éviter une redondance entre les indicateurs.

Pour pallier ce problème de terre, il ne faudra plus faire l'impasse sur le rinçage de la paille avant le séchage en fin d'expérience lors des futures applications de ce protocole.

Il est important de noter que les expériences des paniers à VDT ont été installées entre le 15 octobre et le 20 novembre 2021 et ont été retirées le 12 avril 2022. La durée de l'expérience varie donc d'un mois entre les premières et les dernières parcelles semées. Par conséquent, les indicateurs pourraient être influencés par cet élément. A l'avenir, les paniers pourraient être installés en même temps lorsque la dernière parcelle est semée. Cela pourrait cependant apporter d'autres problèmes comme le fait que les VDT des premières parcelles semées auraient le temps de redévelopper leur activité suite à la perturbation du semis alors que les dernières parcelles semées viennent d'être perturbées. Il y aura donc un impact sur l'activité des VDT et nos mesures.

4.3.2. Teneur en carbone organique

Les résultats obtenus pour le CO total varient entre 0,84 et 1,95 g/100g de sol sec. En comparaison, l'année passée le carbone total variait entre 0,94 et 1,75 g/100g.

Les valeurs de CO stable (fraction fine) varient de 0,33 à 0,51 g/100g, avec une moyenne de 0,42 g/100g, contre 0,23 à 0,50 g/100g l'année passée.

Les valeurs de CO labile (fraction grossière) varient de 0,47 à 1,44 g/100g, contre 0,63 à 1,31 g/100g l'année passée. Ces valeurs correspondent à des teneurs moyennes à très élevées, avec une moyenne de 0,67 g/100g pour cette année. La teneur en carbone labile est plus élevée que le carbone stable. Cela veut dire que l'apport de MO jeune, apportée depuis moins de cinq ans (Jangir *et al.*, 2019), est assez important pour la majorité des parcelles et que le stock de carbone stocké sur du long terme est plus faible.

L'indicateur C_{qfrac} varie de 1,07 à 2,85 ; cela veut dire que toutes les parcelles sont en phase d'augmentation du taux de MO. En comparaison, l'année passée le rapport carbone labile/stable variait entre 1,23 et 5,18.

Il ne faut pas oublier que sur les quatre échantillons prélevés par parcelle, uniquement un a été analysé en laboratoire et donc utilisé dans les différentes analyses statistiques, pour des raisons de soucis techniques en laboratoire. Il sera donc intéressant d'analyser ces autres échantillons afin de voir si les mêmes tendances se confirment.

Tous les sols des parcelles de l'étude sont dans des valeurs de teneur en CO assez élevées selon le protocole Carbiosol (Annexe 16) (Vincent *et al.*, 2019). Ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus par Belin et Fockedey (2021). Il faut cependant ajouter que leurs résultats n'ont également pas eu de répétition par parcelle, ce qui fait que les valeurs ne portent que sur 20 données.

4.3.3. Stabilité des agrégats

De manière générale, avoir une bonne stabilité du sol (score élevé) est bénéfique car cela permet de limiter l'érosion et la battance, ainsi que d'avoir une bonne rétention de l'eau et des minéraux (Bissonnais, 1995; Odile *et al.*, 2013).

Il existe peu de résultats d'expériences à propos du test USDA. C'est pourquoi des comparaisons sont faites avec les autres mémoires réalisés dans le cadre de la thèse de L. Leveau (Biot, 2020 et Belin et Fockedey, 2021) ainsi que par Fabulet (2021). Biot a obtenu lors de ses expériences des scores pour les terres de cultures globalement compris entre 3,75 et 4,75. Alors que Belin et Fockedey ont rencontré tous les scores de 1 à 8 au moins une fois, avec des données variant autour d'une moyenne de 3,5. Cette année, la moyenne des scores est de 3,1 ; ce qui est proche mais un peu plus faible que l'année passée. Cette différence avec les deux mémoires peut s'expliquer par le fait que le protocole de Biot a été adapté par Belin et Fockedey et que cette année le protocole a de nouveau été légèrement adapté. En effet, tous les agrégats (12) ont été prélevés sous la croûte de battance alors que l'an passé,

la moitié des agrégats ont été pris dans celle-ci. On peut donc considérer que le nombre d'agrégats récoltés n'ayant pas été battus par la pluie a doublé. Cette double adaptation explique peut-être l'obtention de scores plus faibles.

Fabulet (2021) a obtenu pour les agrégats prélevés dans l'horizon supérieur (0 à 2 cm) des scores variant en moyenne de 4,5 à 6 pour les différents travaux de sol étudiés. Du plus faible au plus élevé, on retrouve le labour, le système de techniques culturales simplifiées (TCS) jeune (<5 ans), le TCS vieux (>10 ans) et le semis direct. L'échelle de score utilisée est celle du protocole de départ avec un score maximum de 6 (Annexe 7), alors que dans ce travail, le score maximum est de 8 avec de nouvelles classes intermédiaires créées (Tableau 4). On peut donc supposer que les scores obtenus par Fabulet seraient plus élevés avec une échelle de score allant jusqu'à 8. En comparaison avec les scores obtenus cette année dont la moyenne est de 3,1, les scores obtenus par Fabulet sont bien supérieurs. Cela pourrait s'expliquer par le fait que dans son réseau d'agriculteur, la majorité utilise des techniques permettant de conserver la structure des sols et donc d'en augmenter la stabilité. Lorsque l'on regarde plus précisément les résultats obtenus cette année par parcelle, on remarque que les agriculteurs pratiquant le semis direct, se considérant en TCS ou en agriculture de conservation de sol ont des scores plus élevés que les parcelles conventionnelles. La tendance proposée par Fabulet est donc similaire aux résultats du mémoire mais il est important de retenir que la région d'étude et donc les sols ne sont pas les mêmes.

On a pu constater que de nombreux échantillons s'étaient vus attribuer un score de 2 et 3. Il serait peut-être intéressant à l'avenir d'ajouter des scores intermédiaires afin de capter encore plus la variabilité de stabilité entre les agrégats.

4.3.4. Évolution de la croûte de battance

Dans cette partie, après avoir discuté les données pluviométriques, la discussion est séparée en deux parties. D'abord, les protocoles utilisés sont commentés et des pistes d'amélioration sont proposées. Ensuite, les résultats obtenus sont comparés à d'autres études et discutés.

4.3.4.1. Données pluviométriques

Les données de pluie utilisées cette année proviennent du réseau de stations météorologiques Pameseb. Le réseau comprend 30 stations réparties sur toute la Wallonie, cela veut dire qu'il y a une station pour environ 550 kilomètres carrés. Ce nombre de station est donc faible en comparaison avec la grande variabilité spatiale des précipitations. Comme nous prenons pour chaque parcelle expérimentale les données de la station météo la plus proche, il serait intéressant qu'il y ait plus de stations ou que les stations soient plus proches des parcelles.

L'exactitude de ces données par rapport à la réalité de la pluie tombée sur chaque parcelle n'est donc pas excellente mais permet d'avoir une estimation. Si l'objectif avait été de calculer

précisément le lien entre pluie et battance du sol, il serait important de calculer les précipitations sur la parcelle précisément.

Il reste important de préciser que l'intensité de la pluie (mm/h) a plus d'effet sur la dégradation du sol que la quantité de pluie (mm). Il serait donc nécessaire de mesurer l'intensité à la place de la quantité pour être plus proche de la réalité et cela par exemple en analysant les données radar de l'IRM (IRM, 2022).

4.3.4.2. Discussion des protocoles

a. Protocole de B_Dmin

Contrairement au protocole de Boiffin (1984) qui proposait de mesurer le Dmin directement sur le terrain, cette année il a été mesuré à partir des photos prises en champ, en mesurant la taille des plus petits agrégats à la surface du sol au cours du temps avec l'aide de gabarits.

La détermination du Dmin *via* les photos n'a pas été d'une grande facilité. Les photos étant en deux dimensions, il manquait parfois une perspective de profondeur pour déterminer avec précision si l'agrégat est incorporé ou non à la croûte de battance. Il serait donc intéressant de réaliser la mesure de Dmin directement sur la parcelle bien que les conditions climatiques de l'hiver rendent cette mesure assez pénible.

Le Dmin est mesuré à partir du placement de l'expérience jusqu'au moment où la croûte de battance est formée. Ce qui veut dire que peu importe le stade initial du sol – donc le Dmin initial –, la mesure se termine au même stade de dégradation de la surface du sol. Lorsque le Dmin initial est plus grand car le sol est travaillé plus grossièrement, cela aura un impact sur la courbe du Dmin en fonction du temps, ce qui influence la valeur de l'indicateur B_Dmin. La mesure est donc fortement influencée par l'état initial du sol comme l'a constaté Boiffin (1984) dans sa thèse. Cette mesure ne permet donc pas d'analyser l'évolution de la surface de croûte au cours du temps de la même manière pour toutes les parcelles car celle-ci dépend des travaux de sol réalisés avant le semis de la céréale.

b. Protocole de B_Dlim

En ce qui concerne la répartition initiale des calibres d'agrégats, la proportion de la surface couverte par les petits agrégats (2, 5 et 10 mm) a été évaluée sur le terrain alors que pour les plus grands agrégats, la mesure de la surface couverte a été réalisée *via* les photos. Cette méthodologie a très bien fonctionné car les petits agrégats sont difficilement observables en photo alors que pour les grands agrégats, il est plus facile d'estimer leur surface avec l'aide de gabarits sur ordinateur.

Cette méthode de mesure *via* photo ainsi que les catégories utilisées pour classer les surfaces non couvertes par des agrégats, comme « surface lisse », « surface sombre » ou « surface couverte par de la MO », ont un impact sur le calcul de l'indicateur de Dlim (B_Dlim). Il a été décidé de considérer que les surfaces lisses et sombres faisaient partie de la « plaque initiale ». C'est pour cette raison que la classe de calibre « 0 mm » existe (Annexe 17). Il a

également été choisi de pondérer les valeurs des catégories afin que la surface totale couverte corresponde à 100% de la surface de la placette. C'est pourquoi toutes les courbes de l'annexe 17 convergent vers 100. Il serait intéressant d'étudier l'impact de ces choix dans une étude ultérieure.

En ce qui concerne le calcul de la surface de plaque au cours du temps, la méthode de mesure se base sur un système de classes de valeur (Tableau 6). Un inconvénient de cette méthode est qu'elle n'est pas très précise car elle attribue une même valeur à toutes les surfaces d'une même classe (valeur moyenne de la classe). Il est important de préciser qu'il n'est pas possible de comparer la surface de plaque avec d'autres études car celle-ci est influencée, entre autres, par les conditions climatiques et la date de semis.

Ces deux mesures (répartition initiale des agrégats et surface de plaque) ont été réalisées par deux personnes différentes et sont assez chronophages, ce qui pourrait expliquer un biais dans la mesure de cette année mais également entre les différentes années de l'étude de la thèse de L. Leveau. Pour limiter ce biais entre les années, la mesure de la surface de plaque est réalisée par L. Leveau pendant les trois années de mesures.

Pour terminer, un point important de cette mesure est qu'elle ne dépend pas de l'état initial du sol ; en ce qui concerne la répartition et la taille des agrégats. Cela s'explique par le fait que la mesure de répartition initiale des agrégats n'est utilisée que pour déterminer la taille du plus grand agrégat incorporé dans la plaque de battance en fonction de la mesure de la surface de plaque. Cette indépendance permet à l'indicateur B_Dlim d'être moins dépendant des travaux du sol réalisés avant le semis 2021.

c. Comparaison des deux protocoles

Suite à la discussion des deux protocoles, on peut dire que la mesure de Dlim est très complexe en comparaison avec la mesure de Dmin. Mais elle a l'avantage de ne pas dépendre de l'état initial du sol.

Les deux méthodes sont réalisées *via* l'analyse de photos, les deux sont donc sujettes à une certaine approximation de l'observateur.

Les droites de régression pour les deux indicateurs, avec la pluie cumulée en abscisse et les valeurs de Dmin ou Dlim en ordonnée, sont calculées à partir d'un certain nombre de points (en fonction du nombre de passages en champ). Si le nombre de points est faible car certains ont été supprimés pour les effets de plateau qu'ils engendraient, un point qui a été « mal » mesuré peut avoir un grand impact sur la pente de la droite de régression. Il est donc important de supprimer les points qui semblent erronés.

Le protocole de Boiffin (1984) demande que le sol soit à l'état fragmentaire et « nu », sans végétation, pour faire l'observation de la battance. Pour ce faire, il a été nécessaire de travailler le sol de certaines parcelles, notamment les parcelles en semis direct (24, 27 et 28). Cependant, si l'objectif est de comparer les pratiques et la battance, la mesure sur ces

parcelles n'est pas représentative des PC étant donné que le semis direct sous couvert est réalisé dans le but d'éviter la battance.

4.3.4.3. Discussion des résultats

a. Résultats de B_Dmin

Les valeurs de B_Dmin obtenues varient entre 0,15 et 0,89 mm d'agrégats par mm de pluie avec une moyenne de 0,47. Il est difficile de comparer cette mesure à d'autres études car elle est très dépendante du type de sol et ce dernier dépend fortement de la région d'étude. De plus, il n'est pas possible de comparer les résultats avec ceux de Belin et Fockedey car ils n'ont pas réalisé la mesure dans leur travail. Lorsque l'on compare tout de même les résultats obtenus à d'autres études, nos résultats semblent en moyenne plus élevés et avec une variance également plus élevée (Annabi, 2005; Ouvry, 1990). Cela pourrait s'expliquer par le grand nombre de parcelles de l'étude, tous avec des PC assez différentes.

b. Résultats de B_Dlim

Les valeurs de B_Dlim obtenues varient entre 0,04 et 0,90 mm d'agrégats par mm de pluie avec une moyenne de 0,3. Alors que, les valeurs obtenues par Boiffin (1984) sont comprises entre 0,12 et 0,35 mm/mm de pluie et celles obtenues par Belin et Fockedey (2021) entre 0,18 et 1,21 mm/mm de pluie avec une moyenne de 0,6.

Il est possible d'expliquer la variabilité des données par rapport à Boiffin (1984) par un plus grand nombre de parcelles avec des pratiques différentes, des conditions d'expérience moins contrôlées (chaque agriculteur à ses propres PC), un observateur différent ou encore une date de semis différente et donc l'apparition de pluie plus ou moins tôt. C'est d'ailleurs la raison de la création d'une variable à propos de la durée entre le semis et la première pluie qui sera discutée au point 4.4.3.2.

Toutes ces conditions sont retrouvées également par Belin et Fockedey (2021), c'est pourquoi les indicateurs sont assez proches en termes de distribution. Les données de l'année passée sont cependant plus élevées ; cela pourrait s'expliquer par une intensité des pluies de l'année 2020-2021 plus forte mais aussi simplement par l'échantillon de parcelles qui est différent. De plus, les deux manipulations sur les données de répartition initiale des calibres d'agrégats n'ont pas été réalisées par Belin et Fockedey, ce qui pourrait également expliquer l'écart entre les résultats.

c. Comparaison de B_Dmin et B_Dlim

Les valeurs obtenues cette année pour les indicateurs B_Dmin et B_Dlim ne sont pas proches l'une de l'autre, avec un B_Dmin plus grand que le B_Dlim. Ceci est étonnant car les deux méthodes créées par Boiffin doivent, selon lui, arriver aux mêmes conclusions sur l'évolution de la battance (Boiffin, 1984).

Cette différence peut être expliquée par le fait que deux observateurs différents ont participé aux analyses de photos. L. Leveau a mesuré les surfaces de plaque et une autre personne a

réalisé les autres observations. Au plus les observateurs ont analysé les photos avec précaution, au plus la valeur de D_{min} sera surestimée (pour être sûr que l'agrégat ne soit pas dans la plaque) et la valeur de D_{lim} sera sous-estimée (pour être sûr de ne pas prendre en compte plus que la surface de plaque). Ce qui peut mener à un écart entre les deux indicateurs. Il serait donc intéressant que la même personne réalise toutes les mesures.

L'objectif de la réalisation des deux mesures de cette année était de prouver que les deux arrivaient aux mêmes conclusions sur la battance du sol par la pluie. La faible corrélation entre les deux mesures ne permet cependant pas d'affirmer cela. Il sera donc intéressant de renouveler les deux mesures l'année prochaine.

4.3.5. Compaction du sol

La compaction des sols a été évaluée selon la méthode VESS qui attribue un score à chaque sol allant de 1 (Très friable) à 5 (Très compact). Le score optimum semble être de 2,5, ce qui correspond à un sol ferme mais aéré (Brauman et Thoumazeau, 2020; Fabulet, 2021). Ce qui veut dire que, contrairement à tous les autres indicateurs, ce sont les valeurs moyennes qui sont les meilleures. Cet élément est à prendre en compte lors de l'observation des corrélations avec l'indicateur de compaction.

Une méta-analyse à propos de la méthode VESS confirme cela en disant que le score optimum se trouve entre 2 et 3 (Franco *et al.*, 2019). Et pour les sols Aba de Wallonie l'optimum est de 2,8 (Franco *et al.*, 2019). Avec un score moyen de 3,1 et un écart-type de 0,6 pour les résultats de cette année, on peut considérer que la majorité des parcelles ont une bonne compaction du sol. Ces résultats sont également rejoints par les résultats du mémoire de Belin et Fockede (2021) qui ont obtenu un score moyen de 2,9. Le score supérieur de cette année pourrait s'expliquer par un état hydrique du sol différent au moment de la mesure, mais peut également être dû à un biais de l'expérimentateur car comme l'a écrit Fabulet (2021) : « La grille de notation semble être construite pour un utilisateur plus expérimenté et habitué des différentes structures de sol ». Les observations des scores VESS de cette année ont été réalisées par une même personne ce qui permet de pouvoir comparer les parcelles entre elles sans biais lié à l'expérimentateur.

La variabilité entre les parcelles et les placettes semble assez forte. Ce point a été aussi soulevé par Belin et Fockede (2021) mais est également visible dans les résultats de l'étude de Fabulet (2021) entre les différents travaux de sol.

Cette variabilité entre les parcelles peut s'expliquer par la large gamme de structures différentes dues à des pratiques propres à chaque agriculteur. Pour ce qui concerne l'hétérogénéité au sein des parcelles, celle-ci est de manière générale assez importante pour l'ensemble des parcelles mais permet tout de même de distinguer les parcelles entre eux. Il est donc important de prendre assez de mesures pour être représentatif de la moyenne de la parcelle.

4.3.6. Pression en adventices

Les résultats obtenus pour les indicateurs de densité et de compétition des adventices sont très variables entre les parcelles. Les données et les observations sur le terrain montrent que cette variabilité provient notamment des méthodes de désherbage qui sont très différentes en bio et en conventionnel. En effet, les herbicides chimiques sont interdits en AB. Les agriculteurs ont donc recours généralement au désherbage mécanique mais celui-ci est bien moins efficace contre les adventices.

Certaines parcelles ont été semées dans un couvert végétal déjà développé (semis direct). Pour ces parcelles (24, 27 et 28), la densité et la compétitivité des adventices sont élevées, notamment à cause des couverts de plantes compagnes qui sont encore en partie présents. Les plantes compagnes ont été reprises dans les adventices. Il serait peut-être intéressant pour les années futures de faire une distinction entre les deux. Ces couverts jouent un double rôle : ils entrent en compétition pour les nutriments, l'eau et la lumière mais ils peuvent également apporter de l'azote (légumineuses) et couvrent le sol (plus rapidement que les adventices) pour éviter la formation d'une croûte de battance ou même empêcher le développement d'adventices. Ils ont donc un rôle positif contrairement aux adventices qui sont surtout nuisibles pour les cultures.

Comme dit au point 1.3.3, chaque plante (couvert ou adventice) a un potentiel de compétition directe différent mais également un potentiel de multiplication différent (compétition indirecte) (Livre Blanc Céréales, 2021). Afin de mieux tenir compte de ces différences, les coefficients de compétitivité pourraient être adaptés. Actuellement, ils ne dépendent que du stade phénologique des plantes mais cela pourrait être couplé avec un coefficient lié à la multiplication qui serait propre à chaque espèce. Cela permettrait d'être beaucoup plus précis lors du calcul de la compétitivité des adventices.

4.3.7. Discussion sur les méthodes de mesure

Dans ce travail, beaucoup de mesures sont basées sur des appréciations visuelles (VESS, surface de paille, comptage des cabanes et des turricules de VDT, évolution de la croûte de battance...). Ces appréciations visuelles par classes de valeur peuvent apporter un biais lié à l'observateur important. Selon L. Leveau, une méthode de comparaison par paires pourrait être plus adéquate. Cette méthode a déjà été testée pour des évaluations dans de nombreux domaines (Balloffet, 1995). Des logiciels sont également développés pour les enseignants (Comproved, n.d.). La méthode consiste à présenter des objets deux par deux afin de les comparer en indiquant lequel est plus le grand et cela sans leur donner de valeur. Par exemple, pour évaluer la surface de paille restante dans les paniers à VDT, ceux-ci peuvent être observés deux à deux et l'observateur indique lequel est le plus recouvert de paille sans pour autant évaluer un pourcentage de surface recouverte. L'observateur réalise le même exercice de manière aléatoire sur tous les paniers et finalement il sera possible d'établir une classification précise des paniers en fonction de la surface de paille qui les recouvre.

Toutes les expériences ont généralement été faites par une seule personne afin d'éviter le plus possible un biais. Malgré cela, d'une année à l'autre il n'est pas possible que ce soit le même expérimentateur, il y a donc un biais inévitable qu'il faudra prendre en compte lors de l'assemblage des données des trois années d'expérience.

4.4. Analyses multivariées

4.4.1. Liens entre les services écosystémiques

Dans cette partie, les liens entre les indicateurs de SE seront discutés avec l'aide du dendrogramme (Figure 29) et de la matrice de corrélation (Figure 26).

4.4.1.1. Dendrogramme des services écosystémiques

La figure 29 permet de regrouper les parcelles selon les SE qui ont été mesurés expérimentalement. La classification a été faite avec l'ensemble des indicateurs de SE. Cependant, certaines parcelles (32 et 39) ont été retirées de l'échantillon à cause de valeurs trop élevées pour certains indicateurs qui avaient trop d'influence sur la classification.

La première parcelle retirée est la 32. Celle-ci a une teneur en CO (stable et labile) particulièrement élevée en comparaison avec les autres parcelles : la teneur en carbone total est de 1,95g/100g de sol sec. Elle est la seule parcelle à avoir une teneur en carbone très élevée selon les données du rapport Carbiosol de l'annexe 16. Les parcelles 32 et 33 sont cultivées par le même agriculteur mais il y a pratiquement une différence du simple au double entre les deux parcelles au niveau de la teneur en carbone total. Un contact a donc été pris avec l'agriculteur afin de comprendre cette teneur élevée mais aucune explication n'a été trouvée. Il serait donc intéressant de réaliser la mesure pour les autres échantillons prélevés sur cette parcelle car un seul a pu être analysé à temps. Cela permettrait de confirmer ou non l'écart de la parcelle 32. On remarque que cette parcelle se trouve assez proche des caractéristiques des parcelles du deuxième groupe.

La deuxième parcelle retirée est la 39. Celle-ci a une densité d'adventices particulièrement élevée avec une moyenne de 235 plantes/m² alors que la moyenne de l'ensemble des parcelles est d'environ 20 plantes/m². La première explication est que cette parcelle est cultivée selon le système biologique ; aucun désherbage chimique n'est donc réalisé. Il est bien connu que les adventices sont un vrai problème en AB. Pourtant, toutes les parcelles en bio n'ont pas une densité d'adventices si élevée, même s'ils sont pour cet indicateur généralement plus hauts que la moyenne. Les parcelles 39 et 40 sont cultivées par le même agriculteur ; pourtant la parcelle 40 a une densité d'adventices bien plus faible (33 plantes/m²). Une telle différence pose question. Une réponse pourrait être que la parcelle 40 a eu comme précédent pendant deux années une culture de luzerne. Cette culture a pour particularité d'impacter négativement, donc diminuer, l'abondance et la diversité des adventices (Médiène *et al.*, 2019). On remarque que cette parcelle se trouve assez proche des caractéristiques des parcelles du cinquième groupe.

Le premier groupe de la classification est composé de sept parcelles (21, 22, 23, 29, 33, 35 et 36) qui sont caractérisées par une faible activité des VDT et une faible densité et diversité d'adventices. Ces parcelles sont toutes cultivées de manière conventionnelle ou en TCS. Ces parcelles sont généralement caractérisées par un travail du sol important et l'utilisation d'herbicides. Ceci peut expliquer respectivement la faible activité des VDT (impactés négativement par le travail du sol) et les valeurs faibles de densité et diversité d'adventices (impactées négativement par les herbicides).

Le deuxième groupe est composé des parcelles 30 et 37. Ces deux parcelles ont la particularité d'avoir une teneur en CO élevée, qui reste cependant plus faible que la parcelle 32 retirée de l'échantillon. La teneur de ces trois parcelles est particulièrement élevée pour le carbone labile avec des teneurs supérieures à 1g/100g de sol sec. Cette teneur en carbone labile est généralement un signe d'un grand apport en MO dans les cinq dernières années (Jangir *et al.*, 2019).

Le troisième groupe est composé de la parcelle 27 uniquement qui est caractérisée par une présence élevée de turricules ainsi qu'une forte densité d'adventices. Cette parcelle 27 a été semée cette année dans un couvert *via* la technique du semis direct. Comme il n'y a pas eu de travail du sol avant le semis, les VDT n'ont pas été impactés négativement et donc il est normal de voir une quantité de turricules importante. Ensuite, la forte densité d'adventices est à prendre avec précaution car, comme déjà dit précédemment, les plantes du couvert ont été comptabilisées avec les adventices. Il est donc attendu en semis direct d'avoir une densité « d'adventices » (adventices et couverts) élevée.

Le quatrième groupe est composé de quatre parcelles (24, 28, 31 et 34). Elles sont caractérisées par une forte activité des VDT et une faible sensibilité du sol à la battance. Sur ces quatre parcelles, trois sont en agriculture de conservation (24, 28 et 34) et la dernière (31) est en conventionnel mais possède un élevage bovin et donc beaucoup de fumier est apporté sur les parcelles de l'agriculteur. On peut donc voir ici que le fumier a eu un impact similaire aux techniques de conservation des sols (limitation du travail du sol) sur les SE liés aux VDT et à la battance du sol. Premièrement, on remarque que les VDT ont été favorisés sur les parcelles dont le sol est moins travaillé et où beaucoup de fumier est apportée ; ce qui est confirmé dans la littérature (Syers and Springett, 1984). Deuxièmement, on remarque que pour les mêmes raisons (moins de travail du sol et apport de fumier), le sol est moins sensible à la battance par la pluie.

Le cinquième et dernier groupe est composé de quatre parcelles (25, 26, 38 et 40) ; celles-ci ont une densité et une diversité d'adventices plus élevées que le reste des parcelles. Elles ont cependant une densité d'adventices plus faible que les parcelles 27 (troisième groupe) et 39 ; pour rappel cette dernière a été retirée de l'échantillon. Toutes les parcelles de ce groupe sont cultivées en AB, cela veut dire qu'aucun traitement chimique n'est réalisé, dans ce cas, contre les adventices. Il n'est donc pas surprenant de trouver plus d'adventices sur ces parcelles.

4.4.1.2. Matrice de corrélation des services écosystémiques

La matrice de corrélation reprenant les 19 indicateurs de SE se trouve à la figure 26.

Les indicateurs liés aux VDT sont de manière générale tous liés entre eux. On peut se dire que tous les indicateurs conduisent aux mêmes conclusions et qu'il y a donc une certaine redondance entre eux. Il est cependant important de rappeler que tous les indicateurs concernant les vers ne sont pas à prendre dans le même sens. Une activité forte des VDT se traduit par un nombre élevé de turricules et de cabanes mais une valeur faible de surface et de poids de paille.

Plus spécifiquement, tous les indicateurs de turricules sont corrélés entre eux et de même pour les indicateurs de cabanes. La même observation a été réalisée par Belin et Fockedey (2021). A l'avenir, il serait donc suffisant de calculer les indicateurs de turricules et de cabanes qu'en fin d'expérience (T_{turF} et T_{cabF}). Attention que pour mesurer ces indicateurs, il sera tout de même nécessaire de réaliser plusieurs mesures car ce sont des résultats cumulés. Les indicateurs de turricules et de cabanes sont corrélés positivement entre eux mais seulement moyennement. Il n'est donc pas possible d'affirmer que si on enlevait un des deux types d'indicateurs, il n'y aurait pas une perte d'information sur les VDT. Il est également possible que le nombre faible de turricules observés explique la corrélation moyenne obtenue.

La surface et le poids de paille sont fortement corrélés entre eux, ils sont donc redondants et il serait donc possible de n'en garder qu'un des deux pour les futurs usages du protocole. L'indicateur T_{poids} prend en compte la quantité de paille dans les trois dimensions, alors que la surface de paille est en deux dimensions. Cependant, le poids de paille a été contaminé par de la terre cette année. Il sera donc intéressant de garder les deux indicateurs dans les mesures prévues l'année prochaine afin de confirmer la corrélation forte. Une surface de paille ou un poids de paille plus faible et un nombre de cabanes élevé sont indicateurs d'une activité élevée des VDT, ce qui explique la forte corrélation entre les indicateurs correspondants. Cependant, il y a des corrélations plus faibles entre les indicateurs liés à la paille et les indicateurs de turricules. On peut donc imaginer que les turricules apportent une information différente sur les vers que les cabanes.

Tous les indicateurs de vers sont corrélés avec la stabilité des agrégats (U). Ce qui veut dire qu'une présence élevée de VDT est corrélée avec une grande stabilité des agrégats. Cela confirme ce qui a été dit dans la littérature : les vers augmentent l'incorporation de la MO, ce qui a un effet bénéfique sur la structure du sol (Syers and Springett, 1984) et les turricules contribuent à la formation d'agrégats (Chauhan, 2014).

Tous les indicateurs de vers sont également corrélés avec l'indicateur de battance B_{Dlim} . Autrement dit, une présence élevée de VDT est liée à une faible sensibilité du sol à la battance, ce qui correspond à une faible sensibilité des agrégats de surface à la dégradation par la pluie. Les justifications sont identiques à celles données pour la stabilité des agrégats du paragraphe précédent.

Concernant le carbone du sol, les indicateurs de carbone sont liés entre eux mais ne sont corrélés à aucun autre indicateur à plus de 50 pourcents. Le carbone stable est uniquement corrélé avec le carbone total ; ce qui n'a pas d'intérêt lorsque l'on sait que le carbone total est la somme des carbones stables et labiles. Les trois autres indicateurs (carbone total, carbone labile et le coefficient labile/stable) sont tous fortement corrélés entre eux ; ce qui n'a encore une fois pas beaucoup d'intérêt car les corrélations sont dues aux méthodes de calcul du carbone total et du coefficient labile/stable. Il serait utile de mesurer la teneur en carbone des autres échantillons prélevés afin d'avoir un plus grand jeu de données avant de tirer des conclusions.

Concernant l'indicateur de stabilité des agrégats (U), il est corrélé avec les indicateurs de vers comme dit plus haut mais il ne présente aucune autre corrélation supérieure à 50 pourcents. Il aurait pourtant été intéressant d'observer des liens avec les indicateurs liés à la battance (B_Dlim et B_Dmin) ou l'indicateur de compaction (V) qui sont tous les trois liés à la structure du sol également.

L'indicateur de compaction (V) n'a aucune corrélation avec les autres indicateurs de SE. Cela veut probablement dire qu'aucun autre indicateur ne décrit la même dimension de SE.

Concernant les indicateurs de l'expérience de suivi de la battance du sol par la pluie, les deux indicateurs (B_Dmin et B_Dlim) ne sont pas fortement corrélés entre eux (42%). Ce qui est assez curieux sachant que l'objectif des deux méthodes est le même. Comme la mesure de B_Dmin n'a pas été mesurée lors de l'année 2020-2021, il n'est pas possible de tirer des conclusions car la différence est peut-être due à des erreurs de l'expérimentateur. Il sera donc intéressant de renouveler la mesure des deux indicateurs dans le futur.

L'indicateur B_Dmin est corrélé positivement mais faiblement avec les indicateurs de densité et de compétitivité des adventices. Cela veut dire que dans les 20 parcelles suivies, les sols sensibles à la battance ont tendance à être plus fortement couverts par les adventices. On pourrait expliquer cette corrélation par le fait que certaines pratiques mènent conjointement à une sensibilité à la battance et à une pression des adventices plus élevée. On verra dans la matrice de corrélation des PC et des SE (Figure 27 a et b) que les PC corrélées avec B_Dmin le sont également avec A_den et A_com.

Enfin, les indicateurs liés aux adventices sont globalement corrélés positivement entre eux, principalement les indicateurs de densité et de compétitivité qui sont corrélés à 95%. Ce qui est normal sachant que la compétitivité est calculée à partir de la densité. L'indicateur de diversité est cependant faiblement corrélé avec les deux autres indicateurs. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une densité élevée ne correspond pas spécialement à une diversité élevée et inversement.

4.4.2. Lien entre services écosystémiques et pratiques culturelles

4.4.2.1. Matrice de corrélation des services écosystémiques et des pratiques culturelles

Les corrélations entre PC et SE seront discutées dans cette partie lorsque celles-ci semblent intéressantes car vu le nombre d'indicateurs dans la matrice (19 SE et 50 PC), il n'est pas possible de tout discuter (Figure 27 a et b). La date de semis 2021 a été ajoutée à la matrice afin de voir ses possibles corrélations avec les SE mais sera discutée dans une section dédiée uniquement à cette variable car il ne s'agit pas d'une PC. Elle n'est pas considérée comme une pratique dans cette étude car cette variable est indépendante du choix des agriculteurs ; les semis d'automne dépendent majoritairement de la météo et de la récolte de la culture précédente. Tout comme dans la section « Résultats », les corrélations seront discutées par expérience.

Incorporation de la MO par les VDT (T ...) : Tous les indicateurs de vers sont corrélés avec la durée de recouvrement du sol par le mulch ; ce qui est logique car les VDT apprécient la MO (ici sous forme de mulch) (Syers and Springett, 1984) mais également car c'est du temps durant lequel il n'y aura pas de travail du sol et le travail du sol n'est pas apprécié par les VDT (Chauhan, 2014; Jangir *et al.*, 2019). Les vers sont également corrélés avec les cultures associées avec des couverts pour la même raison. Les indicateurs sont de manière générale corrélés aux travaux de sol. Le labour, les outils animés, la fréquence et la profondeur cumulée des travaux de sol, la fréquence des cultures récoltées sous le sol, la fréquence de fragmentation du sol sont toutes des pratiques qui défavorisent l'activité des VDT. A l'inverse, la durée depuis le dernier labour favorise l'activité des vers.

Sensibilité de la surface du sol à la battance par la pluie (B ...) : Les deux indicateurs de cette expérience sont de manière générale corrélés avec les pratiques liées au travail du sol, bien que la majorité des corrélations ne dépassent pas les 50%. On remarque cependant qu'ils ne sont pas toujours corrélés avec les mêmes indicateurs de PC, cela pourrait venir du fait qu'ils ne sont déjà pas fort corrélés entre eux.

Stabilité des agrégats sous l'action de l'eau (U) : La stabilité des agrégats est corrélée négativement avec les travaux de sol, cela signifie qu'ils auraient tendance à diminuer la cohésion entre les particules de sol et donc la stabilité des agrégats. Parmi ces travaux de sol se trouvent la fréquence et la profondeur de labour, la fréquence d'utilisation d'outils animés et la profondeur cumulée des travaux de sol. Une étude similaire a été effectuée dans le Hainaut mais les résultats n'avaient pas montré de liens entre les travaux du sol et la stabilité des agrégats (Bielders *et al.*, 2013). Cette différence pourrait venir de la méthode de calcul. En effet, aucun coefficient de corrélation n'a été réalisé mais leur approche a été de classer les agriculteurs par système agricole et de comparer les stabilités des agrégats entre systèmes. La différence peut donc venir de la variabilité des pratiques au sein des systèmes. Ensuite, la stabilité est favorisée par la MO en général, ce qui est validé par la corrélation

positive avec la durée sur dix ans durant laquelle le sol est couvert de mulch. Il est prouvé dans de nombreuses études que la MO joue un rôle important dans la stabilité du sol (Monnier, 1965).

Compaction du sol (V) : L'indicateur de compaction est corrélé à certains IFT triticum (IFT calculés pour les cultures de froments et escourgeons uniquement). Cette corrélation est sans doute le fruit du hasard car aucun lien logique n'a été trouvé dans la littérature à ce propos mais on peut dire que lorsqu'il y a plus de passage avec des engins agricoles sur un champ, la compaction sera plus importante. Il est curieux de ne pas voir une corrélation négative de plus de 50% avec le labour ou les indicateurs liés aux travaux de sol car ceux-ci devraient normalement avoir pour effet de réduire la compaction de sol.

Teneur en carbone du sol (C ...) : Les indicateurs liés au carbone sont corrélés à moins de 50 pourcents avec les indicateurs de PC. Une première explication qui a déjà été mentionnée est le fait qu'un seul échantillon par parcelle a été analysé et qu'il serait donc intéressant d'avoir plus de répétitions. Une seconde explication peut être que récolter dix ans d'historique cultural n'est pas assez pour être représentatif du contenu en carbone du sol car c'est un processus qui demande du temps (surtout le carbone stable).

Présence d'adventices dans la culture (A ...) : On remarque que le seul indicateur de SE présentant des corrélations de plus de 50 pourcents est l'indicateur de diversité d'adventices. Il est important de rappeler ici que les couverts ont été comptés comme des adventices. Ce choix pourrait avoir un impact sur les corrélations entre l'indicateur de densité d'adventices et les PC ; ce qui pourrait expliquer qu'aucune corrélation ne dépasse 50 pourcents. Premièrement, une grande diversité d'espèces récoltées favorise la diversité d'adventices. Ceci peut s'expliquer par le fait que la diversité d'espèces cultivées présente des conditions très différentes pour le développement des adventices (travail du sol au printemps ou à l'automne...). Ces conditions différentes permettent généralement de diminuer les populations d'adventices mais diversifient les types d'adventices car certaines apprécient un type de culture et d'autres un autre type de culture. Deuxièmement, la diversité d'adventices est corrélée négativement avec l'azote minéral apporté. Ceci est probablement lié au fait que les parcelles en AB ont une diversité d'adventices plus élevée et la législation bio interdit d'utiliser l'azote minéral. Troisièmement, la profondeur du labour diminue la diversité d'adventices. Cette corrélation est tout à fait normale car l'objectif principal du labour est de retourner le sol afin d'enfouir les adventices et ainsi les faire mourir. Enfin, une corrélation négative entre les IFT herbicide et la densité d'adventices était attendue de manière significative, pourtant, un coefficient de seulement 49% de corrélation a été attribué entre ces deux indicateurs.

4.4.2.2. Comparaison des corrélations entre services et pratiques avec les données de l'an passé

Le tableau 13 reprend les principales corrélations entre les indicateurs de SE et de PC du point précédent afin de les comparer aux corrélations obtenues lors de l'année 2020-2021 par Belin et Fockedey (2021). Ce tableau permet de montrer les premières similitudes dans les informations récoltées expérimentalement durant deux années consécutives. Ces premiers liens sont généralement des confirmations de la littérature et ne sont pas des éléments nouveaux. Les quelques différences observées entre les corrélations montrent la nécessité d'effectuer plusieurs années de répétitions. Cependant, on peut tout de même voir que la majorité des corrélations observées l'année passée ont été à nouveau rencontrées cette année. C'est une chose très encourageante pour la suite de la thèse de L. Leveau. Il sera intéressant pour la troisième année de recherche expérimentale de porter une attention particulière aux similitudes déjà observées entre les deux premières années.

Tableau 13 : Comparaison des principales corrélations entre les services écosystémiques et les pratiques culturales obtenues lors des années 2020-2021 (Belin et Fockedey, 2021) et 2021-2022. MO = Matière Organique (le terme est assimilé à la matière en surface et correspond donc au mulch considéré cette année). IFT = Indice de Fréquence de Traitement.

Services écosytémiques	X. Belin et A. Fochedey (2021)	G. Dehaye et J. Dumont de Chassart
Incorporation de la MO par les vers de terre (T_...)	- Corrélié (+) avec la présence de prairie, culture ou couvert - Corrélié (-) avec les travaux de sol - Corrélié (-) avec les IFT	- Corrélié (+) avec la présence de mulch - Corrélié (-) avec les travaux de sol
Sensibilité du sol à la battance par la pluie (B_...)	- Corrélié (+) avec les travaux de sol (moins de MO en surface)	- Corrélié (+) avec les travaux de sol
Stabilité des agrégats sous l'action de l'eau (U)	- Corrélié (-) avec les travaux de sol (moins de MO en surface)	- Corrélié (-) avec les travaux de sol - Corrélié (+) avec la présence de mulch
Compaction du sol (V)	- Pas de lien avec le labour	- Pas de lien avec le labour
Teneur en carbone du sol (C_...)	- Corrélié (+) avec les travaux d'incorporation de la MO - Corrélié (-) avec le labour	Pas de corrélation importante
Présence d'adventices (A_...)	- Corrélié (-) avec les IFT (surtout herbicide)	- Corrélié (-) avec le labour - Très faiblement corrélié (-) avec IFT herbicide

4.4.3. Impact des nouvelles variables

4.4.3.1. Date de semis

Une variable concernant la date de semis en 2021 a été ajoutée dans la matrice de corrélation reprenant les indicateurs de SE ainsi que les indicateurs de PC car cette variable semble importante à comparer avec les SE. En effet, il est possible que cette date influence les résultats obtenus pour certaines mesures de SE réalisées en champ.

Le choix de la date de semis dépend de différents éléments. Tout d'abord, en fonction du précédent, il ne sera pas possible de semer avant une certaine date (exemple : une récolte de betteraves en novembre retardera le semis) et l'état du sol ne sera pas identique. Ensuite, les paramètres météorologiques font que l'état du sol n'est pas toujours optimal pour le semis : un sol trop humide ne pourra pas être semé, il faudra attendre qu'il sèche. Enfin, les choix personnels de l'agriculteur impactent aussi la date de semis.

L'indicateur de stabilité des agrégats (U) ainsi que tous ceux à propos des VDT ($T_{...}$) sont corrélés négativement avec la date de semis et cela avec des coefficients de l'ordre de 50 pourcents. Cela doit notamment venir du fait que la date de semis a un impact sur l'état du sol ensemencé, avec une importance des travaux de sol (surtout le labour et la première reprise⁹) qui sont impactés par les conditions climatiques (Hervé, 2018). Cette année, les semis tardifs ont été réalisés dans des conditions assez humides et par temps plus froid, ce qui a favorisé des travaux de sol plus grossiers et tout cela peut expliquer les corrélations négative obtenues avec les vers et la stabilité des agrégats. En effet, comme dit précédemment, les VDT apprécient des températures entre 10 et 15°C et des taux d'humidité entre 60 et 70% (Chauhan, 2014).

4.4.3.2. Durée entre le semis et la première pluie

La variable qui représente le temps entre le semis et la première pluie (plu_{trav}) a été créée pour investiguer son lien avec la battance élevée mesurée sur certaines parcelles. Elle se base sur l'idée que les agrégats du sol « fondent » plus rapidement s'ils n'ont pas eu le temps de sécher (« blanchir » en langage agricole) avant la première pluie qui suit le semis. La matrice de corrélation avec les indicateurs de battance a montré une faible corrélation de cette variable plu_{trav} avec les indicateurs B_{Dlim} et B_{Dmin} , de respectivement 27 et 49 pourcents. Cette corrélation montre qu'il y a un lien mais ce lien est sans doute atténué par le fait que les indicateurs de battance sont calculés sur une période de plusieurs mois alors que la variable (plu_{trav}) n'est liée qu'à la première pluie. Il serait peut-être intéressant de calculer les corrélations avec des indicateurs B_{Dlim} et B_{Dmin} calculés sur la période date de semis-première pluie.

⁹ La première reprise correspond ici au premier travail du sol réalisé après le labour, ce travail a pour effet de « reprendre » le travail du labour. Dans le langage agricole c'est un mot souvent utilisé.

Pour obtenir un coefficient de corrélation plus représentatif, la manière dont plu_trav a été calculée pourrait aussi être améliorée. Premièrement, le temps entre le semis et la pluie a été calculé en jours et sans tenir compte des autres paramètres météorologiques tels que l'humidité et la température de l'air, la vitesse du vent et l'ensoleillement. En pratique, une ou deux heures de soleil et de vent sec peuvent faire sécher la partie superficielle du sol. La variable pourrait donc être calculée sur une échelle de temps plus courte afin d'être plus précise et tenir compte d'autres paramètres météorologiques.

Deuxièmement, la première pluie est considérée à partir de 0,5 litres par mètre carré par jour mais cette valeur a été prise arbitrairement pour représenter une pluie suffisante pour mouiller le sol. Il serait donc intéressant de tester d'autres valeurs et à nouveau sur des échelles de temps plus courtes.

Troisièmement, l'humidité initiale du sol ainsi que la taille des agrégats ont une influence sur la vitesse de séchage et pourraient également être prises en compte.

Enfin, comme cela a déjà été précisé pour la battance, l'intensité de pluie devrait être prise en compte et pas uniquement la quantité car l'intensité a une grande influence sur la dégradation des agrégats (Boiffin, 1984).

La présence d'une faible corrélation montre que ce lien observé par les agriculteurs entre l'état du sol et la première pluie est justifié. Il est donc fort probable qu'en rajoutant et en ajustant les paramètres cités ci-dessus, une plus grande corrélation soit observée entre la variable plu_trav et les indicateurs de sensibilité à la battance. Ce qui aboutirait à de meilleures conclusions.

4.4.4. Durée d'historique cultural

4.4.4.1. Dendrogramme pour dix ans d'historique récoltés

Une classification des parcelles sous la forme d'un dendrogramme en fonction des PC récoltées sur dix ans permet de classer les agriculteurs en fonction de leurs PC, afin de visualiser les PC communes entre les différents agriculteurs (Figure 30). Les caractéristiques évoquées ci-dessous sont uniquement celles qui peuvent faire l'objet d'une discussion.

Le premier groupe, composé de la parcelle 26 uniquement, est caractérisé par les éléments suivants : une fréquence d'utilisation d'outils animés faible sur dix ans et une grande quantité d'azote organique apportée. L'utilisation d'outils animés est même très faible car aucun outil animé n'a été utilisé sur la parcelle 26 depuis 11 ans. Ceci est particulièrement impressionnant car la majorité des agriculteurs en utilisent annuellement. La classification en fonction de la quantité d'azote organique apporté s'explique car elle est la parcelle sur laquelle la plus grande quantité d'azote organique a été apportée, avec deux fois plus que la plus élevée des autres parcelles. La raison d'un apport aussi important est que l'agriculteur possède un élevage de poules et donc beaucoup de fumier de poule qui a la particularité d'être très riche en azote.

Le deuxième groupe est composé des parcelles 24 et 28. Elles sont caractérisées par un nombre de variétés récoltées total et en association élevé ainsi qu'une faible fréquence d'utilisation d'outils animés. Ce groupe est également caractérisé par une période courte durant laquelle le sol est à l'état « travaillé » (donc laissé « nu ») et longue à l'état recouvert de mulch mort. Ces caractéristiques coïncident avec les trois piliers de l'agriculture de conservation que ces agriculteurs pratiquent (APAD, 2012) :

- couverture permanente du sol
- travail du sol réduit
- diversité et rotation des cultures

Il est intéressant de constater que d'autres parcelles considérées en agriculture de conservation ne semblent pas, selon ce clustering, se distinguer par certaines de ces pratiques. Pour rappel, les autres parcelles en agriculture de conservation sont : en conventionnel les parcelles 27, 34 et en bio les parcelles 26, 37 et 38.

Le troisième groupe est composé des parcelles 25, 39 et 40. Ces parcelles ont été regroupées car elles ont toutes des IFT faibles pour les traitements herbicides, régulateurs et totaux ainsi que des faibles quantités d'azote minéral et total. Cela s'explique par le fait que les trois parcelles sont en AB et que les traitements chimiques ainsi que l'apport d'azote minéral sont interdits dans la législation bio. L'azote total est l'un des facteurs qui peut expliquer que la parcelle 26, qui est aussi en AB mais avec un grand apport d'azote, est à l'écart de ce groupe.

Le quatrième groupe est composé des parcelles 21, 29 et 36. Celles-ci sont caractérisées par une profondeur cumulée élevée de travail du sol, un nombre élevé de labour sur dix ans et de cultures dont les parties souterraines sont récoltées ainsi que par des IFT élevés. Toutes ces caractéristiques peuvent être liées entre elles *via* la fréquence de cultures dont les parties souterraines sont récoltées. En effet, les données d'historique cultural récoltées montrent que ces cultures nécessitent un travail intense du sol mais aussi généralement une utilisation plus conséquente de produits phytosanitaires (particulièrement en pommes de terre).

Le cinquième groupe est composé de toutes les parcelles restantes comprenant : des parcelles en AB (37 et 38), en agriculture de conservation (34 et 27), en TCS (32, 33 et 35) et en conventionnels (22, 23, 30 et 31). La forme en escalier du dendrogramme et la hauteur entre les différents embranchements indique que ces parcelles ne se différencient pas fortement les unes des autres *via* les indicateurs de PC (sinon des petits groupes plus distincts seraient observés au sein de ce groupe).

Comme décrit ci-dessus, les différentes appellations (conventionnel, bio, conservation...) utilisées par les agriculteurs se marquent dans certains groupes mais ne correspondent pas totalement aux groupes créés. Ceci confirme le fait que les PC ne sont pas toujours identiques dans les différents systèmes culturels et qu'il est donc intéressant d'utiliser ces PC pour les comparer aux SE.

Lorsque l'on regarde de plus près le dendrogramme et qu'on sait que certains agriculteurs (3) ont fourni deux parcelles, on peut les voir assez proches au niveau de leurs PC. D'abord, les parcelles 32 et 33 sont ensemble dans le dernier groupe, même si elles sont assez éloignées dans ce groupe. Ensuite, les parcelles 37 et 38 sont extrêmement proches. Enfin, les parcelles 39 et 40 sont dans le groupe 3 et sont également très proches.

Le dendrogramme de la figure 30 représente donc assez bien la réalité de la situation au niveau des PC mises en place par les agriculteurs sur leurs parcelles. Il sera intéressant de voir si la même chose se remarque lorsque l'on prend des durées d'historique cultural plus courtes (point 4.5).

4.4.4.2. Comparaison des durées de récolte de l'historique cultural

Tout d'abord, lorsque l'on regarde les dendrogrammes des figures 30, 31 et 32, la classification des parcelles pour dix ans d'historique (Figure 26) est visuellement proche de la classification pour cinq ans (Figure 30) mais relativement différente pour deux ans (Figure 31). Cette information permet de dire que les parcelles sont classées différemment lorsque l'on prend des durées de récolte d'historique différentes mais cela ne permet pas de dire s'il est préférable de récolter l'historique cultural sur deux, cinq ou dix ans. En effet, plusieurs facteurs peuvent influencer le choix de la durée d'historique à récolter :

- Plus la durée de l'historique cultural récolté est longue, plus on collecte de l'information. Une plus longue période d'historique cultural permet également de tenir compte d'éléments plus anciens qui peuvent laisser des traces à long terme sur la parcelle : parcelle cultivée anciennement par un autre agriculteur, passage en AB, essais, ancienne prairie ... Pour ces raisons, il est plus probable que les dix ans représentent mieux les pratiques des agriculteurs.
- Comme dit précédemment, lorsque l'on compare les classifications des parcelles pour des durées d'historique de cinq et dix ans, on constate de nombreuses similitudes. Si la durée d'historique à récolter est plus courte, cela diminuera la charge de travail liée à la récolte et au traitement des données. Sur base de cette constatation, nos résultats font penser qu'il est suffisant de récolter cinq années d'historique pour ne pas perdre d'information.
- Enfin, la classification pour deux ans semble fort différente des deux autres durées, ce qui nous amène à croire que cette durée ne permet pas d'être autant représentative des pratiques des agriculteurs. Cependant, même si la durée d'historique la plus longue semble apporter le plus d'informations, certains SE pourraient être influencés par des PC sur des périodes plus courtes. Ces PC sont « noyées » dans le calcul des indicateurs d'une durée d'historique plus longue ce qui rend les corrélations plus difficiles à observer.

Si on reprend plus en détail les dendrogrammes des figures 26, 30 et 31, on constate les similitudes suivantes :

- Les parcelles 24, 26 et 28 qui sont caractérisées par une diversité importante des variétés cultivées et un travail du sol faible sont proches pour cinq et dix ans. Dans le dendrogramme de deux ans, les parcelles 24 et 26 sont toujours proches mais la parcelle 28 est plus éloignée. Pourtant, la parcelle 26 est en AB et pas les deux autres mais la conversion vers l'AB ne date que de deux ans.
- Les cinq autres parcelles en AB (25, 37, 38, 39 et 40) sont souvent regroupées. Pour deux ans, elles forment un groupe avec la parcelle 32 en plus, pour cinq ans la parcelle 38 est éloignée et pour dix ans les parcelles 37 et 38 sont séparées des trois autres. Ces deux parcelles sont caractérisées par une fréquence de labour légèrement plus faible avec un historique de dix ans contrairement aux trois autres. Cette différence provient probablement du fait que les parcelles 37 et 38 sont cultivées en AB de conservation et que la conversion vers l'AB ne date que de quatre ans contre six et huit ans pour les parcelles 25 et 39-40. Le cluster « bio » est généralement caractérisé par des IFT faibles peu importe la durée de l'historique récolté.
- La parcelle 36 est seule dans un groupe pour les durées d'historique de 2 et 5 ans une fois à cause d'IFT élevés et une autre fois par un apport de phosphore important.
- Pour les 11 autres parcelles, les distinctions sont moins claires. Pour 10 ans d'historique, elles se retrouvent toutes assez proches dans un même groupe. Pour cinq ans, elles sont toujours dans un seul groupe dans lequel deux sous-groupes semblent s'être formés. Enfin pour deux ans d'historique, la tendance qui semblait se dessiner avec cinq ans d'historique se confirme avec deux groupes distincts dont l'un des deux (groupe 5 avec notamment la parcelle 24) reprend la plupart des parcelles en agriculture de conservation.

D'après ces observations, il semblerait que la classification soit similaire pour les trois durées d'historiques culturels des parcelles en AB. Certaines autres parcelles (24, 26 et 28) se distinguent pour les trois durées d'historiques notamment à cause du faible travail du sol. La parcelle 36 se distingue également par ses IFT élevés. Pour les autres parcelles, il semblerait que les pratiques diffèrent moins et qu'en fonction du nombre d'années d'historique récoltées, elles se retrouvent tantôt dans un groupe, tantôt dans un autre. Une certaine évolution semble se dessiner pour les parcelles en agriculture de conservation car elles se distinguent de plus en plus des autres parcelles à chaque réduction de durée de l'historique. Ceci laisse penser que les pratiques tendent à évoluer au fil des années.

Il serait utile de réaliser des études complémentaires sur la dynamique des SE au cours du temps. Par exemple, si l'on démontre que l'activité des VDT peut fortement augmenter après seulement deux ans à la suite d'un changement de pratiques, il est suffisant de ne récolter que deux années d'historique culturel pour identifier des liens entre les PC et le SE lié aux VDT.

Une manière de faire cela pourrait être de comparer les matrices de corrélations des SE et des PC pour deux, cinq et dix ans ou utiliser le tableau 12 et ainsi observer le nombre d'années qui mène à des corrélations logiques vis-à-vis de la littérature pour chaque indicateur. Ces matrices semblent prometteuses car on distingue déjà des similitudes et des différences intéressantes (Figure 27, Annexes 26 et 28). Par exemple, les corrélations liées à l'activité des VDT sont assez similaires pour les trois durées d'historique. A l'inverse, les corrélations liées aux indicateurs B_Dlim et de stabilité des agrégats varient beaucoup plus en fonction de la longueur d'historique.

En comparant les corrélations des différentes matrices avec les corrélations attendues dans la littérature, cela pourrait apporter une double information. Premièrement, elles pourraient apporter de l'information sur la période d'historique cultural idéale à récolter dans le cadre d'une étude du même type que celle-ci. Deuxièmement, elles apporteraient des informations concernant la dynamique des SE. En effet, si un SE est fort corrélé à des PC pour une durée d'historique courte et que cette corrélation est confirmée par la littérature, il est probable que les processus liés à ce SE évoluent de manière rapide et, inversement, pour un SE qui n'aurait des corrélations que pour une durée d'historique longue, il est probable que les processus de ce SE évoluent lentement.

Pour terminer, sur base des premières observations de ces matrices, il est fort probable que la durée d'historique cultural idéale dépende fortement du SE observé. Ceci semble logique car, par exemple, il est évident que la dynamique de l'activité des VDT n'est certainement pas exactement la même que la dynamique de la banque de graines d'adventices ou encore de la compaction du sol.

Conclusion

Ce mémoire a permis l'évaluation de la fourniture en SE de 20 parcelles expérimentales afin de fournir un deuxième jeu de données dans le cadre de la thèse de L. Leveau. Il a permis également de tester les protocoles avec les modifications conseillées lors des années antérieures et d'encore améliorer les protocoles expérimentaux. Ensuite, ce mémoire a permis d'identifier des corrélations entre PC et SE. Enfin, il a permis d'alimenter une discussion autour de la durée d'historique cultural optimale à récolter pour l'analyse de ces corrélations.

Les principales conclusions concernant les protocoles sont les suivantes :

- Les protocoles d'évaluation de la battance permettant de créer les indicateurs B_Dlim et B_Dmin sont influencés par des biais liés à l'évaluation, principalement visuelle, de l'évolution de la battance. La comparaison de ces indicateurs pour d'autres années de mesures pourrait permettre d'identifier si l'un des deux indicateurs pourrait être abandonné. A ce stade la corrélation entre les deux indicateurs ne permet pas de dire que l'un peut remplacer l'autre.
- Le protocole permettant d'évaluer l'activité des VDT pourrait être amélioré afin d'être moins chronophage et plus facile à reproduire par les agriculteurs. Ces améliorations consistent à ne garder que les indicateurs de poids et de surface de paille en fin d'expérience. Après de plus nombreuses répétitions, un seul indicateur pourrait être gardé mais la contamination du poids de paille par la terre reste un obstacle à la suppression de l'indicateur de surface dans le cadre de ce mémoire. Une aide visuelle a été créée afin d'aider à classer les paniers à VDT en fonction de leur surface de paille. Enfin, des recherches complémentaires devraient être réalisées afin d'être certain que les indicateurs de turricules et de cabanes n'apportent pas une information différente. Dans ce cas, ils ne pourraient pas être supprimés.
- Le protocole mesurant la stabilité des agrégats de sol pourrait être amélioré en rajoutant des classes de stabilité entre les classes 2 et 3. En effet, une grande partie des parcelles se retrouvaient dans ces classes et l'ajout de classes intermédiaires permettrait de mieux différencier les parcelles entre elles.
- Le protocole permettant d'identifier la diversité, la densité et la compétitivité des adventices pourrait être amélioré en modifiant les coefficients de compétitivité afin de prendre en compte les différences de compétitivité entre chaque espèce d'adventice.
- Le protocole utilisé pour mesurer les fractions en carbone stables et labiles du sol a été amélioré et devrait être plus précis. Cette amélioration concerne la technique d'échantillonnage qui a été effectuée avec une gouge à la place d'une tarière. Cette technique permet de calculer directement la densité du sol et d'augmenter la rapidité

d'échantillonnage. Cependant, à la suite d'un problème technique au laboratoire, une seule mesure par parcelle a été réalisée, ce qui ne permet pas de faire des observations générales.

Concernant les corrélations entre indicateurs de SE, de manière générale, il y avait de fortes corrélations entre les indicateurs d'une même expérience. En plus, une corrélation positive a été observée entre les indicateurs d'activité des VDT et l'indicateur de stabilité des agrégats. Ce dernier est également corrélé négativement avec un des deux indicateurs de sensibilité du sol à la battance (B_Dlim).

Au niveau des corrélations entre indicateurs de PC et de SE, les principales observations sont les suivantes :

- L'activité des VDT est corrélée négativement avec les indicateurs de travail du sol.
- La stabilité des agrégats est corrélée négativement avec les indicateurs de travail du sol et positivement avec la diversité d'espèces de cultures et de couverts et le temps durant lequel le sol est couvert.

Certaines corrélations très précises entre une pratique et un indicateur ne sont pas toujours interprétables sur base de la littérature et ne sont donc pas reprises dans cette conclusion. Les autres indicateurs de SE ne présentent pas de corrélations évidentes avec des PC.

Une classification des parcelles en fonction de leurs PC a été effectuée en reprenant deux, cinq et dix ans d'historique cultural. Il en ressort que les périodes d'historique modifient la classification entre parcelles. Cependant, cela ne permet pas de conclure si une des trois durées de récolte d'historique convient mieux. Il a été observé que pour les parcelles avec des pratiques très spécifiques (bio, semis-direct), la classification change peu et les parcelles se regroupent souvent. Pour celles-ci, une période d'historique cultural plus courte pourrait être envisagée. Après l'observation des matrices de corrélation entre PC et SE pour des durées d'historique de 2, 5 et 10 ans, une première tendance montre que la durée idéale de l'historique cultural dépend du SE pour lequel les corrélations avec les PC sont observées. Cependant, des observations complémentaires et plus précises de ces matrices devraient être effectuées.

Tous ces résultats proviennent d'un échantillon assez réduit de parcelles agricoles (20) et ne permettent donc pas de réaliser des analyses statistiques autres que descriptives. Ces résultats ne sont donc pas généralisables. Une analyse complète à la fin des trois années d'expériences pourra certainement aboutir à des conclusions plus fiables.

Bibliographie

- Agapit, C., 2018. Emission d'auxine et de nitrates par les bactéries des turricules de vers de terre : effet sur la croissance et le développement des plantes (Theses). Université Paris-Est.
- Annabi, M., 2005. Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine: relation avec les caractéristiques de leur matière organique 281.
- APAD, 2012. Les 3 piliers de l'Agriculture de Conservation des Sols [WWW Document]. Apad. URL <https://www.apad.asso.fr/agriculture-de-conservation-3/principes-de-lac> (accessed 6.5.22).
- Baize, D., 2017. Du taux de carbone à celui de matières organiques dans les sols — Les Mots de l'agronomie [WWW Document]. URL https://loexplor.istex.fr/mots-agronomie.fr/index.php/Du_taux_de_carbone_%C3%A0_celui_de_mati%C3%A8res_organiques_dans_les_sols (accessed 6.6.22).
- Balloffet, P., 1995. La comparaison par paires et le classement simple : évaluation comparée de la fidélité de deux méthodes permettant au consommateur d'exprimer ses préférences de manière globale sur un ensemble de produits | Association Française du Marketing [WWW Document]. URL <https://www.afm-marketing.org/fr/content/3907-la-comparaison-par-paires-et-le-classement-simple-%C3%A9valuation-compar%C3%A9e-de-la-fid%C3%A9lit%C3%A9-de> (accessed 6.5.22).
- Baudot, J., 2022. Matrice des corrélations [WWW Document]. URL http://www.jybaudot.fr/Correl_regress/matcorr.html (accessed 5.25.22).
- Belin, X., Fockedey, A., 2021. Etude de l'impact des pratiques agricoles sur les services écosystémiques à travers une recherche participative dans la région limoneuse et sablo-limoneuse du Brabant wallon.
- Bielders, C., Hiel, M.-P., Cambier, J.-F., Aniset, J., 2013. Impact des techniques culturales sur le taux de carbone organique du sol et la stabilité des agrégats dans la province du Hainaut (projet Interreg IV Prosensols).
- Biot, N., 2020. Comparaison de méthodes d'évaluation de la fourniture du service écosystémique de la stabilité structurale sur des sols limoneux et limono-sableux en Belgique.
- Bissonnais, L., 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Étude Gest. Sols* 13.
- Bockstaller, C., Guichard, L., Makowski, D., Aveline, A., Girardin, P., Plantureux, S., 2008. Agri-Environmental Indicators to Assess Cropping and Farming Systems: A Review. <https://dx.doi.org/10.1051/agro:2007052> 28. <https://doi.org/10.1051/agro:2007052>

- Boeraeve, F., 2018. HOW CAN INTEGRATED ECOSYSTEM SERVICE VALUATION HELP UNDERSTAND AGROECOLOGICAL TRANSITION? 232.
- Boiffin, J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies.
- Bonin, L., Gautellier Vizios, L., Vacher, C., 2019. Effets de la densité des adventices sur le rendement des céréales [WWW Document]. URL <https://www.arvalis-infos.fr/quelle-est-la-nuisibilite-des-mauvaises-herbes-en-cereales-a-paille--@/view-17542-arvarticle.html> (accessed 5.9.22).
- Braat, L.C., de Groot, R., 2012. The ecosystem services agenda:bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosyst. Serv.* 1, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.011>
- Brauman, A., Thoumazeau, A., 2020. Biofunctool® : un outil de terrain pour évaluer la santé des sols, basé sur la mesure de fonctions issues de l'activité des organismes du sol 2020–289.
- Capillon, A., 2007a. Nouvelles tendances pour l'agriculture mondiale : concilier l'environnement et la productivité. *Comptes Rendus Acad. Sci. Ser. II* 2007, 3.
- Capillon, A., 2007b. Nouvelles tendances pour l'agriculture mondiale : concilier l'environnement et la productivité 32.
- Cellier, V., Aubertot, J., Cordeau, S., Fontaine, L., Froger, M., 2017. Développements méthodologiques pour une CARactérisation SIMplifiée des pressions biotiques et des Régulations biologiques - CASIMIR.
- Chabert, A., 2017. Expression combinée des services écosystémiques en systèmes de production agricole conventionnels et innovants : étude des déterminants agroécologiques de gestion du sol, des intrants et du paysage 268.
- Chabert, A., Sarthou, J.-P., 2020. Conservation agriculture as a promising trade-off between conventional and organic agriculture in bundling ecosystem services. *Agric. Ecosyst. Environ.* 292, 106815. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106815>
- Chauhan, R.P., 2014. Role of Earthworms in Soil Fertility and Factors Affecting Their Population Dynamics: A Review.
- Chauvel, B., Darmency, H., Munier-Jolain, N., Rodriguez, A., 2018. Gestion durable de la flore adventice des cultures. Editions Quae.
- Cheesman, O., 2004. The environmental impacts of sugar production: the cultivation and processing of sugarcane and sugar beet. CABI International, Wallingford, UK ; Cambridge, Mass.
- Comproved, n.d. Welcome to Comproved - Assess better. Learn more. [WWW Document]. Comproved. URL <https://comproved.com/en/> (accessed 6.5.22).
- CRA-W, 2022. Agromet.be [WWW Document]. URL <https://agromet.be/fr/pages/home/> (accessed 5.19.22).

- Derdour, H., Laverdière, M.R., Angers, D.A., 1994. Comportement mécanique d'un sol argileux. Effets de la taille des agrégats, de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Can. J. Soil Sci.* 74, 185–191. <https://doi.org/10.4141/cjss94-026>
- Destain, M.-F., 2013. La compaction des sols agricoles en Wallonie.
- EcoBioSoil, 2022a. Rôles des vers de terre dans les sols - EcoBioSoil [WWW Document]. URL <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/roles-des-vers-de-terre-dans-les-sols> (accessed 5.9.22).
- EcoBioSoil, 2022b. Protocole participatif - Paniers à Vers de Terre - EcoBioSoil [WWW Document]. URL <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/protocole-participatif-paniers-a-vers-de-terre> (accessed 5.14.22).
- European Commission, 2022. Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services - MAES - Environment - European Commission [WWW Document]. URL https://ec.europa.eu/environment/nature/knowledge/ecosystem_assessment/index_en.htm (accessed 5.9.22).
- European Environment Agency, 2022. Structure of CICES | . URL <https://cices.eu/cices-structure/> (accessed 3.5.22).
- Fabulet, É., 2021. Effet des pratiques de conservation des sols sur la santé des sols limoneux dans le 64: acquisition et valorisation de références locales sur maïs avec l'outil Biofunctool 91.
- Filser, J., Mebes, K.-H., Winter, K., Lang, A., Kampichler, C., 2002. Long-term dynamics and interrelationships of soil Collembola and microorganisms in an arable landscape following land use change. *Geoderma, Land use and sustainability: FAM Research Network on Agroecosystems* 105, 201–221. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00104-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00104-5)
- Franco, H., Guimaraes, R., Tormena, C., Cherubin, M., Favilla, H., 2019. Global applications of the Visual Evaluation of Soil Structure method: A systematic review and meta-analysis - ScienceDirect [WWW Document]. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198718309826?via%3Dihub> (accessed 6.5.22).
- Fritz, D.M., 2015. Johannes Burmeister, Roswitha Walter 18.
- Godfray, J., Charles, H., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Makowski, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People [WWW Document]. URL https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.1185383?casa_token (accessed 5.8.22).
- Greenotec, 2022. Présentation de ASBL Greenotec [WWW Document]. URL <https://www.greenotec.be/pages/presentation.html> (accessed 5.9.22).
- Griffon, M., 2002. Révolution Verte, Révolution Doublement Verte Quelles technologies, institutions et recherche pour les agricultures de l'avenir ? *Mondes En Dev.* 117, 39–44.

- Griffon, M., n.d. Quelles technologies, quelles institutions et quelle recherche pour les agricultures de l'avenir ? 8.
- Haines-Young, R., Potschin, M., 2013. Classifying Ecosystem Services | HUGIN OpenNESS [WWW Document]. URL <https://openness.hugin.com/example/cices> (accessed 5.9.22).
- Hazell, P., Wood, S., 2008. Drivers of change in global agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 495–515. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2166>
- Hervé, D., 2018. Systèmes de culture et érosion : L'état de surface du sol, indicateur des risques d'érosion liés aux systèmes de culture, in: Eldin, M., Milleville, P. (Eds.), *Le Risque En Agriculture, À Travers Champs*. IRD Éditions, Marseille, pp. 65–81.
- IRM, 2022. Météo en Belgique - IRM [WWW Document]. URL <https://www.meteo.be/fr/belgique> (accessed 6.5.22).
- Jangir, C., Kumar, S., Meena, R.S., 2019. Significance of Soil Organic Matter to Soil Quality and Evaluation of Sustainability. pp. 357–381.
- Larbi, K., 2016. Effet des pratiques culturales sur la dynamique des flores adventices des terres cultivées dans la zone semi-aride (Algérie). Effects of cultural-practices on weeds dynamic of cultivated land in semi-arid region. *Rev. Agric.*
- Larousse, 2022. Définitions : adventice - Dictionnaire de français Larousse [WWW Document]. URL <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/adventice/1239> (accessed 5.9.22).
- Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., Herzog, F., Lavorel, S., Lifran, R., Roger-Estrade, J., Sarthou, J.-P., Trommetter, M., 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies (Other), Expertises Collectives. INRA. <https://doi.org/10.15454/chz5-0922>
- Leveau, L., 2020. Documents de travail non publiés.
- Livre Blanc Céréales, 2021. Les adventices – Livre Blanc Céréales. URL <https://www.livre-blanc-cereales.be/caracteristiques-des-adventices/> (accessed 6.5.22).
- Luo, Z., Wang, E., Sun, O.J., 2010. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: A review and synthesis. *Geoderma* 155, 211–223. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.012>
- Marsden, C., 2014. Processus écologiques - Une question de terminologie : “Carbone organique” et “Matière Organique” [WWW Document]. URL <https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/LienCMO.html> (accessed 6.6.22).
- Médiène, S., Quinio, M., Butier, A., Bazot, M., Jeuffroy, M.-H., Pelzer, E., 2019. Observatoire de parcelles agricoles pour évaluer la diversité des adventices dans des légumineuses et les blés suivants. *Innov. Agron.* 74, 121–127. <https://doi.org/10.15454/rmastk>
- Millennium Ecosystem Assessment (Program) (Ed.), 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington, DC.

- Milleville, P., 1987. Recherches sur les pratiques des agriculteurs- fdi:25134- Horizon [WWW Document]. URL <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:25134> (accessed 5.9.22).
- Minitab, 2022. Interprétation des résultats principaux pour la fonction Variables de groupes [WWW Document]. URL <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/multivariate/how-to/cluster-variables/interpret-the-results/key-results/> (accessed 5.25.22).
- Monnier, G., 1965. Action des matieres organiques sur la stabilite structurale du sol. *Sols Afr.* 10, 5.
- Moore, J.C., 1994. Impact of agricultural practices on soil food web structure: Theory and application. *Agric. Ecosyst. Environ.* 51, 239–247. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(94\)90047-7](https://doi.org/10.1016/0167-8809(94)90047-7)
- Munier-Jolain, N., Mediene, S., Meiss, H., Boissinot, F., Rainer, W., Jacques, C., Bretagnolle, V., 2012. Rôle des prairies temporaires pour la gestion de la flore adventice dans les systèmes céréaliers. *Innov. Agron.* 22, 71–84.
- Norris, C.E., Congreves, K.A., 2018. Alternative Management Practices Improve Soil Health Indices in Intensive Vegetable Cropping Systems: A Review. *Front. Environ. Sci.* 6.
- Odile, D., Guy, R., Baize, D., 2013. Les sols et leurs structures: Observations à différentes échelles. *Quae*.
- Ouvry, J.F., 1990. Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré : expérience du Pays de Caux (France) 13.
- Power, A.G., 2010. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 365, 2959–2971. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>
- Robin, M.-H., 2014. Analyse et modélisation des effets des pratiques culturales et de la situation de production sur les dégâts causés par les bioagresseurs des cultures. Application au blé d'hiver 317.
- Ruysschaert, G., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., 2006. Soil losses due to mechanized potato harvesting. *Soil Tillage Res.* 86, 52–72. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.016>
- Sandhu, H., Wratten, S., Costanza, R., Pretty, J., Porter, J.R., Reganold, J., 2015. Significance and value of non-traded ecosystem services on farmland. *PeerJ* 3, e762. <https://doi.org/10.7717/peerj.762>
- Seybold, C.A., Herrick, J.E., Brejda, J.J., 1999. Soil resilience: a fundamental component of soil quality.
- Shahane, A.A., Shivay, Y.S., 2021. Soil Health and Its Improvement Through Novel Agronomic and Innovative Approaches. *Front. Agron.* 3.
- Simon, G.-A., n.d. History of Food Security 28.
- Six, J., Merckx, R., Kimpe, K., Paustian, K., Elliott, E.T., 2000. A re-evaluation of the enriched labile soil organic matter fraction. *Eur. J. Soil Sci.* 51, 283–293. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00304.x>

- SMCS, 2022. SMCS - Plateforme technologique de Support en Méthodologie et Calcul Statistique [WWW Document]. URL <https://sites.uclouvain.be/training/smcs/> (accessed 6.3.22).
- SPW, 2020. Agriculture Biologique [WWW Document]. URL <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/AGRI%204.html> (accessed 5.9.22).
- SPW, 2015. WalOnMap [WWW Document]. URL <http://geoportail.wallonie.be/walonmap> (accessed 5.14.22).
- Syers, J.K., Springett, J.A., 1984. Earthworms and soil fertility, in: Tinsley, J., Darbyshire, J.F. (Eds.), *Biological Processes and Soil Fertility, Developments in Plant and Soil Sciences*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 93–104.
https://doi.org/10.1007/978-94-009-6101-2_8
- TEEB, 2010. Research and academia (2010). *Econ. Ecosyst. Biodivers.* URL <http://teebweb.org/publications/teeb-for/research-and-academia/> (accessed 5.9.22).
- Tilman, D., 1998. The greening of the green revolution. *Nature* 396, 211–212.
<https://doi.org/10.1038/24254>
- UE-FEDER, n.d. Prosensols_A7_Structure_USDA.
- Vincent, Q., Chartin, C., Krüger, I., Van Wesemael, B., Carnol, M., 2019. CARBIOSOL: Biological indicators of soil quality and organic carbon in grasslands and croplands in Wallonia, Belgium. *Ecology* 100, e02843. <https://doi.org/10.1002/ecy.2843>
- Wardle, D.A., Nicholson, K.S., Bonner, K.I., Yeates, G.W., 1999. Effects of agricultural intensification on soil-associated arthropod population dynamics, community structure, diversity and temporal variability over a seven-year period. *Soil Biol. Biochem.* 31, 1691–1706. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00089-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00089-9)
- XLstat, 2022. Analyse en Composantes Principales (ACP) [WWW Document]. XLSTAT Your Data Anal. Solut. URL <https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/analyse-en-composantes-principales-acp> (accessed 5.25.22).
- Young, M.D., Ros, G.H., de Vries, W., 2021. Impacts of agronomic measures on crop, soil, and environmental indicators: A review and synthesis of meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 319, 107551. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107551>

Impact des pratiques culturelles sur les services écosystémiques à travers une étude participative dans la région sablo-limoneuse du Brabant wallon

Présenté par Grégoire Dehaye et Joachim Dumont de Chassart

En plus de devoir faire face aux changements climatiques, l'agriculture moderne doit répondre à de nombreux enjeux : diminuer les intrants de synthèse, nourrir une population en augmentation, faire face aux sécheresses et aux périodes humides... Pour y répondre, les agriculteurs sont amenés bien souvent à changer leurs pratiques. Afin d'orienter leur décisions, de nombreuses études évaluent l'impact des pratiques agricoles sur l'agroécosystème. Dans ce mémoire, il a été décidé d'évaluer l'impact des pratiques culturelles sur la fourniture de services écosystémiques par les champs. Ces services sont considérés comme des alternatives permettant de diminuer les intrants issus de ressources non renouvelables ; notamment grâce à l'amélioration de la structure, de l'activité biologique et de la fertilité des sols.

Ce mémoire représente la deuxième année de récolte de données d'une étude participative plus globale dont la recherche expérimentale s'étale sur trois années. Chaque année, des agriculteurs mettent à disposition 20 parcelles cultivées en froment ou en épeautre pour l'étude. Pour chacune des parcelles, une récolte de l'historique des pratiques culturelles est effectuée en prenant l'historique des dix années précédentes afin de créer un set d'indicateurs. Ensuite, les fournitures de services écosystémiques des 20 champs sont mesurées sur le terrain afin de créer un deuxième set d'indicateurs. Sur les résultats, des analyses statistiques descriptives ont été réalisées afin d'identifier les corrélations entre les deux types d'indicateurs. Les principales corrélations positives (+) et négatives (-) observées sont les suivantes : l'activité des vers de terre et la stabilité des agrégats sont corrélées (+) avec la présence de matières organiques sur le sol et (-) avec l'intensité et la fréquence des travaux de sol. La sensibilité du sol à la battance par la pluie est corrélée (+) avec l'intensité et la fréquence des travaux de sol. La présence d'adventices est corrélée (-) avec la fréquence du labour. Après cela, la question de la durée d'historique idéale à récolter pour l'identification des corrélations entre pratiques culturelles et services écosystémiques a été abordée. Des nouveaux sets d'indicateurs ont été créés pour des durées d'historiques de 2 et 5 ans. Cela a permis de montrer des similitudes entre les classifications réalisées sur cinq et dix ans qui mènent à croire que la récolte de donnée pourrait être réalisée sur cinq ans et non dix. Elles ont également permis d'émettre l'hypothèse que la durée d'historique à récolter va dépendre de la dynamique des services écosystémiques observés.