

Faculté des bioingénieurs

Impact des pratiques culturelles sur les services écosystémiques liés aux auxiliaires de culture et à la production végétale dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse wallonnes

Auteur : Joy Van den Broeck

Promoteurs : Lola Leveau (doctorante UCLouvain/ELI/ELIA)

Prof. Pierre Bertin (UCLouvain/ELI/ELIA)

Lecteurs : Prof. Yannick Agnan (UCLouvain/ELI/ELIE)

Dr Fanny Boeraeve (Service Public de Wallonie)

Année académique 2022-2023

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

Remerciements

De nombreuses personnes ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens tout d’abord à remercier chaleureusement Lola Leveau pour l’encadrement très bienveillant qu’elle a pu m’apporter durant toute la réalisation de ce mémoire. Merci beaucoup pour ta disponibilité lors des réunions, tes précieux conseils notamment pour la relecture du mémoire, pour l’invitation à la formation sur les indicateurs biologiques, et finalement pour les chouettes moments passés à sillonner les champs du Brabant Wallon.

Je remercie également Pierre Bertin pour ses conseils lors de la relecture du mémoire, et pour m’avoir amenée, à travers ses cours, à m’intéresser de plus en plus à l’agriculture et à ses nombreux enjeux.

Ce mémoire n’aurait pas pu être réalisé sans l’aide de Thomas Dagbert et Pierre Van Thorre. Je les remercie tout particulièrement pour leur aide très précieuse dans la préparation des expériences, pour leur accompagnement lors de l’installation et la récolte des expériences en champs (malgré les conditions météo parfois compliquées) ainsi que pour les discussions intéressantes que nous avons eues ensemble.

Je remercie également :

Charles Rongione pour m’avoir aidée avec les analyses statistiques ;

Les membres du laboratoire PEPA pour l’ambiance très accueillante ressentie ;

Et l’ensemble des agriculteurs des parcelles sur lesquelles les expériences de ce mémoire ont pu être réalisées.

J’aimerais également remercier mes amis, et en particulier Ségolène, Céline, Alexiane et Tiffany pour leur soutien et la relecture de certaines parties de ce mémoire ainsi que pour tous les bons moments passés ensembles durant toutes ces années d’étude.

Finalement, je remercie chaleureusement ma famille pour m’avoir soutenue tout au long de mes études et pour les relectures du mémoire effectuées.

Résumé

Le développement d'une agriculture durable repose entre autres sur la transition vers d'autres modes de production diminuant les pressions sur l'environnement à travers la valorisation des services écosystémiques. En tant qu'actrice de l'agroécosystème, l'agriculture peut agir à différentes échelles pour maintenir, voire augmenter ces services écosystémiques, notamment à travers les pratiques culturales appliquées sur les parcelles.

Ce mémoire s'insère dans la thèse de L. Leveau dont l'objectif est de déterminer si certaines pratiques agricoles innovantes actuelles appliquées dans les fermes de grandes cultures wallonnes permettent de remplacer les intrants issus de ressources non renouvelables par des services écosystémiques. Dans cette étude, des mesures de fourniture en services écosystémiques par des parcelles agricoles aux pratiques diversifiées sont réalisées sur trois ans. Ce mémoire s'inscrit dans la deuxième année de la partie expérimentale de cette étude. Son objectif est de quantifier les services d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre, de décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes, de prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture et de production végétale, et d'étudier les liens entre ces services fournis par une parcelle et les pratiques culturales appliquées sur cette même parcelle.

Les résultats obtenus ont été utilisés pour réaliser des analyses statistiques descriptives. Les principaux résultats montrent que le service d'incorporation de la litière végétale dans sol est corrélé négativement à l'intensité du travail du sol et aux indices de fréquence de traitement en herbicides et insecticides, et est corrélé positivement avec la part de temps de mulch sur l'itinéraire cultural de la parcelle. Les moyennes des indicateurs liés au service de décomposition de la matière organique du sol ne permettent pas de différencier significativement les différentes parcelles étudiées. Le protocole du service de prédation de graines nécessite d'être amélioré pour répondre à l'objectif de cette étude. Le service de production végétale est corrélé positivement à la quantité d'azote minéral apporté et au nombre de variétés récoltées. Ce service est également corrélé négativement à la date de semis du froment.

Ce mémoire analyse également l'influence de la date de semis sur les résultats du protocole développé par l'Observatoire Participatif des Vers de Terre évaluant l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre. La corrélation de la date de semis avec certains indicateurs de pratiques culturales a cependant rendu l'interprétation confuse, bien que la comparaison avec les résultats obtenus pour les mêmes expériences en 2020-2021 laisse à penser que l'impact de la date de semis sur les résultats diminue quand l'expérience est réalisée à partir du mois de mars plutôt que directement après le semis de la culture d'hiver.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Table des figures.....	vi
Index des tableaux.....	viii
Introduction.....	1
État de l’art	2
1 État et défis de l’agriculture actuelle	2
2 L’agroécosystème.....	3
2.1 Définition	3
2.2 La matière organique du sol.....	4
2.2.1 Propriétés physiques de la matière organique du sol.....	4
2.2.2 Propriétés chimiques de la matière organique du sol	7
3 Les services écosystémiques	8
3.1 Définition.....	8
3.2 Services écosystémiques et travail du sol	8
3.3 Classification.....	9
3.4 Les services écosystémiques intrants.....	10
3.4.1 Services écosystémiques liés à l’activité des vers de terre	10
3.4.2 Services écosystémiques liés à l’activité des microorganismes	14
3.4.3 Services écosystémiques liés à l’activité des prédateurs de graines d’adventices	16
3.5 Les services écosystémiques produits.....	18
4 Objectif	19
Matériel et méthode	20
5 Cadre de la recherche	20
5.1 Thèse de Lola Leveau.....	20
5.2 Contexte de la thèse.....	20
5.2.1 Objectif de la thèse.....	21
5.2.2 Plan de la recherche complet.....	21
5.3 Contextualisation du mémoire.....	22
5.4 Réalisations antérieures au mémoire	22
5.4.1 Sélection des agriculteurs.....	22
5.4.2 Sélection des indicateurs.....	22
5.4.3 Mémoires précédents réalisés dans le cadre de la thèse	24

5.5	Cadre spatial et temporel du mémoire	24
6	Itinéraires culturels des parcelles étudiées.....	26
6.1	Contact avec les agriculteurs.....	26
6.1.1	Choix des parcelles	26
6.1.2	Itinéraire culturel.....	26
6.2	Choix des indicateurs de pratiques culturelles	26
7	Protocole expérimental.....	26
7.1	Plan expérimental.....	28
7.2	Expériences évaluant les services écosystémiques.....	29
7.2.1	Incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre (T_...).....	29
7.2.2	Décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes (D_...)	32
7.2.3	Prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture (P_...)	34
7.2.4	Production végétale (R_...).....	35
7.2.5	Analyse chimique et physique des échantillons de sols.....	36
7.3	Résumé des indicateurs évalués sur base des expériences réalisées	38
8	Analyses statistiques	39
8.1	Analyses générales	39
8.2	Analyses de l'influence de la date de semis	40
	Résultats	41
9	Introduction.....	41
10	Résultats des indicateurs de pratiques culturelles.....	41
11	Résultats des indicateurs de services écosystémiques et de carbone organique	41
11.1	Généralités sur les résultats	41
11.2	Résultats des indicateurs de services écosystémiques	44
11.2.1	Incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre	44
11.2.2	Décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes.....	45
11.2.3	Prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture	45
11.2.4	Production végétale	46
11.3	Résultats des indicateurs de carbone organique	46
11.3.1	Teneur en carbone organique du sol	46
11.3.2	Ratio de la teneur en carbone organique du sol sur la teneur en argile granulométrique.....	46
11.4	Variabilité inter- et intra-parcellaire.....	47
12	Analyses multivariées	48
12.1	Indicateurs de services écosystémiques et de carbone organique.....	48
12.1.1	Matrice de corrélation.....	48

12.1.2	Classification hiérarchique sur composantes principales (HCPC_SE).....	49
12.1.3	Modèle ANOVA pour les groupes de la classification hiérarchique.....	52
12.2	Tous les indicateurs	53
12.2.1	Matrice de corrélation.....	53
12.2.2	Analyse en composantes principales (ACP_SE_PC).....	55
13	Influence de la date de semis.....	56
13.1	Dynamique d'évolution des indicateurs liés aux vers de terre	56
13.2	Date de semis et pratiques culturales	58
13.3	Date de semis et indicateurs de services écosystémiques liés aux vers de terre	59
	Discussion	61
14	Introduction.....	61
15	Indicateurs de services écosystémiques et de carbone organique.....	61
15.1	Incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre	61
15.2	Décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes.....	64
15.3	Prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture	66
15.4	Production végétale	67
15.5	Indicateurs de carbone organique	68
16	Analyses multivariées	69
16.1	Indicateurs de services écosystémiques et de carbone organique.....	69
16.1.1	Matrice de corrélation.....	69
16.1.2	Classification hiérarchique sur composantes principales (HCPC_SE).....	70
16.2	Tous les indicateurs	71
16.2.1	Matrice de corrélation.....	71
16.2.2	Analyse en composantes principales (ACP_SE_PC).....	72
16.2.3	Comparaison avec les données des mémoires précédents	73
17	Influence de la date de semis.....	74
17.1	Dynamique d'évolution des indicateurs liées aux vers de terre	75
17.2	Date de semis et pratiques culturales	75
17.3	Date de semis et indicateurs de services écosystémiques liés aux vers de terre	76
17.4	Conclusion concernant la date de semis	77
	Conclusion	78
	Bibliographie	80

Table des figures

Figure 1 : Teneur en C_{org} (SOC) en fonction de la teneur en argile granulométrique (Clay) dans un sol de culture.....	4
Figure 2 : Principaux modes de liaison entre l'argile minéralogique et la MOS (Soltner 2011).....	6
Figure 3 : Cinétiques de minéralisation du C_{org} obtenues avec des substrats différant par leur valeur du rapport C:N (Calvet 2003).	7
Figure 4 : Performances des différents systèmes de travail du sol selon trois critères (Morris <i>et al.</i> 2010).....	8
Figure 5 : Cabane (haut) et turrículos (bas) de VDT (J. Van den Broeck, 2022).	11
Figure 6 : Enrichissement de la terre par les VDT (Soltner 2011).	12
Figure 7 : Teneur en C_{org} incorporé dans le sol en fonction de la profondeur, pour différents sols travaillés en labour (CT), en surface (ST) et en semis direct (NT) durant 17 années (Balesdent, Chenu, et Balabane 2000).....	15
Figure 8 : Pourcentage de parcelles emblavées en colza pour lesquelles le mode de travail du sol a limité sévèrement, moyennement ou pas du tout le rendement (Cetiom 2008).....	18
Figure 9 : Calendrier des expériences réalisées sur l'année 2021-2022 avec les périodes de suivi et les personnes en charge (adapté de L. Leveau 2020).....	25
Figure 10 : Répartition des champs selon les modèles classiques d'agriculture pour l'ensemble de l'échantillon 2021-2022 sélectionné.	26
Figure 11 : Carré d'expérimentation pour de la parcelle 32 de l'échantillon de parcelles 2021-2022 (parcelle non bio).	29
Figure 12 : Représentation d'un panier à VDT en date du 24 juin 2022 et mise en évidence des cabanes J. Van den Broeck).	30
Figure 13 : Disposition des sachets de thés, localisés à l'aide d'un piquet, sur un champ bio le long de la ligne de semis pour être à l'abri des désherbages mécaniques (à gauche) et sur un champ non bio (à droite) (J. Van den Broeck).....	33
Figure 14 : Masse relative restante du TV (Green) et du TR (Rooibos) en fonction du temps, pour deux températures différentes (Keuskamp <i>et al.</i> 2013).	33
Figure 15 : Carte de prédation sur laquelle sont collées dix graines de <i>Poa annua</i> (J. Van den Broeck).	34
Figure 16 : Représentation d'une carte de prédation au sein d'un champ (L. Leveau, 2021).	35
Figure 17 : Évaluation de la sédimentation à la pipette (adapté de Durner et Iden 2021).	37
Figure 18 : Boîtes de Tukey avec écarts-types et moyennes pour chacun des indicateurs de SE et de C_{org}	42

Figure 19 : Boîtes de Tukey du ratio $C_{org}/argile$ granulométrique pour les différentes parcelles..	46
Figure 20 : Corrélogramme de l'ensemble des indicateurs de SE et de C_{org}	49
Figure 21 a (haut) et b (bas) : ACP_ SE sur sept indicateurs de SE en variables actives (T_cabf, T_poids_inc, D_S, D_k, P_graines, R_grain et R_paille) et 4 en variables illustratives (T_cab1, T_cab2, T_cab3 et T_surf_inc) pour les dimensions (a) 1 et 2 et (b) 2 et 3..	51
Figure 22 : Corrélogramme pour l'ensemble des indicateurs mesurés au cours de cette étude (SE, C_{org} et PC).....	54
Figure 23 a (gauche) et b (droite) : ACP_SE_PC sur les indicateurs de SE non redondants en variables actives (T_poids_inc, T_cabf, D_k, D_S, P_graines, R_grain et R_paille) et l'ensemble des PC en variables illustratives, pour les dimensions (a) 1 et 2 et (b) 1 et 3.....	56
Figure 24 a (haut) et b (bas) : Dynamique d'apparition des cabanes à VDT entre le début et la fin de l'expérience par parcelle, avec mise en place des paniers à VDT (a) en automne et (b) au printemps.	57
Figure 25 : Corrélogramme de la date de semis, des indicateurs de PC et de certains indicateurs de SE..	58
Figure 26 a (gauche) et b (droite) : Corrélogramme des indicateurs de VDT et de la date de semis du froment pour (a) les mesures d'automne et (b) les mesures de printemps.	59
Figure 27 a (haut) et b (bas) : Droites de régression des indicateurs de SE en fonction de la date de semis pour les deux périodes de mesure..	60

Index des tableaux

Tableau 1 : Etat structural du sol en fonction de son ratio C_{org} /argile granulométrique (Johannes et al. 2017).....	5
Tableau 2 : Correspondance entre les SE et fonctions de l'écosystème étudiés dans ce mémoire et les SE et fonctions globales de l'écosystème provenant de l'étude de Le Roux et al. (2008).....	10
Tableau 3 : Mécanismes d'influence des VDT sur les plantes (Brown, Edwards, et Brussaard 2004).....	11
Tableau 4 : Catégories des indicateurs de SE (adapté de Haines-Young et Potschin (2010) selon les critiques réalisées l'étude de Boerema et al. (2017)).	23
Tableau 5: Indicateurs de SE étudiés dans la thèse de L. Leveau et correspondance avec la classification établie au Tableau 4.	24
Tableau 6 : Liste des indicateurs de PC calculés à partir de l'historique cultural de chaque parcelle sur dix années.....	27
Tableau 7 : Résumé des indicateurs de SE utilisés dans les analyses ultérieures.	38
Tableau 8 : Résumé des indicateurs de C_{org} utilisés dans les analyses ultérieures.....	38
Tableau 9 : Résumé des statistiques descriptives chiffrées pour chacun des indicateurs de SE et de C_{org}	43
Tableau 10 : Résultats d'un modèle ANOVA pour les indicateurs T_poids_inc, D_S, D_k, R_grain R_paille et Corg_arg en fonction des parcelles..	47
Tableau 11 : Contribution des variables à la construction des trois premières composantes principales de l'ACP_SE.	50
Tableau 12 : Modèle ANOVA de certains indicateurs de SE en fonction des groupes formés par la HCPC.	52
Tableau 13 : Comparaison des valeurs moyennes et des écarts-types totaux pour les trois indicateurs qui mesurent l'activité d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT pour les trois campagnes de mesures réalisées jusqu'à présent dans la thèse de L. Leveau.	62
Tableau 14 : Comparaison des valeurs moyennes et des écarts-types totaux pour les indicateurs de taux de décomposition et de stabilisation de la MOS entre deux campagnes de mesures (2021 et 2022, mesures prises dans le cadre de la thèse de L. Leveau). Concernant les valeurs provenant du CRA-W, seules les données minimum et maximum ont pu être comparées.	65
Tableau 15 : Comparaison des valeurs moyennes et des écarts-types totaux pour l'indicateur du taux de prédation de graines d'adventices entre trois campagnes de mesure. Les deux dernières (2021 et 2022) correspondent à des mesures prises dans le cadre de la thèse de L.	

Leveau. Les données de 2012 proviennent de l'expérience réalisée par Boursault (2012) dans le cadre de sa thèse.....	66
Tableau 16 : Comparaison des valeurs moyennes et des écarts-types totaux pour les indicateurs de rendement en grain et de rendement en paille entre les deux campagnes de mesures réalisées jusqu'à présent dans le cadre de la thèse de L. Leveau.	67
Tableau 17 : Comparaison des valeurs moyennes et des écarts-types totaux pour les indicateurs de teneur en C_{org} et du ratio $C_{org}/argile$ granulométrique pour les deux campagnes de mesure réalisées jusqu'à présent dans le cadre de la thèse de L. Leveau.	68
Tableau 18 : Comparaison des principales corrélations entre le SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT et les PC pour les mesures réalisées dans ce mémoire (printemps 2022), les mesures réalisées par Dumont de Chassart et Dehaye (2022) (automne 2021) et les mesures réalisées par Belin et Fockedey (2021) (automne 2020).....	74
Tableau 19 : Comparaison des principales corrélations entre les SE de décomposition de la MOS par les microorganismes et les PC pour les mesures réalisées dans ce mémoire (printemps 2022) et les mesures réalisées par L. Leveau l'année 2020-2021 (printemps 2021).....	74

Abréviations

ACP = Analyse en Composantes Principales

AES = Agro-écosystème

ANOVA = Analysis Of Variance

C:N = rapport Carbone-Azote

CAH = Complexe Argilo-Humique

CASIMIR = Caractérisation Simplifiée des Pressions Biotiques et des Régulations Biologiques

CIPF = Centre Indépendant de Promotion Fourragère

C_{org} = Carbone Organique

CRA-W = Centre de Recherche Agronomique Wallon

CT = Carbone Total

FAO = Food and Agriculture Organization

HCPC = Hierarchical Clustering on Principal Component

IFT = Indice de Fréquence de Traitement

INRA = Institut National de Recherche Agronomique

IPBES = Intergovernmental Platform for Biodiversity and Ecosystem Services

MOS = Matière Organique du Sol

OPVT = Observatoire Participatif des Vers de Terre

PC = Pratique Culturelle

SE = Service Écosystémique

SPW = Service Public de Wallonie

TBI = Tea Bag Index

TCS = Technique Culturelle Sans labour

TR = Thé Rooibos Lipton®

TV = Thé Vert Lipton®

VDT = Vers De Terre

Introduction

Le remplacement de certains intrants issus de ressources non renouvelables par des fonctions et processus de l'agroécosystème contribue à la durabilité des systèmes agricoles alternatifs au système conventionnel. La collaboration entre les agronomes et les acteurs de terrain est essentielle pour orienter les pratiques actuelles vers plus de durabilité. L'objectif global de ce mémoire (qui prend part à la thèse de L. Leveau) consiste à caractériser les pratiques innovantes actuelles utilisées dans les fermes de grandes cultures wallonnes qui permettent de remplacer les intrants commerciaux par des services écosystémiques.

Le corps de ce mémoire se compose de quatre parties.

L'État de l'art est un état des lieux des connaissances scientifiques existantes à l'heure actuelle sur les services écosystémiques et porte une attention plus particulière sur les services écosystémiques liés aux auxiliaires de culture et la production végétale (ces services sont étudiés dans la suite du mémoire). Les liens entre les pratiques concernant le travail du sol et ces services écosystémiques spécifiques seront ensuite établis sur base de la littérature. La partie État de l'art se termine par l'objectif du mémoire qui détermine les nouvelles connaissances apportées par ce dernier sur base des connaissances existantes.

La partie Matériel et Méthodes a pour but d'établir la façon dont l'objectif du mémoire va être réalisé. Il s'agit tout d'abord d'une mise en contexte du mémoire au sein de la thèse de L. Leveau, suivie d'une présentation des plans d'expérience et des différents protocoles mis en place. Cette partie se termine par une présentation des analyses statistiques employées dans l'analyse des résultats.

La partie Résultats consiste en une présentation objective et neutre de l'ensemble des résultats obtenus au cours des expériences réalisées. Les indicateurs de services écosystémiques et de pratiques culturelles sont décrits puis analysés à travers des analyses multivariées. Ces dernières permettent de présenter les liens de corrélations existant entre ces deux catégories d'indicateurs.

Finalement, la partie Discussion permet de faire le lien entre les sections Résultats et État de l'art. Dans cette partie, les résultats présentés dans la section précédente sont mis en relation avec les résultats d'expériences similaires (dont celles obtenues dans les expériences précédentes de la thèse de L. Leveau). Des réflexions critiques sur les protocoles utilisés et des pistes d'amélioration pour les expériences de 2023 sont également apportées. Pour terminer, certains liens de corrélations observés entre les indicateurs de services écosystémiques et de pratiques culturelles sont interprétés sur base des connaissances scientifiques.

Ce mémoire se termine par une conclusion globale répondant à l'objectif défini à la partie État de l'art sur l'ensemble des travaux réalisés dans ce mémoire en 2022.

État de l'art

1 État et défis de l'agriculture actuelle

Dans les années 1960, la révolution verte marque le début d'une nouvelle ère agricole avec l'augmentation considérable de la production agricole basée sur trois facteurs principaux : la sélection de variétés à fort rendement potentiel, l'utilisation élevée d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires et le perfectionnement des systèmes d'irrigation et de drainage (Mazoyer et Roudart 2017).

Des études ont été réalisées pour démontrer le coût environnemental de ces activités (FAO 2017), notamment en ce qui concerne la décomposition des sols (érosion, acidification, salinisation etc.), l'émission de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique, la limitation des ressources naturelles telles que l'eau ou certains minéraux ou encore l'érosion de la biodiversité¹. Cette érosion est essentiellement due aux excès d'utilisation des produits phytosanitaires et à la fragmentation des habitats naturels des organismes (Médiène *et al.* 2011).

Dans les milieux agricoles, l'évolution des populations d'oiseaux constitue un bon indicateur pour suivre l'état de la biodiversité, du fait de leur position élevée dans la chaîne alimentaire, de leur grande variété d'exigences écologiques et d'un temps de réaction rapide face aux changements environnementaux (SPW 2021). En Wallonie, ces populations d'oiseaux strictement associés aux milieux agricoles sont en déclin continu (perte allant jusqu'à 60% de leurs effectifs) depuis 1990 (SPW 2021). Ces constats ont un impact important sur le niveau de services rendus par les organismes biologiques associés au milieu agricole et sur leurs interactions avec l'environnement (Médiène *et al.* 2011).

Face à ces défis environnementaux, le modèle agricole actuel est amené à se réformer. Le développement d'une agriculture plus favorable pour l'environnement repose sur deux axes principaux (SPW 2021) : la transition vers d'autres modes de production diminuant les pressions sur l'environnement et la meilleure valorisation des services fournis par les écosystèmes et des interactions biotiques. Ces services, appelés des services écosystémiques (SE, section 3) permettent de préserver les ressources (sol, eau, biodiversité) tout en réduisant l'utilisation d'intrants de synthèse (Briat et Job 2017). En tant qu'actrice de l'écosystème, l'agriculture peut agir à différentes échelles spatio-temporelles pour maintenir, voire améliorer ces SE. La mise en place des mesures agro-environnementales (haies, bandes enherbées, corridors entre les parcelles, etc.) montre un effet positif sur la biodiversité locale

¹La biodiversité est définie par IPBES (2017) comme « la variabilité des organismes vivants de toutes origines [...]. Cela comprend la variation des attributs génétiques, phénotypiques, phylogénétiques et fonctionnels, ainsi que les changements d'abondance et de distribution dans le temps et l'espace entre et parmi les espèces, les communautés biologiques et les écosystèmes ».

en milieu agricole (Médiène *et al.* 2011; SPW 2021). A l'échelle de la parcelle, il est possible d'agir sur les pratiques culturales (PC) appliquées. Ces dernières peuvent être très variables au sein des modèles alternatifs au modèle agricole conventionnel (tels que l'agriculture biologique, l'agriculture de conservation des sols ou l'agroforesterie) car il n'y a pas toujours de cadre strict définissant ces agricultures.

La valorisation des SE à travers ces nouveaux modèles, notamment *via* les PC appliquées sur les parcelles, nécessite d'investir dans des programmes de recherche et développement afin d'adapter ces méthodes aux différentes conditions locales dans cet objectif de transition vers une agriculture plus durable (FAO 2017).

2 L'agroécosystème

2.1 Définition

Selon Gliessman (2004), un écosystème est un « système fonctionnel de relations complémentaires entre les organismes vivants et leur environnement, délimité par des frontières arbitrairement choisies, et qui dans l'espace et le temps semble maintenir un équilibre stable mais dynamique ».

Un agroécosystème (AES) est créé lorsque l'être humain manipule et modifie un écosystème dans le but d'établir une production agricole. Il est composé d'un système écologique en interaction avec un système socio-économique. Ce dernier désigne les ressources humaines et matérielles qui interviennent au sein de l'écosystème agricole tandis que le système écologique comprend l'ensemble des composantes biotiques et abiotiques comprises ou circulant au sein de l'AES (Tibi et Therond 2018). La sphère biotique regroupe deux composantes en interaction. La biodiversité planifiée d'une part, est constituée de l'ensemble des plantes et animaux intentionnellement introduits dans l'écosystème et destinés à des fins de production agricole. La biodiversité associée d'autre part, inclut toutes les espèces végétales et animales qui interagissent avec cette biodiversité planifiée : les plantes adventices des cultures, la faune du sol (communautés microbiennes, macro- et mésofaune endogée), et la macro- et mésofaune épigée et aérienne (Tibi et Therond 2018).

Les nombreuses interactions entre chacune des sphères de l'AES impliquent que la transition vers de nouveaux modèles agricoles doit se faire au moyen d'une analyse systémique² car toutes les composantes de ce système sont interconnectées (WaES 2016).

L'une des composantes ayant un rôle déterminant au sein des AES est la matière organique du sol (MOS). Cette dernière influence les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols et est par conséquent impliquée dans les enjeux environnementaux et agronomiques de ces sols (Calvet, Chenu, et Houot 2015).

² Une analyse systémique « s'appuie sur une approche globale des problèmes ou des systèmes que l'on étudie et se concentre sur le jeu des interactions entre leurs éléments. [...] » (*Dictionnaire actuel de l'éducation* 1993).

2.2 La matière organique du sol

La MOS est définie comme la fraction organique du sol incluant les résidus de matières végétale et animale mortes ainsi que les composés organiques résultant de leurs transformations chimiques (Blume *et al.* 2016b). Les substances organiques introduites par les activités humaines sont comprises dans cette catégorie. Dans la suite de ce travail, ni les organismes vivants, ni la litière végétale (c'est-à-dire les résidus de culture aériens non incorporés au sol) ne sont considérés comme des composantes de la MOS (contrairement à certaines autres définitions). Les composantes des constituants organiques du sol pris en compte dans la définition de la MOS de ce travail peuvent être visualisées au schéma de l'Annexe 1.

La MOS contenue dans un sol n'est pas quantifiable en tant que telle. Seuls les éléments chimiques contenus dans cette MOS peuvent l'être. L'évaluation du taux de MOS se calcule donc sur base de la teneur en carbone organique³ (C_{org}) du sol, multipliée par un coefficient de conversion de valeur 1,72⁴ (Calvet, Chenu, et Houot 2015). La teneur en C_{org} , est très variable en fonction du type de sol et de son mode d'occupation. Sur la période 2015-2019, les sols wallons sous culture présentaient des teneurs en C_{org} comprises entre 1,1 et 3,2% (SPW 2020). Dans les régions agricoles limoneuse et sablo-limoneuse de Belgique (régions étudiées dans la suite de ce travail), la valeur moyenne était de respectivement 1,19% et 1,14% dans les sols de culture (SPW 2020). En deçà de 2% de C_{org} , les agrégats (section 2.2.1) deviennent instables, ce qui entraîne des risques d'érosion (Calvet, Chenu, et Houot 2015).

La MOS assure de nombreuses fonctions et contribue notamment à la fertilité des sols. Elle représente un élément indispensable pour la présence de végétaux, animaux et microorganismes auxquels elle fournit l'énergie et les nutriments (Calvet, Chenu, et Houot 2015). Les deux sections ci-dessous présentent les propriétés physique et chimique de la MOS. L'influence des vers de terre (VDT) et des microorganismes sur la MOS sera détaillée respectivement aux sections 3.4.1.2 et 3.4.2.1.

2.2.1 Propriétés physiques de la matière organique du sol

La capacité du sol à stocker du C_{org} est directement corrélée à la teneur en argile granulométrique dans les sols (Figure 1). Les argiles granulométriques font partie des constituants minéraux du sol et représentent les particules de diamètre inférieur à 2

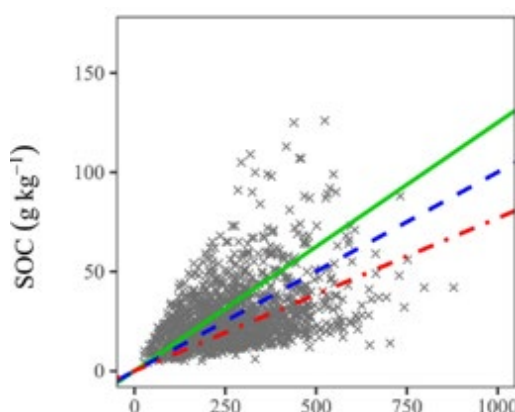


Figure 1 : Teneur en C_{org} (SOC) en fonction de la teneur en argile granulométrique (Clay) dans un sol de culture. En vert : ratio 1/8, en bleu : ratio 1/10, en rouge : ratio 1/13 (Prout *et al.* 2021).

³ Lors de la mesure du C_{org} , il n'est pas possible de faire abstraction des microorganismes vivants se trouvant dans les échantillons. La mesure du C_{org} et donc de la MOS comprend donc la partie micro- des organismes du sol. Cette réflexion ne concerne que la mesure de la MOS (pas ses propriétés physiques et chimiques).

⁴ Cette constante provient du fait que la teneur moyenne en C_{org} contenu dans la MOS est de 58%.

µm. Elles comprennent, entre autres, les argiles minéralogiques, structures minérales constituées de feuillets et déterminant les propriétés physico-chimiques du sol. La teneur en argile granulométrique détermine la capacité d'adsorption de la MOS aux surfaces minérales argileuses du sol (Prout *et al.* 2021). Une étude réalisée par Johannes *et al.* (2017) définit les

valeurs suivantes pour l'évaluation du ratio $\frac{C_{org} [g.kg^{-1}]}{Argile\ granulométrique [g.kg^{-1}]}$:

Tableau 1 : État structural du sol en fonction de son ratio $C_{org}/argile\ granulométrique$ (Johannes *et al.* 2017). Ces valeurs ont été définies selon les scores VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) correspondant, allant de 1 (bonne structure du sol) à 5 (faible structure du sol). Un score VESS de 2 correspond à un ratio $C_{org}/argile$ de 1/8, les scores VESS de 3 et 4 correspondent respectivement à des ratios $C_{org}/argile$ de 1/10 et 1/13.

Valeur (x) du ratio $\frac{C_{org}}{Argile\ granulométrique}$	$x > 1/8$	$1/8 > x > 1/10$	$1/10 > x > 1/13$	$x < 1/13$
État structural du sol	Très bon	Bon	Sujet à l'amélioration	Pauvre

La MOS, en particulier la MOS stable (définie ci-dessous), est donc directement liée à la structure du sol *via* les minéraux argileux. En effet, les surfaces minérales et la MOS forment des assemblages de diverses tailles appelés des **agrégats**. On distingue généralement les micro-agrégats (<250 µm) des macro-agrégats (>250 µm) (Blume *et al.* 2016b). Leur juxtaposition confère au sol sa structure qui détermine ses propriétés physiques. En assemblant les particules de sol en agrégats, la MOS permet une meilleure infiltration de l'eau et de l'air dans les sols ainsi qu'une bonne résistance face à la battance, l'érosion ou encore le tassement (Chenu *et al.* 2017). Au sein de ces agrégats, les liaisons par adsorption entre la MOS et les surfaces minérales forment le **complexe argilo-humique** (CAH). Ce dernier joue un rôle important dans la fertilité du sol. Il se compose de MOS, d'argiles minéralogiques et de cations. Les cations présents dans le sol sont adsorbés à cette structure par la charge électrique négative présente à la surface du CAH et sont alors considérés comme « échangeables ». Ceci signifie qu'ils peuvent aisément se substituer les uns aux autres et être disponibles pour la nutrition minérale des plantes (Bruand et Tessier 2017). La valeur globale de cette charge électrique est définie par sa « capacité d'échange cationique » (Bruand et Tessier 2017).

L'adsorption des particules organiques sur les surfaces minérales argileuses se réalise à travers trois types d'interaction (Figure 2, Soltner 2011) :

- Des interactions entre les charges négatives de l'argile minéralogique et les charges négatives d'une molécule organique, par l'intermédiaire d'un pont formé par un cation polyvalent tel que Ca^{2+} . Ce mode de liaison permet d'assurer une bonne stabilité des agrégats (résistance à la minéralisation et à la dispersion par l'eau) ;

- Des interactions par l'intermédiaire d'un ligand hydroxylé (tel que Fe^{3+} ou Al^{3+}) situé en bordure du feuillet d'argile minéralogique et relié aux molécules organiques de la MOS ;
- Aux points de rupture des feuillets d'argiles minéralogiques, sur les charges positives apparaissant en cas de cassure des feuillets (en cas d'érosion par exemple).

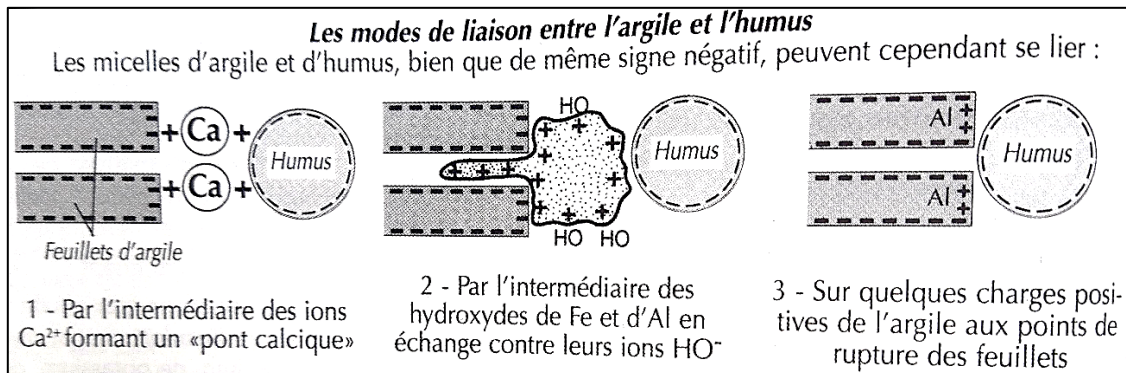


Figure 2 : Principaux modes de liaison entre l'argile minéralogique et la MOS (l'humus est défini dans la section suivante) (Soltner 2011).

Certains substrats organiques ne peuvent être assimilés et minéralisés par les microorganismes lorsqu'ils sont adsorbés (protection physico-chimique). De plus, lorsque les particules se trouvent dans des pores du sol trop fins pour être accessibles aux microorganismes, ils sont également protégés de la minéralisation (protection physique) (Calvet, Chenu, et Houot 2015).

La mesure du ratio entre la fraction grossière ($> 20 \mu\text{m}$)⁵ et la fraction fine ($< 20 \mu\text{m}$) du C_{org} est un indicateur de l'évolution du C_{org} sur les cinq à dix dernières années. Une valeur de 0,5-1 permet d'assurer une teneur stable en C_{org} dans le sol, tandis que des valeurs plus élevées indiquent une augmentation de la teneur en C_{org} dans le sol (et inversement) (Chartin *et al.* 2019). La fraction morte du C_{org} du sol se distingue en trois composantes en fonction de sa stabilité physique et chimique (O'Rourke *et al.* 2015; Chartin *et al.* 2019) :

- Le **carbone labile** comprend le C_{org} facilement assimilable et rapidement minéralisable par les organismes du sol. Il possède un temps de résidence (temps nécessaire pour renouveler entièrement le contenu de ce réservoir) d'un à deux ans. Cette fraction correspond majoritairement à la fraction grossière de C_{org} regroupant les macro- et micro-agrégats, les débris végétaux en cours de décomposition et la litière végétale ;
- Le **carbone lent** constitue la fraction de C_{org} ayant une décomposition lente avec un temps de résidence de l'ordre de 10 à 100 ans ;
- Le **carbone stable** comprend le C_{org} hautement stabilisé. Il possède un temps de résidence de 100 à plus de 1000 ans. Cette fraction du carbone est intéressante pour la séquestration du carbone à long terme. Elle correspond à la fraction fine du carbone et se trouve sous forme de micro-agrégats.

⁵ Ces valeurs correspondent au diamètre des particules.

2.2.2 Propriétés chimiques de la matière organique du sol

Cette partie est décrite *via* les différentes étapes de l'évolution de la matière organique (hors biomasse vivante) à partir du moment où elle est apportée sur le champ. La grande majorité des réactions de transformation chimique de la litière végétale et de la MOS est catalysée par des enzymes produites par les microorganismes (Calvet, Chenu, et Houot 2015).

Premièrement, la litière végétale et la MOS subissent un processus de décomposition appelé la **minéralisation primaire**. La digestion de ces matières organiques par les microorganismes du sol libère principalement de l'énergie, de l'eau et du CO₂. Cette phase assure la prolifération de ces organismes, pour autant que de l'azote soit disponible en suffisance dans la matière organique de départ pour assurer leur multiplication (développé en fin de section). S'en suit une phase de décroissance microbienne à la mort de ceux-ci lorsque la majorité de la litière végétale et de la MOS facilement accessible aura été digérée. Cette phase conduit à une libération de substances nutritives minérales dans le sol issues de la décomposition de la litière végétale, de la MOS et des corps microbiens. Ces substances minérales peuvent avoir différentes fins : assimilation directe par les plantes, adsorption au CAH, synthèse d'humus ou encore lessivage et lixiviation⁶ (Soltner 2011).

Certains produits transitoires de la MOS ne vont pas se minéraliser complètement à l'issue de la minéralisation primaire et vont se regrouper pour aboutir à la formation de molécules plus complexes appelées l'humus. Ce processus s'appelle l'**humification de la MOS** et commence aussitôt après la phase de prolifération microbienne. Grâce à sa liaison avec l'argile au sein du CAH, l'humus est assez résistant aux attaques microbiennes. Il va cependant finir par être minéralisé très lentement (1,5 à 2% du stock du sol par an, Soltner 2011). Il s'agit de l'étape de **minéralisation secondaire de la MOS**.

La vitesse de minéralisation de la litière végétale et de la MOS est définie par leur ratio $\frac{\text{Carbone}}{\text{Azote}}$. La proportion de ces deux éléments dans un substrat, appelé le rapport C:N, est un facteur déterminant dans la vitesse de minéralisation de ce substrat (Figure 3, Calvet, Chenu, et Houot 2015). En effet, la présence d'azote est indispensable pour assurer une bonne croissance microbienne et donc sur la capacité des microorganismes à décomposer la litière végétale et la MOS

(Recous, Lashermes, et Bertrand 2017). Dans la littérature scientifique, la valeur seuil du

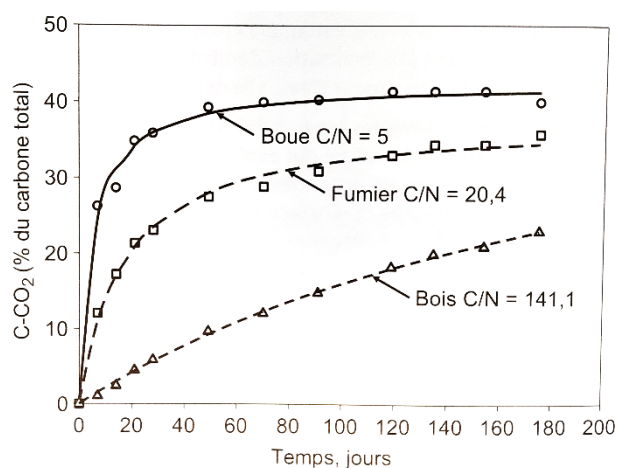


Figure 3 : Cinétiques de minéralisation du C_{org} obtenues avec des substrats différents par leur valeur du rapport C:N (Calvet 2003).

⁶ Le lessivage concerne le transport de particules solides non solubles, tandis que la lixiviation concerne uniquement celui des éléments solubles.

rapport C:N est généralement définie à 25. Lorsque ce ratio est inférieur, la quantité d'azote organique minéralisé est plus grande que la quantité d'azote inorganique assimilé par les microorganismes. Il y a une production nette d'azote, avec risques de pertes par lixiviation. Dans le cas d'une valeur supérieure, il n'y a pas assez d'azote pour permettre la décomposition de la MOS (phénomène de « faim d'azote ») et les microorganismes puisent l'azote dans les réserves du sol pour assurer leur multiplication et décomposer la litière végétale et la MOS (Calvet, Chenu, et Houot 2015).

3 Les services écosystémiques

3.1 Définition

Selon la définition de Tibi et Therond (2018a), « Les services écosystémiques sont des processus écologiques ou des éléments de la structure de l'écosystème dont l'être humain bénéficie, activement en mobilisant du capital matériel (énergie, eau, produits phytosanitaires...) et/ou cognitif (connaissances, par ex. pratiques agricoles), ou passivement (par ex. avantage dérivé du SE de régulation du climat) [...]. ». Ces avantages contribuent au bien-être de l'humain en agissant sur de multiples domaines : alimentation, santé, activités économiques, culturelles, etc. (WaES 2016). Un SE peut être à l'origine de plusieurs avantages (Tibi et Therond 2018a). Dans un contexte agricole, les bénéficiaires des SE sont d'une part les agriculteurs et d'autre part la société dans son ensemble. Ils peuvent être affectés différemment par un même processus écologique (Tibi et Therond 2018).

Le niveau de fourniture en SE dépend directement de l'état des entités et du fonctionnement des écosystèmes (Tibi et Therond 2018). La garantie d'une fourniture en SE continue dans l'espace et le temps nécessite de prendre en compte les conséquences des activités humaines sur les écosystèmes, les limites biologiques des écosystèmes à rendre des services et la demande en services des différents acteurs dans un environnement donné (WaES 2016).

3.2 Services écosystémiques et travail du sol

Le travail du sol est défini comme l'ensemble des opérations mécaniques de fragmentation, mélange et retournement du sol dans un système de culture. Son impact sur les caractéristiques des sols cultivés est très global comparé aux autres PC (Roger-Estrade, Labreuche, et Boizard 2014). De plus, il a été observé que parmi l'ensemble des PC, celles qui montrent le plus de variabilité entre

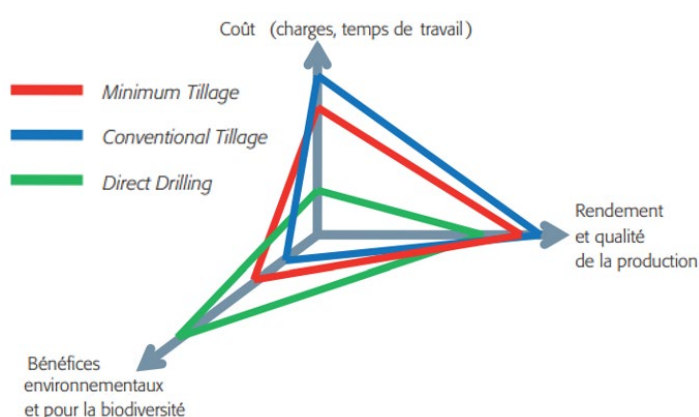


Figure 4 : Performances des différents systèmes de travail du sol selon trois critères : le coût, le rendement et la qualité de la production, et les bénéfices environnementaux et pour la biodiversité (Morris et al. 2010).

les agriculteurs de l'échantillon étudié dans ce mémoire sont liées au travail du sol (Belin et

Fockedey 2021; Dumont de Chassart et Dehaye 2022). Pour cette raison, la partie « État de l'art » de ce mémoire ne s'intéressera qu'aux études ayant démontré des liens entre chacun des SE présentés ci-dessous et les PC liées au travail du sol. Les itinéraires de travail du sol sont extrêmement variables selon les agriculteurs. Ils peuvent néanmoins être classés en trois catégories (Figure 4) : le système conventionnel avec labour (conventional tillage), le travail du sol simplifié (minimum tillage) et le semis direct (direct drilling).

3.3 Classification

La classification des SE permet d'établir des comparaisons et compromis entre les divers SE fournis (Wallace 2007). L'Institut National de Recherche Agronomique (INRA), à travers le travail de Le Roux *et al.* (2008), propose une classification appropriée des SE fournis par les AES. Cette classification a été choisie dans le cadre de ce travail car elle est facilement appropriable par les agriculteurs et applicable à l'échelle de la parcelle. Elle distingue :

- **Les SE intrants** : ils permettent de réduire le recours aux intrants de synthèse tout en maintenant de bonnes conditions de production. Ils contribuent à la fourniture des ressources, au maintien des supports physico-chimiques et assurent la régulation des interactions biotiques ;
- **Les SE produits qui contribuent au revenu agricole direct** : ils concernent la production de biens par les écosystèmes. Ceux-ci peuvent répondre à des besoins d'alimentation, de matériaux ou d'énergie ;
- **Les SE produits hors revenu agricole direct** : ils présentent un intérêt pour la société, tel que la séquestration du carbone, l'esthétique des paysages ou la qualité des eaux.

Parmi l'ensemble des SE répertoriés dans le travail de Le Roux *et al.* (2008, Annexe 2), trois SE plus spécifiques seront approfondis dans le cadre de ce mémoire (Tableau 2) : la dynamique de la matière organique (SE intrant), le contrôle des adventices par les auxiliaires de cultures⁷ (SE intrant) et le service de production végétale (SE produit contribuant au revenu agricole direct). Ces SE ont été mesurés car ils font partie de l'ensemble des SE étudiés dans la thèse de L. Leveau qui constitue le cadre plus large de ce mémoire (section 5.4.2) et leur période de mesure correspond à la période de réalisation du présent mémoire.

⁷ Selon l'INRAE, un auxiliaire de culture au sens large est défini comme « un organisme vivant qui fournit des services écosystémiques permettant de faciliter la production agricole. Il remplace tout ou une partie du travail et des intrants apportés par l'agriculteur (microorganismes, organismes antagonistes à certaines bioagresseurs, insectes pollinisateurs, etc.) » (Joseph, Delattre, et Sarthou 2018). Au sens restreint, ils désignent uniquement les organismes qui, de par leur mode de vie, développement et/ou alimentation, régulent les populations de ravageurs de culture (Joseph, Delattre, et Sarthou 2018).

Tableau 2 : Correspondance entre les SE et fonctions de l'écosystème étudiés dans ce mémoire et les SE et fonctions globales de l'écosystème provenant de l'étude de Le Roux et al. (2008). Les couleurs représentant chacun des SE seront conservées tout au long de ce travail.

	SE étudiés	Fonctions de l'écosystème étudiées	SE globaux (Le Roux et al. 2008)	Fonctions de l'écosystème correspondantes (Le Roux et al. 2008)
SE intrants	Dynamique de la matière organique	Fragmentation et enfouissement de la litière végétale par les VDT	Fertilité des sols	- Dynamique de la MOS : minéralisation, décomposition - Dynamique des éléments nutritifs : transformations élémentaires, solubilisation
		Décomposition de la MOS par les microorganismes		
	Contrôle des adventices	Prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture	Contrôle des bioagresseurs	- Habitats et ressources pour les auxiliaires - Prédation, parasitisme, pathogénicité
SE produits	Production végétale	Rendement du froment en grain et en paille	Production végétale	- Production primaire : rendement - Production primaire : stabilité des rendements malgré les variations de l'environnement (climat, bioagresseurs...)

3.4 Les services écosystémiques intrants

Les SE intrants peuvent être considérés comme des facteurs de production puisqu'ils influencent la production végétale. L'agriculteur et la société bénéficient de leurs avantages à travers la diminution de l'usage d'intrants de synthèse et ainsi la réduction des pollutions environnementales qui y sont associées (Tibi et Therond 2018).

3.4.1 Services écosystémiques liés à l'activité des vers de terre

3.4.1.1 Classification des vers de terre

La classification proposée par Marcel Bouché en 1977 est la plus utilisée dans la communauté scientifique pour différencier les catégories écologiques des VDT. Elle peut être représentée par un triangle dont chacun des pôles correspond à l'une des trois catégories de VDT définies par des caractéristiques écologiques propres, bien que la plupart des espèces se trouvent à l'intermédiaire de ces pôles (Bouché 1977).

Ces trois catégories écologiques sont (Bouché 1977; Brady et Weil 2014; Pelosi, Bertrand, et Roger-Estrade 2009):

- **Les épigés** : ils vivent à la surface du sol et décomposent la litière végétale en plus petites particules (sans la mélanger aux horizons plus profonds du sol). Ils sont généralement absents des sols agricoles à cause de l'enfouissement des résidus de cultures par le labour ainsi que l'utilisation de produits phytosanitaires ;

- **Les endogés** : ils vivent en profondeur du sol et se nourrissent de matière minérale plus ou moins enrichie de MOS. Par leurs déplacements horizontaux, ils aèrent le sol en profondeur et permettent aux nouvelles racines de s'installer ;
- **Les anéciques** : ils se nourrissent de MOS et de litière végétale. Ils incorporent cette dernière au sol en creusant de profondes galeries verticales (jusqu'à 6 mètres de profondeur). Ils rejettent ensuite la terre digérée sous forme de turricules, en surface ou dans le sol (Figure 5). L'entrée de leurs galeries à la surface du sol est souvent recouverte par des amas de litière végétale organisés spatialement, appelés des cabanes à VDT (Figure 5, OPVT 2022). Ils sont généralement plus longs et larges que les épigés et endogés.



Figure 5 : Cabane (haut) et turricules (bas) de VDT (J. Van den Broeck, 2022).

Le caractère subjectif de certains critères utilisés par Bouché (1977) pour répartir les VDT a donné lieu à des classifications différentes pour une même espèce selon les revues. Dans un objectif de restructuration de cette classification, les résultats obtenus par Bottinelli *et al.* (2020) indiquent que les caractères les plus influents pour différencier les espèces sont la coloration et la pigmentation de la peau, ainsi que la longueur corporelle. Ces mêmes résultats ont finalement permis d'assigner à chaque espèce un pourcentage d'appartenance à chacune des trois grandes catégories écologiques des VDT.

3.4.1.2 Fonctions écologiques

Les mécanismes par lesquels les VDT sont susceptibles d'affecter les plantes sont résumés dans le Tableau 3. Ces mécanismes sont d'ordres biologique, chimique et physique (Brown, Edwards, et Brussaard 2004a).

Tableau 3 : Mécanismes d'influence des VDT sur les plantes (Brown, Edwards, et Brussaard 2004).

MECANISMES D'INFLUENCE DES VDT SUR LES PLANTES	
Chimique	1. Changements dans la disponibilité spatio-temporelle des nutriments du sol
Physique	2. Changements dans la structure physique du sol
Biologique	3. Changements et dispersion dans les populations et activités des microorganismes bénéfiques
	4. Interactions avec la banque de graines du sol
	5. Production de substances PGR et PGI (plant-growth-regulating/influencing)
	6. Changements dans les populations et les impacts sur les parasites et pathogènes de plantes
	7. Abrasion des racines et ingestion de certaines parties de plantes vivantes

Tout d'abord, sur le plan **chimique**, les VDT (anéciques et épigés) jouent un rôle important dans la disponibilité des nutriments du sol en ingérant directement de la litière végétale ou de la MOS peu décomposée (Bentley, Butt, et Nuutingen 2022). Durant le processus de digestion, la partie non assimilée par le VDT est fragmentée, mélangée à la terre ingérée puis excrétée

sous forme de déjections appelées turricules (Hedde *et al.* 2017). La minéralisation de ces derniers, processus qui intervient principalement lorsque le turricule est "jeune", permet

	Composition en pour mille		Augmentation due aux vers de terre %
	Sol de surface	Excréments des vers de terre	
Calcium échangeable	1,990	2,790	40 %
Magnésium échangeable . . .	0,162	0,492	204 %
Azote (Nitrate)	0,004	0,022	366 %
Phosphore disponible	0,009	0,067	644 %
Potassium échangeable	0,032	0,358	1.019 %
Taux de saturation	0,074	0,093	26 %
pH	6,4	7,0	—

Figure 6 : Enrichissement de la terre en minéraux par les VDT et influence des VDT sur le taux de saturation du sol et sur le pH (Soltner 2011).

d'augmenter dans le sol la teneur en substances assimilables par les plantes, respectivement de 1019%, 644% et 366% pour le potassium, le phosphore et l'azote (Figure 6, Bertrand *et al.* 2015; Soltner 2011). De plus, le brassage vertical du sol par les anéciques permet (Soltner 2011; Archambeaud et Thomas 2016) :

- D'enfouir la litière végétale et la MOS vers les profondeurs du sol, ce qui permet aux organismes vivant en profondeur de bénéficier de leur énergie ;
- De remonter à la surface les éléments lessivés tels que le calcium.

Ensuite, les VDT participent à la structure **physique** des sols par la formation d'agrégats et de porosités. Lors du processus de digestion, ils mettent en contact physique la terre qu'ils ingèrent avec des substances organiques provenant de décompositions microbiennes dans leur tube digestif, ce qui permet la formation d'agrégats stables de CAH (Archambeaud et Thomas 2016; Soltner 2011). Certaines études estiment que plus de 50% des agrégats de surface des sols sont formés par les VDT (Kubiena 1953). De plus, les galeries formées par les passages verticaux des VDT anéciques, pouvant représenter jusqu'à 5% du volume du sol (Hedde *et al.* 2017), constituent des voies d'aération et d'écoulement préférentiel de l'eau contribuant à la diminution de l'érosion des sols (Bertrand *et al.* 2015).

Finalement, d'un point de vue **biologique**, les VDT sont en interaction avec les autres organismes du sol (microorganismes, invertébrés, vertébrés, plantes) à travers divers processus : biocontrôle des pathogènes et parasites, stimulation des symbioses (ex : entre la bactérie *Rhizobium* et les légumineuses, Gange 1993; Doube *et al.* 1994), production de régulateurs de croissance des plantes (PGR et PGI, Brown, Edwards, et Brussaard 2004), etc. L'effet des VDT sur chacune de ces fonctions peut être expliqué par un ensemble de mécanismes impliquant de nombreux organismes du sol (Hedde *et al.* 2017). Deux de ces interactions (celles relatives aux microorganismes et aux prédateurs de graines d'adventices), seront approfondies respectivement aux sections 3.4.2 et 3.4.3.

3.4.1.3 Facteurs majeurs influençant l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre

L'activité d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT est tout d'abord influencée par l'abondance des VDT présents dans le sol. La quantité et qualité (C:N) de la matière organique apportée au sol constitue le facteur déterminant pour évaluer l'abondance

des VDT. Ils sont favorisés en présence de matières organiques ayant un C:N faible (<20, ex : compost, fumier, matière organique fraîche) puisqu'ils ont besoin d'azote pour assurer leur développement (Curry 2004).

L'activité des VDT est également déterminée par des facteurs climatiques. L'humidité du sol constitue le déterminant majeur dans la distribution et de l'activité des VDT. Ces derniers sont généralement les plus actifs lorsque la teneur en eau du sol est proche de la capacité au champ⁸ (~10kPa) et leur activité décroît lorsque l'humidité du sol diminue (Curry 2004; Lavelle et Spain 2001). De plus, les VDT ont un optimum de température du sol situé entre 10 et 20°C en région tempérée (Curry 2004). Leur période optimale d'activité se concentre donc principalement au printemps et en automne.

Finalement, la gestion des terres à travers les activités humaines (mise en culture d'un sol, déforestation, présence d'éléments toxiques dans les sols, etc.) exerce également une influence considérable sur l'activité des VDT de façon directe (perturbations physiques) et indirectes (altération de l'environnement physico-chimique et de leur approvisionnement en nourriture) (Curry 2004). Globalement l'abondance et la diversité des VDT est plus faible dans les sols cultivés par rapport aux sols non cultivés (Peigné *et al.* 2009; Djallo *et al.* 2022).

3.4.1.4 Effet du travail du sol sur l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre

L'intensité⁹ des méthodes de travail du sol est l'un des facteurs majeurs régissant la taille et la diversité de la population de VDT (Bertrand *et al.* 2015). D'après une étude réalisée par Boström (1995), 61 à 68% de la biomasse lombricienne est affectée lors d'un labour par des blessures physiques souvent mortelles, causées par le retournement des mottes de terre et les outils de labour utilisés. Le retournement des mottes détruit les galeries des VDT, endommage fortement les cocons assurant leur reproduction et conduit à une exposition élevée des lombrics aux prédateurs (House et Parmelee 1985). Les anéciques sont les plus impactés car contrairement aux épigés, leurs galeries sont permanentes et utilisées comme abris et routes pour la nourriture (Pelosi, Bertrand, et Roger-Estrade 2009; Bouthier *et al.* 2014).

Une étude réalisée par Pelosi, Bertrand, et Roger-Estrade (2009) compare la densité et biomasse des trois groupes écologiques des VDT en fonction des PC, comparant, entre autres, le travail du sol en semis direct et en labour. Les parcelles sont cultivées en suivant ces PC durant sept ans avant la première année de collecte de données. Sur les trois années de données récoltées, la densité des anéciques et épigés était respectivement 5,2 et 12,5 fois plus élevée en semis direct qu'en labour. Ces deux catégories sont en effet favorisées par la

⁸ La capacité au champ correspond à la quantité maximale de rétention d'eau dans un sol (Veihmeyer et Hendrickson 1931). En Wallonie, la teneur en eau moyenne des sols est inférieure à la capacité au champ entre avril et septembre (SPW et ULg 2013).

⁹ L'intensité du travail du sol peut être définie comme une combinaison de la profondeur de travail du sol, du mode de fragmentation et de la fréquence des opérations (Bertrand *et al.* 2015).

présence abondante de litière végétale et l'absence de travail du sol. En revanche, les endogés sont favorisés par l'incorporation de la litière végétale dans le sol lors du labour puisque leur accès à la matière organique est facilité. Les techniques de semis direct n'accroissent donc pas toujours le nombre total de VDT (car les endogés sont peu impactés par le labour) mais bien leur diversité et leur biomasse (*via* la présence plus abondante d'anéciques, Pérès *et al.* 2022).

3.4.2 Services écosystémiques liés à l'activité des microorganismes

3.4.2.1 Fonctions écologiques

Les microorganismes du sol, constitués entre autres d'algues, de champignons et de bactéries, sont reconnus comme des acteurs clés du fonctionnement du système sol-plante. Ce fonctionnement est basé sur des biotransformations, c'est-à-dire des processus par lesquels des composés organiques sont transformés d'une forme à l'autre sous l'action d'organismes vivants (Singh 2017).

La décomposition et minéralisation de la MOS assurées par les microorganismes leur permettent de jouer un rôle majeur dans le fonctionnement écologique des sols agricoles à travers des mécanismes de dynamique du carbone et de recyclage des nutriments (section 2.2.2). Une étude réalisée en Wallonie montre une corrélation positive entre la variabilité de la fraction grossière du C_{org} (composé majoritairement de C_{org} labile) et le carbone microbien (van Wesemael *et al.* 2019). Plusieurs travaux (Griffiths *et al.* 2000; Wertz *et al.* 2006; Juarez *et al.* 2013) ont démontré l'absence de relation entre la diversité microbienne dans les sols et la vitesse de minéralisation de la MOS, due à la redondance fonctionnelle entre ces organismes. Cette redondance serait due au très grand nombre d'espèces présentes dans les communautés microbiennes du sol.

3.4.2.2 Facteurs majeurs influençant la décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes

Le taux de décomposition de la MOS dépend tout d'abord de l'abondance et de la diversité fonctionnelle des microorganismes. Celles-ci sont influencées entre autres par le type de couverts végétaux (qualité et quantité de substrat) et la teneur en azote du sol (endogène et exogène)¹⁰. Les organismes présents au cours de la décomposition sont différents en fonction de la nature du substrat apporté. La présence de MOS ayant une faible teneur en azote va par exemple favoriser certaines communautés du sol ayant des enzymes adaptées à la décomposition de cette MOS, telles que certaines espèces de champignon (Recous, Lashermes, et Bertrand 2017). Les facteurs environnementaux (température, humidité, acidité, concentration en nutriments, présence de substances toxiques, etc.) influencent également fortement ces organismes, avec des effets très variables selon le microorganisme considéré (Lavelle et Spain 2001; Calvet, Chenu, et Houot 2015). Finalement, certaines PC

¹⁰ Une fertilisation exogène est basée sur des apports externes à l'AES sous formes d'engrais. Une fertilisation endogène se base sur la disponibilité des nutriments minéraux dans la dynamique de fonctionnement de l'AES.

appliquées sur les parcelles agricoles, telles que le travail du sol et la fertilisation organique, impactent également ces communautés de microorganismes (section 3.4.2.3).

Outre ces facteurs directement liés aux microorganismes, la décomposition et minéralisation de la MOS est également influencée par les types de liaisons avec les surfaces minérales sur lesquelles elles s'adsorbent et qui peut limiter l'accès à cette MOS (section 2.2.1, Chenu *et al.* 2017). De plus, les biotransformations par les microorganismes du sol nécessitent un contact entre ces microorganismes (ou leurs enzymes extracellulaires) et les substrats organiques. Pour être biodégradés, les composés organiques doivent donc être accessibles (protection physique) et biodisponibles (protection physicochimique, Chenu *et al.* 2017).

Finalement, la présence de VDT influence la structure des communautés microbiennes de deux façons (Bertrand *et al.* 2015; McLean et Parkinson 2000) :

- Les VDT favorisent la décomposition de la litière végétale et de la MOS à travers leur fragmentation, ce qui augmente leur surface de décomposition par les microorganismes ;
- Le passage des matières organiques dans le tube digestif des VDT change leurs propriétés physico-chimiques *via* la formation de turricules.

3.4.2.3 Effet du travail du sol sur la décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes

Le travail du sol change fortement la localisation de la MOS dans le sol. En effet, le labour homogénéise la répartition de la MOS dans la couche de sol labourée, tandis que dans les systèmes en semis direct ou en travail simplifié, plus de 50% des nouveaux apports de MOS se situent dans les quatre premiers cm du sol (Figure 7, Calvet, Chenu, et Houot 2015; Balesdent, Chenu, et Balabane 2000).

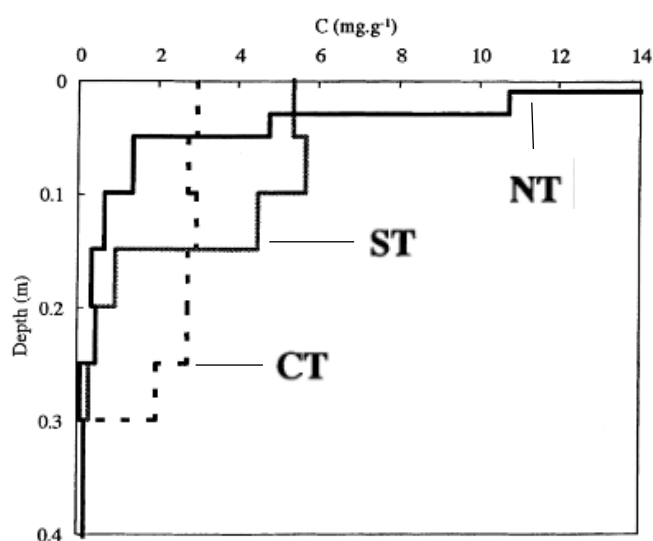


Figure 7 : Teneur en C_{org} incorporé dans le sol en fonction de la profondeur, pour différents sols travaillés en labour (CT), en surface (ST) et en semis direct (NT) durant 17 années (Balesdent, Chenu, et Balabane 2000). Cette expérience a été mesurée à Boigneville, après 17 cultures successives de maïs.

Cette différence entre les deux systèmes conduit à des différences de localisation des flux biologiques majeurs régissant le devenir de la MOS tels que sa décomposition par les microorganismes. La quantité et l'activité des microorganismes suivent généralement la stratification de la MOS dans les sols : dans les systèmes en semis direct ou en travail simplifié, la densité de ces microorganismes est très élevée à la surface du sol et diminue avec la profondeur (ce qui est avantageux pour le stockage de carbone dans les sols), contrairement

aux systèmes à labour où les microorganismes sont répartis de façon plus homogène dans le sol (Andrade, Colozzi-Filho, et Giller 2003). De plus, le travail du sol avec labour diminue la diversité biologique microbienne à la surface du sol, significativement plus élevée dans les pratiques de semis direct (Liu *et al.* 2006).

La meilleure accessibilité des microorganismes à la MOS lors d'un travail du sol (qui diminue la protection physico-chimique de la MOS) stimule sa minéralisation. Une étude réalisée en France sur un sol initialement labouré montre que sur une période de 17 ans, la quantité de MOS minéralisée est doublée dans un système de labour par rapport à un système en semis direct strict (en prenant en compte les apports plus élevés de matière organique en semis direct) (Balesdent, Chenu, et Balabane 2000).

3.4.3 Services écosystémiques liés à l'activité des prédateurs de graines d'adventices

3.4.3.1 Fonctions écologiques

La banque de graines est définie comme la réserve de graines viables et non germées présente dans et à la surface des sols à un moment défini et dont la germination varie entre autres en fonction des conditions environnementales (Thompson et Grime 1979). La régulation de la banque de graines par les auxiliaires de culture est liée à plusieurs processus biologiques : certains organismes consomment les graines, avant ou après dispersion, d'autres participent à la distribution spatiale et temporelle des graines, d'autres encore influencent la croissance des plantes (Hedde *et al.* 2017).

Dans le cas des écosystèmes agricoles, les organismes les plus fréquemment répertoriés dans le processus de prédation de graines d'adventices sont les carabes et, dans une moindre mesure, certaines espèces d'oiseaux (Tibi et Therond 2018). Une étude réalisée en France par Boursault (2012) met en évidence une corrélation négative entre l'activité de ces prédateurs et la taille de la banque de graines, suggérant une régulation. Cette même étude démontre que pour l'espèce la plus prédatée dans l'étude par les carabes – *Viola arvensis* – jusqu'à 80% des graines présentes à la surface du sol ont disparu en une année (Boursault 2012).

3.4.3.2 Facteurs majeurs d'influence de la prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture

La prédation des graines d'adventices est tout d'abord influencée par l'abondance et la diversité des organismes prédateurs de graines. Les écosystèmes agricoles ainsi que leur environnement proche constituent les habitats et réserves de nourriture de ces prédateurs. Ces communautés sont donc fortement influencées par la composition des écosystèmes (par ex. la part d'habitats des prédateurs dans la parcelle), et la configuration des écosystèmes (par ex. leur proximité avec la parcelle) (Tibi et Therond 2018). L'usage de produits phytosanitaires et l'intensité du travail du sol sont également des facteurs d'influence sur les communautés de prédateurs de graines (section 3.4.3.3).

Ensuite, le processus de prédation dépend également de l'état de la banque de graines d'adventices au sein de la parcelle agricole ou dans son environnement proche (Tibi et Therond 2018a). Cette banque de graines est fortement influencée par la configuration spatiale et par la répartition temporelle des couverts végétaux qui constituent l'AES. La séquence de culture et la densité en adventices ont un effet significatif sur l'abondance des graines d'adventices dans le sol et donc sur le développement à long terme de ce stock de graines (Tibi et Therond 2018).

Finalement, les VDT ont une action sur la distribution des graines (Forey *et al.* 2011) ainsi que sur leur taux de germination. Ce dernier est diminué de 70 à 97% après passage d'une graine dans le tube digestif des VDT par destruction physico-chimique (Decaëns *et al.* 2003). Les VDT montrent globalement une préférence de consommation pour les petites graines, ce qui a un impact direct sur les communautés de plantes adventices germées (Milcu, Schumacher, et Scheu 2006).

3.4.3.3 Effet du travail du sol sur le processus de prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture

Le travail du sol exerce une pression de sélection sur la flore adventice et va donc influencer l'état (abondance et composition) de la banque de graines d'adventices notamment en enfouissant les graines de surface à des profondeurs défavorables à la germination et en remontant une partie des graines à la surface (ce qui les rend disponibles à la prédation) (Boursault 2012; Colbach et Vacher 2014). De nombreuses études rapportent que l'abandon du labour est suivi d'une augmentation de l'abondance et de la richesse spécifique de la flore adventice, sauf en cas d'application d'herbicides.

Les pratiques de travail du sol exercent une influence généralement négative sur les auxiliaires de culture (dont les prédateurs de graines d'adventices) telles que la destruction de leurs habitats ou encore la limitation en ressources alimentaires (graines, autres animaux, etc.) (Tibi et Therond 2018). Dans le cas des carabes, le travail du sol est un facteur majeur dans la dynamique de ces populations (Lubac 2014). Un travail profond (comme le labour) a tendance à diminuer leur abondance, notamment à travers la modification de leur habitat et la mortalité des larves de carabes, là où un travail superficiel (comme le semis direct) augmente leur richesse spécifique (Lubac 2014). La force de réponse des carabes aux différentes pratiques de travail du sol dépend néanmoins des espèces considérées.

Par conséquent, la modification de la disponibilité en graines ainsi que des communautés de carabes suite au travail de sol aura des effets sur le processus de prédation des graines par ces organismes. Une étude réalisée par Cromar, Murphy, et Swanton (1999) montre un taux de prédation de graines d'adventices de 24% dans les systèmes avec labour et un taux de 32% pour les systèmes avec travail superficiel du sol. Une autre étude, réalisée par Menalled *et al.* (2007) confirme cette observation en démontrant que la prédation dans les systèmes sans labour est deux fois plus élevée que dans ceux avec labour.

3.5 Les services écosystémiques produits

Selon la classification de Le Roux *et al.* (2008), les SE produits peuvent être divisés en deux catégories : les services contribuant directement au revenu agricole et ceux hors revenu agricole direct. La première catégorie concerne la production de biens agricoles (végétaux et animaux), qui peut être considérée comme un coproduit du fonctionnement des écosystèmes (SE intrants) et des pratiques agricoles exogènes (Tibi et Therond 2018). Les SE produits hors revenu agricole direct incluent quant à eux par exemple la séquestration du carbone, la valeur esthétique des paysages ou encore la qualité des eaux (Le Roux *et al.* 2008). L'effet du travail du sol sur le service de production végétale à travers la mesure du rendement est décrit ci-dessous.

Le rendement des espèces cultivées est affecté de manière très variable selon les différents types de travail du sol. De manière générale, les études s'accordent à dire que l'adoption de systèmes de non-labour diminue le rendement, en particulier dans les systèmes de non travail du sol strict (Van den Putte *et al.* 2010; Agreste 2008). Le rendement en système de

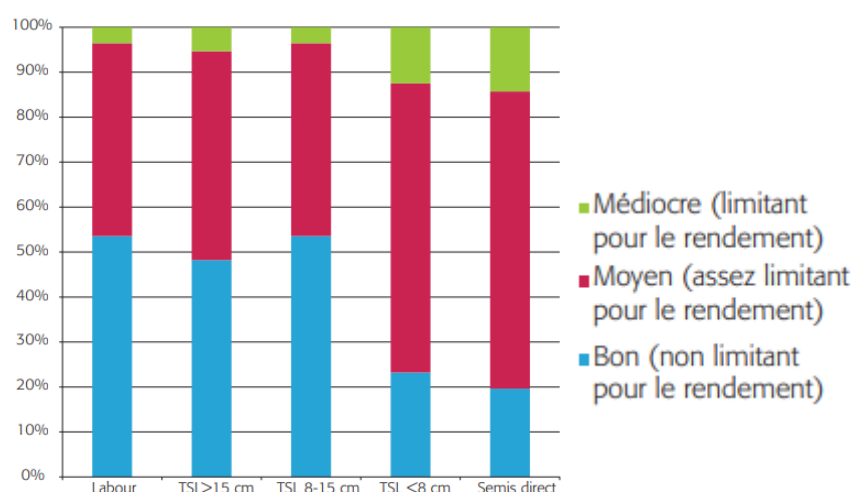


Figure 8 : Pourcentage de parcelles emblavées en colza pour lesquelles le mode de travail du sol a limité sévèrement, moyennement ou pas du tout le rendement (Cetiom 2008). TSL = techniques culturales sans labour. Les rendements en labour, TSL > 15 cm, TSL 8-15 cm, TSL < 8 cm et semis direct ont été mesurés sur respectivement 129, 44, 160, 25 et 29 parcelles.

non-labour peut être égal ou supérieur au rendement des systèmes conventionnels au-delà d'une profondeur de travail de 15 cm. Ces études démontrent une perte de rendement généralement inversement proportionnelle à la profondeur de travail (Figure 8, Roger-Estrade, Labreuche, et Boizard 2014). Une autre étude réalisée en Allemagne montre une réduction du rendement de 67% dans les systèmes de grande culture en travail simplifié, par rapport aux systèmes en labour. Cette réduction est principalement due à une diminution de la minéralisation de la MOS et à une augmentation de la pression des adventices, qui constituent des obstacles majeurs à l'adoption de ces systèmes (Zikeli et Gruber 2017).

Les études présentées ci-dessus font donc ressortir que le travail du sol en profondeur, en particulier le labour, reste intéressant dans une optique d'obtention de rendements élevés. Cependant, l'impact du travail du sol sur le rendement doit être replacé dans un débat plus large incluant les questions environnementales pour permettre à l'agriculture d'entrer en transition face aux enjeux auxquelles elle est confrontée.

4 Objectif

Ce travail s'inscrit dans la thèse de L. Leveau dont l'objectif 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 du modèle conceptuel théorique du remplacement des intrants issus de ressources non renouvelables par des services agro-écosystémiques ». La particularité de cette approche est qu'elle s'intéresse aux pratiques utilisées plutôt qu'à différencier les modèles d'agricultures. Un même modèle peut en effet rassembler plusieurs PC différentes selon les agriculteurs.

Dans le cadre de cette étude, des mesures de fourniture en SE par des parcelles agricoles aux pratiques diversifiées sont réalisées sur trois ans. Ce mémoire s'inscrit dans la deuxième année de la partie expérimentale de la thèse et complète, à travers l'évaluation de SE différents, la base de données de la fourniture en SE par les parcelles de l'échantillon 2021-2022 initiée par Dumont de Chassart et Dehay (2022). L'objectif général de ce mémoire est d'identifier les liens existants entre d'une part les SE liés aux auxiliaires de culture et à la production végétale et, d'autre part les PC appliquées sur des parcelles de culture en région limoneuse et sablo-limoneuse wallonnes. Les SE étudiés dans ce travail sont (1) l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT, (2) la décomposition de la MOS par les microorganismes, (3) la prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture et (4) la production végétale.

L'expérience pour la mesure du SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT est classiquement (selon le protocole de l'Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT)) mise en place juste après le semis de la culture d'hiver (vers le mois de novembre). Or la date de semis peut fortement varier d'un agriculteur à l'autre, ce qui a influencé les résultats obtenus dans les mémoires précédents ayant réalisé cette mesure. La comparaison des corrélations entre la date de semis et les résultats observés pour deux campagnes de mesures différentes permettra de vérifier si cette influence est plus faible lorsque l'expérience est mise en place au mois de mars (évalué dans ce mémoire) plutôt que juste après le semis (mémoire de Dumont de Chassart et Dehay 2022) dans un objectif d'amélioration du protocole de l'OPVT.

Les objectifs spécifiques de ce mémoire consistent à répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les liens de corrélation entre les indicateurs de SE (parmi ceux étudiés) fournis par une même parcelle ?
- Quels sont les liens de corrélation entre les indicateurs de PC appliqués sur une parcelle et les indicateurs de SE fournis par cette parcelle (parmi ceux étudiés) ?
- Quelle est l'influence de la date de semis du froment sur l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT selon le protocole de l'OPVT durant la période de mesure mars-juin ? Est-elle différente lorsque l'expérience a lieu durant la période originale du protocole (novembre-mai) ?

Matériel et méthode

5 Cadre de la recherche

5.1 Thèse de Lola Leveau

Ce mémoire s'inscrit dans une recherche à plus long terme, la thèse de Lola Leveau, et qui a pour titre « Les pratiques innovantes actuelles des fermes de grandes cultures wallonnes permettent-elles de remplacer des intrants commerciaux par des services écosystémiques ? »

5.2 Contexte de la thèse

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 issus de ressources non renouvelables 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 – sous contrainte 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.

5.2.1 Objectif de la thèse

L'objectif général de la thèse est d'identifier, *via* une approche collaborative et multidisciplinaire, si certaines pratiques ou combinaisons de pratiques appliquées actuellement en grandes cultures 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 marge économique de la rotation.

5.2.2 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 (selon les 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 agriculteur·rices
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 agriculteur·rices 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 agriculteur·rices du réseau.

5.3 Contextualisation du mémoire

Ce mémoire se situe dans la deuxième année (2022) de la phase 2 de la recherche menée par L. Leveau (Analyse des parcelles du réseau). L'objectif de cette phase est de (1) mesurer en champ les SE, (2) enquêter sur l'itinéraire cultural, (3) identifier les liens existants entre les SE et l'itinéraire cultural et (4) calculer les indicateurs économiques. Ce mémoire participe à la réalisation des trois premiers objectifs cités ci-dessus (cellules surlignées en bleu dans le tableau de la section 5.2.2).

5.4 Réalisations antérieures au mémoire

5.4.1 Sélection des agriculteurs

En 2019, un réseau de 20 agriculteurs a été constitué par L. Leveau pour servir de base à la création de l'échantillon de parcelles analysées dans sa thèse. L'objectif étant de différencier des pratiques agricoles variées, une attention particulière a été portée à la diversité des profils des agriculteurs sélectionnés. Divers critères, tels que la dimension de l'exploitation, le type global de système cultural (agriculture de conservation, agriculture biologique, agriculture conventionnelle, etc.) ainsi que la présence ou non d'un élevage sur la ferme ont été utilisés pour réaliser ce choix. Les agriculteurs ont également été choisis en fonction de la proximité de leurs parcelles avec Louvain-la-Neuve. Les parcelles étudiées doivent se situer à maximum 30 minutes de route de Louvain-la-Neuve, afin de pouvoir réaliser l'ensemble des mesures mensuelles sur une courte période, ce qui permet d'éviter les biais dus à des conditions météorologiques changeantes.

5.4.2 Sélection des indicateurs

La mesure des SE dans un environnement agricole nécessite une compréhension approfondie du fonctionnement des systèmes écologiques (Dale et Polasky 2007). Selon Wallace (2007), les classifications des SE établies¹¹ confondent les bénéfices dont la société profite et les mécanismes qui permettent de fournir ces bénéfices. En réponse à cette confusion, un classement (« cascade » des SE, Annexe 3) distinguant la structure de l'écosystème, les processus qui s'y déroulent et les services et bénéfices dérivés a été développé par Haines-Young et Potschin (2010).

L'étude de Boerema *et al.* (2017) constate cependant qu'aucune mesure de SE n'entre dans la catégorie « Service écosystémique » de la cascade des SE. Cet indicateur constitue plutôt un concept regroupant les indicateurs « Fonctions » et « Bénéfices » de l'écosystème car il prend en compte autant les aspects écologiques que socio-économiques des écosystèmes (Boerema *et al.* 2017). Le Tableau 4 est une adaptation du classement en cascade des SE selon les critiques reportée par Boerema *et al.* (2017). Cette classification distingue les indicateurs de la composante écologique (Propriétés et Fonctions) des indicateurs de la composante socio-économique (Bénéfices) des écosystèmes (TEEB 2010).

¹¹ L'auteur cite en particulier la classification établie par le Millenium Assessment, un rapport publié en 2005 par l'ONU qui a permis la popularisation du concept de SE.

- L'indicateur « Propriétés de l'écosystème » représente la structure biophysique des écosystèmes (données concernant le sol, les organismes vivants etc.) ;
- L'indicateur « Fonctions et processus de l'écosystème » représente les changements d'ordre biophysique, chimique ou biologique qui se déroulent au sein d'un écosystème (dynamique de la matière organique et des éléments nutritifs dans le sol, interactions écologiques, stabilité et perméabilité du sol etc.) ;
- L'indicateur « Bénéfices » représente les changements positifs dans le bien-être humain résultant de la satisfaction des besoins et envies (diminution de la pollution de l'eau, diminution des maladies des cultures, fourniture en fourrages etc.).

Tableau 4 : Catégories des indicateurs de SE (adapté de Haines-Young et Potschin (2010) selon les critiques réalisées l'étude de Boerema et al. (2017)).

Indicateur	Propriétés de l'écosystème	Fonctions et processus de l'écosystème	Bénéfices
Signification	Structure biophysique de l'écosystème	Changements biophysiques, chimiques et biologiques au sein d'un écosystème	Changements positifs dans le bien-être humain
Exemple 1	Présence d'auxiliaires de culture prédateurs de graines	Prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture	Diminution des pertes de rendement dues aux adventices
Exemple 2	Porosité verticale du sol	Stabilité des agrégats dans l'eau	Diminution de l'érosion des sols

Des concertations entre L. Leveau, N. Biot, les agriculteurs sélectionnés et des experts scientifiques ont permis de définir un set d'indicateurs cohérent et approprié à l'évaluation de plusieurs SE sur le terrain (Leveau, Falys, et Bertin 2019a; 2019b; Biot 2020). Un critère majeur retenu pour le choix de ces indicateurs est l'intérêt et la compréhensibilité de ceux-ci pour et par les agriculteurs. C'est pourquoi les indicateurs de type « Bénéfices » et « Fonctions », plus proches des avantages réels procurés par l'écosystème en faveur de l'humain et la société, ont été privilégiés (Boeraeve 2018). Finalement, 12 indicateurs ont été retenus pour étudier les SE dans la thèse de L. Leveau (Tableau 5).

Tableau 5: Indicateurs de SE étudiés dans la thèse de L. Leveau et correspondance avec la classification établie au Tableau 4.

INDICATEURS DE SE ETUDIES	TYPE D'INDICATEUR
Incorporation de la litière végétale par les vers de terre	Fonction
Décomposition de la MOS par les microorganismes du sol	Fonction
Teneur du sol en MOS stable et labile	Propriétés
Stabilité des agrégats	Fonction
Evolution de la croûte de battance	Bénéfice
Compaction du sol	Propriétés
Présence d'adventices	Bénéfice
Présence de maladies	Bénéfice
Activité des auxiliaires des cultures	Fonction
Rendement en grain	Bénéfice
Evolution du stock de carbone dans le sol	Bénéfice
Biodiversité des plantes cultivées	Bénéfice

5.4.3 Mémoires précédents réalisés dans le cadre de la thèse

La phase expérimentale de la thèse a débuté en 2020-2021 (section 5.2.2) avec la réalisation du mémoire collégial de X. Belin et A. Fockedey. Ces derniers ont participé à la mise en place et à l'amélioration des protocoles d'expérience utilisés pour obtenir les indicateurs de SE. L'objectif de leur mémoire était d'identifier les liens existant entre l'itinéraire cultural et la fourniture en SE intrants sur des parcelles de grandes cultures brabançonnaises à sol limoneux (Aba) (Belin et Fockedey 2021). L'année 2021-2022, J. Dumont de Chassart et G. Dehaye ont poursuivi cette étude à travers leur mémoire collégial avec le même objectif (Dumont de Chassart et Dehaye 2022). Au cours de leur mémoire, une analyse complémentaire visant à déterminer le nombre d'années d'historique cultural optimal à récolter auprès des agriculteurs afin d'observer les liens entre les PC et les SE a également été réalisée.

5.5 Cadre spatial et temporel du mémoire

Le présent mémoire a débuté au mois de janvier 2022 pour une durée d'un an, contrairement aux deux mémoires précédents se déroulant sur une année académique (septembre – juin). La spécificité de ce mémoire est qu'il complète, avec des SE différents dont les mesures nécessitent d'être mises en place au printemps ou en été, la base de données initiée lors du mémoire de Dumont de Chassart et Dehaye (2022) pour les parcelles de l'échantillon 2021-2022 de la thèse. Lors de la première année d'expérimentations (échantillon de parcelles 2020-2021), ces mêmes mesures ont été réalisées par L. Leveau.

Les différentes expériences réalisées dans ce mémoire sont les suivantes (Figure 9) :

- La mesure de **l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT** via le protocole des Paniers à Vers de Terre. Le suivi de cette activité est réalisé sur chaque parcelle une fois par mois, de mars à juin ;

- La mesure de la **décomposition de la MOS par les microorganismes** *via* le protocole Tea Bag Index (TBI). Cette mesure a démarré au à la fin du mois de mars pour une durée d'environ 85 jours en champ ;
- La mesure de la **prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture**. Cette mesure a été réalisée sur base du protocole des carte de prédation, au début du mois de juillet pour une durée d'une semaine en champ ;
- La mesure en laboratoire de la **teneur en carbone organique (C_{org})** ainsi que l'**analyse granulométrique des échantillons de sol** récoltés en février par J. Dumont de Chassart et G. Dehaye. Cette expérience ne mesure pas un SE mais permet d'apporter une information complémentaire pour interpréter les résultats liés aux mesures des SE ;
- La mesure du **rendement du froment** récolté en juillet sur chacune des parcelles étudiées.

Pour une meilleure compréhension, les mesures réalisées par Dumont de Chassart et Dehaye (2022) ont également été représentées sur la Figure 9 car elles ont été réalisées sur les mêmes parcelles et certaines expériences et/ou discussions de ce travail s'y rapportent directement.

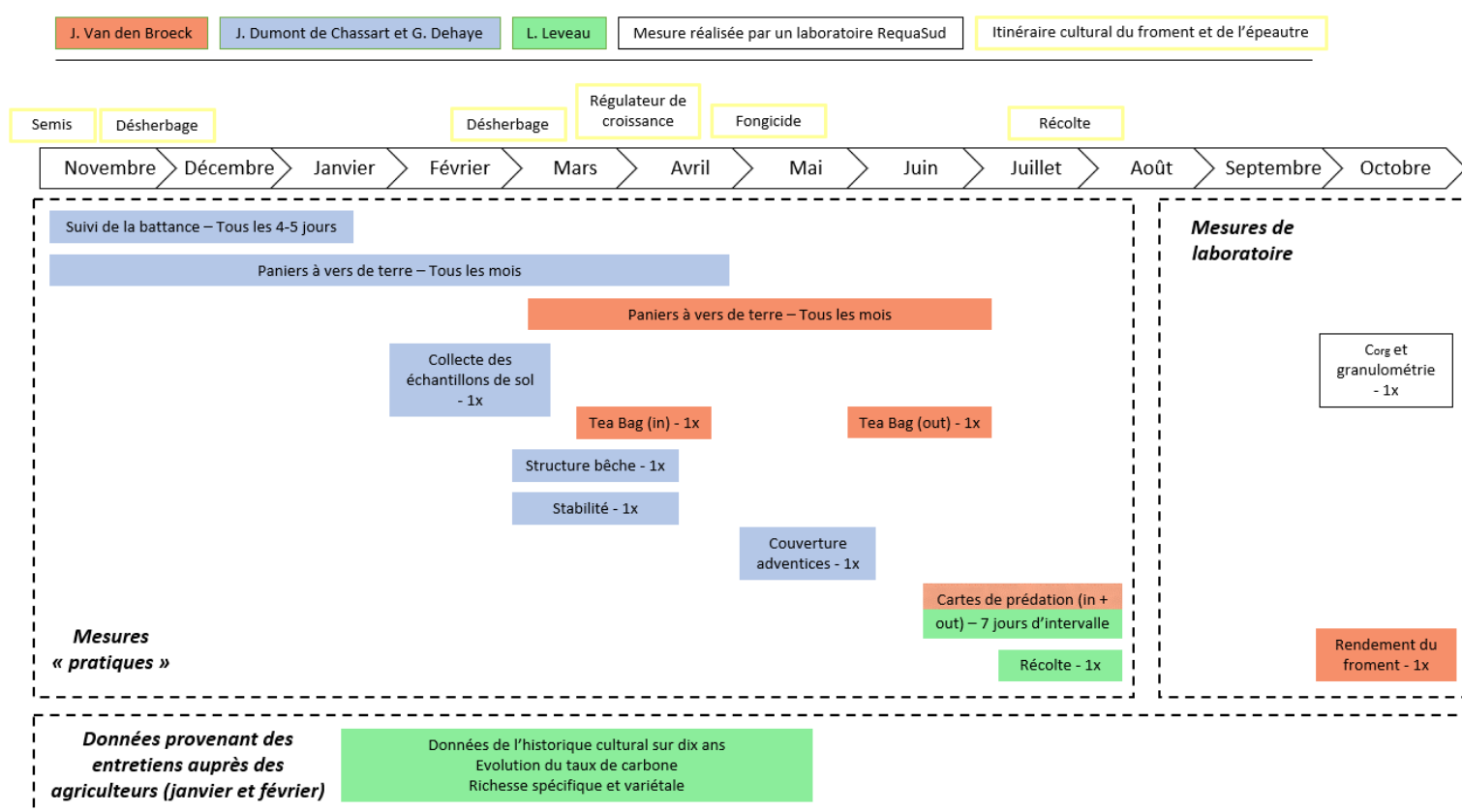


Figure 9 : Calendrier des expériences réalisées sur l'année 2021-2022 avec les périodes de suivi et les personnes en charge (adapté de L. Leveau 2020).

6 Itinéraires cultureux des parcelles étudiées

6.1 Contact avec les agriculteurs

6.1.1 Choix des parcelles

Le réseau de fermes choisi est aussi représentatif que possible de la diversité présente dans la région, avec des modèles agricoles et des PC très variés (Figure 10). Toutes les analyses se font à l'échelle de la parcelle, sur une culture de froment d'hiver (ou d'épeautre¹² pour une minorité).

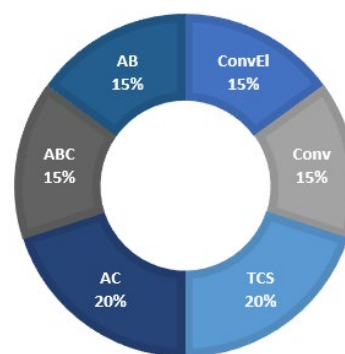


Figure 10 : Répartition des champs selon les modèles classiques d'agriculture pour l'ensemble de l'échantillon de parcelles 2021-2022 sélectionné. Conv: conventionnel, TCS: techniques culturales sans labour, AC: agriculture de conservation, ABC: agriculture biologique et de conservation, AB: agriculture biologique, convEl: Conventionnel Elevage.

6.1.2 Itinéraire culturel

Durant les mois de janvier et février, les itinéraires cultureux sur dix ans pour chacune des parcelles étudiées ont été récoltés auprès des agriculteurs. Ces itinéraires contiennent des informations concernant : leur situation de production, les cultures de rente, les cultures de couverture, le travail du sol, les fertilisants et amendements utilisés et les produits phytosanitaires ou acteurs de lutte biologique. L'ensemble des informations demandées aux agriculteurs lors des enquêtes réalisées se trouvent à l'Annexe 4.

6.2 Choix des indicateurs de pratiques culturales

Sur base des données récoltées lors des interviews auprès des agriculteurs, 50 indicateurs répartis en différents groupes ont été calculés *via* Excel par L. Leveau. Sur ces 50 indicateurs, seuls 39 sont considérés comme pertinents dans ce mémoire et seront par la suite mis en relation avec les indicateurs de SE (Tableau 6). La pertinence de ces indicateurs a été établie sur base de :

- La redondance de certains indicateurs entre eux ;
- La pertinence de l'indicateur dans le cadre de ce travail ;
- La gamme de valeurs dans laquelle l'indicateur évolue. Si cette dernière est faible, la différence de valeurs pourrait provenir d'une erreur humaine d'estimation (par exemple dans le cas d'une estimation de la profondeur de labour). Dans ce cas, l'intégrer aux analyses induirait une différence dans les résultats alors qu'il n'y aurait pas d'influence sur la fourniture en SE.

¹² L'épeautre (*Triticum spelta*) appartient au même genre que le froment d'hiver (*Triticum aestivum*) et a un itinéraire culturel très similaire. C'est pourquoi les différences entre ces espèces peuvent être considérées comme négligeables lorsque des comparaisons sont établies.

Tableau 6 : Liste des indicateurs de PC calculés à partir de l'historique culturel de chaque parcelle sur dix années.

	Indicateur	Abréviation
Pratiques générales	Label biologique (oui/non)	AB
	Années depuis la conversion à l'agriculture biologique	Date_AB
	Emploi du terme technique culturale sans labour (oui/non)	TCS
	Emploi du terme Agriculture de conservation (oui/non)	AC
	Emploi du terme Agroécologie (oui/non)	AE
	Emploi du terme Protection intégrée des cultures (oui/non)	PIC
	Emploi du terme Agriculture raisonnée (oui/non)	AR
	Emploi du terme Agriculture conventionnelle (oui/non)	Aconv
Cultures récoltées	Précédent du froment simplifié (culture aérienne/souterraine)	PrecedentSimple
	Diversité des familles récoltées	DivFamRec
	Diversité des espèces récoltées	DivEspRec
	Nombre de cultures avec récolte simultanée de plusieurs espèces	EspRecAsso
	Nombre de variétés récoltées présentes par saison culturale et par surface cultivée	VarRecTotalParSurf
	Fréquence de culture des céréales	FreqPoaceae
	Fréquence de culture récoltées sous le sol	FreqRecolteSol
	Fréquence de culture récoltées en automne	FreqRecolteAutomne
	Fréquence des cultures sarclées	FreqSarclee
Couverture du sol	Nombre de jours avec une culture vivante (récoltée ou en couvert)	Tps_Cultures_Tout
	Part de temps de mulch sur l'itinéraire culturel	Tps_Mulch
	Durée de la période entre le dernier travail du sol et le semis, sans mulch	Tps_SolTravaille
	Nombre moyen de familles associées en interculture	FamParCV
	Nombre moyen d'espèces associées en interculture	EspParCV
Toutes les plantes cultivées	Diversité des familles totale (cultures et couverts)	DivFamTot
	Diversité des espèces totale (cultures et couverts)	DivEspTot
Fertilisants et amendements	Quantité d'azote minéral total apporté	NminTot
	Quantité d'azote organique total apporté	NorgTot
	Quantité de potassium total apporté	Ktot
	Quantité de phosphore total apporté	Ptot
Travail mécanique	Années depuis le dernier retournement du sol	Temps_DernierLabour
	Fréquence des retournements du sol	Freq_Labour
	Années depuis le dernier usage d'outil animé	Temps_DernierAnime
	Fréquence des travaux avec outils animés	Ferq_OutilAnime
	Fréquence des travaux de fragmentation	Freq_Fragmentation
	Fréquence des travaux de mélange	Freq_Melange
	Fréquence des travaux de mélange profonds (> 15 cm)	Freq_MelProf
	Profondeur cumulée totale de tous les types de travaux	ProfCum_Tout
Produits phytosanitaires	Indice de fréquence de traitement (IFT) herbicide sur 10 ans	IFT_10_herb
	IFT fongicide sur 10 ans	IFT_10_fong
	IFT insecticide sur 10 ans	IFT_10_insect
	IFT régulateur sur 10 ans	IFT_10_reg
	IFT molluscicide sur 10 ans	IFT_10_moll
	IFT herbicide moyen du Triticum aestivum de la rotation	IFT_Triticum_aestivum_herb
	IFT fongicide moyen du Triticum aestivum de la rotation	IFT_Triticum_aestivum_fong
	IFT insecticide moyen du Triticum aestivum de la rotation	IFT_Triticum_aestivum_insect
	IFT régulateur moyen du Triticum aestivum de la rotation	IFT_Triticum_aestivum_reg

7 Protocole expérimental

7.1 Plan expérimental

La mise en place des zones d'expérimentation, délimitées par quatre piquets de coin et un piquet central, a été réalisée par J. Dumont de Chassart et G. Dehaye lors de leur mémoire, à l'aide du logiciel QGIS (version 3.16). Ce logiciel a été utilisé dans la création des plans expérimentaux pour la disposition et localisation des piquets délimitant une zone d'expérimentation de 1 ha dans chaque parcelle¹³. Cette zone doit répondre à une série de contraintes afin de fournir un cadre de recherche homogène pour l'ensemble des parcelles étudiées :

- Posséder un sol de type « Aba¹⁴ » selon la carte numérique des sols de Wallonie, qui correspond à un sol limoneux à drainage naturel favorable avec un horizon B textural (Laboratoire de Géopédologie - FUSAGx 2007). Ces sols sont constitués de 65 à 100 % de limon, 0 à 30 % d'argile et 0 à 12 % de sable ;
- Posséder une pente de maximum 10 % ;
- Posséder un historique cultural homogène, c'est-à-dire le même itinéraire technique sur l'ensemble de l'hectare durant les dix dernières années ;
- Être placée à minimum 20 mètres des bords de la parcelle ;
- Être emblavée en froment d'hiver ou épeautre cette année 2021-2022.

Les différentes expériences ont été représentées sur QGIS et leurs coordonnées étaient ensuite encodées dans un GPS portable afin de les positionner correctement sur les parcelles. La Figure 11 présente une carte QGIS comprenant les expériences de J. Dumont de Chassart et G. Dehaye qui a ensuite été complétée avec les expériences réalisées dans ce mémoire. Dans la mesure du possible, les passages de roues du tracteur ont également été représentés (sur base des données satellite et de la largeur du pulvérisateur de l'agriculteur) afin d'éviter d'y placer des zones de mesures, et pour constituer une voie de passage non destructrice du froment lors des visites mensuelles sur les champs. Pour les parcelles en agriculture biologique, étant donné l'absence de traces de pulvérisateur, plusieurs passages parallèles ont été prévus sur le plan et suivis grâce au GPS tout au long des visites. Les expériences ont été placées de la même manière (en carré, sur des lignes parallèles...) sur chacun des champs afin de pouvoir les retrouver facilement. De plus, un piquet en PVC coloré à son extrémité a été disposé à côté de chacune des zones de mesures afin de pouvoir les repérer plus facilement dans le champ. Ces précautions étaient d'autant plus utiles en fin d'expérience lorsque le froment avait atteint une certaine hauteur.

¹³ Sur les parcelles 22 et 26, il a été décidé de construire un rectangle de 1 ha, car il n'était pas possible de respecter les critères de positionnement expérimentaux avec une forme carrée.

¹⁴ « A » définit la nature de la roche mère, « b » définit l'état de drainage naturel et « a » caractérise le type de développement de profil.

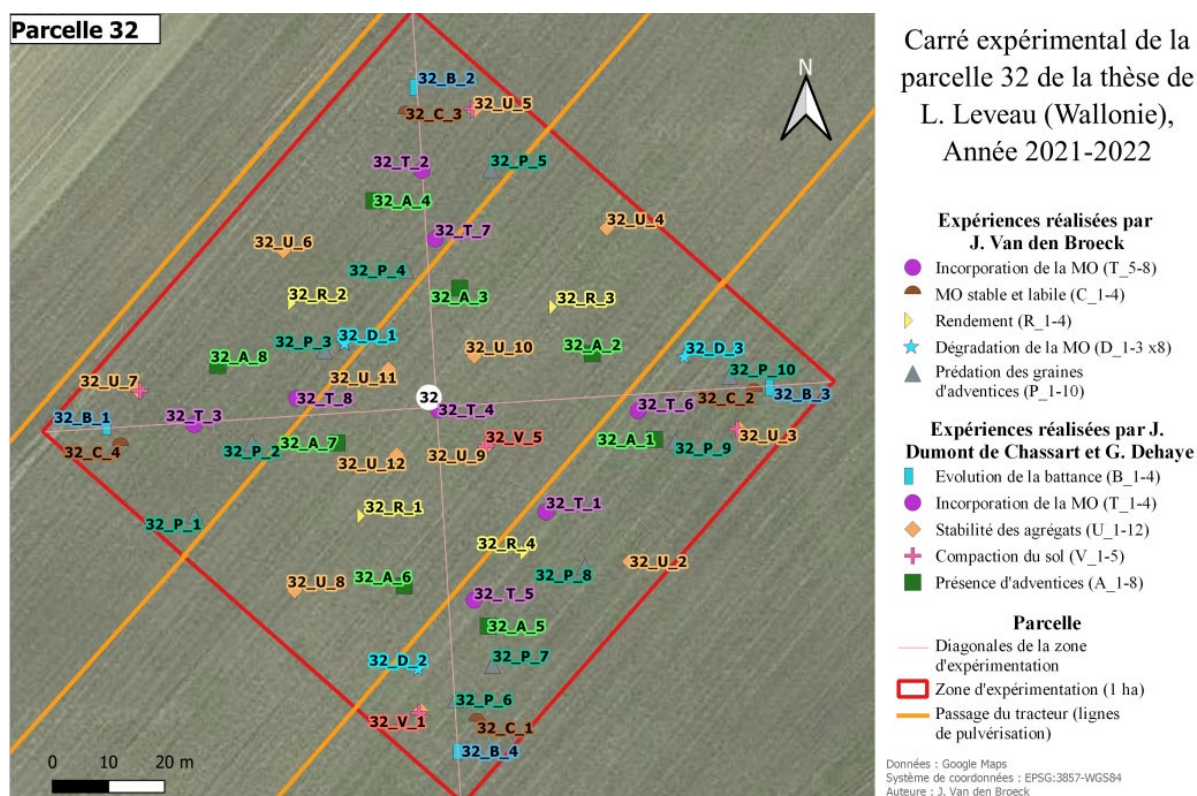


Figure 11 : Carré d'expérimentation pour de la parcelle 32 (parcelle non bio) de l'échantillon de parcelles 2021-2022.

7.2 Expériences évaluant les services écosystémiques

Les protocoles employés dans ce mémoire ont été sélectionnés par L. Leveau sur base des critères suivants : la rapidité d'exécution, la simplicité, le coût et la rigueur scientifique. L'ensemble des protocoles utilisés dans ce mémoire est issu d'une base de données interne du laboratoire PEPA, les « Protocoles PEPA » (Annexe 5). Les quatre premières expériences concernent des mesures de SE, tandis que les indicateurs de C_{org} (section 7.2.5) ont pour objectif d'interpréter les résultats issus des mesures de SE.

7.2.1 Incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre (T_...)

Choix et objectif de la mesure

Le protocole des Paniers à Vers de Terre a été développé par l'observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT), affilié à l'Observatoire des sciences de l'univers de Rennes. Il permet de mesurer l'activité de surface des VDT anéciques sur une période de trois à quatre mois au moyen de paniers à VDT (OPVT 2022). Dans ce protocole, des paniers à VDT remplis de paille sont installés à la surface du sol, et des mesures régulières de l'activité des VDT (cabanes, turricules, enfouissement) sont réalisées. Ce protocole a été sélectionné car il permet directement de mesurer l'activité d'incorporation de la litière végétale dans le sol sur une période relativement longue.

Le protocole original de l'OPVT débute généralement à partir d'octobre, juste après le semis de la culture d'hiver, pour une durée variant entre quatre et six mois (OPVT 2022). La durée idéale permet d'observer une différence d'incorporation entre les parcelles tout en évitant

qu'une parcelle ne se retrouve sans paille à la fin. Cependant, la comparaison entre les différentes parcelles peut être biaisée par les variations (parfois fortes) entre les dates de semis du froment par les différents agriculteurs. L'hiver étant une période d'inactivité pour les VDT (le taux d'incorporation de la litière végétale à cette période est très faible), les résultats obtenus en fin d'expérience pourraient donc être liés à la date de semis plutôt qu'à l'activité des VDT. Pour tester cette hypothèse, l'expérience d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT dans ce mémoire est réalisée de début mars à fin juin. L'influence de la date de semis sur les résultats obtenus est ensuite comparée avec les résultats obtenus la même année sur les mêmes parcelles durant la période hivernale (Dumont de Chassart et Dehay 2022).

Protocole (PEPA014, 2021)

Le protocole suivi dans ce mémoire comporte les modifications apportées par Belin et Fockede (2021) au protocole initial de l'OPVT. Dans cette expérience, quatre paniers à VDT (Figure 12) de 50x30x10 cm sont disposés en carré (Figure 11) au sein de la parcelle expérimentale. Ces paniers sont réalisés avec un grillage à mailles écartées d'1 cm, ce qui permet le passage des VDT, mais pas celui d'autres animaux (oiseaux, rongeurs...). Dans chaque panier, 50 g de paille séchée et coupée en tronçons de 5 cm est répartie de manière homogène à la surface du sol au début de l'expérience.

Trois observations sont réalisées à un mois d'intervalle au sein de chaque panier. Ces observations sont réalisées en remplissant différents indicateurs quantitatifs sur la fiche de terrain de l'OPVT (Annexe 6). Il s'agit de :

- La mesure du nombre de nouvelles cabanes à VDT représentées par des amas de litière végétale organisés spatialement à la surface du sol sous forme d'étoiles et/ou de tipis¹⁵ ;
- La mesure du nombre de nouveaux turricules visibles à la surface du sol, reconnaissables à leur forme grumeleuse et peu anguleuse ;
- La classe de recouvrement final de la paille, indiquant la superficie du panier recouverte par de la paille à la fin de l'expérience.



Figure 12 : Représentation d'un panier à VDT en date du 24 juin 2022 et mise en évidence des cabanes J. Van den Broeck).

Les classes de recouvrement de la paille proposées par l'OPVT étant très larges (Annexe 8) et donc difficiles à analyser statistiquement, il a été décidé, lors du mémoire de Belin et Fockede (2021), de définir une cabane à VDT.

¹⁵ La définition d'une cabane à VDT suivie pour déterminer si un amas de litière végétale représente ou non une cabane est celle de Belin et Fockede (2021), disponible à l'Annexe 7.

(2021) d'attribuer à chaque panier une estimation plus précise à l'aide de dix classes de recouvrement ayant chacune 10% d'écart, sur base d'une aide visuelle développée par Dumont de Chassart et Dehayé (2022) (Annexe 9). Un exemple d'évolution de la surface de paille au sein d'un panier durant les quatre mois de mesures peut être visualisé à l'Annexe 10.

Finalement, une mesure additionnelle aux trois mesures de base du protocole OPVT a été apportée par Belin et Fockedey (2021) ; il s'agit de la perte en masse de paille entre le début et la fin de l'expérience, afin d'évaluer la quantité de litière végétale incorporée au sol sous l'action des VDT. A la fin de l'expérience, la paille a donc été récoltée au sein de chaque panier, rincée à l'eau de ville puis séchée et pesée. La différence entre les 50 g initiaux de paille et la masse finale mesurée permet d'avoir une idée du taux d'incorporation de la paille par les VDT.

CRITIQUE DE LA MESURE DU NOMBRE DE TURRICULES

Durant l'expérience de cette année, une critique a été portée à l'indicateur évaluant le nombre de turricules présents au sein de chaque panier à VDT, mesure provenant du protocole de l'OPVT et ayant été réalisée lors des deux mémoires précédents relatifs à la thèse. Lors de l'observation mensuelle des paniers, il a été difficile de rendre compte avec précision de leur nombre à cause de trois principaux facteurs. Premièrement, le nombre de turricules visibles au sein du panier est corrélé négativement à la surface de la paille dans le panier ; au plus il y a de paille, au moins les turricules se trouvant en dessous de cette paille sont visibles. Deuxièmement, la distinction d'un passage à l'autre entre les nouveaux turricules et ceux étant déjà présents lors du passage précédent était difficile à cause de leur petite taille et des conditions météorologiques dont les effets, par exemple lors d'une pluie, peuvent diluer les turricules. Troisièmement, différentes tailles, superficies, et diamètres de turricules ont été observés, ce qui rend la distinction entre un, deux ou plusieurs turricules difficile.

Les échanges avec les mémorants ayant réalisé cette mesure précédemment ont cependant permis d'affirmer que cette mesure présente les avantages suivants : (1) c'est une mesure qui témoigne inévitablement de l'activité spécifique des VDT, (2) c'est un critère qui permet de distinguer les champs (grande variabilité inter-champs) et (3) certaines parcelles ayant un faible nombre de cabanes à VDT présentent un grand nombre de turricules, ce qui permet de mettre en évidence l'activité des VDT sur ces parcelles.

Globalement, il a été conclu que cet indicateur est difficilement quantifiable de façon précise mais pourrait être adapté à une analyse en catégories (classes de surface recouverte par des turricules). Cependant, aucune classification établie pour catégoriser les turricules n'a été trouvée dans la littérature scientifique et l'analyse en catégories rendrait l'analyse statistique complexe. A la vue de ces différents facteurs, il a été décidé de ne pas garder cet indicateur pour rendre compte de l'activité des VDT.

Indicateurs

Les indicateurs utilisés pour mesurer le SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT ont été choisis de sorte qu'une augmentation de la valeur de l'indicateur signifie une augmentation de la fourniture de SE. Ces indicateurs sont les suivants :

- Le nombre de cabanes apparues en un mois (**T_cab1**) ;
- Le nombre de cabanes apparues en deux mois (**T_cab2**)¹⁶ ;
- Le nombre de cabanes apparues en trois mois (**T_cab3**) ;
- Le nombre de cabanes apparues au total (**T_cabf**) ;
- Le taux de surface de paille incorporée en fin d'expérience (**T_surf_inc**), c'est-à-dire le rapport entre la surface incorporée et la surface initiale de la paille ;
- Le taux de masse de paille incorporée en fin d'expérience (**T_poids_inc**), c'est-à-dire le rapport entre la masse incorporée et la masse initiale de la paille.

7.2.2 Décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes (D_...) Choix et objectif de la mesure

La mesure de la décomposition de la MOS par les microorganismes a été réalisée à travers le protocole Tea Bag Index (TBI) développé par des chercheurs de l'Université d'Utrecht (Teatime4Science 2016b). Cette méthode consiste à enterrer des sachets de thé dans le sol et à mesurer leur perte en masse après trois mois d'enfouissement. Cette approche peu onéreuse et facile à mettre en œuvre permet de générer des grandes bases de données internationales grâce à l'approche collaborative. Le protocole a été standardisé afin de rendre ces données comparables entre elles (Keuskamp *et al.* 2013).

La comparaison possible avec des données provenant de régions géographiques proches, telles que celles provenant du CRA-W, ainsi que l'approbation de sa valeur pour la mesure de la décomposition de la MOS par la communauté scientifique (Keuskamp *et al.* 2013) ont été des critères importants dans le choix de ce protocole.

Protocole (PEPA018, 2021)

Le protocole utilisé dans ce mémoire a été légèrement adapté par rapport au protocole original de Keuskamp *et al.* (2013) en suivant les modifications apportées par le CRA-W et Greenotec. Ces modifications consistent en une augmentation du nombre d'échantillons par parcelle et en la définition d'un protocole d'enfouissement plus précis (Annexe 11). Sur chaque parcelle agricole, 24 sachets de thé, divisés en trois placettes de huit sachets (quatre thés verts Lipton® (TV) et quatre thés Rooibos Lipton® (TR)) (Figure 13), sont enterrés à une profondeur d'environ 8 cm. Les sachets sont enfouis en lignes en alternant TV et TR avec un

¹⁶ Le nombre de cabanes est donc une mesure cumulée : $T_cab2 = T_cab1 + \text{nombre de nouvelles cabanes observée entre le 1}^{\text{e}} \text{ et le 2}^{\text{e}} \text{ mois.}$

écartement de 40 cm, à 45° des lignes de semis pour les champs non bio, et parallèles aux lignes de semis pour les champs bio (Figure 13). La durée d'enfouissement est de 85 jours environ¹⁷, de fin mars à fin juin. Après récolte des sachets, ces derniers sont pesés individuellement afin d'en déterminer la perte en masse, dont sont dérivés les deux indicateurs présentés ci-dessous.



Figure 13 : Disposition des sachets de thé sur un champ bio le long de la ligne de semis pour être à l'abri des désherbages mécaniques (à gauche) et sur un champ non bio (à droite) (J. Van den Broeck).

Indicateurs

La MOS étant composée d'une partie stable et d'une autre partie labile, son taux de décomposition (k) n'est pas constant et dépend de la proportion de ces deux parties. La décomposition de la MOS peut être approximée par la fonction suivante :

$$W(t) = ae^{-k_1 t} + (1 - a)e^{-k_2 t}$$

où $W(t)$ représente la masse du substrat après le temps d'incubation t , a la fraction labile et $(1-a)$ la fraction stable de la MOS. k_1 et k_2 représentent respectivement les taux de décomposition des fractions labiles et stables. La variable k_2 , très faible et ne pouvant être estimée que sur de longues échelles de temps, peut être négligée ce qui revient à simplifier l'équation :

$$W(t) = ae^{-kt} + (1 - a)$$

L'estimation des deux paramètres a et k nécessite l'utilisation de deux matières organiques ayant des taux de décomposition différents. Le k du TR est faible comparé à celui du TV, ce qui signifie que la décomposition de la fraction labile du TR continue lorsque celle du TV aura déjà été totalement consommée (Figure 14). L'utilisation de deux litières différentes permet de mesurer au même moment la fraction décomposable du TV (a_g) ainsi que le taux de décomposition (k) du TR.

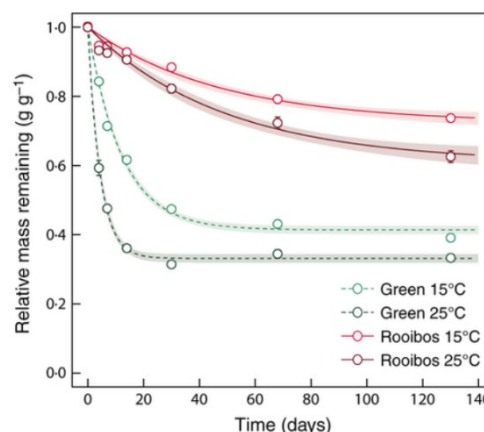


Figure 14 : Masse relative restante du TV (Green) et du TR (Rooibos) en fonction du temps, pour deux températures différentes (Keuskamp et al. 2013).

Une partie des composés labiles du TV peut se stabiliser avec le temps en fonction de facteurs

¹⁷ La durée d'enfouissement varie de 81 à 86 jours en fonction des parcelles. Cette durée est prise en compte dans le calcul des indicateurs.

environnementaux. Cette stabilisation induit un biais dans le calcul de la fraction réellement décomposée a_g et de la fraction hydrolysable H_g (représentant l'estimation chimique des proportions des deux fractions pour le TV). Le taux de stabilisation de la MOS labile (S) est donc représenté par l'équation :

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

Les deux indicateurs du SE de décomposition de la MOS par les microorganismes du sol issus de la mesure de la perte en masse des TV et TR sont :

- Le facteur de stabilisation (S) de la MOS labile, calculé à partir des TV (**D_S**) ;
- Le taux de décomposition (k) de la MOS labile, calculé à partir des TR (**D_k**).

Le détail des calculs réalisés pour calculer ces deux facteurs est disponible à l'Annexe 12.

7.2.3 Prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture (P_...)

Choix et objectif de la mesure

Le SE de prédation des graines d'adventices a été mesuré en modifiant le protocole des cartes de prédation, développé lors du projet CASIMIR¹⁸. Dans le protocole original, des graines de *Viola arvensis* sont collées sur des cartes de prédation. Ces dernières sont posées en champ et la disparition des graines au cours du temps permet de rendre compte du taux de prédation à cet emplacement. Cette méthode a été choisie pour le côté pratique des protocoles établis, ainsi que pour la comparaison possible avec des résultats issus de zones agricoles similaires à celles étudiées.

La modification du protocole a entre autres consisté à remplacer les graines de *V. arvensis* par une autre espèce car celles-ci peuvent être disséminées par les fourmis sans être consommées entièrement (les graines d'adventices sont donc toujours présentes dans les champs et leur disparition de la carte n'est pas synonyme de prédation). L'espèce *Poa annua* a été choisie (Figure 15) car il s'agit d'une espèce prédatée par les vertébrés et invertébrés qui a déjà été utilisée dans ce protocole dans l'étude de Saska *et al.* (2014). De plus, cette espèce fait partie de la flore adventice des grandes cultures wallonnes et a peu d'impact sur le rendement de la culture d'hiver (Infloweb 2022).

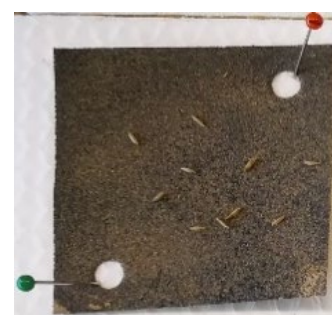


Figure 15 : Carte de prédation sur laquelle sont collées dix graines de *Poa annua* (J. Van den Broeck).

¹⁸ Développements méthodologiques pour une Caractérisation Simplifiée des pressions biotiques et des Régulations biologiques. L'objectif de ce projet était de sélectionner et d'élaborer des protocoles simples entre autres concernant la régulation biologique des bioagresseurs dans les parcelles agricoles (CASIMIR 2016).

Protocole (PEPA001, 2021)

Deux étapes sont nécessaires pour réaliser cette expérience : la préparation en laboratoire et la mise en place des cartes sur le terrain.

Les cartes de prédation sont des carrés de 5 cm de côté constitués de papier de verre noir (Figure 15). Ce dernier possède une bonne résistance aux intempéries et la couleur noire évite d'attirer tous les insectes (Lubac 2014). Sur chacune des cartes, dix graines de *Poa annua* sont fixées avec une colle en spray inodore, puis recouvertes d'un peu de terre afin d'éviter que les insectes ne soient piégés sur la carte à cause de la colle (Annexe 13).



Figure 16 : Représentation d'une carte de prédation au sein d'un champ (protocoles PEPA, L. Leveau 2021).

Dans chaque parcelle, dix cartes de prédation sont séparées en deux zones au sein desquelles cinq cartes sont espacées d'environ dix mètres en lignes droites. Les cartes sont maintenues au sol grâce à deux piquets placés aux deux coins opposés de la carte (Figure 16).

Les cartes sont positionnées en champ le plus tard possible dans la saison culturale, pour s'approcher de la période durant laquelle les adventices ayant germé suite au semis de la culture sont au stade de dispersion des graines. La seconde moitié du mois de juillet a été évitée afin de rester hors des périodes potentielles de moisson. Dans l'expérience réalisée dans ce mémoire, les cartes ont été placées fin juin et récoltées une semaine plus tard, au début du mois de juillet. Cette durée a été modifiée par rapport au protocole original (4 jours) afin d'être dans une situation où des différences peuvent être observées entre parcelles, tout en évitant une situation où l'ensemble des graines auraient été prédatées.

Indicateur

Le pourcentage de graines d'adventices prédatées (**P_graines**) constitue l'indicateur mesuré pour ce SE de prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de cultures.

7.2.4 Production végétale (R_...)

Objectif de la mesure

Le SE de production végétale assuré par l'AES est facilement mesuré sur base du rendement de la culture. La mesure du rendement du froment d'hiver (et de l'épeautre) est divisée en deux parties : le rendement en grain (t/ha) et le rendement en paille (t/ha). L'humidité grains récoltés a été également mesurée, à l'aide d'un humidimètre pour céréales. Une faible humidité permet d'éviter le séchage artificiel car les grains sont moins propices à l'apparition de moisissures et à la fermentation. Cette mesure est donc importante pour évaluer la valeur commerciale de la culture. Dans le cas du froment, la norme commerciale est généralement fixée à 15% (mecmargroup 2022; terre-net 2020).

Ces différents paramètres ont été mesurés sur une ou des variété(s) de froment ou d'épeautre différentes selon les agriculteurs. Ces dernières n'ont pas été imposées car cette étude considère que le choix des variétés fait partie des PC. Ce choix porte beaucoup d'influence sur les paramètres cités ci-dessus, et en particulier le rendement.

Protocole (PEPA012, 2021)

La récolte des échantillons se fait juste avant la moisson, lorsque les grains sont murs. Le froment (plante entière) est récolté manuellement sur quatre placettes de 1 m² chacune, pour chacune des parcelles. L'ensemble des échantillons est ensuite passé à la moissonneuse-batteuse afin d'assurer la séparation entre le grain et la paille. Les grains sont ensuite tamisés afin d'en retirer les grosses impuretés, puis pesés. La masse totale (paille + grains) ayant été pesée préalablement, le rendement en paille est obtenu par soustraction. Ensuite, l'humidité des grains a été évaluée à l'aide de l'humidimètre pour céréales du Centre indépendant de promotion fourragère (CIPF). Finalement, afin de se défaire de l'influence de la teneur en eau du grain dans la masse mesurée, une mesure correctrice a été appliquée pour calculer la masse à humidité standard (Annexe 14).

Indicateurs

Deux indicateurs du SE de production végétale sont finalement obtenus lors de cette mesure :

- Le rendement en grains (**R_grain**) ;
- Le rendement en paille (**R_paille**).

7.2.5 Analyse chimique et physique des échantillons de sols

Choix et objectif de la mesure

L'analyse physico-chimique des échantillons de sol a été réalisée dans le laboratoire de RequaSud - réseau de laboratoires wallons mesurant la qualité du milieu et des produits agricoles et agroalimentaires (Requasud 2022) - situé à La Hulpe¹⁹. Parmi l'ensemble des mesures réalisées, deux sont développées dans ce mémoire car elles sont utilisées pour calculer les indicateurs et pour l'interprétation des résultats. La première mesure concerne la quantification du carbone total (CT) contenu dans les échantillons de sol, la seconde mesure concerne l'analyse granulométrique des échantillons.

Protocole pour la mesure du carbone total

Sur chaque parcelle, quatre échantillons composites de sols ont été prélevés au printemps 2022, avant l'application potentielle de fertilisants organiques sur les cultures (qui peuvent biaiser les résultats mesurés). Ces prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une gouge de 25 mm de diamètre, pour un volume total d'environ 1,3 litres par échantillon.

¹⁹ Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité

La mesure du CT est évaluée *via* une combustion sèche dérivée de la norme NF ISO 10694 (méthode Dumas). Cette procédure quantifie toutes les formes de carbone présentes dans les échantillons de sol (Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité 2018). Pour obtenir uniquement la fraction de C_{org} depuis le CT, une mesure par calcimétrie de la fraction inorganique du carbone est réalisée puis déduite de la teneur en CT.

Chaque échantillon de sol est tout d'abord tamisé à 2 mm, séché (température $< 40^{\circ}\text{C}$) puis pesé et enfermé dans une capsule d'étain. La faible quantité de sol utilisée nécessite une bonne homogénéité dans l'échantillon de base. Le principe de la combustion sèche repose sur une élévation de la température (entre 900°C et 1600°C , selon les analyseurs) au sein d'une atmosphère constituée d'oxygène pur. Ces conditions particulières conduisent à la décomposition par oxydation du CT, essentiellement sous forme de dioxyde de carbone (CO_2). Les gaz de combustion produits sont ensuite véhiculés par l'hélium, un gaz porteur inerte. La vapeur d'eau est séparée du CO_2 par fixation sur un adsorbant (perchlorate de magnésium $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$). Les gaz entrent ensuite dans une colonne chromatographique qui sépare les différents gaz élémentaires, puis sont introduits dans un appareil de mesure. La concentration des échantillons est déterminée sur base de leur masse initiale et d'une droite d'étalonnage réalisée à partir d'étalons dont les teneurs en carbone total sont connues (Bertsch et Ostinelli 2019; Caria, Proix, et Ciesielski 2007).

Le carbone inorganique total (carbonates essentiellement) est mesuré par calcimétrie selon la norme NF ISO 10693. Le carbone inorganique réagit avec un acide avec formation de CO_2 dont le volume dégagé est mesuré à l'aide d'un calcimètre. Le C_{org} est obtenu par soustraction entre le CT et la teneur en carbone inorganique mesurée (Caria, Proix, et Ciesielski 2007).

Protocole pour la mesure de la granulométrie

La mesure de la texture du sol, c'est-à-dire de sa teneur en masse (par rapport à de la matière minérale sèche décarbonatée) de sables grossiers, sables fins, limons grossiers, limons fins et argiles granulométriques est déterminée par une succession de tamisages et sédimentations (Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité 2018). Le triangle textural utilisé pour la classification est celui de l'USDA (United States Department of Agriculture) (Annexe 15).

Avant l'analyse de la fraction fine du sol, les sels rapidement solubles, ainsi que les carbonates, la matière organique et les oxydes de fer sont soustraits de l'échantillon car ils induisent un biais dans les mesures. La première étape de la mesure consiste à plonger les échantillons de sol dans de l'eau, afin de bien séparer chacune des particules individuelles. Une fois séparées, elles sont filtrées à travers des tamis de plus en plus fins, chacun des refus étant pesé. A partir d'un certain diamètre ($< 50\ \mu\text{m}$,

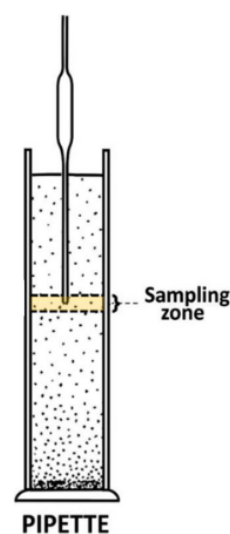


Figure 17 : Évaluation de la sédimentation à la pipette (adapté de Durner et Iden 2021).

c'est-à-dire la fraction regroupant les limons et les argiles granulométriques), la mesure par tamisage n'est plus assez précise et l'on procède à une mesure par sédimentation. Les particules restantes sont placées dans de l'eau et leur taille est déduite de leur vitesse de sédimentation, *via* la loi de Stokes : au plus les particules sont grosses, au plus elles sédimenteront rapidement (Annexe 16). Une pipette est utilisée pour extraire les particules à une profondeur constante et à des temps de décantation différents (Figure 17). La loi de Stokes est ensuite utilisée pour calculer le diamètre effectif²⁰ (r) de ces particules à une période donnée (Weil et Brady 2014; Blume et al. 2016a).

Indicateurs

Deux indicateurs sont obtenus par ces mesures :

- La teneur en C_{org} des échantillons de sol (**C_org**) ;
- Le rapport $\frac{C_{org} (gC/kg)}{\text{taux d'argile granulométrique } (g/kg)}$ des échantillons de sol (**Corg_arg**).

7.3 Résumé des indicateurs évalués sur base des expériences réalisées

Tableau 7 : Résumé des indicateurs de SE utilisés dans les analyses ultérieures.

Service écosystémique	Indicateur	Abréviation de l'indicateur ²¹
Incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT	Le nombre de cabanes apparues en 1-2-3 mois	T_cab1 – T_cab2 – T_cab3
	Le nombre de cabanes apparues au cours de la saison (environ 4 mois)	T_cabf
	Le taux de surface de paille incorporée en fin d'expérience	T_surf_inc
	Le taux de masse de paille incorporée en fin d'expérience	T_poids_inc
Décomposition de la MOS par les microorganismes	Le taux de décomposition de la MOS labile	D_k
	Le taux de stabilisation de la MOS labile	D_S
Prédation des graines d'adventices	Le taux de graines d'adventices prédatées	P_graines
Production végétale	Le rendement en grain	R_grain
	Le rendement en paille	R_paille

Tableau 8 : Résumé des indicateurs de C_{org} utilisés dans les analyses ultérieures.

Indicateur	Abréviation de l'indicateur
La teneur en carbone organique du sol	C_org
Le rapport $\frac{C_{org}}{\text{Taux d'argile granulométrique}}$	Corg_arg

²⁰ La loi de Stokes se réfère à des particules de forme sphériques. Pour des particules ayant d'autres formes, un rayon effectif est calculé comme étant le rayon moyen des particules.

²¹ Ces abréviations seront utilisées par la suite pour les analyses statistiques.

8 Analyses statistiques

8.1 Analyses générales

Les données brutes de chaque expérience ont tout d'abord été transcrites sur Excel et une première visualisation sur ce même logiciel a permis d'observer les distributions pour chacun des indicateurs de SE et C_{org} . L'analyse statistique des données sur le logiciel R a ensuite permis de mettre en relation les indicateurs de PC, de SE, et de C_{org} en trois grandes étapes.

Tout d'abord, des statistiques descriptives pour chacun des indicateurs (SE, C_{org} et PC) ont été réalisées. Celles-ci comprennent des analyses statistiques chiffrées des données brutes (nombre de données, maximum, minimum, écart-type,...), des histogrammes afin de montrer la répartition générale des données en fonction des indicateurs et des boîtes de Tuckey afin de visualiser la répartition des données inter-champs par indicateur. Ensuite, des analyses ANOVA ont été réalisées pour réaliser des comparaisons de moyennes et de variabilité inter- et intra-parcellaire sur les indicateurs respectant les hypothèses. La normalité a été vérifiée à l'aide de tests de Shapiro et l'homoscédasticité a été mesurée sur base du test de Levene. Le test de Kruskal-Wallis (test non paramétrique), a finalement permis de réaliser des comparaisons de moyennes entre les différentes parcelles pour les indicateurs ne respectant les hypothèses nécessaires à l'ANOVA. Finalement, trois types d'analyses multivariées ont été réalisées pour l'ensemble des indicateurs : des matrices de corrélation, des analyses en composantes principales (ACP) et des classifications hiérarchiques sur composantes principales (HCPC). Les packages Hmisc, FactoMineR et factoextra du logiciel R ont été utilisés pour ces analyses.

Une matrice de corrélation permet d'étudier la dépendance entre plusieurs variables grâce à l'élaboration de coefficients de corrélation entre chacune des variables (STHDA 2020). Le test de corrélation employé dans ce travail est le test de Pearson. Une ACP est une analyse multivariée permettant d'extraire les informations importantes d'un set de données contenant N variables quantitatives corrélées en les projetant dans un espace de dimension réduite à n dimensions ($n < N$). Ces dimensions sont représentées sous la forme d'un ensemble de nouvelles variables orthogonales appelées les composantes principales qui maximisent la variabilité entre individus. Les observations originales sont ensuite projetées dans cet espace à dimensions réduites (Abdi et Williams 2010). La part de variance expliquée est la plus élevée pour la première composante principale et diminue ensuite. Les variables utilisées pour la construction des composantes principales sont appelées « variables actives ». Dans certaines situations, des « variables illustratives », qui ne sont pas utilisées pour la création des axes, sont ajoutées pour interpréter les résultats obtenus (Abdi et Williams 2010). La lecture et interprétation d'une ACP est expliquée à l'Annexe 17. Les HCPC sont également des analyses multivariées permettant classer un jeu de données sur base de leur position dans l'espace établi par les composantes principales de l'ACP, en distinguant les individus selon leurs caractéristiques communes (Husson, Josse, et Pagès 2010).

8.2 Analyses de l'influence de la date de semis

Durant l'année 2021-2022, deux campagnes de mesures pour le protocole OPVT mesurant l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT ont été réalisées. Ces données sont nommées selon la saison de mise en place des paniers à VDT :

- La campagne « automne 2021 » désigne l'expérience des paniers à VDT réalisée par Dumont de Chassart et Dehaye (2022). Cette expérience a été mise en place juste après le semis du froment par l'agriculteur ; la date de mise en place de l'expérience diffère donc selon les parcelles (de mi-octobre à mi-novembre), jusque début avril ;
- La campagne « printemps 2022 » désigne l'expérience des paniers à VDT décrite dans ce mémoire et mise en place début mars jusque fin juin.

Les parcelles étudiées dans ce travail sont les mêmes que celles étudiées dans le mémoire de Dumont de Chassart et Dehaye (2022). Ceci rend donc possible la comparaison entre les résultats obtenus dans les deux mémoires. Cette comparaison permet d'étudier l'influence du caractère tardif de la date de semis sur l'indicateur d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT en fonction de la saison de mise en place de l'expérience des paniers à VDT.

Une première matrice de corrélation a tout d'abord été réalisée afin de vérifier dans quelle mesure les champs ayant des indicateurs de PC similaires ont été semés à des dates proches. S'il existe des corrélations entre la date de semis et les PC, il ne sera pas possible de distinguer l'influence de la date de semis sur l'indicateur de SE car cet effet sera confondu avec l'effet des PC. Ces derniers sont calculés à partir d'une moyenne sur les dix années précédant l'étude.

Deux matrices de corrélation (pour chacune des campagnes de mesures) ont ensuite été réalisées pour comparer le lien entre les indicateurs d'incorporation de la litière végétale dans le sol et la date de semis en fonction de la campagne de mesure. Des droites de régression ont finalement permis de visualiser et d'analyser plus finement ces relations.

Résultats

9 Introduction

Les résultats présentés ci-dessous correspondent à des statistiques descriptives non inférentielles. Cela signifie que les résultats obtenus ne peuvent être généralisés à grande échelle car l'échantillon de parcelles étudié ne respecte pas les hypothèses nécessaires. Les résultats de ce travail serviront néanmoins à compléter la base de données récoltée sur les trois années d'expérimentations dans la thèse de L. Leveau afin de mener à des conclusions plus globales.

Les résultats des indicateurs de teneur en C_{org} (C_{org}) et du rapport entre les taux de C_{org} et d'argile granulométrique (C_{org_arg}) ont été obtenus tardivement. Pour cette raison, ces indicateurs n'ont pas été pris en compte dans la construction et la classification de l'ACP_SE et de l'ACP_SE_PC (sections 12.1.2, 12.1.3 et 12.2.2).

10 Résultats des indicateurs de pratiques culturales

Hormis les indicateurs du nombre de familles et du nombre d'espèces par couvert pour lesquels uniquement 19 données sont disponibles, tous les indicateurs sont calculés à partir des données récoltées sur les 20 parcelles. La signification de l'abréviation de chaque indicateur utilisé dans la suite de ce travail se trouve au Tableau 6 (section 6.2) ainsi que sur la feuille annexe récapitulative des abréviations.

La répartition en histogrammes des données concernant les indicateurs de PC se trouve aux figures 9, 10 et 11 de l'Annexe 18. Ces figures comprennent respectivement les indicateurs de PC quantitatifs, catégoriels et logiques. Les histogrammes montrent la répartition du nombre de parcelles sur l'étendue des valeurs de l'indicateur considéré. Globalement, ces histogrammes ont une distribution très variable d'un indicateur de PC à l'autre. Dans la suite de ce travail, ces résultats sont mis en relation avec les indicateurs de SE et de C_{org} afin de faire ressortir les liens qui les unissent.

11 Résultats des indicateurs de services écosystémiques et de carbone organique

11.1 Généralités sur les résultats

La répartition générale des données par indicateur selon un histogramme se trouve à l'Annexe 19. Chaque indicateur de SE et de C_{org} est analysé dans la section 11.2 à partir des deux éléments suivants. La comparaison des données inter- et intra-parcellaires pour l'ensemble des indicateurs est analysée dans la section 11.4.

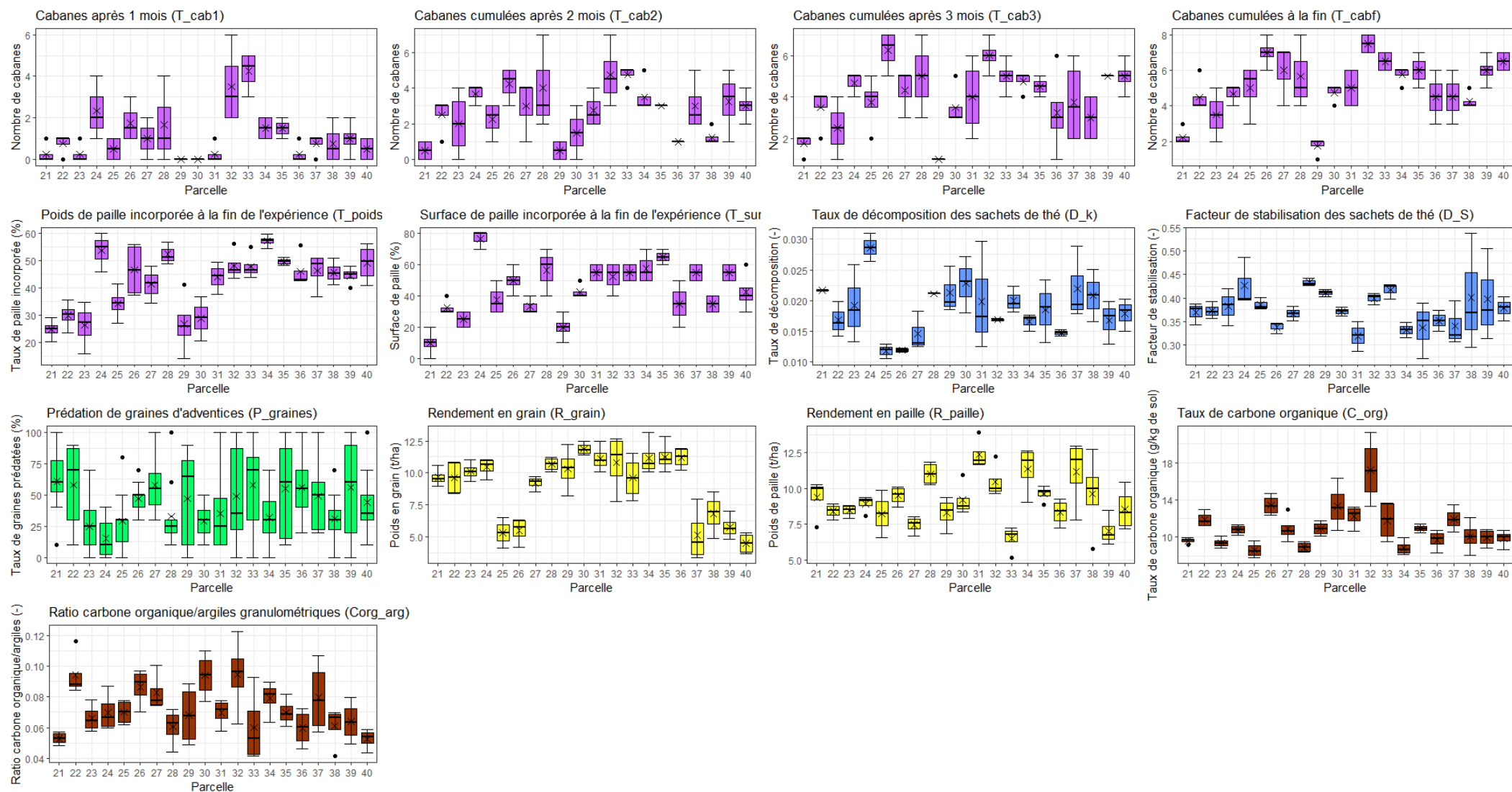


Figure 18 : Boîtes de Tukey avec écarts-types et moyennes pour chacun des indicateurs de SE et de C_{org} . Les couleurs correspondent aux différents SE auxquels les indicateurs font référence. Pour chaque « boîte », rectangle = deuxième et troisième quartile ; barre = médiane ; croix = moyenne ; points = outliers ; extrémité des barres verticales = 1,5 fois l'espace interquartile, point = valeur ne se trouvant pas dans l'espace interquartile ni dans l'espace délimité par les barres verticales.

SE	Indicateur	Abréviation	Nombre de données totales	Répétitions /champ	minimum	1er quartile	médiane	moyenne	3e quartile	maximum	écart-type
Incorporation de la MOS par les VDT	Nombre de cabanes après 1 mois [cabanes]	T_cab1	80	4	0	0	1	1,107	1,5	6	1,381
	Nombre de cabanes cumulées après 2 mois [cabane]	T_cab2	80	4	0	1	3	2,68	4	7	1,653
	Nombre de cabanes cumulées après 3 mois [cabane]	T_cab3	80	4	1	3	4	3,987	5	7	1,672
	Nombre de cabanes cumulées à la fin [cabanes]	T_cabf	80	4	1	4	5	5,04	6	8	1,704
	Taux du poids de paille incorporé à la fin [%]	T_poids_inc	80	4	14,2	34,6	43,6	41,78	50,2	60	11,256
	Surface de paille disparue à la fin [%]	T_surf_inc	80	4	0	30	50	43,84	60	80	17,21
Décomposition de la MOS par les microorganismes	Facteur de stabilisation des sachets de thé [-]	D_S	60	3	0,27	0,35	0,38	0,38	0,40	0,54	0,05
	Taux de décomposition des sachets de thé [-]	D_k	60	3	0,011	0,015	0,018	0,019	0,021	0,031	0,005
Prédation des graines d'adventices	Taux de graines prédatées [%]	P_graines	200	10	0	20	40	43,35	70	100	29,642
Production végétale	Rendement en grain [t/ha]	R_grain	80	4	3,397	7,584	10,038	9,101	10,973	13,152	2,614
	Rendement en paille [t/ha]	R_paille	80	4	5,182	7,882	9,019	9,215	10,153	13,894	1,873
Carbone organique	Teneur en Corg [g/kg]	C_org	80	4	7,84	9,547	10,565	11,02	12,125	21,22	2,321
	Ratio Corg/argiles granulométriques [-]	Corg_arg	80	4	0,04142	0,0584	0,06967	0,07177	0,0841	0,12238	0,008

Tableau 9 : Résumé des statistiques descriptives chiffrées pour chacun des indicateurs de SE et de C_{org}. Les couleurs correspondent aux différents SE. Le C_{org} ne représente pas un SE mais ses indicateurs aident à l'interprétation des résultats des SE.

- La répartition des données inter-champs pour chacun des indicateurs via des **boîtes de Tukey** (Figure 18). Cette analyse permet de comparer différentes parcelles entre elles pour un même indicateur. Dans l'ensemble, les moyennes des 20 parcelles étudiées sont visuellement assez différentes pour un même indicateur ;
- **L'analyse statistique chiffrée** de chaque indicateur (Tableau 9). Celle-ci contient des informations sur le nombre de données totales analysées, le nombre de répétitions par champ pour chaque expérience et différentes valeurs concernant la distribution des données (valeur minimum, 1^{er} quartile, médiane, moyenne, 3^e quartile et valeur maximum).

11.2 Résultats des indicateurs de services écosystémiques

11.2.1 Incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre

Sur chaque parcelle, quatre paniers à VDT ont été mis en place. Les indicateurs concernant l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT sont au nombre de trois. Le premier se rapporte au nombre de cabanes à VDT cumulées au sein d'un panier sur des durées d'approximativement 1,2,3 et 4 mois²² (respectivement T_cab1, T_cab2, T_cab3 et T_cabf). Le deuxième concerne le taux de masse de la paille incorporée au sol à la fin de l'expérience (T_poids_inc). Le dernier concerne le pourcentage de la surface de paille incorporée au sol à la fin de l'expérience (T_surf_inc). Sur les 80 paniers à VDT ayant été installés, cinq ont été endommagés en cours d'expérience, ce qui porte le nombre de données utilisables pour l'ensemble de ces indicateurs à 75.

La répartition par parcelle du nombre de cabanes cumulées observées est assez semblable pour l'ensemble des indicateurs de cabanes, en particulier pour T_cab3 et T_cabf. Les parcelles n'ayant pas beaucoup de cabanes en début d'expérience gardent généralement cette tendance jusqu'à la fin (et inversement), ce qui est en partie dû au fait qu'il s'agit d'une mesure cumulée. Par contre, si l'on compare le nombre de nouvelles cabanes apparues entre deux mesures mensuelles (mesure non cumulée), les corrélations sont assez faibles entre tous ces indicateurs (Annexe 20). Le nombre de cabanes étant un résultat cumulatif, les moyennes pour chacun de ces indicateurs augmentent avec le temps d'expérience, avec une valeur moyenne de 1 cabane au début et 5 à la fin de l'expérience.

La Figure 24b de la section 13.1 (car analysée plus en détail dans la section 13.1) présente la dynamique des cabanes à VDT au printemps. Celle-ci peut être mise en relation avec l'évolution de la surface de paille incorporée dans chaque parcelle au cours des quatre mois de mesure (Annexe 21). Globalement, la tendance observée pour la surface de paille suit l'évolution du nombre de cabanes à VDT. Cette affirmation est particulièrement vraie pour les parcelles présentant peu de cabanes : au moins il y a de cabanes observées, au moins la surface de paille incorporée au sein du panier est élevée.

²² A partir de la mise en place des paniers, mesures après 21, 56, 86, et 104 jours précisément.

L'indicateur de taux de masse de paille incorporée comporte une valeur moyenne de 42% de la masse initiale qui a été incorporée au sol. Les parcelles possédant des valeurs faibles pour cet indicateur correspondent généralement aux parcelles ayant un faible nombre de cabanes, bien que la situation inverse soit moins marquée. La répartition des parcelles pour l'indicateur du taux de surface de paille incorporée est assez similaire à celle de l'indicateur T_poids_inc. La valeur moyenne du pourcentage de surface de paille incorporée est de 44%, et la majorité des parcelles se trouvent au-delà de 30%.

11.2.2 Décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes

Pour calculer les indicateurs de décomposition de la MOS (D_k) et de stabilisation de la MOS (D_S), trois placettes de huit sachets de thé ont été placés sur chaque champ (ce qui porte à 24 le nombre de sachets de thé par parcelle). Sur chaque placette, une moyenne des 8 sachets de thé qui s'y trouvent a été calculée. Chaque parcelle possède donc trois valeurs pour les indicateurs D_S et trois valeurs pour les indicateurs D_k.

Sur quelques placettes, certains indicateurs D_k et D_S n'ont pas pu être mesurés pour deux raisons. Premièrement, certains sachets de thé étaient troués ou n'ont pas été retrouvés dans le sol à la fin de l'expérimentation. Au total, deux placettes sur deux parcelles différentes n'ont pas permis de mesurer l'indicateur D_k car aucun TR non troué n'y a été retrouvé. Une de ces mêmes placettes n'a pas non plus permis de mesurer D_S car aucun TV non troué n'y a été retrouvé non plus. Deuxièmement, il n'a pas été possible de calculer l'indicateur D_k sur six placettes différentes car la valeur obtenue pour réaliser le calcul sortait du domaine du logarithme (Annexe 12). Ceci se produit lorsque les conditions pour réaliser le protocole TBI ne sont pas remplies. La mesure du taux de décomposition du TR suppose que ce dernier est toujours dans la première phase de décomposition (fraction labile de la MOS) tandis que le TV se trouve déjà dans la seconde phase (fraction stable de la MOS). Or lorsque le taux d'incubation est trop long et/ou que la décomposition par les microorganismes du sol est très rapide, le TR peut entrer dans la seconde phase de décomposition, ce qui entraîne un taux de décomposition négatif ou incalculable. Tout cela porte le nombre de données utilisables à 52 pour l'indicateur D_k et 59 pour l'indicateur D_S.

La distribution de l'indicateur D_k présente une moyenne de 0,019. La parcelle 24 montre une valeur particulièrement élevée pour cet indicateur (moyenne de 0,029), contrairement aux parcelles 25, 26 et 27 dont les valeurs sont très basses (moyenne de 0,013) par rapport à cette moyenne. L'indicateur D_S présente quant à lui une valeur moyenne de 0,38.

11.2.3 Prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture

Sur chacune des parcelles, la mise en place de dix cartes de prédation a permis de mesurer l'indicateur de la prédation de graines d'adventices (P_graines). La valeur moyenne du taux de graines prédatées pour l'ensemble des parcelles est de 43% (Tableau 9). Une grande variabilité intra-parcellaire est observée pour cet indicateur : certaines parcelles (32, 33 et 39)

possèdent une différence de 100% entre leur valeur minimum et maximum de taux de graines prédatées.

11.2.4 Production végétale

La mesure du SE de production végétale a été réalisée sur base de quatre répétitions par parcelle. L'intervalle entre les valeurs minimum et maximum de l'indicateur de rendement en grain (R_{grain}) est de 9,75 t/ha, ce qui est très élevé. L'histogramme de cet indicateur montre que les valeurs peuvent être divisées en deux groupes ayant chacun des répartitions symétriques mais dont la moyenne diffère (Annexe 19). La valeur moyenne de l'indicateur du rendement en paille (R_{paille}) est 9,2 t/ha.

11.3 Résultats des indicateurs de carbone organique

11.3.1 Teneur en carbone organique du sol

Sur chaque parcelle, quatre échantillons composites de sol ont été prélevés afin d'y mesurer la teneur en C_{org} . Les valeurs de C_{org} mesurées varient entre 7,8 et 21,2 g de C_{org} par kg de sol, avec une valeur moyenne de 11 g/kg ce qui correspond à une teneur de 1,1% de C_{org} dans le sol. La majorité des parcelles présentent des taux relativement similaires et proches de la moyenne, bien que certaines parcelles montrent des valeurs particulièrement élevées, jusqu'à 21,2 g/kg.

11.3.2 Ratio de la teneur en carbone organique du sol sur la teneur en argile granulométrique

La mesure du rapport entre la teneur en C_{org} et la teneur en argile granulométrique a été réalisée à partir de quatre répétitions par parcelle. Cet indicateur présente une moyenne des données de 0,078, c'est-à-dire quasiment la valeur de 1/13 (0,077) qui délimite deux états différents de structure du sol (Tableau 1, section 2.2.1). Les taux d'argile granulométrique mesurés sur les 20 parcelles se situaient tous entre 10 et 23%.

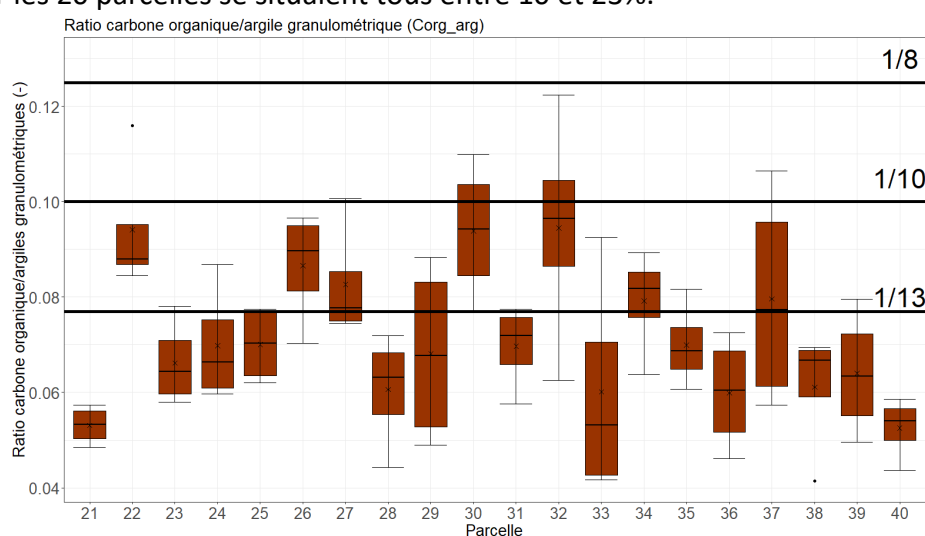


Figure 19 : Boîtes de Tukey du ratio C_{org} /argile granulométrique pour les différentes parcelles. Les lignes horizontales correspondent aux valeurs des ratios 1/8, 1/10 et 1/13 délimitant l'état de la structure du sol. Une valeur supérieure à 1/8 est considérée comme un « très bon état », une valeur comprise entre 1/10 et 1/8 est considérée comme « bon état », une valeur comprise entre 1/13 et 1/10 est considérée comme « état sujet à l'amélioration » et une valeur inférieure à 1/13 est considérée comme « pauvre état » (Johannes et al. 2017).

La Figure 19 montre la répartition des données du ratio C_{org}/argile granulométrique en fonction des parcelles et leur situation par rapport aux limites faisant état de la structure du sol. La majorité des parcelles ont un ratio inférieur à 1/13, ce qui signifie qu'elles contiennent peu de MOS par rapport à ce qu'elles pourraient contenir sur base de leur teneur en argile granulométrique. Quelques parcelles présentent une valeur située dans la gamme [1/13 ; 1/10] avec un meilleur état du sol que les parcelles précédentes, bien que sujet à l'amélioration. Globalement, les parcelles présentant les ratios les plus élevés sont les mêmes parcelles qui possèdent des taux de C_{org} élevés. Aucune valeur moyenne des parcelles n'est située dans les gammes de bon état et très bon état du sol ($< 1/10$).

11.4 Variabilité inter- et intra-parcellaire

Pour chacun des SE, des analyses de comparaison de moyenne à un facteur de variabilité (c'est-à-dire la parcelle, ANOVA 1) ont été réalisées afin de comparer les moyennes et les variances intra et inter-parcellaires. Ceci permet de vérifier si les protocoles sont bien adaptés pour chacune des expériences et si l'échantillonnage est bien réalisé. Cependant, l'ensemble des données ne respectant pas les hypothèses pour réaliser une analyse ANOVA, seuls cinq indicateurs ont pu être analysés pour cette mesure : T_poids_inc , D_S , D_k , R_grain , R_paille et $Corg_arg$.

Pour déterminer la relation entre la variance intra- et inter-champs, le rapport entre la somme des carrés des erreurs (SSE) et la somme des carrés du modèle ANOVA (SSM) a été calculé²³ (Tableau 10). Lorsque ce rapport est inférieur à 1, cela signifie que la variance intra-champs est inférieure à la variance inter-champs (et inversement). La p-valeur a également été indiquée pour déterminer si au moins une parcelle a une moyenne significativement différente des autres (à un niveau de confiance donné).

Tableau 10 : Résultats d'un modèle ANOVA pour les indicateurs T_poids_inc , D_S , D_k , R_grain , R_paille et $Corg_arg$ en fonction des parcelles. Le nombre d'étoiles correspond à l'indice de significativité ('***' est plus significatif que '*').

Modèle ANOVA	Nombre d'échantillons	SSE/SSM	p-valeur
$T_poids_inc \sim \text{parcelle}$	n = 72	0,30	3,419e-11 ***
$D_S \sim \text{parcelle}$	n = 39	1,37	0,139
$D_k \sim \text{parcelle}$	n = 54	0,81	0,03331 *
$R_grain \sim \text{parcelle}$	n = 72	0,20	1,505e-15 ***
$R_paille \sim \text{parcelle}$	n = 72	0,55	3,797e-07 ***
$Corg_arg \sim \text{parcelle}$	n = 80	0,93	0,0001655 ***

Les indicateurs du taux de masse de paille incorporée, de rendement en paille et en grain et du rapport C_{org}/argile granulométrique présentent des p-valeurs toutes inférieures au niveau de confiance 0,01. Il existe donc une différence significative entre les moyennes d'au moins

²³ La SSE représente la variabilité à l'intérieur d'un traitement, tandis que la SSM représente la variabilité entre traitements.

deux parcelles pour chacun de ces indicateurs, pour un niveau de confiance 0,05. Ces quatre indicateurs ont également une variabilité inter-parcellaire plus grande que leur variabilité intra-parcellaire. En revanche, les indicateurs de taux de décomposition et de stabilisation de la MOS ont une variabilité intra-parcellaire plus grande qu'inter-parcellaire et leur p-valeur indique que des différences significatives entre les moyennes des parcelles ne peuvent pas être établies pour ces deux indicateurs.

Pour les indicateurs ne respectant pas les conditions pour réaliser une ANOVA, un test de Kruskal-Wallis²⁴ a été réalisé et montre que chacun de ces indicateurs contient au moins une parcelle ayant une moyenne significativement différente des autres. L'écart-type total pour l'indicateur du nombre de cabanes augmente au fur et à mesure du temps ($T_{cabf} > T_{cab1}$). Les boîtes de Tukey des indicateurs de cabanes cumulées à la fin et de taux de surface de paille incorporée sont visuellement assez variables entre les différentes parcelles (écarts-types globaux de respectivement de 1,7 cabanes et 17%). La boîte de Tukey de l'indicateur $P_{graines}$ montre une distribution très élevée des données au sein des différentes parcelles. L'indicateur de la teneur en C_{org} possède une distribution des données relativement faible avec quelques parcelles se distinguant par une plus grande valeur (écart-type global de 2,3 g/kg).

12 Analyses multivariées

12.1 Indicateurs de services écosystémiques et de carbone organique

12.1.1 Matrice de corrélation

Le corrélogramme de la Figure 20 présente les corrélations entre les 13 indicateurs de SE et C_{org} , provenant de cinq expériences différentes. Les couleurs utilisées représentent le sens de la corrélation : en rouge il s'agit d'une corrélation négative, en bleu d'une corrélation positive. Les valeurs correspondent quant à elles au coefficient de corrélation de Pearson. L'ensemble des données n'étant pas distribué normalement, la significativité des valeurs n'a pas pu être testée.

Sur la Figure 20, tous les indicateurs liés à l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT (T_{cab}^{25} , T_{poids_inc} , T_{surf_inc}) sont tous fortement²⁶ corrélés positivement entre eux, sauf T_{cab1} (corrélation moyenne avec T_{poids_inc} et T_{surf_inc}). Ce constat n'est pas surprenant étant donné qu'ils mesurent le même SE et que ce sont des mesures cumulées. De plus, les deux indicateurs du taux d'incorporation de la paille (en masse ou en surface) mesurent tous deux la même activité d'incorporation de la paille, c'est pourquoi leur coefficient de corrélation est très élevé.

²⁴ Le test de Kruskal-Wallis est un test non paramétrique permettant de déterminer si des échantillons proviennent d'une même population, ou si au moins un échantillon provient d'une population différente.

²⁵ Cet indicateur regroupe tous les indicateurs du nombre de cabanes (T_{cab1} , T_{cab2} , T_{cab3} et T_{cabf}).

²⁶ Une corrélation est considérée comme forte si elle est $\geq 0,6$. Une corrélation est considérée comme moyenne si elle est $< 0,6$ et $\geq 0,4$.

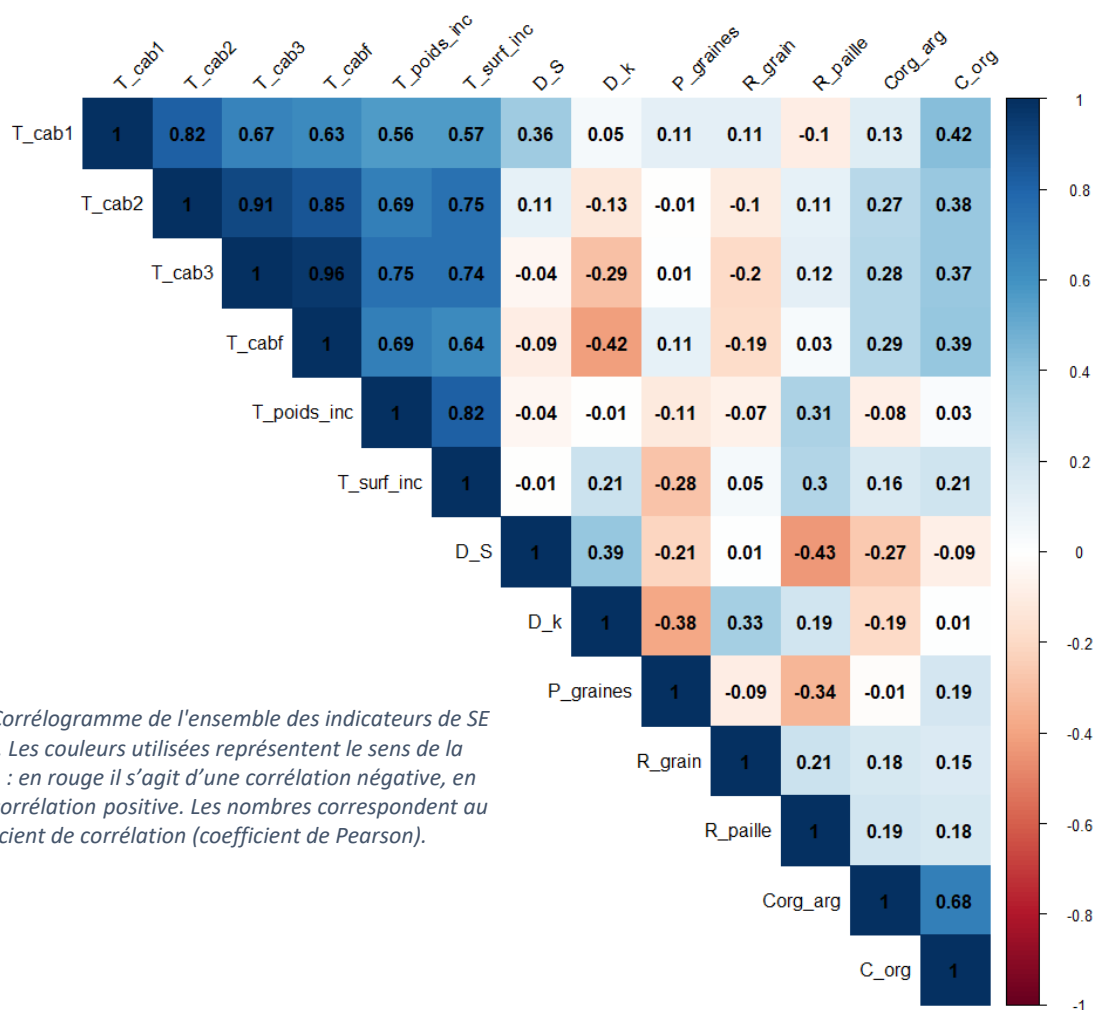


Figure 20 : Corrélogramme de l'ensemble des indicateurs de SE et de C_{org}. Les couleurs utilisées représentent le sens de la corrélation : en rouge il s'agit d'une corrélation négative, en bleu d'une corrélation positive. Les nombres correspondent au coefficient de corrélation (coefficient de Pearson).

Concernant les indicateurs D_S, D_k, P_graines, R_grain et R_paille, aucun d'entre eux n'est fortement corrélé à un autre indicateur. Une corrélation négative moyenne est observée entre les indicateurs T_cabf et D_k ainsi qu'entre les indicateurs D_S et R_paille. Finalement, l'indicateur C_{org} est corrélé moyennement positivement avec T_cab1 et est fortement corrélé positivement à l'indicateur Corg_arg.

12.1.2 Classification hiérarchique sur composantes principales (HCPC_SE)

Une première ACP (ACP_SE) a été réalisée sur base des indicateurs de SE²⁷ afin d'observer les relations entre ceux-ci. Étant donné que certaines variables d'incorporation de la litière végétale dans le sol sont redondantes, il a été décidé de ne prendre en compte que sept indicateurs en variables actives : T_cabf, T_poids_inc, D_S, D_k, P_graines, R_grain et R_paille. Ceci permet d'éviter les répétitions d'informations dans la construction des composantes principales, qui font ressortir davantage les liens de corrélation entre ces indicateurs redondants plutôt qu'avec les autres indicateurs.

L'indicateur T_cabf est conservé car la dynamique des cabanes au cours du temps du nombre de cabanes est linéaire et car il est celui qui permet au mieux de montrer l'activité des VDT

²⁷ Les indicateurs de C_{org} ne sont pas pris en compte dans cette analyse en raison de l'arrivée tardive des résultats.

sur le long terme (le plus proche de la durée du protocole de l'OPVT). Les quatre indicateurs non repris en tant que variables actives (T_cab1, T_cab2, T_cab3 et T_surf_inc) ont été ajoutés à l'ACP_SE en tant que variables illustratives afin de montrer leurs liens avec les variables actives. L'indicateur T_surf_inc n'a pas été pris en compte en tant que variable active car il est très corrélé à l'indicateur T_poids_inc. Ce dernier a été choisi plutôt que T_surf_inc car il s'agit d'une mesure continue, plus rigoureuse et qui tient compte du volume de la paille (dimension 3D) en fin d'expérience (contrairement à la mesure de surface qui est une mesure en 2D).

Les trois premières composantes de l'ACP_SE permettent d'expliquer 74% de la variance totale entre toutes les variables actives choisies (Figure 21). La part de la variance totale expliquée par les composantes 1, 2 et 3 est de respectivement 30%, 25% et 19%. Le Tableau 11 présente la contribution de chaque variable à la formation des trois premières composantes. Cette information est nécessaire pour interpréter par la suite la position des individus (représentant chaque parcelle) sur cette ACP_SE.

Tableau 11 : Contribution des variables à la construction des trois premières composantes principales de l'ACP_SE.

1 ^e composante principale		2 ^e composante principale		3 ^e composante principale	
30%	T_cabf	37%	R_paille	48%	D_S
28%	D_k	25%	T_poids_inc	14%	R_paille
13%	T_poids_inc	18%	P_graines	12%	T_poids_inc
10%	D_S	7%	D_k	10%	T_cabf
10%	R_grain	5%	R_grain	6%	R_grain
9%	P_graines	5%	T_cabf	4%	P_graines
0%	R_paille	2%	D_S	3%	D_k

Sur la Figure 21a, l'indicateur T_poids_inc est corrélé positivement à T_cabf et R_paille. L'indicateur P_graines est opposé aux indicateurs R_paille, D_k et R_grain, ce qui signifie qu'ils sont corrélés négativement. La Figure 21b montre que les indicateurs R_paille et D_S (bien représentés par les composantes 1 et 3, Tableau 11) sont corrélés négativement sur le plan constitué par ces deux axes.

La disposition des parcelles par rapport aux composantes principales et aux variables permet d'interpréter les caractéristiques de chacune de ces parcelles. Ceci permet d'établir des groupes de parcelles partageant certaines caractéristiques. Sur base de l'ACP_SE, trois groupes ont pu être formés en prenant en compte ses cinq premières dimensions de l'ACP par la formation d'une HCPC²⁸. Ces groupes sont représentés par les différentes couleurs sur la Figure 21. Pour certains groupes, une comparaison avec la HCPC sur SE du mémoire de J. Dumont de Chassart et G. Dehaye (« automne 2021 », données mesurées sur les mêmes

²⁸ Cette approche permet de combiner trois méthodes standards d'analyses multivariées : les méthodes de composantes principales, la classification ascendante hiérarchique et le partitionnement en k-moyennes (Husson, Josse, et Pagès 2010).

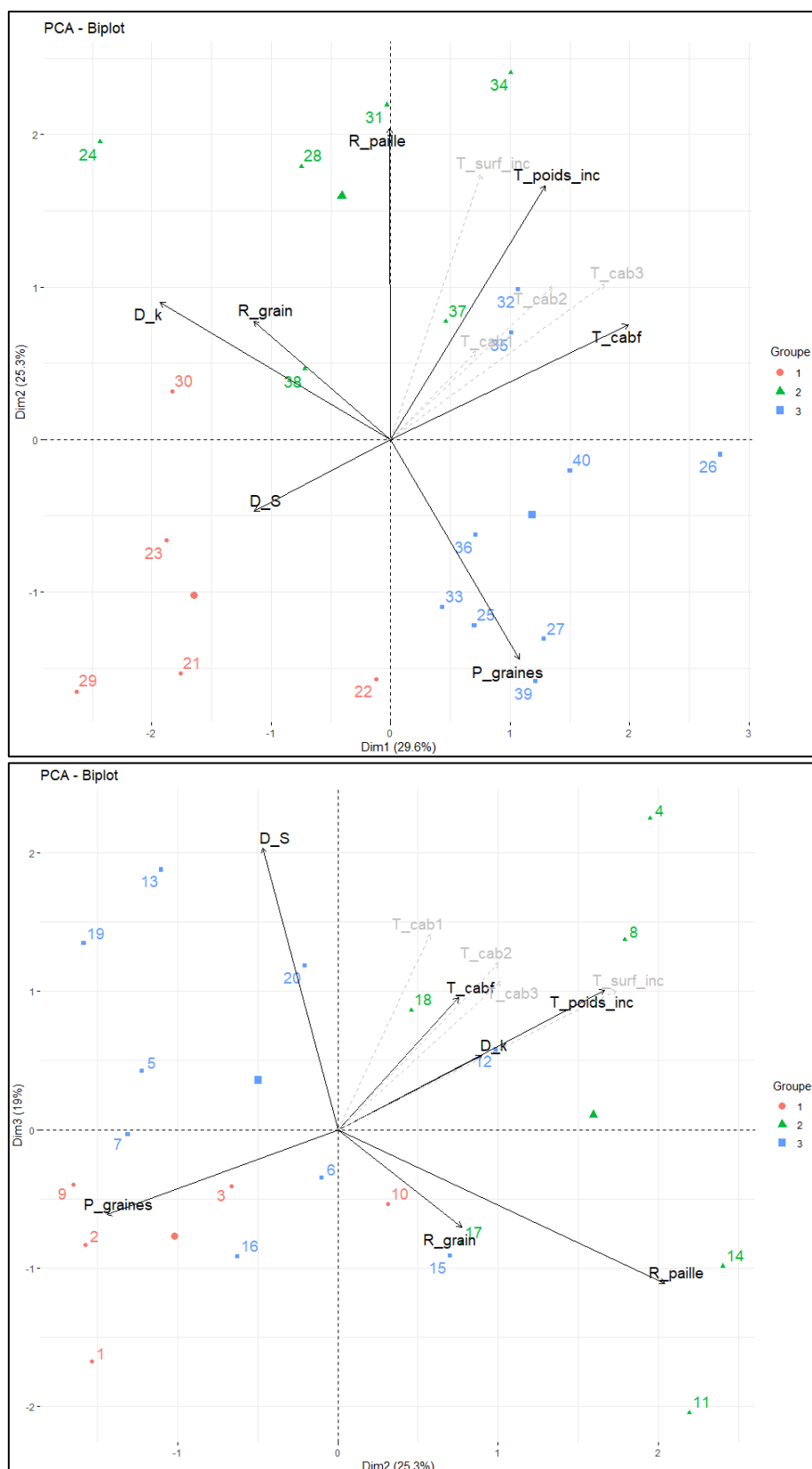


Figure 21 a (haut) et b (bas) : ACP_ SE sur sept indicateurs de SE en variables actives (T_{cabf} , T_{poids_inc} , D_S , D_k , $P_{graines}$, R_{grain} et R_{paille}) et quatre en variables illustratives (T_{cab1} , T_{cab2} , T_{cab3} et T_{surf_inc}) pour les dimensions (a) 1 et 2 et (b) 2 et 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la HCPC (développés plus bas). Les variables illustratives sont représentées par des flèches pointillées en gris. Les symboles de plus grande taille et sans numéro correspondent à la position moyenne de chaque groupe sur l'ACP_SE.

parcelles) est réalisée lorsqu'il y a des ressemblances. Les comparaisons (faible/élevé) se font par rapport à l'ensemble des groupes formés. Les groupes sont ordonnés en fonction de leur ordre dans la légende. Les variables présentées sont celles qui décrivent au mieux chaque groupe.

- Le **premier groupe (groupe rouge)** regroupe les parcelles 21, 22, 23, 29, 30. Ces parcelles ont des valeurs faibles pour la dimension 1. Elles sont caractérisées par un faible nombre de cabanes cumulées à la fin de l'expérience et par des faibles surface et masse de paille incorporées. Ce groupe est assez similaire à l'un des groupes d'automne 2021 caractérisé par une faible activité des VDT et une faible diversité et densité d'adventices (indicateur non mesuré dans le cadre de ce mémoire) ;
- Le **second groupe (groupe vert)** comprend les parcelles 24, 28, 31, 34, 36 et 38. Ces parcelles ont une valeur élevée pour la dimension 2. Elles sont caractérisées par un rendement en paille, une surface et une masse de paille incorporée élevées. Le taux de décomposition de la MOS est élevé et la prédation de graines d'adventices assez faible pour ce groupe. Les parcelles 24, 28, 31 et 34 appartiennent au même groupe dans les mesures d'automne 2021 caractérisées par une forte activité des VDT et une faible sensibilité à la battance (indicateur non mesuré ici) ;
- Le **troisième groupe (groupe bleu)** regroupe les parcelles 25, 26, 27, 32, 33, 35, 36, 39 et 40. Il est caractérisé par une prédation de graines d'adventices élevée et des valeurs faibles pour les indicateurs de taux de décomposition de la MOS, rendement en paille et nombre de cabanes cumulées à la fin.

12.1.3 Modèle ANOVA pour les groupes de la classification hiérarchique

Un modèle ANOVA a été réalisé pour tester si les trois groupes formés par la HCPC_SE à la section 12.1.2 distinguent bien indicateurs de l'ACP_SE (Tableau 12). Les hypothèses relatives au modèle ANOVA ont été validées pour les indicateurs T_cabf, T_poids_inc, P_graines, D_k et R_paille.

Tableau 12 : Modèle ANOVA de certains indicateurs de SE en fonction des groupes formés par la HCPC. Le nombre d'étoiles correspond à l'indice de significativité ('***' est plus significatif que '*').

Modèle ANOVA	R ² aj	p-valeur
T_cabf ~ groupe	0,5614	0,0003522 ***
T_poids_inc ~ groupe	0,796	5,26e-07 ***
P_graines ~ groupe	0,243	0,03645 *
D_k ~ groupe	0,3757	0,007084 **
R_paille ~ groupe	0,4265	0,003442 **

Les indicateurs T_cabf, T_poids_inc, P_graines, D_k et R_paille sont bien distincts parmi les trois groupes formés par la HCPC_SE (p-valeur < 0,05). Les coefficients de détermination ajustés sont assez élevés pour les indicateurs T_cabf et T_poids_inc, ce qui montre que le modèle formé est une bonne représentation des données réelles pour ces indicateurs.

12.2 Tous les indicateurs

12.2.1 Matrice de corrélation

La Figure 22 présente le corrélogramme de l'ensemble des indicateurs mesurés au cours de cette étude (indicateurs de SE, C_{org} et PC). Les corrélations principales ($>|0,45|$) entre indicateurs de SE, C_{org} et PC sont décrites ci-dessous sur base de cette figure. La description dans la section suivante de ces relations *via* une ACP permettra de compléter l'analyse.

De nombreuses PC sont corrélées aux indicateurs liés à l'activité des VDT (T_{cab} , T_{poids_inc} et T_{surf_inc}). Le nombre de cabanes cumulées à la fin est fortement corrélé négativement à la fréquence des cultures récoltées sous le sol. Il est moyennement corrélé négativement à la fréquence des cultures récoltées en automne et des cultures sarclées ainsi qu'à la fréquence de labour, à la durée de la période entre le dernier travail du sol et le semis (sans mulch) et à la profondeur cumulée totale des opérations de travail du sol. L'indicateur T_{cabf} est également moyennement corrélé négativement aux indices de fréquence de traitement (IFT) en produits phytosanitaires, en particulier herbicides et insecticides. Les indicateurs T_{poids_inc} et T_{surf_inc} sont quant à eux corrélés respectivement fortement et moyennement négativement à la durée de la période entre le dernier travail du sol et le semis (sans mulch) et à la fréquence de labour. Ils sont tous deux moyennement corrélés négativement à la profondeur cumulée totale des opérations de travail du sol effectuées. Les taux de masse et de surface de paille incorporée sont moyennement corrélés positivement à la part de temps de mulch sur l'itinéraire cultural et sont respectivement fortement et moyennement corrélés positivement à la diversité totale des espèces semées et au nombre d'années auquel remonte le dernier labour. Finalement, l'indicateur du taux de masse de paille incorporée est moyennement corrélé négativement à la fréquence d'utilisation d'outils animés, à l'IFT en insecticides et à la date de semis du froment, tandis que l'indicateur du taux de surface de paille incorporée est fortement corrélé négativement à l'IFT en insecticides et moyennement corrélé négativement aux IFT en fongicides et insecticides sur le froment.

Pour ce qui est des indicateurs liés à la décomposition et stabilisation de la MOS (D_k et D_S), le facteur de stabilisation de la MOS est moyennement corrélé négativement au nombre de variétés récoltées présentes par saison culturale et par surface cultivée. Le taux de décomposition de la MOS est moyennement corrélé négativement à la diversité des espèces récoltées et est moyennement corrélé positivement à l'IFT en produits régulateurs de croissance.

L'indicateur du taux de graines prédatées ($P_{graines}$) est faiblement corrélé aux indicateurs de PC. On note tout de même une corrélation positive moyenne avec IFT en fongicides appliqués sur le froment.

L'indicateur de rendement en grains (R_{grain}) montre une corrélation forte positive avec la quantité d'azote minéral apporté. Le rendement en paille (R_{paille}) est quant à lui fort corrélé

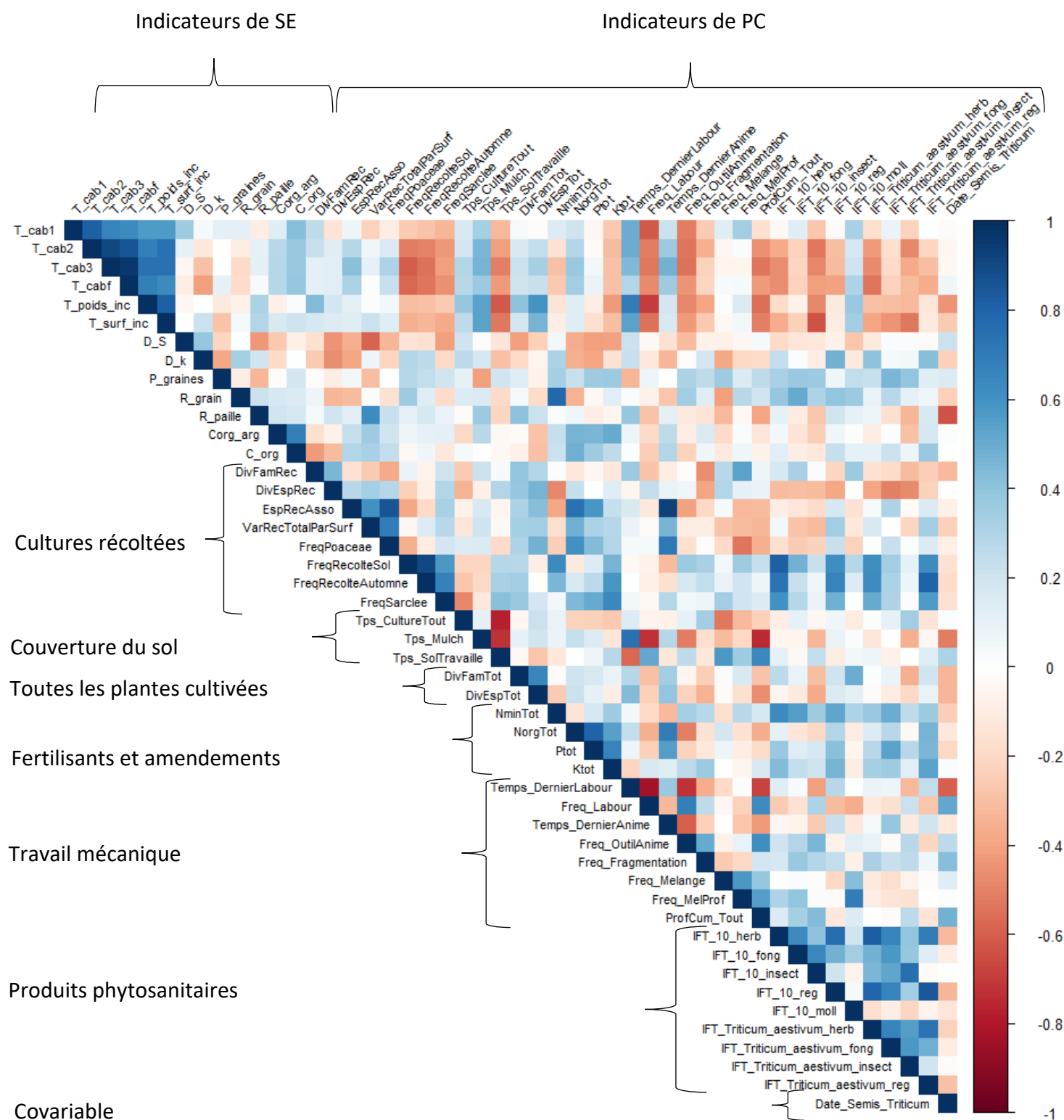


Figure 22 : Corrélogramme pour l'ensemble des indicateurs mesurés au cours de cette étude (SE, C_{org} et PC). Les couleurs utilisées représentent le sens de la corrélation : en rouge il s'agit d'une corrélation négative, en bleu d'une corrélation positive. Les nombres correspondent au coefficient de corrélation (coefficient de Pearson).

positivement avec le nombre de variétés récoltées présentes par saison culturale et par surface cultivée et est fortement corrélé négativement à la date de semis du froment.

Finalement, les deux indicateurs relatifs au C_{org} sont moyennement corrélés positivement avec la quantité d'azote organique total apporté sur la parcelle. L'indicateur du ratio $C_{org}/argile$ granulométrique (C_{org_arg}) est également moyennement corrélé positivement à la quantité de phosphore total et de potassium total apporté.

12.2.2 Analyse en composantes principales (ACP_SE_PC)

Cette ACP (ACP_SE_PC) a pour objectif de comparer la fourniture en SE sur les champs sur base des PC. Elle a été construite en prenant en compte les SE non redondants en tant que variables actives et l'ensemble des PC en tant que variables illustratives. La contribution des variables à la construction des différentes composantes est très semblable à celle de l'ACP_SE (Annexe 22). La petite différence provient du fait que seules 19 parcelles sur les 20 sont utilisées pour réaliser cette analyse de l'ACP_SE_PC (données manquantes sur la parcelle 25). Sur l'ensemble des 43 indicateurs quantitatifs (6 SE et 37 PC)²⁹, seuls ceux qui sont le mieux représentés sur l'ACP ($\cos^2 > 0,3$) sont indiqués. Sur la Figure 23, les quatre premières dimensions représentent 88% de la variance du jeu de données total. La part de la variance totale expliquée par les composantes 1, 2, 3 et 4 est de respectivement 32%, 26%, 19% et 12%.

La Figure 23a révèle une corrélation négative forte des indicateurs d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT (T_{poids_inc} et T_{cabf}) avec deux indicateurs de travail du sol (fréquence de labour et profondeur cumulée totale des opérations de travail du sol) et avec l'IFT en insecticides appliqués sur le froment. Ces trois indicateurs de PC sont également corrélés négativement avec le rendement en paille. Les indicateurs de temps auquel remonte le dernier labour de et la part de temps de mulch sur l'itinéraire cultural de la parcelle sont fortement corrélés positivement avec le rendement en paille et sont également corrélés positivement le taux de masse de paille incorporée au sol. Sur la Figure 23b, on observe une corrélation forte positive entre le rendement en grain et la quantité d'azote total apporté. Le facteur de stabilisation de la MOS est corrélé négativement au nombre de variétés présentes par saison culturale et par surface et à la fréquence des cultures sarclées.

Concernant les corrélations entre PC (variables illustratives), les composantes 1 et 2 montrent une corrélation positive entre la profondeur cumulée totale des travaux de sol effectués, la fréquence de labour et l'IFT en insecticides sur les cultures de froment. Ces trois indicateurs sont corrélés négativement aux indicateurs de temps auquel remonte le dernier labour et de part de temps de mulch sur l'itinéraire cultural de la parcelle qui sont fortement corrélés positivement entre eux. Sur les composantes 3 et 4, les indicateurs de fréquence de culture

²⁹ Les indicateurs de C_{org} ne sont pas pris en compte dans cette analyse en raison de l'arrivée tardive des résultats.

sarclées et de nombre de variétés récoltées présentes par saison culturale et par surface cultivée sont corrélés positivement entre eux.

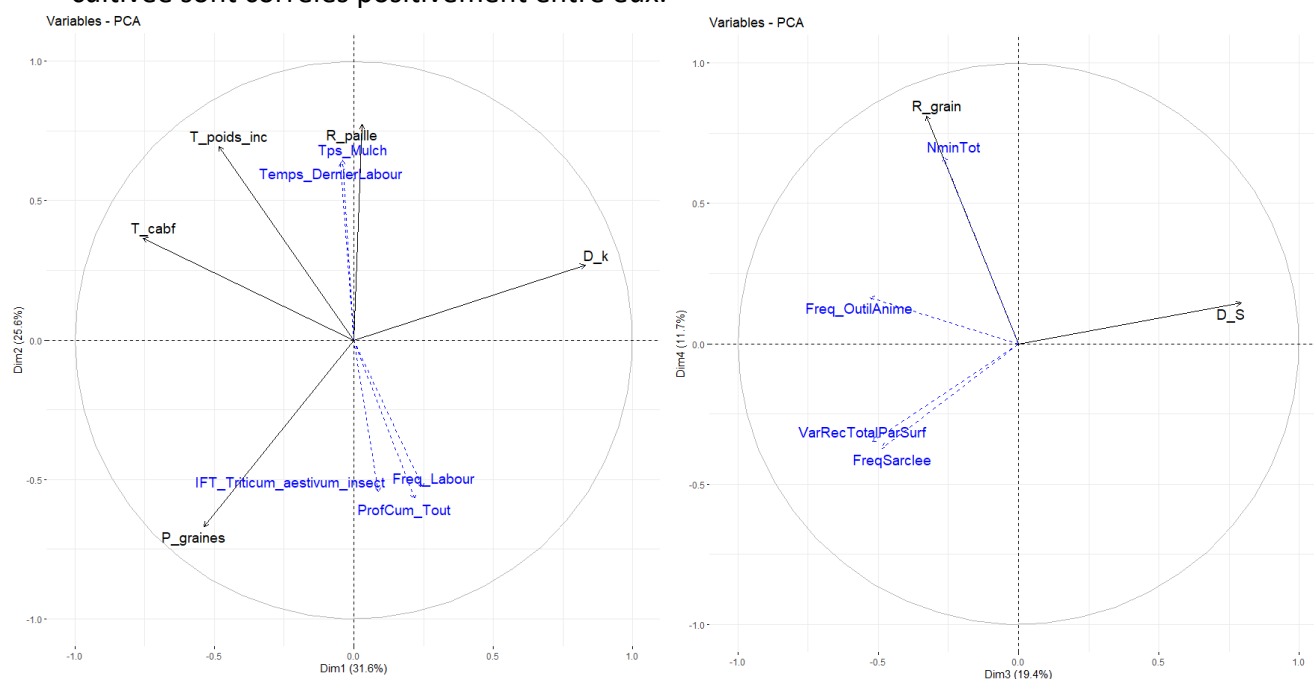


Figure 23 a (gauche) et b (droite) : ACP_SE_PC sur les indicateurs de SE non redondants en variables actives (T_poids_inc , T_cabf , D_k , D_S , $P_graines$, R_grain et R_paille) et l'ensemble des PC en variables illustratives, pour les dimensions (a) 1 et 2 et (b) 1 et 3. Les variables illustratives sont représentées par les flèches pointillées en bleu. Seules les variables dont le $\cos^2 > 0.3$ sont représentées sur cette ACP_SE_PC.

13 Influence de la date de semis

Le caractère tardif de la date de semis du froment à l'automne 2021 a porté une influence sur les résultats obtenus par Dumont de Chassart et Dehaye (2022) lors de leur expérience des paniers à VDT. Afin de vérifier si cette influence est plus faible lorsque cette expérience est mise en place au mois de mars (*i.e.* avec des dates de mise en place moins variables), une comparaison entre les deux périodes a été effectuée. Premièrement, les dynamiques d'apparition des cabanes ont été observées et des matrices de corrélation ont ensuite permis de réaliser des comparaisons plus fines.

13.1 Dynamique d'évolution des indicateurs liés aux vers de terre

La Figure 24 représente la dynamique d'apparition des cabanes à VDT au cours de deux périodes différentes d'expérimentation. La Figure 24a représente les mesures réalisées sur des paniers à VDT implantés à l'automne 2021 (analysés par J. Dumont de Chassart et G. Dehaye), tandis que la Figure 24b représente les mesures « printemps 2022 » réalisées sur les paniers implantés au début du mois de mars (analysés dans ce mémoire). Ces deux expériences ont été mises en place durant respectivement quatre et six mois sur les mêmes parcelles. Les points sur une même droite (Figure 24) représentent les observations mensuelles des cabanes, desquelles résultent les indicateurs.

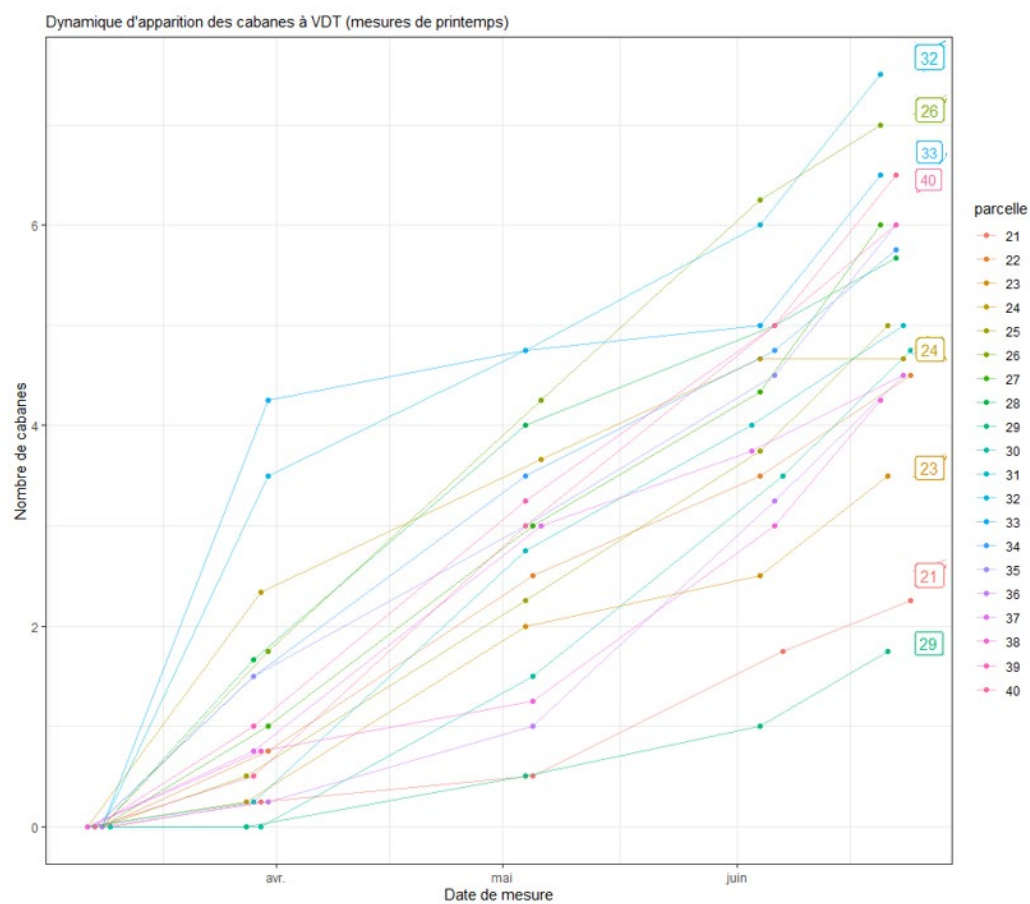
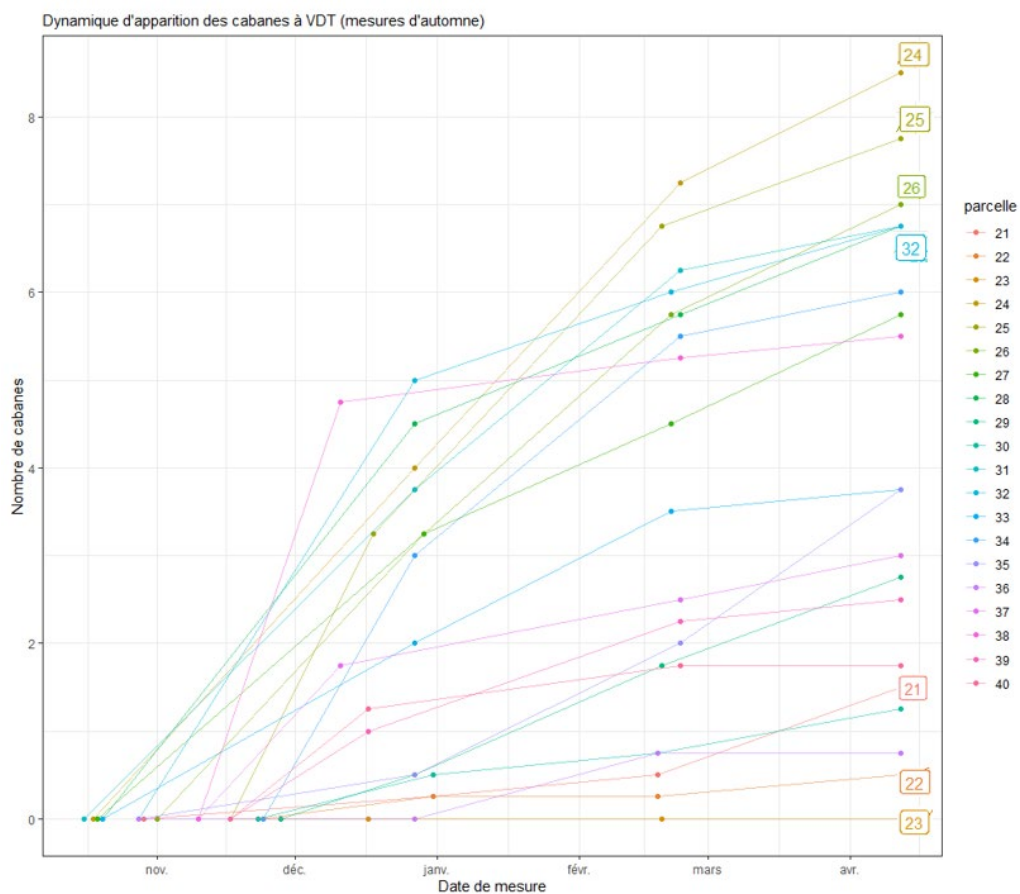


Figure 24 a (haut) et b (bas) : Dynamique d'apparition des cabanes à VDT entre le début et la fin de l'expérience par parcelle, avec mise en place des paniers à VDT (a) en automne et (b) au printemps.

Les mesures d'automne 2021 (Figure 24a) et de printemps 2022 (Figure 24b) présentent une répartition assez semblable des parcelles en fonction du nombre de cabanes observées. Dans l'ensemble, les parcelles ayant eu un faible taux d'incorporation sont globalement les mêmes, quelle que soit la saison (et inversement) bien que les parcelles situées aux valeurs extrêmes changent légèrement d'une saison à l'autre.

La pente globale pour l'ensemble des parcelles est positive et a été calculée comme étant plus faible pour les mesures d'automne que pour les mesures de printemps (Figure 24). Sur la Figure 24a, les mois durant lesquels il semble y avoir eu le plus d'activité des VDT sont les mois de novembre et décembre, qui comportent les pentes les plus élevées pour la majorité des droites. Pour les mesures de printemps, les pentes les plus élevées se situent au mois de juin (à la fin de l'expérience). Ceci est en accord avec les conditions environnementales optimales des VDT décrites à la section 3.4.1.3. Les conditions environnementales par mois durant les neuf mois d'expérience (octobre à juin) se trouvent à l'Annexe 23. La parcelle 24 semble néanmoins avoir atteint un plateau à partir du mois de juin et montre une surface de paille incorporée très élevée (Annexe 21).

13.2 Date de semis et pratiques culturales

Sur base des expériences liées aux VDT de l'année 2020-2021, une réflexion a été faite l'année passée concernant la confusion qu'il pouvait y avoir entre l'influence de la date de semis et celle des PC. En effet, si des PC similaires sont appliquées sur des champs ayant été semés à des dates proches, les effets « date de semis » et « PC » sont confondus. Par exemple, si toutes les parcelles labourées ont été semées à une certaine période, tandis que les autres parcelles en TCS ont été semées à une autre période, il pourrait y avoir un lien entre le SE d'incorporation de la litière végétale par les VDT et la date de semis, mais l'effet de cette

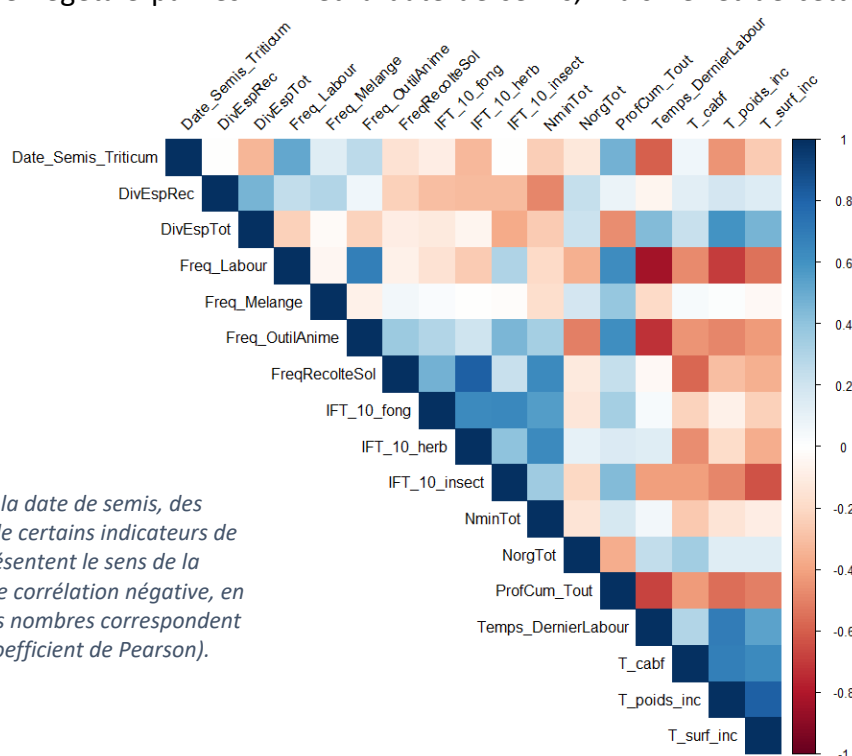


Figure 25 : Corrélogramme de la date de semis, des indicateurs de SE liés aux VDT et de certains indicateurs de PC. Les couleurs utilisées représentent le sens de la corrélation : en rouge il s'agit d'une corrélation négative, en bleu d'une corrélation positive. Les nombres correspondent au coefficient de corrélation (coefficient de Pearson).

dernière serait confondu avec l'effet de la PC « fréquence de labour ». Dans les résultats de l'année passée, aucune PC n'était corrélée significativement à la date de semis (Annexe 24). Afin de vérifier dans quelle mesure cette réflexion est toujours valable pour la suite de l'analyse (section 13.3), un corrélogramme a été réalisé afin de vérifier l'influence de la date de semis sur les PC pour l'année 2021-2022.

L'indicateur « Date_Semis_Triticum » représente le nombre de jours écoulés entre le 1er octobre 2021 et la date de semis du froment par l'agriculteur. Sur la Figure 25, la date de semis semble fortement corrélée au temps auquel remonte le dernier labour ainsi qu'à la fréquence de labour et à la profondeur cumulée totale des opérations de travail du sol. L'effet de la date de semis sur l'échantillon de parcelles de l'année 2021-2022 est donc confondu avec l'effet de ces PC pour interpréter les différences entre indicateurs de SE liés aux VDT.

13.3 Date de semis et indicateurs de services écosystémiques liés aux vers de terre

La Figure 26 présente les corrélations entre les indicateurs de SE liés aux VDT et le caractère tardif du semis. Pour réaliser ces corrélogrammes, deux parcelles ont été supprimées car les paniers des mesures d'automne ont été mis en place trop longtemps après le semis.

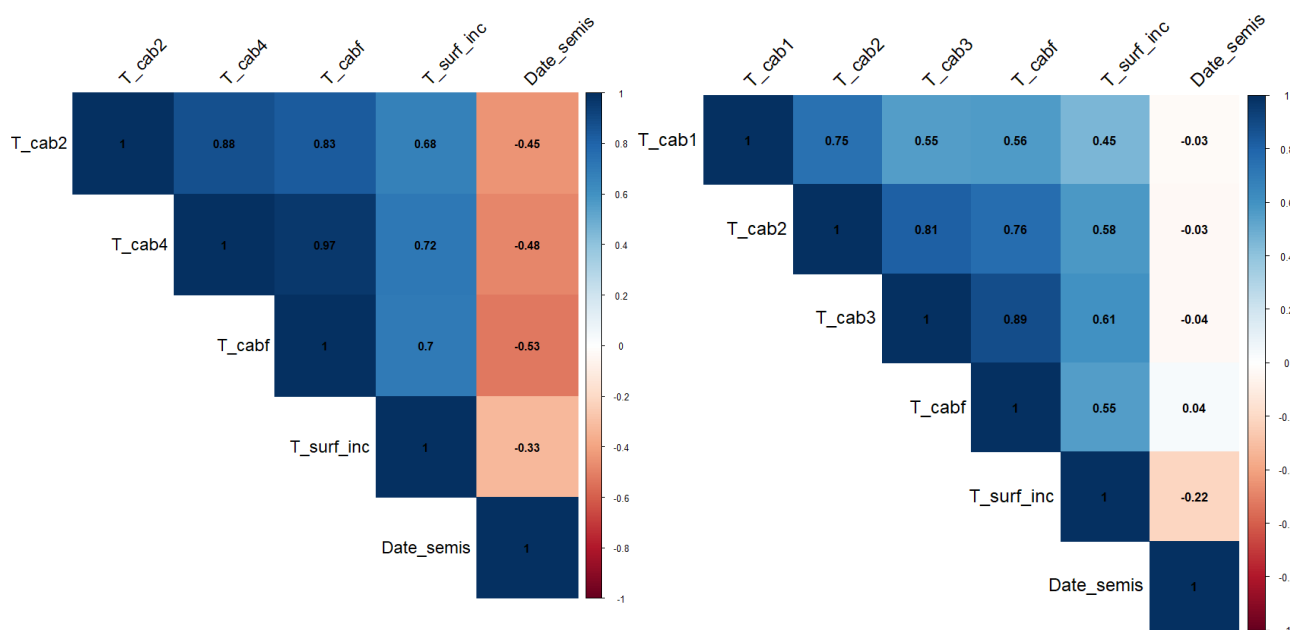


Figure 26 a (gauche) et b (droite) : Corrélogramme des indicateurs de VDT et de la date de semis du froment pour (a) les mesures d'automne 2021 et (b) les mesures de printemps 2022. Les couleurs utilisées représentent le sens de la corrélation : en rouge il s'agit d'une corrélation négative, en bleu d'une corrélation positive. Les nombres correspondent au coefficient de corrélation (coefficient de Pearson).

Pour des raisons pratiques permettant la comparaison entre les deux jeux de données, l'indicateur « T_poids_inc », représentant le taux de masse de paille ayant été incorporée par les VDT, n'a pas été représenté ici car cet indicateur a été surestimé lors des mesures d'automne (la paille n'ayant pas été lavée en fin d'expérience, la mesure de la masse de paille comprend également les morceaux de terre (Dumont de Chassart et Dehay 2022)).

L'information principale ressortant de ces deux corrélogrammes est que le nombre de cabanes à VDT n'est pas corrélé de la même manière à la date de semis en fonction de la saison. Pour les mesures d'automne (Figure 26a), la date de semis est moyennement corrélée négativement à ces indicateurs, ce qui signifie que l'activité des VDT diminue lorsque le caractère tardif de la date de semis augmente. Pour cette même période, la corrélation avec l'indicateur de taux de surface de paille incorporée est faible. Pour la période printemps 2022 (Figure 26b), la date de semis n'est pas du tout corrélée aux indicateurs de cabanes à VDT et est très faiblement corrélée négativement au taux de surface de paille incorporée.

Deux régressions linéaires ont été réalisées pour visualiser graphiquement les corrélations entre la date de semis et les indicateurs de VDT en fonction de la saison (Figure 27). Les deux graphiques présentent l'influence de la date de semis et de la saison sur respectivement l'indicateur du nombre de cabanes cumulées à la fin et l'indicateur du taux de surface de paille incorporée. Ces résultats sont cohérents avec le corrélogramme de la Figure 26. Le faible coefficient de détermination indique que la date de semis exerce une faible influence (du moins linéaire) sur ces deux indicateurs, en particulier pour les mesures de printemps (pente très faible et $R^2_{\text{printemps}} < R^2_{\text{automne}}$).

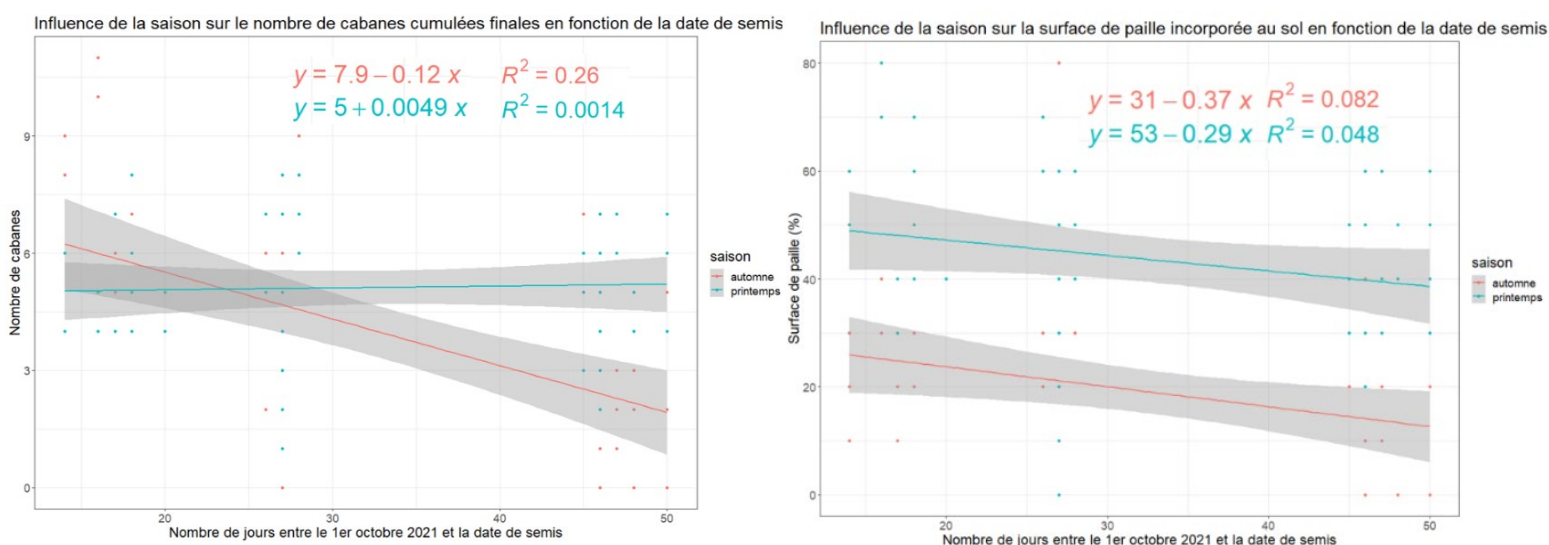


Figure 27 a (gauche) et b (droite) : Droites de régression des indicateurs de (a) nombre de cabanes cumulées à la fin et (b) taux de surface de paille incorporée au sol en fonction de la date de semis pour les deux périodes de mesure. Les mesures de printemps sont colorées en bleu, les mesures d'automne sont colorées en rouge. La surface grisée représente l'intervalle de confiance à 95%.

Discussion

14 Introduction

Les résultats obtenus pour les indicateurs de SE sont tout d'abord commentés et comparés avec des expériences similaires. Cette partie a pour objectif de critiquer les protocoles utilisés et de commenter les différences ou ressemblances entre les résultats obtenus dans ce mémoire et les valeurs obtenues lors des deux premières années d'expériences de la thèse ainsi que dans la littérature. Ensuite, les corrélations entre SE et entre SE et PC sont analysées sur base des matrices de corrélation et ACP présentées à la section Résultats. Des hypothèses de liens de cause à effet sont proposées afin d'expliquer certaines de ces corrélations. Enfin, une réflexion concernant l'influence de la date de semis sur les résultats des indicateurs de SE liés à l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT sera apportée.

Les corrélations entre PC ne sont que très peu analysées dans ce travail, qui s'intéresse davantage à caractériser les SE et les liens entre SE et PC.

15 Indicateurs de services écosystémiques et de carbone organique

Cette partie étudie les liens entre les résultats obtenus et d'autres résultats provenant d'expériences similaires au niveau du protocole et de la région étudiée. La comparaison se fait majoritairement avec les résultats obtenus l'année 2020-2021 par L. Leveau (« printemps 2021 ») et lors du mémoire de A. Fockedey et X. Belin (« automne 2020 »), ainsi qu'avec les résultats de l'année 2021-2022 lors du mémoire de J. Dumont de Chassart et G. Dehaye (« automne 2021 »). Les résultats d'automne 2021 sont obtenus sur les mêmes parcelles que celles étudiées dans ce mémoire.

L'analyse ANOVA du Tableau 10 (section 11.4) a permis de montrer que les indicateurs de taux de masse de paille incorporée, de rendement en grain, de rendement en paille et du ratio $C_{org}/argile$ minéralogique permettent de différencier significativement au moins une parcelle par rapport à une autre. Le protocole utilisé pour réaliser ces expériences est donc bien adapté à cette étude. En revanche, les moyennes par champ pour les indicateurs de décomposition et de stabilisation de la MOS ne permettent pas de distinguer les champs entre eux. Ce commentaire sera approfondi dans la section 15.2.

15.1 Incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre

Le protocole de l'OPVT utilisé pour les expériences réalisées dans ce mémoire est un protocole destiné à l'origine aux particuliers. La thèse de L. Leveau est la première étude scientifique à utiliser ce protocole à plus large échelle. Par conséquent, les données provenant des deux mémoires réalisés précédemment (Dumont de Chassart et Dehaye 2022; Belin et Fockedey 2021) sont les seules données comparables existantes. Ceci est d'autant plus vrai que les

indicateurs mesurés (nombre de cabanes cumulées à la fin, taux de surface et de masse de paille incorporée) sont des variables spécifiques au protocole de l'OPVT.

Tableau 13 : Comparaison des valeurs moyennes et des écarts-types totaux pour les trois indicateurs qui mesurent l'activité d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT pour les trois campagnes de mesures réalisées jusqu'à présent dans la thèse de L. Leveau.

Indicateur	Données automne 2020	Données automne 2021 ³⁰	Données printemps 2022
Nombre de cabanes cumulées à la fin par mois (T_cabf/mois)	Moyenne = 1,8	Moyenne = 0,7	Moyenne = 1,3
	Écart-type = 1	Écart-type = 0,5	Écart-type = 0,43
Taux de la masse de paille incorporée à la fin par mois (T_poids_inc/mois)	Moyenne = 4,5%	/	Moyenne = 10,4%
	Écart-type = 3,3%	/	Écart-type = 2,8%
Taux de surface de paille incorporée à la fin par mois (T_surf_inc/mois)	Moyenne = 5,8%	Moyenne = 3,4%	Moyenne = 11%
	Écart-type = 3,8%	Écart-type = 2,8%	Écart-type = 4,3%

Le Tableau 13 présente les valeurs mises à même échelle temporelle³¹ obtenues lors des trois campagnes de mesure réalisées jusqu'à présent pour les indicateurs liés aux VDT. Globalement, on observe une distinction entre les indicateurs de nombre de cabanes cumulées à la fin, et les indicateurs de taux de surface et de masse de paille incorporée. Les mesures d'automne 2020 présentent un nombre moyen de cabanes plus élevé que les mesures d'automne 2021 et de printemps 2022. En revanche, dans le cas des indicateurs de taux de surface et masse de paille incorporée, les valeurs obtenues sont plus élevées pour la campagne de mesure de printemps 2022 par rapport aux deux autres campagnes de mesure. Les moyennes et les écarts-types restent globalement dans la même gamme de valeurs, ce qui montre que les résultats sont cohérents entre eux.

Les différences de valeurs observées pour un même indicateur entre ces trois campagnes de mesure peuvent s'expliquer principalement par

- Les parcelles différentes entre les campagnes automne 2020 et les campagnes automne 2021/printemps 2022, sur lesquelles sont appliquées des PC différentes ;
- La saison d'expérimentation et les conditions environnementales différentes d'une année à l'autre ;

³⁰ La paille n'ayant pas été lavée en fin d'expérience, la mesure de la masse de paille comprend les morceaux de terre ce qui induit une surestimation des données mesurées. Ces dernières ne sont donc pas prises en compte.

³¹ La mise à échelle a consisté à diviser les données obtenues par le nombre de mois d'expérimentation (6-6-4 mois pour les données de respectivement 2020-2021-2022). Cette méthode, peu rigoureuse étant donné les dates variables de mise en place de l'expérience (dépendantes de la date de semis) pour les expériences installées en automne, est néanmoins utile pour comparer les valeurs entre elles.

- Le biais dû à l'expérimentateur, malgré le suivi de la définition précise d'une cabane à VDT par Belin et Fockedey (2021) (Annexe 7).

Sur base de ce dernier point, le seul indicateur pour lequel le biais de l'expérimentateur est évité est celui évaluant le taux de masse de paille incorporée. Pour cette raison, cette mesure, non incluse dans le protocole original de l'OPVT, constitue l'indicateur le plus fiable, car objectif, parmi les trois indicateurs.

Les comparaisons réalisées au Tableau 13 montrent l'indicateur de cabanes cumulées à la fin de l'expérience semble suivre une dynamique différente des deux autres indicateurs. Deux causes peuvent expliquer cela. La première est que l'indicateur de cabanes, bien qu'il soit fortement corrélé positivement aux deux indicateurs de taux de paille incorporée, ne donne pas exactement la même information d'activité d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT par rapport aux deux autres indicateurs. La seconde cause provient du fait qu'il s'agit de la mesure la plus subjective parmi les trois. Une hypothèse concernant la différence observée entre ces deux catégories d'indicateurs (T_cab d'un côté, T_surf_inc et T_poids_inc de l'autre) serait que les indicateurs de nombre de cabanes sont uniquement liés à l'activité des VDT, contrairement à la paille de surface qui peut être soit incorporée par les VDT, soit décomposée par les microorganismes du sol.

Le taux de masse de paille incorporée est plus élevé durant les mois de mars à juin, par comparaison aux mois de novembre à mai. Ceci est en accord avec les conditions météorologiques optimales pour les VDT au printemps (Annexe 23). En effet, les moyennes des températures pour les mois d'expérience de printemps 2022 et d'automne 2021 sont de respectivement 12,8°C et 6,9°C. L'activité des VDT est élevée lorsque les températures se situent entre 10°C et 20°C (Curry 2004; Lavelle et Spain 2001). L'indicateur du taux de surface de paille incorporée suit cette même tendance et a été calculé sur base d'une aide visuelle (Annexe 9) ce qui ajoute de la fiabilité à cette observation.

La réflexion finale apportée par les deux mémoires précédents (Belin et Fockedey 2021; Dumont de Chassart et Dehay 2022) concernant les indicateurs liés aux VDT était que, parmi les trois indicateurs d'incorporation de la litière végétale, seul l'indicateur T_poids_inc pouvait être conservé pour de futures mesures car l'information apportée était similaire entre les deux indicateurs (T_poids_inc et T_surf_inc corrélés à environ 80% avec T_cabf) et qu'il s'agit de la mesure la moins chronophage. Les mesures effectuées dans ce mémoire amènent à nuancer cette réflexion. La suppression des deux catégories d'indicateurs (nombre de cabanes et taux de paille incorporée) peut amener à une perte d'information car la corrélation observée dans les mesures de ce mémoire entre ces indicateurs était plus faible (environ 65%) et la dynamique différente (Tableau 13). La forte corrélation positive entre les indicateurs de taux de masse et de surface de paille incorporée (Figure 20) permet cependant de conclure qu'un seul parmi ces deux indicateurs est suffisant dans une optique d'optimisation du protocole pour des mesures scientifiques mesurant un grand nombre de paniers à VDT. L'indicateur

T_poids_inc est préféré à l'indicateur T_surf_inc car (1) il s'agit de la mesure la moins chronophage, (2) l'indicateur T_surf_inc ne tient compte que de la surface de la paille (et pas du volume), ce qui peut induire des erreurs dans les comparaisons entre paniers et (3) il s'agit d'une mesure visuelle ce qui peut également induire un biais entre les différents expérimentateurs chaque année. Étant donné les différences de conclusions entre les mémoires précédents et celui-ci, ces observations nécessiteront une mesure supplémentaire pour la période d'expérimentation 2022-2023 pour pouvoir être mieux interprétées.

La Figure 24 de la section 13.1 montre la dynamique d'apparition des cabanes à VDT en fonction des parcelles et de la campagne de mesure. Plusieurs commentaires peuvent être faits au sujet du protocole en observant cette figure. Premièrement, pour les deux périodes d'expérimentation (automne 2021 et printemps 2022), les pentes des droites sont encore élevées à la fin de l'expérience. L'absence majoritaire d'un plateau à la fin de l'expérience montre que le taux de paille à la surface du sol est suffisant pour construire des cabanes supplémentaires. Sur base de cet indicateur, la durée de l'expérience des paniers à VDT est donc correcte. La figure de la dynamique de surface de paille incorporée (Annexe 21) montre cependant un léger plateau sur le dernier intervalle de mesure. Cet intervalle étant inférieur à un mois, il est cependant difficile d'interpréter ce plateau sur base de l'activité des VDT, d'autant qu'il s'agit d'une évaluation visuelle. Ensuite, la fréquence des mesures (mensuelle) semble également être optimale puisqu'une évolution est observée à chaque passage en sachant que les cabanes mettent un certain temps à se former ou à disparaître. Cette réflexion, initiée lors du mémoire de Belin et Fockedey (2021), est importante dans un objectif d'optimisation du protocole OPVT original pour des recherches scientifiques avec un grand nombre de paniers à VDT, puisque le protocole original conseille de réaliser des observations tous les 15 jours, ce qui est très chronophage. Finalement, une manière d'améliorer le protocole de l'OPVT pour les mesures visuelles (nombre de cabanes et taux de surface de paille) serait l'utilisation d'un logiciel d'analyse d'images permettant d'évaluer la surface de paille restante dans un panier à partir d'une photo. Des recherches sont en cours à ce sujet par Rongione (2022) à l'UCLouvain dans le but de se défaire du biais dû à l'expérimentateur. Ce biais inévitable sera à prendre en compte à la fin des trois années d'expérimentation de la thèse de L. Leveau lors de l'assemblage de toutes les données. L'utilisation seule de l'indicateur du taux de masse de paille incorporée permettrait d'éviter ce biais.

15.2 Décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes

Pour les indicateurs liés à la décomposition de la MOS par les microorganismes, les valeurs obtenues au cours de ce travail sont comparées avec celles obtenues l'année passée par L. Leveau sur les parcelles de l'échantillon 2020-2021 de la thèse ainsi qu'avec les valeurs de 2020 du CRA-W dans des parcelles agricoles aux multiples PC en Wallonie. Les périodes de mesure sont les mêmes pour les trois campagnes (mars – juin).

Tableau 14 : Comparaison des valeurs moyennes et des écarts-types totaux pour les indicateurs de taux de décomposition et de stabilisation de la MOS entre deux campagnes de mesures (2021 et 2022, mesures prises dans le cadre de la thèse de L. Leveau). Concernant les valeurs provenant du CRA-W, seules les données minimum et maximum ont pu être obtenues.

Indicateur	Données printemps 2021	Données printemps 2022	Données CRA-W 2020 ³²
Taux de décomposition de la MOS par les microorganismes (D_k)	Moyenne = 0,02	Moyenne = 0,019	Minimum = 0,016
	Écart-type = 0,02	Écart-type = 0,005	Maximum = 0,022
Taux de stabilisation de la MOS labile (D_S)	Moyenne = 0,33	Moyenne = 0,38	Minimum = 0,38
	Écart-type = 0,03	Écart-type = 0,05	Maximum = 0,47

Le Tableau 14 montre que, pour les deux indicateurs D_S et D_k, les gammes de valeurs pour les moyennes, écarts-types, minimum et maximum sont assez similaires entre les différentes mesures. Les légères différences peuvent principalement s'expliquer par :

- Des conditions environnementales changeantes (température, humidité des sols, pH et disponibilité en O₂) qui peuvent varier d'une année et d'un champ à l'autre ;
- Des PC favorisant ou non les activités de décomposition et de stabilisation de la MOS par les microorganismes dans le sol ;
- Une différence de précision dans les mesures des masses de thé initiales et finales (facteur indiqué comme contraignant au protocole TBI par le CRA-W (TRANSAE et Interreg 2021)).

L'analyse ANOVA au Tableau 10 (section 11.4) a montré que la variabilité intra-parcellaire était plus élevée que la variabilité inter-parcellaire pour les indicateurs D_k et D_S et que les moyennes des différentes parcelles ne pouvaient pas être considérées comme différentes. Sur base de cette analyse et du Tableau 14, peu de distinctions peuvent donc être faites concernant les indicateurs TBI dans cette étude entre différentes parcelles et donc entre les PC appliquées dessus. Les résultats des corrélations présentés dans les sections suivantes sont donc à considérer avec un regard critique. La comparaison entre les résultats obtenus sur les trois années de la thèse permettra de valider ou non les corrélations observées.

La conclusion pouvant être tirée de ces comparaisons est que la variabilité spatio-temporelle est assez faible dans les études considérées au Tableau 14. En effet, pour trois mesures ayant eu lieu dans une région proche (Tableau 14), ces indicateurs ne semblent pas se différencier fortement. Cependant, à grande échelle, des différences marquantes sont constatées entre les indicateurs D_S et D_k dans des sols de régions climatiques différentes (Teatime4Science 2016a). L'hypothèse pouvant être émise est que ces indicateurs sont plus influencés par les

³² Les valeurs moyennes et d'écart-type provenant des recherches menées par le CRA-W en 2020 en Wallonie n'ont pas pu être obtenues.

conditions climatiques globales que par les conditions liées aux PC appliquées sur des parcelles dans une même région géographique.

15.3 Prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture

Les données obtenues dans ce mémoire pour le protocole des cartes de prédation sont comparées dans cette section avec les résultats obtenus l'année passée par L. Leveau ainsi qu'avec des résultats mesurés en France (région de Dijon) dans la thèse de Boursault (2012) sur des cultures en froment d'hiver gérées en agriculture conventionnelle.

Tableau 15 : Comparaison des valeurs moyennes et des écarts-types totaux pour l'indicateur du taux de prédation de graines d'adventices entre trois campagnes de mesure. Les deux dernières (2021 et 2022) correspondent à des mesures prises dans le cadre de la thèse de L. Leveau. Les données de 2012 proviennent de l'expérience réalisée par Boursault (2012) dans le cadre de sa thèse (valeur de l'écart-type non disponible).

Indicateur	Données « juillet » de Boursault (2012)	Données printemps 2021	Données printemps 2022
Taux de prédation des graines d'adventices (P_graines)	Moyenne = 40%	Moyenne = 43%	Moyenne = 43%
	/	Écart-type = 32%	Écart-type = 30%

Les valeurs des mesures de 2021 sont très similaires aux valeurs obtenues durant les mesures de 2022, bien que les conditions météorologiques aient été très différentes³³ (Tableau 15). En effet, même en absence de fortes pluies durant le mois de juillet 2022, une disparition des graines très semblable, probablement liée à une activité de prédation, a été observée.

Dans la thèse de Boursault (2012), le protocole des cartes de prédation a été réalisée avec deux différences par rapport au protocole suivi dans ce mémoire : d'une part, les cartes étaient entourées d'une cage pour ne mesurer que l'activité des prédateurs invertébrés, et d'autre part les cartes étaient composées d'un mélange de plusieurs espèces de graines d'adventices différentes (Boursault 2012). Dix sessions d'observation ont été réalisées sur une période de cinq mois (de mai à septembre) pour une durée de sept jours des cartes sur les champs. Dans l'étude de Boursault (2012), la prédation a globalement été plus élevée avant la moisson bien que le taux de prédation soit très dépendant de la période. En effet, l'activité des populations de carabes a été mesurée comme étant la plus élevée aux mois d'avril-mai et aux mois d'août-septembre (Boursault 2012).

Le taux de prédation moyen mesuré par Boursault (2012) au mois de juillet est très proche des taux mesurés dans les mesures 2021 et 2022 de la thèse de L. Leveau. Ainsi, malgré la grande variabilité intra-parcellaire pour cet indicateur dans le présent mémoire (ce qui était déjà le cas l'année passée), les taux moyens semblent relativement constants d'une expérience à l'autre. Aucune conclusion concernant les comparaisons de moyennes ne peut

³³ Des pluies intenses ont eu lieu durant les mesures de 2021. Ces conditions avaient été supposées comme ayant eu un impact sur les données étant donné la dispersion potentielle des graines par des gouttes de pluie.

néanmoins être réalisée à ce stade en raison de la trop grande variabilité intra-parcellaire. Dans l'étude de Boursault (2012), peu de variabilité spatiale (inter- et intra-champs) a été observée bien que la distribution spatiale hétérogène des carabes et des graines d'adventices laissait supposer un taux de prédation hétérogène. La dynamique de prédation stable dans l'espace a été supposée comme étant le résultat d'un effet tampon de l'action conjointe de plusieurs espèces de prédateurs (Boursault 2012). La variabilité temporelle était quant à elle très élevée sur la période des cinq mois d'étude de la thèse de Boursault (2012). Cette variabilité élevée est expliquée par, notamment, une réponse à la phénologie de la culture et à la saison d'activité des prédateurs.

Il pourrait être intéressant, à l'avenir, de tester si la mise en place de cartes de prédation composées d'une diversité d'espèces d'adventices dont chacune est spécifiquement prédatée par une ou plusieurs espèces de prédateurs (tel que réalisé dans la thèse de Boursault (2012)) permet de réduire la variabilité intra-champ par rapport à l'utilisation d'une unique espèce d'adventice (tel que réalisé dans ce mémoire). Si cette hypothèse est confirmée, elle pourrait constituer une piste très intéressante d'amélioration de ce protocole.

15.4 Production végétale

Les valeurs de rendement qui ont été obtenues au cours de cette étude sont comparées avec les rendements en paille et en grain mesurés en 2021 par L. Leveau dans le cadre de sa thèse ainsi qu'avec les valeurs moyennes de rendement en grain obtenu en Belgique en 2022 (ces dernières ne sont pas reprises dans le Tableau 16) (FEGRA 2022).

Tableau 16 : Comparaison des valeurs moyennes et des écarts-types totaux pour les indicateurs de rendement en grain et de rendement en paille entre les deux campagnes de mesures réalisées jusqu'à présent dans le cadre de la thèse de L. Leveau.

Indicateur	Données printemps 2021	Données printemps 2022
Rendement en grain (R_grain)	Moyenne = 8 t/ha	Moyenne = 9,1 t/ha
	Écart-type = 1,76 t/ha	Écart-type = 2,6 t/ha
Rendement en paille (R_paille)	Moyenne = 10,2 t/ha	Moyenne = 9,2 t/ha
	Écart-type = 1,74 t/ha	Écart-type = 1,9 t/ha

En Belgique, les rendements en grain moyens obtenus en 2022 pour le froment d'hiver sont de l'ordre de 9,6 t/ha, ce qui est particulièrement élevé (FEGRA 2022). Cette valeur est due aux conditions météorologiques très chaudes et ensoleillées de l'été 2022. Ces conditions étant favorables à la croissance et maturation du froment, les rendements en grain en froment d'hiver ont augmenté d'environ 15% par rapport à l'année 2021 (rendement belge moyen assez faible, de l'ordre de 8,08 t/ha³⁴ (StatBel 2021; FEGRA 2022)). Il est cependant important

³⁴ Cette faible valeur n'est pas étonnante en raison des pluies intenses qui ont eu lieu en 2021.

de noter que les valeurs moyennes obtenues dans ce mémoire prennent en compte de nombreux modèles agricoles en proportions similaires, contrairement aux moyennes belges dont les proportions sont bien différentes³⁵.

Sur base du Tableau 16, la moyenne du rendement en grain de l'année 2021 est inférieure à celle de l'année 2022, ce qui est en accord avec les conditions météorologiques observées. Le rendement en paille était quant à lui plus élevé dans les mesures de 2021.

15.5 Indicateurs de carbone organique

Tableau 17 : Comparaison des valeurs moyennes et des écarts-types totaux pour les indicateurs de teneur en C_{org} et du ratio C_{org} /argile granulométrique pour les deux campagnes de mesure réalisées jusqu'à présent dans le cadre de la thèse de L. Leveau.

Indicateur	Données printemps 2021 ³⁶	Données printemps 2022
Taux de C_{org}	Moyenne = 1,22%	Moyenne = 1,1%
	Écart-type = 0,19%	Écart-type = 0,23%
Rapport C_{org}/argile granulométrique	/	Moyenne = 0,072
	/	Écart-type = 0,008

La valeur moyenne du taux de C_{org} dans les sols en région limoneuse et sablo-limoneuse en 2017 était de respectivement 1,19% et 1,14% (SPW 2017). Sur base du Tableau 17, la valeur moyenne obtenue dans les mesures de printemps 2021 est légèrement inférieure à ces valeurs, tandis que la mesure de printemps 2022 en est très proche. Pour rappel, en deçà de 2% de C_{org} , les agrégats sont considérés comme instables avec des risques d'érosion (Calvet, Chenu, et Houot 2015). Le taux de C_{org} dans les sols semble être relativement stable entre les campagnes de mesure. Les différences peuvent être expliquées par les caractéristiques des sols, notamment le taux d'argile granulométrique, ou encore par les PC appliquées (fertilisation, travail du sol, etc.) qui peuvent varier d'une année à l'autre en fonction des conditions environnementales.

Peu d'informations sont disponibles quant au taux d'argile granulométrique moyen ou au rapport C_{org} /argile granulométrique mesuré dans les sols agricoles wallons. L'étude de Zhou *et al.* (2022) montre que ce taux diminue selon un gradient allant du sud au nord de la Wallonie. La même observation est mesurée concernant la teneur moyenne de C_{org} . L'étude de Chartin *et al.* (2017) montre que ce taux d'argile granulométrique varie entre 0 et 20% dans les régions limoneuses et sablo-limoneuses de Wallonie, ce qui est en accord avec les valeurs mesurées (entre 10 et 23%, section 11.3). Sur base de la Figure 19 de la section 11.3.2, tous les

³⁵ En 2015, l'agriculture conventionnelle (raisonnée et intensive) représentait 88% sur l'ensemble des modes de production de la filière des céréales wallonnes (SYTRA 2019).

³⁶ Ces données n'ont été obtenues que sur base d'un échantillon par champ (aucune répétition), contrairement aux données printemps 2022 obtenues sur base de quatre échantillons par champ. La teneur en argile granulométrique n'a pas été mesurée sur ces échantillons de sol en 2021.

sols ont une structure pauvre ou sujette à amélioration, ce qui est en accord avec les résultats inférieurs à 2% de la teneur en C_{org} des sols mesurés.

16 Analyses multivariées

16.1 Indicateurs de services écosystémiques et de carbone organique

16.1.1 Matrice de corrélation

Les corrélations entre SE sont analysées principalement sur base de la matrice de corrélation reprenant les 13 indicateurs de SE (Figure 20, section 12.1.1) mais également sur base de l'ACP_SE utilisée pour réaliser la HCPC_SE (Figure 21, section 12.1.2).

D'une manière générale, tous les **indicateurs liés à l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT** sont corrélés positivement entre eux, ce qui est confirmé visuellement sur l'ACP_SE. Le coefficient de corrélation entre le taux de masse de paille incorporée est de 0,69 avec l'indicateur du nombre de cabanes cumulées à la fin de l'expérience et de 0,82 avec l'indicateur du taux de surface de paille incorporée. Ces corrélations élevées confirment la critique des indicateurs du protocole OPVT réalisée à la section 15.1, à savoir que seuls les indicateurs de taux de masse de paille incorporée et de nombre de cabanes cumulées à la fin peuvent être conservés à l'avenir. Étant donné que T_cabf est une mesure cumulative, les passages mensuels en champs sont tout de même nécessaires pour réaliser cette mesure.

La quantité de paille disparue pour une autre cause que les VDT est négligeable : les mailles écartées de 1 cm limitent le passage des plus gros animaux et l'effet du vent est également faible étant donné que la paille a été humidifiée lors de son installation. De plus, la matrice de corrélation montre une corrélation positive entre le nombre de cabanes cumulées à la fin (uniquement influencé par les VDT) et le taux d'incorporation de la paille.

Les indicateurs de décomposition de la MOS (D_k et D_S) sont faiblement corrélés entre eux (coef. de corrélation : 0,39) et sont peu ou pas corrélés au reste des indicateurs. On observe cependant une corrélation moyenne négative entre le taux de décomposition de la MOS et le nombre de cabanes cumulées à la fin de l'expérience. Une hypothèse explicative serait la suivante : les parcelles ayant beaucoup de cabanes sont généralement des parcelles sur lesquelles le travail mécanique est faible (Figure 22, section 12.2.1). Un faible travail du sol induit une moindre minéralisation de la MOS (Balesdent, Chenu, et Balabane 2000) ce qui peut être dû à une aération réduite du sol. Ce lien de corrélation entre les indicateurs de nombre de cabanes et de décomposition de la MOS n'a pas été observé l'année passée.

Il est important de noter que le protocole TBI ne représente pas totalement les conditions de décomposition réelles d'une litière végétale : en effet, la litière du protocole n'est accessible qu'aux microorganismes grâce mailles inférieure à 0,25 mm des sachets de thé en polypropylène. Un protocole incluant l'effet des méso- et macro-organismes donnerait peut-être des résultats plus corrélés à l'activité des VDT (section 3.4.2.2).

Les corrélations avec l'**indicateur de prédation des graines** (P_graines) sont assez faibles. Cependant, étant donné que cette prédation possède une très grande variabilité intra-parcellaire, aucune conclusion ne peut être tirée à ce stade.

Les indicateurs de rendement (R_grain et R_paille) sont faiblement corrélés entre eux (coef. de corrélation : 0,21). L'organe qui contribue le plus au poids du grain par translocation (environ 50 à 60%) est le limbe de la dernière feuille (dont le poids en matière sèche est très faible) (Bertin 2021). A l'inverse, les organes qui influencent le plus le rendement en paille tel que le rachis, contribuent moins au remplissage du grain. L'indicateur R_paille montre une corrélation moyenne négative avec le facteur de stabilisation de la MOS (D_S). Ceci signifie que, lorsque qu'une grande quantité de MOS labile se stabilise en MOS stable, le rendement en paille est plus faible. En absence de fertilisation exogène, une hypothèse explicative pourrait être qu'il y a moins de minéralisation lorsque de la MOS est stabilisée et donc moins d'éléments minéraux disponibles pour la croissance des plantes. Ces indicateurs n'ayant pas été étudiés par Belin et Fockede (2021), aucune comparaison concernant cette corrélation ne peut être faite.

Finalement, **les indicateurs relatifs au C_{org}** (C_{org} et Corg_arg) sont fortement corrélés entre eux. Ceci n'est pas étonnant en raison de l'utilisation de la variable C_{org} dans la mesure de l'indicateur Corg_arg. La partie non corrélée entre ces indicateurs provient de la variabilité de la teneur en argile granulométrique dans les sols. La corrélation entre tous les indicateurs T_cab et l'indicateur C_{org} est proche de 0,4. La MOS étant, en moyenne, composée de 58% de C_{org} (Calvet, Chenu, et Houot 2015), une teneur en C_{org} élevée est liée à une teneur en MOS élevée. Cette dernière constitue la principale ressource alimentaire des VDT, ce qui leur est favorable. On note cependant que cette corrélation positive n'existe qu'avec les indicateurs de cabanes, et non avec les indicateurs d'incorporation de la paille ; ceci confirme les observations réalisées à la section 15.1, à savoir que ces deux types d'indicateurs apportent des informations différentes.

16.1.2 Classification hiérarchique sur composantes principales (HCPC_SE)

Sur base de la HCPC_SE (Figure 21, section 12.1.2), trois groupes ont pu être créés sur base des similitudes dans la fourniture en SE entre les différentes parcelles. Le **premier groupe** est caractérisé par un faible nombre de cabanes à VDT et par de faibles taux de surface et de masse de paille incorporée. Si l'on regarde le modèle classique dans lequel se situent les pratiques générales des agriculteurs, toutes ces parcelles sont gérées en agriculture conventionnelle. Un **second groupe** a été créé par la HCPC_SE et comprend des parcelles pour lesquelles le rendement en paille ainsi que les taux de surface et de masse de paille incorporée sont élevés. Le taux de décomposition de la MOS est également élevé dans ce groupe et la prédation des graines d'adventices est plutôt faible. Toutes les parcelles appartenant à ce groupe sont des parcelles gérées en agriculture de conservation (et parfois en agriculture biologique en plus) sauf la parcelle 31 qui est gérée selon un modèle conventionnel et élevage.

Finalement, le **troisième groupe** est caractérisé par des valeurs faibles pour les indicateurs de taux de décomposition de la MOS, de rendement en paille et de nombre de cabanes, ainsi que par une prédation de graines d'adventices élevée, bien que ce dernier soit très variable entre les parcelles. Parmi les dix parcelles présentes dans ce groupe, quatre sont gérées en agriculture biologique (dont une également en agriculture de conservation), quatre autres sont gérées en TCS, une est gérée en agriculture de conservation et la dernière est en conventionnel élevage.

Les deux premiers groupes sont relativement homogènes en termes de modèle agricole utilisé par l'agriculteur. Ceci montre que la fourniture en SE est un bon indicateur des PC appliquées au sein d'une parcelle. Les parcelles gérées en agriculture de conservation possèdent une fourniture élevée en SE liés à l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT, à la décomposition de la MOS par les microorganismes et au rendement en paille de la culture. Les parcelles gérées en agriculture conventionnelle sont, au contraire, caractérisées par une faible fourniture en SE, en particulier ceux liés à l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT. A ce stade, aucun lien de cause à effet ne peut être établi car il ne s'agit que de statistiques descriptives.

16.2 Tous les indicateurs

16.2.1 Matrice de corrélation

La Figure 22 de la section 12.2.1 présente les liens de corrélation entre les indicateurs de SE d'une part et les indicateurs de PC d'autre part. La date de semis de la céréale d'hiver présente sur le champ d'étude a également été ajoutée à ce corrélogramme bien qu'elle ne constitue pas une PC puisqu'elle est ne relève pas entièrement de la volonté de l'agriculteur. Les semis d'automne dépendent majoritairement des conditions météorologiques et de la période de récolte de la culture précédente. Etant donné le grand nombre de PC étudiées, seules les corrélations principales ($|r| > 0,45$) sont discutées.

Concernant **les indicateurs liés à l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT** (T_{cab} , T_{surf_inc} et T_{poids_inc}), ils sont globalement corrélés négativement au travail du sol ainsi qu'aux IFT en herbicides et insecticides et sont corrélés positivement avec la part de temps de mulch sur l'itinéraire cultural. La perturbation du sol, en particulier à l'automne qui est une saison propice à l'activité des VDT, risque de les blesser et de détruire leur habitat et leurs sources de nourriture (Bertrand *et al.* 2015; Boström 1995), ce qui constitue une hypothèse explicative à ces corrélations. De plus, la toxicité des pesticides pour les VDT a déjà été prouvée (Pelosi *et al.* 2014), ce qui peut également constituer une hypothèse explicative. Finalement, la relation entre l'incorporation de la litière végétale dans le sol et la part de temps de mulch élevé sur l'itinéraire cultural sur la parcelle n'est pas étonnante étant donné que la litière végétale constitue la source de nourriture des VDT anéciques.

Pour les résultats des **indicateurs liés à la décomposition de la MOS par les microorganismes** (D_S et D_k), le facteur de stabilisation de la MOS est moyennement corrélé négativement au

nombre de variétés récoltées présentes par saison culturale et par surface cultivée. L'indicateur de décomposition de la MOS est quant à lui moyennement corrélé positivement à l'IFT en produits régulateurs de croissance et moyennement corrélé négativement à la diversité des espèces récoltées. Cependant, étant donné la faible distinction des moyennes de ces indicateurs entre les différentes parcelles étudiées (section 11.4), ces corrélations sont peu interprétables.

L'indicateur de prédation de graines d'adventices (P_graines) ne possède pas de corrélation forte avec les indicateurs de PC sélectionnés. Les corrélations moyennes sont difficiles à interpréter étant donné la grande variabilité au sein d'une même parcelle pour cet indicateur. Une amélioration du protocole actuel pourrait permettre de confirmer ou non les corrélations observées.

Au niveau des indicateurs de production végétale (R_grain et R_paille), l'indicateur de rendement en grain est fortement lié à une fertilisation élevée en azote minéral total. Le rendement en grain dépend du poids des grains, du nombre de grains par épi et du nombre d'épis par mètre carré. La biomasse avant floraison (stimulée par une fertilisation azotée) influence fortement le nombre de grains (Hay et Porter 2006). Le poids du grain est quant à lui influencé par les hydrates de carbone à 85% (absorbés après floraison) et les protéines (absorbées avant floraison) remobilisés principalement à partir du limbe de la dernière feuille (Hay et Porter 2006). L'azote (minéral, car directement assimilable par les plantes) est donc un facteur limitant pour le rendement final en grain. L'indicateur de rendement en paille est quant à lui fortement corrélé positivement au nombre de variétés cultivées et récoltées présentes par saison culturale et par surface cultivée et est également fortement corrélé négativement avec la date de semis du froment. Cette date joue un rôle important dans la phénologie du froment car le rythme d'initiation des feuilles et la croissance juvénile est influencée par la température du sol. Le nombre de feuilles finales sera plus faible en semis tardif qu'en semis précoce (la matière sèche finale dépend directement du pourcentage de radiation interceptée (Hay et Porter 2006)), ce qui influence négativement le rendement en paille.

Finalement, les deux **indicateurs relatifs au C_{org}** (C_{org} et C_{org_arg}) sont moyennement corrélés positivement avec la fréquence d'apport en azote organique sur la parcelle. L'indicateur du ratio C_{org}/argile granulométrique est également moyennement corrélé positivement à la fréquence d'apport total en phosphore et en potassium. Ces deux fertilisants contenant également une partie organique, on peut conclure que, globalement, les indicateurs relatifs au C_{org} sont directement liés à la fertilisation organique appliquée sur la parcelle.

16.2.2 Analyse en composantes principales (ACP_SE_PC)

L'ACP_SE_PC (Figure 23, section 12.2.2) présente les corrélations des indicateurs de SE et de PC. Les PC sont ajoutées sur l'ACP en tant que variables illustratives. L'objectif de cette

ACP_SE_PC est de visualiser la façon dont se positionnent les PC dans l'espace maximisant la variabilité entre toutes les parcelles vis-à-vis de leur fourniture en SE. Ceci permet d'interpréter la variabilité de fournitures en SE sur base des PC et de montrer les principales corrélations entre tous les indicateurs mesurés.

Concernant les liens entre les indicateurs de SE et de PC, les indicateurs de fréquence de labour, de profondeur cumulée totale des opérations de travail du sol et d'IFT en insecticides sur le froment sont donc ceux qui sont les plus liés à la variabilité des parcelles vis-à-vis de la fourniture en SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT (dans l'espace maximisant la variabilité entre tous les SE mesurés). Ce SE, et plus particulièrement l'indicateur de taux de masse de paille incorporée, est également corrélé positivement avec la part de temps de mulch sur l'itinéraire cultural sur la parcelle et le temps auquel remonte le dernier labour. Les pratiques les plus corrélées au rendement en paille sont la part de temps de mulch sur l'itinéraire cultural et de dernier labour ainsi que la fréquence de labour, la profondeur cumulée totale des opérations de travail du sol et l'IFT en insecticides. Finalement, l'indicateur de PC expliquant au mieux la variabilité du rendement en grain dans cette ACP_SE_PC est la fertilisation en azote minéral total, ainsi qu'observé dans la matrice de corrélation de la section 16.2.1.

En ce qui concerne les indicateurs de PC, les pratiques citées ci-après sont celles permettant au mieux d'expliquer la variabilité entre tous les indicateurs de SE sur l'ACP_SE_PC. La Figure 23 montre une corrélation positive entre des indicateurs de travail mécanique du sol (fréquence de labour et profondeur cumulée totale des opérations de travail du sol) et l'IFT en insecticides sur les cultures de froment. Ces pratiques sont en effet plutôt caractérisées par des parcelles gérées en agriculture conventionnelle. Ces indicateurs sont généralement corrélés négativement avec la part de temps de mulch sur l'itinéraire cultural de la parcelle et le temps auquel remonte le dernier labour. Ces deux derniers indicateurs caractérisent généralement plutôt des parcelles gérées en agriculture de conservation.

16.2.3 Comparaison avec les données des mémoires précédents

Les tableaux 18 et 19 présentent les comparaisons des principales corrélations entre SE et PC observées durant les différentes années de mesure depuis le début de la thèse de L. Leveau. Le SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol présente des corrélations avec des PC semblables (travail et couverture du sol) dans toutes les campagnes de mesures. Les indicateurs de décomposition et de stabilisation de la MOS ne possèdent pas de corrélation commune entre les campagnes de mesure de printemps 2021 et 2022. Les résultats de ces indicateurs n'étaient pas distincts d'une parcelle à l'autre en 2022. Les indicateurs de rendement, prédation de graines d'adventices et de C_{org} n'ayant pas été étudiés dans les mémoires précédents relatifs à la thèse, ils n'ont pas été ajoutés au tableau.

Les dernières mesures de l'année 2022-2023 permettront de compléter et de confirmer ou non ces observations.

Tableau 18 : Comparaison des principales corrélations entre le SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT et les PC pour les mesures réalisées dans ce mémoire (printemps 2022), les mesures réalisées par Dumont de Chassart et Dehaye (2022) (automne 2021) et les mesures réalisées par Belin et Fockedey (2021) (automne 2020). L'abréviation « corr. » signifie corrélation.

SE	Données printemps 2022	Données automne 2021	Données automne 2020
Incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT	- corr. négative avec les travaux de sol - corr. positive avec la part de temps de mulch sur l'itinéraire cultural - corr. négative avec les IFT en herbicides et insecticides	- corr. positive avec la part de temps de mulch sur l'itinéraire cultural - corr. négative avec les travaux de sol	- corr. positive avec la présence de prairie, culture ou couvert - corr. négative avec les travaux de sol - corr. négative avec l'IFT moyen pour l'ensemble des traitements

Tableau 19 : Comparaison des principales corrélations entre les SE de décomposition de la MOS par les microorganismes et les PC pour les mesures réalisées dans ce mémoire (printemps 2022) et les mesures réalisées par L. Leveau l'année 2020-2021 (printemps 2021). L'abréviation « corr. » signifie corrélation.

SE	Données printemps 2022	Données printemps 2021
Décomposition de la MOS par les microorganismes	- D_S corr. négative au nombre de variétés récoltées présentes par saison culturale et par surface cultivée - D_k corr. négative à diversité des espèces récoltées - D_k corr. positive à l'IFT en produits régulateurs de croissance	- D_k corr. négative avec la récolte de variétés en association - D_k corr. positive à l'apport d'azote minéral maximum

17 Influence de la date de semis

En 2020-2021, les résultats obtenus concernant le SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT montraient des résultats significativement différents entre parcelles ayant des PC différentes (Belin et Fockedey 2021). Cependant, les paniers à VDT ayant été mis en place à des dates très variables (dépendant de la date de semis du froment par l'agriculteur), une réflexion a été initiée concernant l'influence de cette date de semis sur les résultats obtenus par les paniers à VDT du protocole OPVT. Pour vérifier cette influence, un corrélogramme entre les SE et la date de semis a été réalisé pour les mesures de l'année 2020-2021. Il en avait été conclu que cette dernière exerçait bel et bien une influence sur les résultats de fourniture en SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT. Pour mieux interpréter cette information, un second corrélogramme a été réalisé afin de vérifier si la date de semis était également corrélée aux PC, auquel cas il n'aurait pas été possible de quantifier l'influence de la date de semis à elle seule. Dans ce corrélogramme (Annexe 20), il avait été observé que les PC n'étaient pas corrélées à la date de semis.

En 2021-2022, la même expérience a été réalisée à la même période (mise en place juste après le semis) par Dumont de Chassart et Dehaye (2022). Pour vérifier si l'influence de la date de semis est amoindrie si les mesures ont lieu au printemps, lorsque le froment est déjà bien mis en place, une seconde campagne de mesures a été réalisée en mettant les paniers à VDT en place à partir du mois de mars (expérience réalisée dans ce mémoire).

17.1 Dynamique d'évolution des indicateurs liées aux vers de terre

Dans l'ensemble, et pour une même durée des mesures, les parcelles pour lesquelles les indicateurs relatifs à l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT (nombre de cabanes et taux de surface de paille incorporée) sont faibles sont les mêmes pour les périodes de mesures automne 2021 et printemps 2022 (Figure 24, section 13.1 et Annexe 21). Les principaux facteurs de changement sont les conditions météorologiques et la durée de la campagne de mesure puisque les parcelles (ainsi que les PC appliquées dessus) sont identiques.

Les pentes des droites permettent de rendre compte de la période d'activité des VDT la plus élevée sur la durée d'expérimentation. Le mois de juin (dont la pente est la plus élevée pour les mesures de printemps 2022) est le mois le plus chaud et le plus humide sur la période de mesure de printemps (Annexe 23). Les mois de novembre et décembre (dont la pente est la plus élevée pour les mesures d'automne 2021) ont probablement une température du sol relativement élevée par rapport à l'ensemble de la période de mesure puisqu'ils suivent les mois d'été et que les fluctuations dans la température de l'air extérieur sont atténuées dans le sol (Weil et Brady 2014). L'effet de la saison est donc obligatoirement à prendre en compte lorsque des comparaisons de valeurs sont réalisées entre deux périodes de mesures différentes. Cependant, la date de semis peut également avoir eu une influence sur les différences observées entre parcelles.

17.2 Date de semis et pratiques culturales

Dans l'échantillon de parcelles 2021-2022, certaines PC sont corrélées à la date de semis du froment (Figure 26, section 13.2). Les parcelles ayant été semées tôt (par rapport à l'ensemble des dates de semis des parcelles étudiées) ont une faible fréquence de labour, une faible profondeur cumulée totale des opérations de travail du sol et un temps auquel remonte le dernier labour élevé (et inversement). Etant donné ce lien de corrélation, il n'est pas possible de conclure que les différences de corrélation observées entre l'activité des VDT et la date de semis pour les mesures de printemps 2022 (présentées dans ce travail) et les mesures d'automne 2021 (mesurées par J. Dumont de Chassart et G. Dehaye) sont entièrement dues à une différence d'influence de la date de semis sur l'activité d'enfouissement de la litière par les VDT.

L'année 2020-2021, la date de semis avait bien eu une influence sur les indicateurs liés aux VDT (sans corrélation avec les PC) (Annexe 24). Cette observation montre que, bien que l'effet de la date de semis soit confondu avec l'effet des PC pour l'année 2021-2022, il est probable

que cette date de semis exerce encore une influence sur les indicateurs de SE, comme c'était le cas l'année passée. L'influence de la date de semis sur la fourniture en SE peut donc être interprétée (section 17.3) tout en gardant un regard critique sur les résultats étant donné l'influence certaine de quelques PC également. La réalisation d'une comparaison similaire (automne/printemps) pour les mesures de l'année 2022-2023 permettra de confirmer ou non les interprétations réalisées.

17.3 Date de semis et indicateurs de services écosystémiques liés aux vers de terre

Dans le cas des mesures ayant débuté à l'automne 2021, la date de semis est moyennement corrélée négativement aux indicateurs de SE mais cette même corrélation est proche de zéro si l'on regarde les mesures ayant débuté au printemps 2022, en particulier pour les indicateurs de nombre de cabanes à VDT (Figure 26, section 13.3). Deux hypothèses explicatives peuvent être avancées.

Premièrement, au plus les travaux mécaniques du sol pour la préparation du semis ont lieu tard dans l'année (c'est-à-dire lorsque l'activité des VDT est en baisse), au plus cela peut avoir endommagé la taille et la diversité des populations des VDT dans le sol (Bertrand *et al.* 2015). Le froment est une culture peu sensible à la compacité du sol ; le labour n'est donc généralement pas justifié avant l'implantation de cette culture (Livre Blanc Céréales 2017a). La préparation du sol peut se limiter à la couche superficielle du sol après des cultures de betteraves, chicorées, céréales ou maïs ensilage récoltées dans de bonnes conditions. Cependant, des décompactages et/ou labours sont indiqués lorsque, par exemple, des ornières importantes ont été créées lors de la récolte du précédent (Livre Blanc Céréales 2017a). En été 2021, les conditions de récolte de la culture précédant le froment (ce froment étant la culture sur laquelle les SE ont été mesuré dans ce travail) ont souvent été difficiles car le sol n'était pas suffisamment ressuyé, dû aux précipitations intenses à cette période. L'itinéraire des travaux mécaniques réalisés a donc été adapté et un travail du sol plutôt intensif³⁷ a été effectué. Il est donc possible que ce dernier ait eu un impact particulièrement important sur l'activité des VDT durant les premiers mois d'expérience pour les mesures d'automne 2021, contrairement aux mesures de printemps 2022.

Deuxièmement, lorsqu'une culture est mise en place et à partir d'un certain stade de développement, les plantes produisent de la matière organique en surface (feuilles, mortes ou non) et dans le sol (racines et exsudats). Ces matières organiques sont bénéfiques aux populations de VDT puisqu'il s'agit de leur source de nourriture. De plus, à partir du moment où elle a atteint son plein tallage (vers mars-avril), la culture devient couvrante et protège les VDT des prédateurs tels que les oiseaux et permet également de tempérer la température du sol par rapport à la température extérieure. Entre mi-octobre et mi-novembre, période sur

³⁷ Pour l'échantillon 2021-2022, la majorité des agriculteurs ont préparé leur sol avant semis du froment comme suit : charrue – herse – semoir ou cultivateur lourd – herse – semoir ou outil à disques – semoir.

laquelle s'est étalé le semis, la différence de développement entre les plantes de froment peut être assez élevée d'un champ à l'autre et le relargage de matières organiques végétales peut ainsi fortement différer en fonction du champ. Au printemps en revanche, les jeunes plantes de froment ont toutes déjà atteint un certain stade de développement³⁸ et sont susceptible de relarguer de la matière organique en surface ou dans le sol, ce qui est favorable aux VDT. De plus, en couvrant le sol, elles assurent une protection physique aux VDT face aux prédateurs.

L'activité des VDT peut donc être favorisée lorsque les paniers à VDT sont mis en place en sortie d'hiver (par rapport à juste après le semis) à travers deux éléments : l'impact plus faible des travaux du sol sur les populations des VDT, et la protection et source nourriture qu'offrent les plantes déjà partiellement développées aux VDT.

17.4 Conclusion concernant la date de semis

La comparaison des corrélogrammes a permis de confirmer que l'influence de la date de semis est bel et bien plus faible dans les mesures ayant débuté en mars par rapport aux mesures ayant débuté au semis du froment. Cette variation peut être due à des différences dans l'impact du travail du sol précédant le semis sur les VDT, ou au relargage plus ou moins grand de MOS en fonction du stade de développement de la plante. Ces résultats sont cependant à considérer avec un regard critique car une corrélation entre la date de semis et les PC a également été observée. Les différences d'influence observées peuvent donc également être dues à des différences dans l'influence des PC sur les populations de VDT entre le mois de novembre et le mois de mars.

Des résultats supplémentaires sur les mesures de l'année 2022-2023 seront nécessaires pour confirmer que l'influence de la date de semis est plus faible lors d'une mesure débutant en mars par rapport à une mesure débutant en novembre tel que conseillé par le protocole de l'OPVT.

³⁸ Le froment passe généralement l'hiver au stade 3 feuilles, avec tallage faible ou inexistant en fonction de la date de semis (Livre Blanc Céréales 2017b).

Conclusion

Dans ce mémoire, diverses mesures ont été réalisées pour quantifier les fournitures en SE liés aux auxiliaires de culture et à la production végétale dans l'échantillon de parcelles de l'année 2021-2022 de la thèse de L. Leveau. Ces mesures permettent de compléter le jeu de données initié lors du mémoire de Dumont de Chassart et Dehay (2022) et comprenant l'ensemble des indicateurs de SE mesurés dans la deuxième année d'expérimentations de la thèse. A la suite de ces expériences, une réflexion critique à propos des **protocoles** utilisés a été proposée. Les **liens de corrélation entre SE d'une part et entre SE et PC d'autre part** ont ensuite été établis afin de répondre à l'objectif général de la thèse, à savoir la caractérisation des PC qui permettent de remplacer les intrants issus de ressources non renouvelables par des SE. Finalement, une analyse a été réalisée concernant **l'influence de la date de semis** sur les résultats obtenus par le protocole des paniers à VDT de l'OPVT, réflexion initiée lors du mémoire de Belin et Fockede (2021).

Les conclusions concernant les protocoles sont les suivantes.

- Parmi les trois indicateurs du SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT (T_poids_inc, T_surf_inc et T_cabf), seuls T_poids_inc et T_cabf pourraient être conservés pour optimiser le protocole de l'OPVT dans le cas d'études scientifiques utilisant un grand nombre de paniers à VDT. Ces deux indicateurs semblent apporter une information légèrement différente, c'est pourquoi il n'est pas indiqué de conserver uniquement l'indicateur T_poids_inc (comme mentionné dans les mémoires précédents relatifs à la thèse) ;
- Les indicateurs issus du protocole TBI ne semblent pas différencier les fournitures en SE de décomposition de la MOS par les microorganismes en fonction des PC appliquées. Selon les tests statistiques réalisés, les moyennes des deux indicateurs obtenus dans ce protocole sont peu variables entre les parcelles étudiées ;
- Le protocole des cartes de prédation tel qu'utilisé dans ce mémoire ne semble pas être approprié pour différencier la fourniture en SE de prédation de graines d'adventices sur des parcelles aux diverses PC à cause d'une trop grande variabilité intra-parcellaire. Il peut être intéressant de vérifier si la mise en place de cartes de prédation avec différentes espèces de graines d'adventices permet de réduire les variabilités intra-parcelles observées et ainsi d'améliorer le protocole.

Des corrélations entre indicateurs de SE sont principalement observées au sein du SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les VDT. Le nombre de cabanes est moyennement corrélé négativement avec le taux de décomposition de la MOS et l'indicateur de stabilisation de la MOS présente une corrélation négative moyenne avec le rendement en paille. Finalement, l'indicateur de taux de C_{org} possède une corrélation moyenne positive avec

les indicateurs de nombre de cabanes à VDT et avec l'indicateur du rapport C_{org}/argile granulométrique.

Les principales corrélations observées entre SE et PC sont les suivantes.

- Le SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol est corrélé positivement avec la part de temps de mulch sur l'itinéraire cultural et est corrélé négativement avec l'intensité et la fréquence des travaux de sol ainsi qu'avec l'IFT en herbicides et insecticides sur la parcelle ;
- Le SE de production végétale est corrélé positivement avec l'apport en azote minéral total ainsi qu'avec le nombre de variétés récoltées par surface et par saison culturale. Ce SE est corrélé négativement à la date de semis du froment ;
- Les corrélations des PC avec le SE de décomposition de la MOS sont peu pertinentes car les tests statistiques réalisés montrent que ces indicateurs ne permettent pas de différencier les moyennes des parcelles entre elles ;
- Le SE de prédation de graines d'adventices ne présente pas de corrélation élevée avec des PC dans les mesures réalisées cette année.

Les observations relatives au SE d'incorporation de la litière végétale dans le sol sont en accord avec les mesures réalisées lors des deux mémoires précédents. L'ensemble des corrélations devra être comparé avec les mesures de l'année 2022-2023.

Finalement, l'influence de la date de semis sur les résultats obtenus dans les mesures issues du protocole des paniers à VDT de l'OPVT a été mesurée *via* des analyses multivariées. La conclusion de ces analyses est la suivante : bien que les corrélations observées entre la date de semis et les indicateurs liés aux VDT soient plus élevées pour les mesures mises en place à l'automne 2021 par rapport à celles mises en place au printemps 2022, les PC exercent également une influence sur ces résultats car ils sont corrélés à la date de semis. Cependant, étant donné qu'une corrélation négative a été observée l'an passé entre les indicateurs de SE et la date de semis (sans interférence des PC), on peut s'attendre à ce que les différences de corrélations observées cette année entre les deux saisons soient réelles (bien que confondues avec l'effet des PC). La réalisation de cette expérience à partir du mois de mars permettrait donc de se défaire de l'influence de la date de semis tout en gardant une information fiable concernant les différences de fourniture en SE lié aux VDT entre les champs. Cette conclusion sera un élément à vérifier lors des mesures de l'année 2022-2023 de la thèse.

Il est important de noter que l'ensemble de ces observations ne sont discutées ici qu'à titre descriptif car mesurées sur un échantillon réduit de parcelles. L'assemblage des données récoltées au cours des trois années d'expérimentations de la thèse permettra de réaliser des conclusions plus globales et généralisables sur base de statistiques inférentielles.

Bibliographie

- Abdi, Hervé, et Lynne J. Williams. 2010. « Principal Component Analysis ». *WIREs Computational Statistics* 2 (4): 433-59. <https://doi.org/10.1002/wics.101>.
- Agreste. 2008. « Dans le sillon du non-labour ». A2C le site de l'agriculture de conservation. 2008. <https://agriculture-de-conservation.com/Dans-le-sillon-du-non-labour.html>. Consulté le 21-09-2022.
- Andrade, D. S., A. Colozzi-Filho, et K. E. Giller. 2003. « The Soil Microbial Community and Soil Tillage ». *Soil Tillage in Agroecosystems*, 51-81.
- Archambeaud, Matthieu, et Frédéric Thomas. 2016. *Les sols agricoles*. Editions France Agricole.
- Balesdent, J, C Chenu, et M Balabane. 2000. « Relationship of Soil Organic Matter Dynamics to Physical Protection and Tillage ». *Soil and Tillage Research* 53 (3): 215-30. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5).
- Belin, Xavier, et Aline Fockedey. 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 ».
- Bentley, P.R., K.R. Butt, et V. Nuutingen. 2022. « Effects of *Lumbricus terrestris* L. population size on incorporation of cereal harvest residues in no-till agroecosystems ». XII International Symposium on Earthworm Ecology.
- Bertin, Pierre. 2021. « Productions végétales. Notes de cours ».
- Bertrand, Michel, Sébastien Barot, Manuel Blouin, Joann Whalen, Tatiana de Oliveira, et Jean Roger-Estrade. 2015. « Earthworm Services for Cropping Systems. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 35 (2): 553-67. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0269-7>.
- Bertsch, F., et M. Ostinelli. 2019. « Standard Operating Procedure for Soil Total Carbon - Dumas Dry Combustion Method ». *FAO*, 12.
- Biot, Nicolas. 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 ».
- Blume, Hans-Peter, Gerhard W. Brümmer, Heiner Fleige, Rainer Horn, Ellen Kandeler, Ingrid Kögel-Knabner, Ruben Kretzschmar, Karl Stahr, et Berndt-Michael Wilke. 2016a. « Physical Properties and Processes ». In *Scheffer/Schachtschabel Soil Science*, par Hans-Peter Blume, Gerhard W. Brümmer, Heiner Fleige, Rainer Horn, Ellen Kandeler, Ingrid Kögel-Knabner, Ruben Kretzschmar, Karl Stahr, et Berndt-Michael Wilke, 175-283. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30942-7_6.
- . 2016b. « Soil Organic Matter ». In *Scheffer/Schachtschabel Soil Science*, édité par Hans-Peter Blume, Gerhard W. Brümmer, Heiner Fleige, Rainer Horn, Ellen Kandeler, Ingrid Kögel-Knabner, Ruben Kretzschmar, Karl Stahr, et Berndt-Michael Wilke, 55-86. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30942-7_3.
- Boeraeve, Fanny. 2018. « How can integrated ecosystem service valuation help understand agroecological transition? » Université de Liège, Liège, Belgique.
- Boerema, Annelies, Alanna J. Rebelo, Merche B. Bodí, Karen J. Esler, et Patrick Meire. 2017. « Are Ecosystem Services Adequately Quantified? » *Journal of Applied Ecology* 54 (2): 358-70. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12696>.

- Boström, Ullalena. 1995. « Earthworm Populations (Lumbricidae) in Ploughed and Undisturbed Leys ». *Soil and Tillage Research* 35 (3): 125-33.
[https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00489-0](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00489-0).
- Bottinelli, Nicolas, Mickaël Hedde, Pascal Jouquet, et Yvan Capowiez. 2020. « An Explicit Definition of Earthworm Ecological Categories – Marcel Bouché’s Triangle Revisited ». *Geoderma* 372 (août): 114361.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114361>.
- Bouché, M. B. 1977. « Strategies lombriciennes ». *Ecological Bulletins*, n° 25: 122-32.
- Boursault, Aline. 2012. « Caractérisation des relations trophiques entre composantes d’un agroécosystème : le cas de la prédation des graines d’adventices par les Carabidae ». These de doctorat, Dijon. <https://www.theses.fr/2012DIJOS119>.
- Bouthier, A., Céline Pelosi, C Villenave, G Peres, Mickaël Hedde, L Ranjard, J-F Vian, et al. 2014. « Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique ». In *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable*.
- Brady, N.C., et R.R. Weil. 2014. « Organisms and Ecology of the Soil ». In .
- Briat, Jean-François, et Dominique Job. 2017. *Les Sols et la Vie Souterraine, Des enjeux Majeurs en Agroécologie*. Quae.
- Brown, George G., Clive A. Edwards, et Lijbert Brussaard. 2004. « How Earthworms Affect Plant Growth : Burrowing into the Mechanisms ». In *Eartworm Ecology*, Clive A. Edwards, 18. CRC Press.
- Bruand, Ary, et Daniel Tessier. 2017. « Le sol habitat : environnement physicochimique et conditions de développement des différents organismes présents dans le sol ». In *Les sols et la vie souterraine Des enjeux majeurs en agroécologie*.
- Calvet, Raoul. 2003. *Le sol: propriétés et fonctions. Phénomènes physiques et chimiques, applications agronomiques et environnementales*. France Agricole Editions.
- Calvet, Raoul, Claire Chenu, et Sabine Houot. 2015. *Les matières organiques des sols, Rôles agronomiques et environnementaux*. France agricole.
- Caria, Giovanni, Nicolas Proix, et Henri Ciesielski. 2007. « Dosage du carbone organique par combustion sèche après décarbonatation automatisée des sols ». Arras (France): INRA. https://comifer.asso.fr/images/pdf/8emes_rencontres/11%20-%20expos%20-%20dosage%20du%20carbone%20organique%20par%20combustion%20sc.pdf. Consulté le 05-11-2022.
- CASIMIR. 2016. « Réseau PIC - Projet CASIMIR ». 2016. <https://www6.inrae.fr/reseau-pic/Projets/Projet-CASIMIR>. Consulté le 16-11-2022.
- Centre provincial de l’agriculture et de la ruralité. 2018. « Liste des méthodes ». brabantwallon.be/bw/entreprendre-travailler/agriculture-1/pole-laboratoires-d-analyses-agricoles/. Consulté le 05-11-2022.
- Cetiom. 2008. « Cetiom ». 2008. <https://www.terresinovia.fr/web/institutionnel/site-institutionnel>. Consulté le 26-11-2022.
- Chartin, Caroline, Antoine Stevens, Esther Goidts, Inken Krüger, Monique Carnol, et Bas van Wesemael. 2017. « Mapping Soil Organic Carbon Stocks and Estimating Uncertainties at the Regional Scale Following a Legacy Sampling Strategy (Southern Belgium, Wallonia) ». *Geoderma Regional*, Digital soil mapping across the globe, 9 (juin): 73-86. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.12.006>.
- Chartin, Caroline, Quentin Vincent, Bas Van Wesemael, et Monique Carnol. 2019. « Développement d’indicateurs de la qualité biologique et du carbone organique du sol pour l’évaluation de l’état des sols en Wallonie : valorisation des acquis et transfert vers les utilisateurs (CARBIOSOL 5) ». Liège. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/252863/1>. Consulté le 28-09-2022.

- Chenu, Claire, Naoise Nunan, Laure Vieublé, Patricia Garnier, Valérie Pot, et Sylvie Recous. 2017. « Localisation des matières organiques et des activités microbiennes : conséquences pour le fonctionnement du sol ». In *Les Sols et la Vie Souterraine, Des enjeux Majeurs en Agroécologie*.
- Colbach, N., et C. Vacher. 2014. « Travail du sol et gestion de la flore adventice. » In *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable*.
- Cromar, Heather E., Stephen D. Murphy, et Clarence J. Swanton. 1999. « Influence of Tillage and Crop Residue on Postdispersal Predation of Weed Seeds ». *Weed Science* 47 (2): 184-94. <https://doi.org/10.1017/S0043174500091608>.
- Curry, James. 2004. « Factors Affecting the Abundance of Earthworms in Soils ». In *Earthworm Ecology*, Clive A. Edwards, Second Edition. CRC Press.
- Dale, Virginia H., et Stephen Polasky. 2007. « Measures of the Effects of Agricultural Practices on Ecosystem Services ». *Ecological Economics*, Special Section - Ecosystem Services and Agriculture, 64 (2): 286-96. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.05.009>.
- Decaëns, Thibaud, Lucero Mariani, Nixon Betancourt, et Juan José Jiménez. 2003. « Seed Dispersion by Surface Casting Activities of Earthworms in Colombian Grasslands ». *Acta Oecologica* 24 (4): 175-85. [https://doi.org/10.1016/S1146-609X\(03\)00083-3](https://doi.org/10.1016/S1146-609X(03)00083-3).
- Dictionnaire actuel de l'éducation*. 1993. 2e éd. Montréal Paris: Guérin ESKA.
- Djallo, Abdourhmane, Kevin Hoeffner, Lola Morand, Sarah Guillocheau, Nathan Lévêque, Pierrick Sorgniard, et Daniel Cluzeau. 2022. « Hierarchization of the effect of agricultural practices in cropland on earthworm communities in Brittany ». Hierarchization of the effect of agricultural practices in cropland on earthworm communities in Brittany.
- Doube, Bernard M., Peter M. Stephens, Christopher W. Davoren, et Maarten H. Ryder. 1994. « Interactions between Earthworms, Beneficial Soil Microorganisms and Root Pathogens ». *Applied Soil Ecology* 1 (1): 3-10. [https://doi.org/10.1016/0929-1393\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0929-1393(94)90018-3).
- Dumont de Chassart, Joachim, et Grégoire Dehaye. 2022. « Impact des pratiques culturales sur les services écosystémiques à travers une étude participative dans la région sablo-limoneuse du Brabant wallon ».
- Durner, Wolfgang, et Sascha C. Iden. 2021. « The Improved Integral Suspension Pressure Method (ISP+) for Precise Particle Size Analysis of Soil and Sedimentary Materials ». *Soil and Tillage Research* 213 (septembre): 105086. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105086>.
- FAO, éd. 2017. *The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FEGRA. 2022. « Communiqué de presse Récolte 2022 ». <https://fegra.be/home/Index>. Consulté le 11-12-2022.
- Forey, Estelle, Sébastien Barot, Thibaud Decaëns, Estelle Langlois, Kam-Rigne Laossi, Pierre Margerie, Stefan Scheu, et Nico Eisenhauer. 2011. « Importance of Earthworm–Seed Interactions for the Composition and Structure of Plant Communities: A Review ». *Acta Oecologica*, Frugivores and Seed Dispersal: Mechanisms and Consequences of a Key Interaction for Biodiversity, 37 (6): 594-603. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2011.03.001>.
- Gange, Alan C. 1993. « Translocation of Mycorrhizal Fungi by Earthworms during Early Succession ». *Soil Biology and Biochemistry* 25 (8): 1021-26. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90149-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90149-6).
- Gliessman, Stephen R. 2004. « Agroecology and Agroecosystems ». In *Agroecosystems Analysis*, 19-29. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr43.c2>.

- Griffiths, B.S., K Ritz, R.D. Bardgett, R Cook, S. Christensen, F. Ekelund, S.J. Sørensen, et al. 2000. « Ecosystem response of pasture soil communities to fumigation-induced microbial diversity reductions: an examination of the biodiversity–ecosystem function relationship ». 2000. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1034/j.1600-0706.2000.900208.x?casa_token=zLoOfcTUJA0AAAAA:p0gvkc9egGeUSFOwloyP7pwTM8WN2oVqvTCOOKOno9mWxFD3EO_BgwwCDHuY1pflkaBoyuTG6AjCiaS1. Consulté le 25-09-2022.
- Groenendyk, Derek, Ty Ferré, Kelly Thorp, et Amy Rice. 2015. « Hydrologic-Process-Based Soil Texture Classifications for Improved Visualization of Landscape Function ». *PloS one* 10 (juin): e0131299. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131299>.
- Haines-Young, Roy, et Marion Potschin. 2010. « The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being ». *Ecosystem Ecology: a new synthesis* 1: 110-39.
- Hay, R. K. M., et J. R. Porter. 2006. *The Physiology of Crop Yield*. Blackwell Publishing. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20063230879>. Consulté le 04-01-2023.
- Hedde, Mickaël, Eric Blanchart, Manuel Blouin, Sophie Boulanger-Joime, Yvan Capowiez, Thibaud Decaëns, Pascal Jouquet, Guénola Pérès, et Marine Zwicke. 2017. « Impact des invertébrés sur les fonctions des sols et leurs applications dans les systèmes sol-plante ». In *Les Sols et la Vie Souterraine, Des enjeux Majeurs en Agroécologie*.
- House, Garfield J., et Robert W. Parmelee. 1985. « Comparison of Soil Arthropods and Earthworms from Conventional and No-Tillage Agroecosystems ». *Soil and Tillage Research* 5 (4): 351-60. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(85\)80003-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(85)80003-9).
- Husson, François, Julie Josse, et Jérôme Pagès. 2010. « Principal Component Methods - Hierarchical Clustering - Partitional Clustering: Why Would We Need to Choose for Visualizing Data? » 2010. http://www.sthda.com/english/upload/hcpc_husson_josse.pdf. Consulté le 19-11-2023.
- Infloweb. 2022. « Pâturin annuel ». Infloweb - connaître et gérer la flore adventice. 2022. <https://www.infloweb.fr/paturin-annuel>. Consulté le 12-01-2023.
- IPBES. 2017. « Biodiversity Definition ». IPBES. 8 décembre 2017. <https://ipbes.net/glossary/biodiversity>. Consulté le 03-10-2022.
- IRM. 2022. « Bilans climatologiques ». KMI. 2022. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/mois-apres-mois/contexte-general>. Consulté le 5-01-2023.
- Johannes, Alice, Adrien Matter, Rainer Schulin, Peter Weiskopf, Philippe C. Baveye, et Pascal Boivin. 2017. « Optimal Organic Carbon Values for Soil Structure Quality of Arable Soils. Does Clay Content Matter? » *Geoderma* 302 (septembre): 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>.
- Joseph, Camille, Daniel Delattre, et Jean-Pierre Sarthou. 2018. « Auxiliaires des cultures », février. <https://doi.org/10.17180/9z65-4m22>.
- Juarez, Sabrina, Naoise Nunan, Anne-Claire Duday, Valérie Pouteau, et Claire Chenu. 2013. « Soil Carbon Mineralisation Responses to Alterations of Microbial Diversity and Soil Structure ». *Biology and Fertility of Soils* 49 (7): 939-48. <https://doi.org/10.1007/s00374-013-0784-8>.
- Keuskamp, Joost A., Bas J. J. Dingemans, Taru Lehtinen, Judith M. Sarneel, et Mariet M. Hefting. 2013. « Tea Bag Index: A Novel Approach to Collect Uniform Decomposition Data across Ecosystems ». *Methods in Ecology and Evolution* 4 (11): 1070-75. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>.
- Kubiena, W.L. 1953. *The Soils of Europe*. London: Thomas Murby and Co.
- Laboratoire de Géopédologie - FUSAGx. 2007. « Légende de la Carte Numérique des Sols de Wallonie - version 2 ». https://www.fichierecologique.be/resources/LCNSW_V2.pdf. Consulté le 20-11-2022.

- Lavelle, Patrick, et Alister Spain. 2001. « Soil Organisms ». In *Soil Ecology*, 201-356. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/0-306-48162-6_3.
- Le Roux, Xavier, Robert Barbault, Jacques Baudry, Françoise Burel, Isabelle Doussan, Eric Garnier, Félix Herzog, et al. 2008. « Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies ». Other. Expertises Collectives. INRA. <https://doi.org/10.15454/chz5-0922>.
- Leveau, Lola. 2020. « Protocoles sur le froment - Thèse Lola Leveau - Analyses répétées de 2020 à 2023. »
- Leveau, Lola, Hugues Falys, et Pierre Bertin. 2019a. « Collaborative design of a sustainability diagnosis based on simple in-field measurements for Walloon field crop systems ». In . <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:231304>. Consulté le 15-11-2022.
- . 2019b. « How to value the ecosystem services provided by a field? Parallel between the indicators used by scientists and the empirical observations of belgian farmers ». In *Proceedings*, 80:82. <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:231293>. Consulté le 15-11-2022.
- Liu, X, S.J. Herbert, A.M. Hashemi, X. Zhang, et G. Ding. 2006. « Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation – a review ». *PLANT SOIL ENVIRON*.
- Livre Blanc Céréales. 2017a. « Préparation Du Sol – Livre Blanc Céréales ». 2017. <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/semis/preparation-du-sol/>. Consulté le 22-12-2022.
- . 2017b. « PRINCIPAUX STADES REPERES DE LA VEGETATION EN CEREALES ». <https://www.livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2017/01/principaux-stades-reperes-de-la-vegetation-en-cereales.pdf>. Consulté le 22-12-2022.
- Lubac, Antoine. 2014. « Évaluation du niveau de régulation biologique des adventices par les Carabidés ». Other, Université de Lorraine. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01835518>.
- Mathieu, Clément, et Jean Lozet. 2011. *Dictionnaire encyclopédique de science du sol: avec index anglais-français*. Lavoisier.
- Mazoyer, Marcel, et Laurence Roudart. 2017. *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*. Média Diffusion.
- McLean, M. A., et D. Parkinson. 2000. « Field Evidence of the Effects of the Epigeic Earthworm *Dendrobaena Octaedra* on the Microfungal Community in Pine Forest Floor ». *Soil Biology and Biochemistry* 32 (3): 351-60. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00161-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00161-3).
- mecmargroup. 2022. « Mesure de la teneur en humidité du blé : en quoi consiste-t-elle ? » 2022. https://www.mecmargroup.com/fr/news/mesure_de_la_teneur_en_humidite_du_ble_e_n_quoi_consiste_t_elle-72. Consulté le 01-11-2022.
- Médiène, Safia, Muriel Valantin-Morison, Jean-Pierre Sarthou, Stéphane de Tourdonnet, Marie Gosme, Michel Bertrand, Jean Roger-Estrade, et al. 2011. « Agroecosystem Management and Biotic Interactions: A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 31 (3): 491-514. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0009-1>.
- Menalled, Fabián D., Richard G. Smith, Joseph T. Dauer, et Tyler B. Fox. 2007. « Impact of Agricultural Management on Carabid Communities and Weed Seed Predation ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118 (1): 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.04.011>.
- Milcu, A., J. Schumacher, et S. Scheu. 2006. « Earthworms (*Lumbricus terrestris*) Affect Plant Seedling Recruitment and Microhabitat Heterogeneity ». *Functional Ecology* 20 (2): 261-68.

- Morris, N. L., P. C. H. Miller, J.H.Orson, et R. J. Froud-Williams. 2010. « The Adoption of Non-Inversion Tillage Systems in the United Kingdom and the Agronomic Impact on Soil, Crops and the Environment—A Review ». *Soil and Tillage Research* 108 (1): 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.004>.
- OPVT. 2022. « Participer - Collaborer - EcoBioSoil ». 2022. https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_presentation.php. Consulté le 29-09-2022.
- O'Rourke, Sharon, Denis Angers, Nicholas Holden, et Alex McBratney. 2015. « Soil organic carbon across scales ». *Global Change Biology* 21. <https://doi.org/10.1111/gcb.12959>.
- Peigné, J., M. Cannavacuolo, Y. Gautronneau, A. Aveline, J. L. Giteau, et D. Cluzeau. 2009. « Earthworm Populations under Different Tillage Systems in Organic Farming ». *Soil and Tillage Research* 104 (2): 207-14. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.02.011>.
- Pelosi, Céline, Sébastien Barot, Yvan Capowiez, Mickaël Hedde, et Franck Vandebulcke. 2014. « Pesticides and Earthworms. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 34 (1): 199-228. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0151-z>.
- Pelosi, Céline, Michel Bertrand, et Jean Roger-Estrade. 2009. « Earthworm Community in Conventional, Organic and Direct Seeding with Living Mulch Cropping Systems ». *Agronomy for Sustainable Development* 29 (2): 287-95. <https://doi.org/10.1051/agro/2008069>.
- Pérès, Guénola, Florent Lelu, Patrice Cotinet, Yannick Bénard, Vincent Hallaire, Djilali Heddadj, Olivier Manceau, et Daniel Cluzeau. 2022. « Do reduced tillage practices applied under organic farming represent realistic approach to maintain soil biological, physical and chemical quality and the linked ecosystem services? » XII International Symposium on Earthworm Ecology.
- Prout, Jonah M., Keith D. Shepherd, Steve P. McGrath, Guy J. D. Kirk, et Stephan M. Haefele. 2021. « What Is a Good Level of Soil Organic Matter? An Index Based on Organic Carbon to Clay Ratio ». *European Journal of Soil Science* 72 (6): 2493-2503. <https://doi.org/10.1111/ejss.13012>.
- Recous, Sylvie, Gwanaëlle Lashermes, et Isabelle Bertrand. 2017. « Couplages et contrôles des cycles du carbone et de l'azote par les communautés microbiennes dans les sols cultivés ». In *Les sols et la vie souterraine Des enjeux majeurs en agroécologie*.
- Roger-Estrade, Jean, J. Labreuche, et H. Boizard. 2014. « Importance du travail du sol : typologie des modes de mise en oeuvre et effets sur le rendement des cultures ». In *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable*.
- Rongione, Charles. 2022. « Weakly Supervised Semantic Segmentation of Multi-Species Canopies Using Active Learning and Fully Convolutional Neural Networks - DIGICROP2022 ». 24 janvier 2022. <https://digicrop.de/c-rongione-weakly-supervised-semantic-segmentation-of-multi-species-canopies-using-active-learning-and-fully-convolutional-neural-networks/>. Consulté le 08-01-2023.
- Saska, P., S. Koprdoová, Z. Martinková, et A. Honěk. 2014. « Comparing Methods of Weed Seed Exposure to Predators ». *Annals of Applied Biology* 164 (2): 301-12. <https://doi.org/10.1111/aab.12102>.
- Singh, Rajni. 2017. « Microbial Biotransformation: A Process for Chemical Alterations ». *Journal of Bacteriology & Mycology: Open Access* 4 (février). <https://doi.org/10.15406/jbmoa.2017.04.00085>.
- Soltner, Dominique. 2011. *Les bases de la production végétale - Tome 1 Le sol et son amélioration*. Sciences et techniques agricoles. <https://www.eyrolles.com/Sciences/Livre/les-bases-de-la-production-vegetale-tome-i-9782907710008/>. Consulté le 23-11-2022.
- SPW. 2017. « Rapport sur l'état de l'environnement wallon ». <http://etat.environnement.wallonie.be/files/Publications/REEW2016/DGRNE-16->

- 16716-REEW%202016-sl-051217-prod2%20-%20basse%20r%c3%a9solution.pdf. Consulté le 19-11-2022.
- . 2020. « Matière organique dans les sols agricoles. » <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/SOLS%202.eew-sheet.html>. Consulté le 25-11-2022.
- . 2021. « Agriculture - État de l'environnement wallon ». Etat de l'environnement wallon. 2021. http://etat.environnement.wallonie.be/cms/render/live/fr_BE/sites/eew/home/Infographies/agriculture.html. Consulté le 25-11-2022.
- SPW, et ULg. 2013. « La compaction des sols agricoles en Wallonie ». https://sol.environnement.wallonie.be/files/Document/Guides/Compaction%20des%20sols%20agricoles_IMPRESSION.pdf. Consulté le 09-12-2022.
- StatBel. 2021. « Estimation définitive de la production des cultures agricoles - 2021 ». <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles#figures>. Consulté le 12-09-2022.
- STHDA. 2020. « Correlation Matrix : A Quick Start Guide to Analyze, Format and Visualize a Correlation Matrix Using R Software ». 2020. <http://www.sthda.com/english/wiki/correlation-matrix-a-quick-start-guide-to-analyze-format-and-visualize-a-correlation-matrix-using-r-software>. Consulté le 19-11-2022.
- SYTRA. 2019. « Quelles agricultures en 2050 ? - Une démarche prospective et participative pour explorer les trajectoires de transition vers moins d'intrants -Le cas de la production céréalière en Région wallonne ». <https://sytra.be/wp-content/uploads/2020/05/UCL-brochure-cereales-web.pdf>. Consulté le 03-01-2023.
- Teatime4Science. 2016a. « TBI protocol ». <http://www.teatime4science.org/wp-content/uploads/French.pdf>.
- . 2016b. « The Project – Teatime4Science ». 2016. <http://www.teatime4science.org/about/the-project/>. Consulté le 29-09-2022.
- TEEB. 2010. « The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations ». *The Economics of Ecosystems and Biodiversity* (blog). 2010. <http://teebweb.org/publications/teeb-for/research-and-academia/>. Consulté le 11-01-2023.
- terre-net. 2020. « Stockage des céréales à la ferme : quelques pré-requis ». terre-net.fr. 2020. <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/conservation-des-cereales-les-pre-requis-du-stockage-a-la-ferme-217-169224.html>. Consulté le 01-11-2022.
- Thompson, K., et J. P. Grime. 1979. « Seasonal Variation in the Seed Banks of Herbaceous Species in Ten Contrasting Habitats ». *Journal of Ecology* 67 (3): 893-921. <https://doi.org/10.2307/2259220>.
- Tibi, Anaïs, et Olivier Therond. 2018. *Services écosystémiques fournis par les espaces agricoles, Evaluer et Caractériser*. Quae.
- TRANSAG, et Interreg. 2021. « Projet européen TRANSAG - TRANSition vers l'Agro-écologie. »
- Van den Putte, An, Gerard Govers, Jan Diels, Katleen Gillijns, et Matthias Demuzere. 2010. « Assessing the Effect of Soil Tillage on Crop Growth: A Meta-Regression Analysis on European Crop Yields under Conservation Agriculture ». *European Journal of Agronomy* 33 (3): 231-41. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.05.008>.
- Vaudor, L. 2021. « ACP ». R-atique. 11 mai 2021. <http://perso.ens-lyon.fr/lise.vaudor/acp/>. Consulté le 09-01-2023.
- Veihmeyer, F. J., et A. H. Hendrickson. 1931. « THE MOISTURE EQUIVALENT AS A MEASURE OF THE FIELD CAPACITY OF SOILS ». *Soil Science* 32 (3): 181-94.

- WalES. 2016. « Le cadre conceptuel-Les services écosystémiques en Wallonie ». 2016.
<https://services-ecosystemiques.wallonie.be/fr/cadre-conceptuel.html?IDC=5893>.
 Consulté le 26-07-2022.
- Wallace, Ken J. 2007. « Classification of Ecosystem Services: Problems and Solutions ». *Biological Conservation* 139 (3): 235-46.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.07.015>.
- Weil, Ray R., et N.C. Brady. 2014. « Soil architecture and physical properties ». In ,
 Fourteenth edition. Columbus: Pearson.
- Wertz, Sophie, Valérie Degrange, James I. Prosser, Franck Poly, Claire Commeaux, Thomas Freitag, Nadine Guillaumaud, et Xavier Le Roux. 2006. « Maintenance of Soil Functioning Following Erosion of Microbial Diversity ». *Environmental Microbiology* 8 (12): 2162-69. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01098.x>.
- Wesemael, Bas van, Caroline Chartin, Martin Wiesmeier, Margit von Lützow, Eleanor Hobley, Monique Carnol, Inken Krüger, et al. 2019. « An Indicator for Organic Matter Dynamics in Temperate Agricultural Soils ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 274 (mars): 62-75. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.01.005>.
- Zhou, Yue, Caroline Chartin, Kristof Van Oost, et Bas van Wesemael. 2022. « High-Resolution Soil Organic Carbon Mapping at the Field Scale in Southern Belgium (Wallonia) ». *Geoderma* 422 (septembre): 115929.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115929>.
- Zikeli, Sabine, et Sabine Gruber. 2017. « Reduced Tillage and No-Till in Organic Farming Systems, Germany—Status Quo, Potentials and Challenges ». *Agriculture* 7 (4): 35.
<https://doi.org/10.3390/agriculture7040035>.

Impact des pratiques agricoles sur les services écosystémiques liés aux auxiliaires de culture et à la production végétale dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse wallonnes

Présenté par Joy Van den Broeck

Le développement d'une agriculture durable repose entre autres sur la transition vers d'autres modes de production diminuant les pressions sur l'environnement à travers la valorisation des services écosystémiques. En tant qu'actrice de l'agroécosystème, l'agriculture peut agir à différentes échelles pour maintenir, voire augmenter ces services écosystémiques, notamment à travers les pratiques culturales appliquées sur les parcelles.

Ce mémoire s'insère dans la thèse de L. Leveau dont l'objectif est de déterminer si certaines pratiques agricoles innovantes actuelles appliquées dans les fermes de grandes cultures wallonnes permettent de remplacer les intrants issus de ressources non renouvelables par des services écosystémiques. Dans cette étude, des mesures de fourniture en services écosystémiques par des parcelles agricoles aux pratiques diversifiées sont réalisées sur trois ans. Ce mémoire s'inscrit dans la deuxième année de la partie expérimentale de cette étude. Son objectif est de quantifier les services d'incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre, de décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes, de prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture et de production végétale, et d'étudier les liens entre ces services fournis par une parcelle et les pratiques culturales appliquées sur cette même parcelle.

Les résultats obtenus ont été utilisés pour réaliser des analyses statistiques descriptives. Les principaux résultats montrent que le service d'incorporation de la litière végétale dans le sol est corrélé négativement à l'intensité du travail du sol et aux indices de fréquence de traitement en herbicides et insecticides, et est corrélé positivement avec la part de mulch mort sur l'itinéraire cultural de la parcelle. Les moyennes des indicateurs liés au service de décomposition de la matière organique du sol ne permettent pas de différencier significativement les différentes parcelles étudiées. Le protocole du service de prédation de graines nécessite d'être amélioré pour répondre à l'objectif de cette étude. Le service de production végétale est corrélé positivement à la quantité d'azote minéral apporté et au nombre de variétés récoltées. Ce service est également corrélé négativement à la date de semis du froment.

Ce mémoire analyse également l'influence de la date de semis sur les résultats du protocole développé par l'Observatoire Participatif des Vers de Terre évaluant l'incorporation de la litière végétale dans le sol par les vers de terre. La corrélation de la date de semis avec certains indicateurs de pratiques culturales a cependant rendu l'interprétation confuse, bien que la comparaison avec les résultats obtenus pour les mêmes expériences en 2020-2021 laisse à penser que l'impact de la date de semis sur les résultats diminue quand l'expérience est réalisée à partir du mois de mars plutôt que directement après le semis de la culture d'hiver.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des bioingénieurs

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