

Faculté des bioingénieurs

Etude de l'impact des pratiques culturales sur les services écosystémiques à travers une recherche collaborative dans la région limoneuse et sablo- limoneuse du Brabant wallon

Auteur : Jean Desimpel

Promoteurs : Prof. Pierre Bertin (UCLouvain/ELI/ELIA)

Prof. Guillaume Lobet (UCLouvain/ELI/ELIA)

Lecteurs : Ir. Hugues Falys (UCLouvain)

Dr. Frédéric Vanwindekens (CRA-W)

Année académique 2023-2024

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

Remerciements

J'aimerais remercier toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu dans la réalisation de ce mémoire. Ainsi, je souhaite remercier Monsieur Bertin pour toutes ses relectures et pour ses commentaires toujours constructifs. Je remercie aussi Monsieur Lobet pour son accompagnement, pour la constante convivialité de ses réunions ainsi que pour ses précieux conseils.

Je remercie aussi Lola pour sa présence infaillible durant la campagne d'expériences, pour sa pédagogie, son encadrement et sa gentillesse.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Thomas Dagbert et Pierre Van Thorre pour leur aide de qualité, depuis la préparation jusqu'à la collecte des expériences. Merci aussi à François pour son aide lors du battage du blé.

Je remercie également Robin, Corentin et Cyril pour leur coup de main dans la préparation des dispositifs expérimentaux ainsi que Pauline pour son aide et son soutien.

Enfin, je voudrais aussi remercier mes parents qui m'ont permis de réaliser ces études et m'ont soutenu tout au long de mon parcours étudiant.

Résumé

Dans un contexte où la promotion de la durabilité des systèmes est devenue un objectif sociétal, la présente recherche contribue à l'amélioration de la durabilité des systèmes agricoles en région wallonne en s'inscrivant dans le cadre des travaux de recherche de L. Leveau, qui se concentrent sur la substitution des intrants commerciaux par des services écosystémiques.

Ainsi, ce mémoire caractérise, par une campagne expérimentale, les liens existants entre un ensemble de pratiques culturales et quatre services écosystémiques dans 20 champs situés en région limoneuse et sablo-limoneuse du Brabant Wallon. Ce mémoire constitue une recherche participative, succédant à quatre autres travaux similaires, qui représente le dernier travail de récoltes des données de la thèse de L. Leveau. Cette recherche se base sur des parcelles mises à disposition par des agriculteurs·rices dans lesquelles sont placés les dispositifs expérimentaux et pour lesquelles l'historique de culture est connu.

Les services écosystémiques étudiés dans ce mémoire sont l'incorporation de la matière organique par les vers de terre, la dégradation de la matière organique par les microorganismes (stabilisation et décomposition), la prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de cultures et la production végétale. Chacun de ces services écosystémiques est illustré par un ou plusieurs indicateurs quantitatifs de services écosystémiques. En croisant ces indicateurs de services écosystémiques avec les indicateurs de pratiques culturales, et l'historique de chaque parcelle sur 10 ans, ce travail a permis d'établir plusieurs liens existants entre les pratiques culturales et les services écosystémiques étudiés sur les 20 parcelles de l'étude.

En effet, les analyses ont montré que le service écosystémique d'incorporation de la matière organique par les vers de terre était impacté négativement par le travail du sol et positivement par la pratique du mulch. Les expériences réalisées pour quantifier le service de prédation de graines d'adventices n'ont pas montré de résultats probants et donc aucun lien cohérent avec les pratiques culturales n'a pu être établi. Les services écosystémiques de stabilisation et de décomposition de la matière organique ont montré une relation inverse entre eux compliquant l'établissement de lien avec les pratiques culturales. L'utilisation de fongicides sur 10 ans a cependant montré un impact négatif sur la stabilisation de la matière organique. De plus, le service de production végétale, par le rendement en paille et en grain, est impacté positivement et de façon majoritaire par l'utilisation d'azote minéral.

Table des matières

Table des illustrations.....	1
Liste des abréviations.....	4
Contexte de l'étude.....	5
Introduction.....	7
1 Etat de l'art.....	8
1.1 Les défis de l'agriculture d'hier et d'aujourd'hui.....	8
1.2 Les services écosystémiques (SE).....	9
1.2.1 L'agroécosystème et les services écosystémiques.....	9
1.2.2 Les différents types de services écosystémiques.....	10
1.2.3 Les services évalués dans ce travail.....	11
1.3 La dynamique de la matière organique dans les sols de l'agroécosystème.....	12
1.3.1 La fragmentation et l'incorporation de la matière organique du sol par l'activité des vers de terre.....	13
1.3.1.1 Description et classification des vers de terre.....	13
1.3.1.2 L'impact de l'activité des vers de terre sur la structure du sol.....	14
1.3.1.3 L'action des vers de terre sur la MOS.....	14
1.3.2 La décomposition de la matière organique par les microorganismes du sol.....	15
1.3.2.1 La dynamique de la décomposition de la MOS.....	15
1.4 Le contrôle des plantes adventices.....	16
1.4.1 La prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de cultures.....	17
1.5 Les pratiques culturales (PC).....	17
1.6 Liens entre les pratiques culturales et les services écosystémiques.....	18
1.6.1 Le lien entre les pratiques culturales et l'activité des vers de terre.....	18
1.6.2 Le lien entre les pratiques culturales et l'activité des microorganismes dans le sol	19
1.6.3 Lien entre les pratiques culturales et la prédation des graines d'adventices.....	20
2 Matériel et méthode.....	21
2.1 Réalisations antérieures au mémoire.....	21
2.1.1 Sélection des parcelles.....	21
2.1.2 Recensement des pratiques culturales des parcelles.....	21
2.1.3 Mise en place des parcelles dans les 20 champs.....	22
2.2 Sélection des indicateurs de pratiques culturales utilisés dans le travail.....	23
2.3 Expériences.....	25
2.3.1 Paniers à vers de terre.....	27
2.3.1.1 Description des paniers.....	27

2.3.1.2	Préparation de la paille.....	27
2.3.1.3	Mise en place en champ	28
2.3.1.4	Mesures en champ.....	29
2.3.1.5	Mesure à la récolte	30
2.3.1.6	Traitement des photos et nomenclature des points GPS	31
2.3.2	Tea bag	31
2.3.2.1	Calcul de la masse initiale de thé dans les sachets.....	31
2.3.2.2	Mise en place	32
2.3.2.3	Récolte des sachets de thé.....	34
2.3.2.4	Calcul des paramètres	34
2.3.3	Carte de prédation	34
2.3.3.1	Fabrication des cartes.....	34
2.3.3.2	Mise en place	35
2.3.3.3	Récolte	36
2.4	Calcul des rendements	36
2.5	Analyses statistiques.....	36
2.5.1	Analyse descriptive des indicateurs	37
2.5.2	Analyse de la significativité des résultats	37
2.5.3	Analyses multivariées	37
3	Résultats.....	38
3.1	Statistiques descriptives.....	38
3.1.1	Indicateurs de services écosystémiques	38
3.1.1.1	Explication générale des méthodes de statistiques descriptives	38
3.1.2	Graphiques des statistiques descriptives	40
3.1.2.1	Indicateurs d'incorporation de la matière organique par les vers de terre ..	43
3.1.2.2	Indicateur de prédation des graines d'adventices	44
3.1.2.3	Indicateurs de dégradation de la matière organique par les microorganismes	44
3.1.2.4	Indicateurs de production végétale	45
3.2	Analyse de significativité des données issues de la campagne expérimentale.....	45
3.2.1	Résultats du test de Kruskal-Wallis.....	46
3.3	Analyses multivariées.....	47
3.3.1	Observation de l'impact des indicateurs de services écosystémiques entre eux	47
3.3.1.1	Corrélogramme	47
3.3.1.2	Analyse en composantes principales	49
3.3.2	Observation de l'impact des indicateurs de pratiques culturales sur les indicateurs de services écosystémiques.....	53
3.3.2.1	Corrélogramme	53
3.3.2.2	Analyse en composante principale.....	56

3.3.2.3	Classification hiérarchique sur composantes principales.....	60
3.3.3	Analyse en composantes principales des indicateurs de PC	61
4	Discussion - Interprétation	64
4.1	Comparaison de la classification sur composantes principales des parcelles sur base des pratiques culturales avec les systèmes de culture.....	64
4.2	Interprétation des résultats de corrélations entre les indicateurs de pratiques culturales et les indicateurs de services écosystémiques.....	66
4.2.1	Incorporation de la MO par les VDT	66
4.2.2	Prédation des graines d'adventices	66
4.2.3	Stabilisation de la MO par les microorganismes.....	67
4.2.4	Décomposition de la MO par les microorganismes	67
4.2.5	Rendement en grain.....	67
4.2.6	Rendement en paille	68
4.3	Interprétation du clustering réalisé sur base des composantes principales de l'ACP_SE/PC	68
4.4	Comparaison du clustering des parcelles sur base des indicateurs de pratiques culturales et des indicateurs de services écosystémiques	70
5	Approfondissement d'une thématique	76
6	Conclusion	78
	Bibliographie.....	80

Table des illustrations

Figures

FIGURE 1: SCHEMA CONCEPTUEL DE LA CLASSIFICATION DE SE SELON LE ROUX ET AL (2008)	11
FIGURE 2 : REPRESENTATION DE L'ETENDUE DE L'IMPACT DE LA MOS (ICI SOM) SUR LES PROPRIETES DU SOL (BASHIR ET AL., 2021).....	13
FIGURE 3 : EXEMPLE DE CARTE DE POSITIONNEMENT DES EXPERIENCES DE CE MEMOIRE [CAGES A VDT ET PLACETTES DE THES (TB)] ET DES EXPERIENCES ANTERIEURES DE MARTO ET VAN COTTOM (2023) (CAGES A VDT ET PLACETTES DE BATTANCE) AINSI QUE LES TRACES DES MACHINES AGRICOLES. PARCELLE N°51	23
FIGURE 4: EXEMPLE DE PANIER À VERS DE TERRE, PHOTO PRISE JUSTE APRÈS LA MISE EN PLACE.....	27
FIGURE 5 : AIDE VISUELLE POUR L'ESTIMATION DE LA SURFACE DE PAILLE RESTANTE (L. LEVEAU).....	30
FIGURE 6 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES PLACETTES DE L'EXPERIENCE DES SACHETS DE THE (SOURCE : PROTOCOLE ADAPTE POUR LA THESE DE L.LEVEAU) LES RONDS VERTS NUMEROTES SYMBOLISENT LES SACHETS DE THE VERT TANDIS QUE LES RONDS ORANGES NUMEROTES SYMBOLISENT LES SACHETS DE THE ROUGE. LES PIQUETS SONT REPRESENTES PAR LES LIGNES ORANGES.....	33
FIGURE 7 : MISE EN PLACE DES SACHETS DE THÉ DANS LE SOL.	33
FIGURE 8 : POSITIONNEMENT DES CARTES DE PREDATION FINALISEES SUR LES REGLETTES. (L. LEVEAU).....	35
FIGURE 9 : PHOTO D'UNE CARTE DE PRÉDATION APRÈS SA MISE EN PLACE EN CHAMPS (L.LEVEAU)	35
FIGURE 10 (SUR DEUX PAGES) : GRAPHIQUES EN BOITES DE TUKEY DES INDICATEURS DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DÉCRITS DANS CE TRAVAIL. LES MOYENNES DE CHAQUE PARCELLE POUR TOUS LES INDICATEURS SONT SYMBOLISÉES PAR UN ROND NOIR PLEIN, LES MÉDIANES PAR UNE LIGNE NOIRE ET LES OUTLIERS PAR UN POINT NOIR VIDE.....	40
FIGURE 11 : REPRESENTATION EN CORRELOGRAMME DE LA MATRICE DE CORRELATION DES INDICATEURS DE SERVICES ECOSYSTEMIQUES CE CORRELOGRAMME, ILLUSTRE LE COEFFICIENT DE CORRELATION PAR UNE COULEUR (ECHELLE SUR LA DROITE DE LA FIGURE) : LE ROUGE SIGNIFIE UNE CORRELATION NEGATIVE ET LE BLEU UNE CORRELATION POSITIVE. LA FORCE DE CORRELATION EST EXPRIMEE PAR LA TEINTE, PLUS CELLE-CI S'APPROFONDIT, PLUS LA CORRELATION EST INTENSE. LES VALEURS NON SIGNIFICATIVES NE SONT PAS REPRESENTÉES (NIVEAU DE CONFIANCE A 95 %). LA SIGNIFICATION DES ABBREVIATIONS EST REPRIS DANS LE TABLEAU 7.....	48
FIGURE 12 : GRAPHIQUES DES VARIABLES DE L'ACP DES INDICATEURS DE SE POUR LA DIMENSION 1 ET 2 (A GAUCHE, 12A) ET POUR LA DIMENSION 2 ET 3 (A DROITE 12B). LA SIGNIFICATION DES ABBREVIATIONS EST REPRIS DANS LE TABLEAU 7	50
FIGURE 13 : ACP DES INDICATEURS DE SE AVEC UN SEUL INDICATEUR DU SE D'INCORPORATION DE LA MO PAR LES VDT. LES GRAPHIQUES MONTRENT LA PROJECTION SUR LA DIMENSION 1 ET 2 (A GAUCHE, 13A) ET POUR LA DIMENSION 2 ET 3 (A DROITE 13B). LES INDICATEURS DE SE ECARTES POUR LES CALCULS DES COMPOSANTES PRINCIPALES SONT REPRESENTES EN FLECHES POINTILLEES BLEUES. LA SIGNIFICATION DES ABBREVIATIONS EST REPRIS DANS LE TABLEAU 7	51
FIGURE 14 : GRAPHIQUES DES INDIVIDUS DES VARIABLES DE L'ACP_SE2 SUR LE PLAN DES DIMENSIONS 1 ET 2 (A GAUCHE 14A) ET 2 ET 3 (A DROITE 14B)	52
FIGURE 15 : REPRÉSENTATION EN CORRLOT DE LA MATRICE DE CORRÉLATION DES INDICATEURS DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES ET DES PRATIQUES CULTURALES. CE CORRÉLOGRAMME, ILLUSTRE LE COEFFICIENT DE CORRÉLATION PAR UNE COULEUR (ÉCHELLE SUR LA DROITE DE LA FIGURE) : LE ROUGE SIGNIFIE UNE CORRÉLATION NÉGATIVE ET LE BLEU UNE CORRÉLATION POSITIVE. LA FORCE DE CORRÉLATION EST EXPRIMÉE PAR LA TEINTE, PLUS CELLE-CI S'APPROFONDIT, PLUS LA CORRÉLATION EST INTENSE. LES VALEURS NON SIGNIFICATIVES NE SONT PAS REPRÉSENTÉES (NIVEAU DE CONFIANCE À 95 %). LA SOUS FIGURE 15A MONTRE LES CORRÉLATIONS ENTRE LES INDICATEURS DE SE, LA SOUS-FIGURE 15B MONTRE LES CORRÉLATIONS ENTRE LES PC ET LA FIGURE 15 C MONTRE LES CORRÉLATIONS ENTRE LES PC ET LES SE. LES SIGNIFICATIONS DES	

ABRÉVIATIONS DES INDICATEURS DE PC SONT EXPLIQUÉES DANS LE TABLEAU 4 ET CELLES DES INDICATEURS DE SE LE TABLEAU 7	54
FIGURE 16 : GRAPHIQUES DES VARIABLES DE L'ACP DES INDICATEURS DE PC ET DE SE POUR LES DIMENSIONS 1 ET 2 (16A) AINSI QUE LES DIMENSIONS 3 ET 4 (16B). LES LABELS DES VARIABLES QUI NE SONT PAS BIEN REPRÉSENTÉES PAR LA PROJECTION SONT RETIRÉS. LES VECTEURS DES INDICATEURS DE SE SONT ENCADRÉS EN ROUGE. LA SIGNIFICATION DES ABRÉVIATIONS DES INDICATEURS DE SE EST REPRIS DANS LE TABLEAU 7 ET LA SIGNIFICATION DES ABRÉVIATIONS DES INDICATEURS DE PC EST REPRIS DANS LE TABLEAU 4.	57
FIGURE 17 : HCPC DES DONNÉES DE L'ACP_SE/PC. LES NOMBRES CORRESPONDENT AU NUMÉRO DES PARCELLES. CELLES-CI SONT REGROUPEES PAR COULEUR SUR BASE DE LEURS RESSEMBLANCES EN TERMES DE VALEUR DES INDICATEURS DE SE ET DE PC	60
FIGURE 18 : : HCPC DES DONNÉES DE L'ACP_SE/PC REPRÉSENTÉ SUR LES DIMENSIONS 3 ET 4. LES NOMBRES CORRESPONDENT AU NUMÉRO DES PARCELLES. CELLES-CI SONT REGROUPEES PAR COULEUR SUR BASE DE LEURS RESSEMBLANCES EN TERMES DE VALEUR DES INDICATEURS DE SE ET DE PC	61
FIGURE 19 GRAPHIQUE DES VARIABLES DE L'ACP DES INDICATEURS DE PC POUR LES DIMENSIONS 1 ET 2. LES LABELS DES VARIABLES QUI NE SONT PAS BIEN REPRÉSENTÉES PAR LA PROJECTION SONT RETIRÉS. LA SIGNIFICATION DES ABRÉVIATIONS DES INDICATEURS DES PC EST REPRIS DANS LE TABLEAU 4.	62
FIGURE 20 : HCPC SUR BASE DES INDICATEURS DE PRATIQUES CULTURALES. LES NOMBRES CORRESPONDENT AU NUMÉRO DES PARCELLES. CELLES-CI SONT REGROUPEES PAR COULEURS SUR BASE DE LEURS RESSEMBLANCES EN TERMES DE VALEUR DES INDICATEURS DE PC.	63
FIGURE 21 : GRAPHIQUES DES INDIVIDUS DE L'ACP_PC COLORÉS SELON LA VALEUR MOYENNE DES INDICATEURS DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DES PARCELLES DE : MASSE DE PAILLE INCORPORÉE PAR LES VDT (MASSE_INC, [21A]), DU TAUX DE GRAINES D'ADVENTICES PRÉDATÉES (P_GRAINES[21B]), DES INDICATEURS DE STABILISATION ET DÉCOMPOSITION DE LA MO PAR LES MICROORGANISMES (RESPECTIVEMENT D_S [21C] ET D_K [21D]), ET DES RENDEMENTS EN GRAIN ET EN PAILLE (RESPECTIVEMENT R_GRAIN [21E], R_PAILLE [21F]). L'ÉCHELLE DES COULEURS CORRESPONDANTE EST MONTRÉE À DROITE DE CHAQUE GRAPHIQUE. LES CADRANS SONT NUMÉROTÉS DE 1 À 4 EN CHIFFRES ROMAINS SELON LA NUMÉROTATION DU PLAN CARTÉSIEN. LES POURCENTAGES DE VARIABILITÉ EXPLIQUÉS PAR LES DIMENSIONS 1 ET 2 SONT RESPECTIVEMENT DE 26,69 % ET 16,13 % ET SONT INDICUÉS À CÔTÉ DES LÉGENDES DES AXES.	71
FIGURE 22 : GRAPHIQUE DES INDIVIDUS DE L'ACP_PC COLORES SELON LA VALEUR MOYENNE DES INDICATEURS DE SERVICES ECOSYSTEMIQUES DES PARCELLES DES RENDEMENTS EN GRAIN EN ECARTANT LES PARCELLES D'EPEAUTRE (52, 55 ET 58) ET LA PARCELLE 45. L'ECHELLE DES COULEURS CORRESPONDANTE EST MONTREE A DROITE DU GRAPHIQUE.	74
FIGURE 23 : GRAPHIQUE DES INDIVIDUS DE L'ACP_PC COLORÉS SELON LA VALEUR MOYENNE DES INDICATEURS DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DES PARCELLES DES RENDEMENTS EN PAILLE, EN ÉCARTANT LES PARCELLES D'EPEAUTRE ET LA PARCELLE 45. L'ÉCHELLE DES COULEURS CORRESPONDANTE EST MONTRÉE À DROITE DU GRAPHIQUE.	75

Tableaux

TABEAU 1 : PHASES DE DEROULEMENT DE LA THESE DE L. LEVEAU	5
TABEAU 2 :DESCRIPTION DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES ETUDIES DANS CE TRAVAIL, ADAPTEE DES TRAVAUX ANTERIEURS [BELIN ET FOCKEDEV, (2021) ; DEHAYE ET DUMONT DE CHASSART (2022) ; MARTO ET VAN COTTOM (2023) ; VANDENBROECK (2023)]	12
TABEAU 3 : CRITERES DE SELECTION OBLIGATOIRES POUR LES CHAMPS UTILISES DANS LA THESE DE L. LEVEAU	21
TABEAU 4 : INDICATEURS DES PRATIQUES CULTURALES ET LEUR ABRÉVIATION UTILISEES DANS LES ANALYSES DE L'IMPACT DES PC SUR LES SE ETUDIES DANS CE TRAVAIL	24
TABEAU 5 : AGENDA DES EXPERIENCES ET RECOLTES PAR SEMAINE. LES DATES DU LUNDI SONT DONNEES EN PREMIERE LIGNE (« SEMAINE DU ») ET LES LIGNES VERTICALES EPAISSES SIGNIFIENT UNE DISCONTINUITÉ DANS LES DATES DES SEMAINES. LES DATES DE RECOLTES DES PLANTES NE SONT PAS INDIQUEES CAR CELLES-CI VARIENT EN FONCTION DES CHAMPS ET DE LA DATE DE MOISSON DU CHAMP. CHAQUE COULEUR REPRÉSENTE	

LES MANIPULATIONS SUR UN DISPOSITIF EXPERIMENTAL A L'EXCEPTION DES SEMAINES DU 19 ET 26 JUIN OU DEUX MANIPULATIONS DIFFERENTES ONT ETE REALISEES SIMULTANEMENT.....	26
TABLEAU 6: CALCUL DE L'HUMIDITE DE LA PAILLE PAR 4 ECHANTILLONS.	28
TABLEAU 7 : VALEURS CARACTERISTIQUES DES INDICATEURS DE SE.....	42
TABLEAU 8 : RESULTATS DU TEST DE KRUSKALL - WALLIS EFFECTUE SUR LES DONNEES D'INDICATEURS DE SE. LA SIGNIFICATION DES ABREVIATIONS EST REPRISE DANS LE TABLEAU 7	46
TABLEAU 9 : COMPARAISON DES REGROUPEMENTS DES PARCELLES PAR CLUSTERING SUR BASE DES PC ET PAR SYSTEME DE PRODUCTION : AGRICULTURE DE CONSERVATION DES SOLS (ACS), AGRICULTURE BIOLOGIQUE (AB), AGRICULTURE BIOLOGIQUE DE CONSERVATION (ACB) ET AGRICULTURE CONVENTIONNELLE (AC). ...	65
TABLEAU 10 : TABLEAUX MONTRANT LES GROUPES DE PARCELLES DE L'HCPC SUR BASE DES COMPOSANTES PRINCIPALES DE L'ACP_SE/PC. LES PRINCIPAUX SYSTEMES DE PRODUCTION DES PARCELLES SONT AUSSI INDiques : AGRICULTURE DE CONSERVATION DES SOLS (ACS), AGRICULTURE BIOLOGIQUE (AB), AGRICULTURE BIOLOGIQUE DE CONSERVATION (ACB) ET AGRICULTURE CONVENTIONNELLE (AC).	68

Liste des abréviations

AB = Agriculture biologique

AC = Agriculture conventionnelle

ACP = Analyse en composantes principales

ACS = Agriculture de conservation des sols

ANOVA = Analyse de la variance

C = Carbone

EAN = European article number

HCPC = Classification hiérarchique sur composantes principales

IFT = Indice de fréquence de traitement

MEA = Millennium ecosystem assessment

MO = Matière organique

MOS = Matière organique du sol

N = Azote

ONU = Organisation des Nations Unies

OPVT = Observatoire participatif des vers de terre

PC = Pratiques culturales

SE = Services écosystémiques

TB = Tea bag

VDT = Vers de terre

Contexte de l'étude

Ce mémoire prend place dans le cadre de la thèse de Lola Leveau. Son travail pose comme question de recherche la suivante :« Les pratiques innovantes actuelles des fermes de grandes cultures wallonnes permettent-elles de remplacer des intrants commerciaux par des services écosystémiques ? ». Ainsi, la recherche vise à déterminer si les intrants issus de ressources non renouvelables peuvent être remplacés par des services écosystémiques de l'agroécosystème, le tout sans nuire à la marge économique de la rotation dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse du Brabant Wallon. Pour ce faire, la recherche se concentre sur les liens entre les pratiques culturales et des indicateurs de services écosystémiques de 60 champs.

La thèse se construit en trois phases se succédant (Tableau 1). La première phase a permis de mettre en place le réseau des parcelles, poser les choix des indicateurs de services écosystémiques et le choix des méthodes de mesures.

Tableau 1 : phases de déroulement de la thèse de L. Leveau

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

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

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

Quatre mémoires ont déjà contribué à la deuxième phase de la thèse de L. Leveau avec comme objectif de caractériser l'impact des pratiques agricoles sur une sélection de services écosystémiques sur 60 champs différents : Belin et Fockedey (2021) sur les 20 premiers

champs ; Dehaye et Dumont de Chassart (2022) et Vandenbroeck (2023) sur les 20 champs suivants; Marto et Van Cottom (2023) pour les 20 derniers champs.

Ces mémoires poursuivent globalement le même objectif mais sont répartis sur des champs ou des saisons différentes (hiver/printemps). Ces étalements temporel et géographique permettront d'observer la variabilité entre les années et les saisons de mesures et résultats ainsi que d'avoir un échantillon étalé sur l'ensemble du Brabant Wallon. De plus, chaque mémoire poursuit un objectif spécifique propre à chaque travail.

Les mesures réalisées dans le cadre de ce mémoire correspondent aux dernières mesures en champs des indicateurs de services écosystémiques réalisées dans le cadre de la thèse et prennent place dans les mêmes champs que le travail de Marto et Van Cottom (2023) mais se déroulent au printemps 2023 et non sur la période hivernale 2022-2023.

Introduction

Au cours du siècle passé, l'agriculture a poursuivi une quête du rendement sans réellement prendre en considération son empreinte environnementale, adoptant une approche productiviste qui s'est appuyée sur des pratiques et des ressources non durables. Cependant, face aux défis environnementaux actuels, l'agriculture contemporaine cherche à évoluer vers des méthodes plus durables, intégrant des technologies modernes et des pratiques écologiques pour concilier productivité et préservation de l'environnement.

Ainsi, une alternative proposée à l'emploi des ressources et pratiques non durables serait l'utilisation et le renforcement des services rendus par l'agroécosystème à l'humain, les services écosystémiques. Pour étudier cette possibilité, il est nécessaire de comprendre l'impact qu'ont les pratiques culturales sur ces services écosystémiques. Ainsi, ce mémoire cherchera à établir l'impact de différentes pratiques culturales sur quatre services écosystémiques dans 20 parcelles réparties sur 16 fermes du Brabant wallon.

Ce mémoire prend part à la recherche menée par Lola Leveau, dont l'objectif est « d'identifier, à travers une recherche collaborative et multidisciplinaire, si certains systèmes de grandes cultures appliqués actuellement en région limoneuse et sablo-limoneuse en Wallonie se rapprochent effectivement de l'objectif théorique de remplacement des intrants synthétisés chimiquement par des services agro-écosystémiques, sans affecter négativement les marges économiques et le bien-être de la profession d'agriculteur » (Leveau, 2021).

Ce mémoire est divisé en quatre parties. Tout d'abord, l'état actuel des connaissances sur le sujet est exposé dans l'Etat de l'art. En effet, ce chapitre explique à travers sa revue de la littérature les termes et concepts clés de ce travail et décrit les liens connus entre les pratiques culturales et les services écosystémiques étudiés. Le second chapitre, Matériel et méthode, explique en détail les modes opératoires de chaque expérience réalisée. Cette partie explique aussi la campagne de récolte des informations auprès des agriculteurs·rices ainsi que les méthodes d'analyses réalisées sur toutes les données. Les résultats de ces analyses sont présentés dans le chapitre 3. Enfin, la section Discussion - Interprétation commente les résultats et les met en lien avec la revue de la littérature décrite dans l'Etat de l'art.

En parallèle de cette recherche, un outil de partage des résultats des expériences aux agriculteurs·rices a été développé. Celui-ci est présenté dans la section « Approfondissement d'une thématique ».

1 Etat de l'art

1.1 Les défis de l'agriculture d'hier et d'aujourd'hui

Durant la deuxième moitié du 20^e siècle, les exigences imposées à la production agricole mondiale ont presque triplé en raison de la croissance de la population et de revenus (Wik et al., 2008). Pour atteindre ces exigences, l'agriculture a changé ses modes de production en changeant ou améliorant ses techniques par (Ameen & Raza, 2017; Borém & de Paula Corrêdo, 2022; Evenson & Gollin, 2003) :

- Le renforcement de l'utilisation de fertilisants chimiques
- Le développement de méthodes d'irrigation plus efficaces
- La diminution de la charge de travail humaine par l'augmentation de l'utilisation des machines agricoles et les améliorations technologiques de celles-ci
- Le développement et l'utilisation de pesticides et d'herbicides
- Le développement de variétés à haut potentiel de production

Ces changements et améliorations, décrits comme les fondements de la révolution verte, ont permis de réaliser des progrès significatifs dans l'augmentation de la consommation alimentaire par habitant. En effet, la proportion de personnes en sous-alimentation dans le monde a diminué de 37 à 17 % entre 1970 et 2002 (Wik et al., 2008).

Pour ce faire, la révolution verte a simplifié les agroécosystèmes et remplacé les fonctions biologiques, initialement fournies par diverses communautés d'organismes, par des intrants chimiques et énergétiques (Bommarco et al., 2013). Cependant, cette simplification a impacté de façon significative l'environnement et la biodiversité, mettant à mal la durabilité du système.

Le chemin pris par l'agriculture durant la fin du 20^e siècle a donc été guidé par la nécessité de production tout en délaissant les conséquences environnementales. L'agriculture conventionnelle (AC) a émergé de cette orientation axée sur la productivité. Ce type d'agriculture possède plusieurs définitions, parfois controversées, et ne comporte pas de cadre stricte ou de cahier des charges précis (Sumberg & Giller, 2022). L'AC est définie dans ce travail comme un système agricole motivé et guidé par une volonté de production maximale. Cette production étant assurée par l'utilisation de méthodes basées sur l'emploi d'une quantité relativement grande d'intrants non renouvelables. Ce système ne met pas ou peu en avant de considération environnementale.

Dans le contexte environnemental actuel, l'agriculture doit changer pour relever les défis à la fois sociaux et économiques, mais aussi environnementaux de la société. De ce fait, la production agricole doit croître plus vite que la croissance de la population et renforcer sa stabilité et sa résilience, le tout en suivant un chemin durable et en réduisant les pressions environnementales (Bommarco et al., 2013; Fróna et al., 2019).

Pour arriver à cela, une multitude de systèmes alternatifs à l'agriculture conventionnelle a été proposée tel que l'agriculture biologique (AB) et l'agriculture de conservation des sols (ACS) pour les plus courants. La littérature mentionne aussi l'agriculture intégrée qui combine les cultures agricoles, l'élevage, la foresterie avec leurs interactions écologiques (Leite-Moraes et

al., 2023) ou l'intensification écologique qui se base sur la gestion des organismes offrant des services qui ont un impact quantifiable directe ou indirecte sur la production agricole (Bommarco et al., 2013).

Ces systèmes ne sont pas exclusifs et se complètent, certains pouvant regrouper plusieurs systèmes alternatifs dans leur fonctionnement. De ce fait, l'alternative face à l'AC ne réside pas en un système unique mais en un ensemble de systèmes différents. Ce système alternatif combinerait ainsi plusieurs pratiques culturales (PC, section 1.5) qui se basent sur des processus écologiques afin de soutenir la production agricole et repenser le système alimentaire pour augmenter la durabilité du système agricole (Dendoncker et al., 2018). Ce système doit intégrer les services fournis par une bonne gestion de l'agroécosystème (section 1.2.1) (Bommarco et al., 2013), ceux-ci sont appelés services écosystémiques (SE, section 1.2) et jouent un rôle important dans la production agricole (Power, 2010)

Cependant Liu et al. (2022) expriment dans leur revue bibliographique le manque de recherches sur la dynamique des services écosystémiques sous différentes pratiques agricoles. Ces recherches étant utiles pour implémenter un modèle de gestion durable des agroécosystèmes, le présent travail œuvre à résoudre ce manque, en liant des indicateurs de SE à différentes pratiques agricoles.

1.2 Les services écosystémiques (SE)

La notion de service écosystémique, présentée dans la section 1 de l'état de l'art, intervient dans le concept d'écosystème. Un écosystème est défini comme : « un système fonctionnel de relations complémentaires entre les organismes vivants et leur environnement, délimité par des frontières choisies de manière arbitraire, qui, dans l'espace et le temps, semblent maintenir un équilibre stable mais dynamique » (Gliessman, 2004).

Dans le cadre de cette étude, le système étudié est un écosystème agricole, aussi appelé agroécosystème. Cette partie de la revue de littérature placera donc le cadre de l'agroécosystème en le définissant, avant de parler plus en profondeur des services écosystémiques associés.

1.2.1 L'agroécosystème et les services écosystémiques

L'agroécosystème ou l'écosystème agricole, est un écosystème modifié par l'activité humaine, géré et configuré dans un but principal de production (de nourriture, de fibres ou d'autres produits agricoles). Il a la particularité d'être composé de plusieurs sous-systèmes en interactions fortes (Moonen & Bàrberi, 2008). La division des sous-systèmes varie dans la littérature de deux à trois sous-classes mais reste similaire dans le fond (Liu et al., 2022; Moonen & Bàrberi, 2008; Tibi & Therond, 2018).

Ainsi, la subdivision présentée par Tibi & Therond (2018) divise les agroécosystèmes en deux: le système écologique et le système socio-économique. Le système écologique, aussi appelé le système biophysique, englobe tous les éléments vivants et non-vivants (hors bâti) présents à l'intérieur de ses frontières géographiques, qui interagissent et circulent au sein de cet espace. Le système socio-économique reprend les personnes qui gèrent le système écologique en

intervenant dessus (les agriculteurs·rices) ainsi que les moyens artificiels appliqués en vue de la production.

Les services écosystémiques interviennent dans ce concept d'agroécosystème comme étant les avantages que l'être humain tire des écosystèmes en fonctionnement (Costanza et al., 2017). Un exemple simple de service écosystémique tiré de l'agroécosystème en Wallonie est l'activité des vers de terre. En réalisant leur fonction, leur activité tend à rendre les sols de meilleure qualité par l'aération des sols, l'incorporation et la dégradation de la matière organique et d'autres procédés développés dans les sections ultérieures. L'être humain tire de ce système fonctionnel des bénéfices, appelés services écosystémiques. Ces bénéfices correspondent par exemple à un meilleur rendement ou à une charge de travail du sol nécessaire moins élevée.

1.2.2 Les différents types de services écosystémiques

La classification des SE correspond à un enjeu important dans l'étude et l'utilisation de ceux-ci comme motivateurs de décisions (Finisdore et al., 2020). Depuis l'apparition de ce concept de SE, différentes classifications ont émergé [par exemple : Costanza et al. (1997), De Groot et al. (2003) et Farber et al. (2006)].

Le Millenium Ecosystem Assessment (MEA), une évaluation mondiale de l'état des écosystèmes effectuée par l'organisation des nations unies (ONU) entre 2001 et 2005 propose une classification en quatre types de services. Cette dernière, souvent utilisée dans la littérature, a cependant été critiquée, car elle ne distinguerait pas les processus amenant aux services des services en tant que tel, ce qui complexifierait la prise de décision (Wallace, 2007). Le classement proposé par le MEA se base sur la fonction des SE. On distingue ainsi :

- Les services de soutien : ce type de services comprend les processus fondamentaux qui permettent le fonctionnement des écosystèmes (la formation des sols, le cycle des nutriments, la photosynthèse, etc.)
- Les services de régulation : ce type de services correspond aux services de régulation des conditions environnementales (la régulation climatique, la régulation des maladies, la purification de l'eau, etc.)
- Les services d'approvisionnement : ce type de services comprend la production des produits tangibles que les êtres humains obtiennent directement des écosystèmes (la nourriture, les fibres, l'eau douce, etc.)
- Les services culturels : ce type de services relève de la valeur symbolique et culturelle que les écosystèmes ont pour les êtres humains. Ils incluent la valeur récréative et esthétique des écosystèmes, ainsi que leur rôle dans la spiritualité et l'identité culturelle.

Dans le cadre de ce travail, qui s'insère dans la thèse de L. Leveau et qui succède à plusieurs travaux déjà réalisés, la classification utilisée sera celle proposée par Le Roux et al. (2008) afin de garder la continuité dans la description de SE. De plus, cette classification a été choisie car elle peut être facilement utilisée par les agriculteurs·rices et mise en œuvre à l'échelle de la parcelle, tout en mettant l'agroécosystème en son centre. Dans la classification établie par Le Roux et al. (2008), les fonctions écologiques sur lesquelles se basent les SE sont clairement différenciées des services écosystémiques, ce qui permet une meilleure gestion des

agroécosystème (Wallace, 2007). La critique évoquée par Wallace (2007) ne s'applique donc pas à la classification de ce travail.

Celle-ci divise les services en trois catégories illustrées dans la Figure 1 :

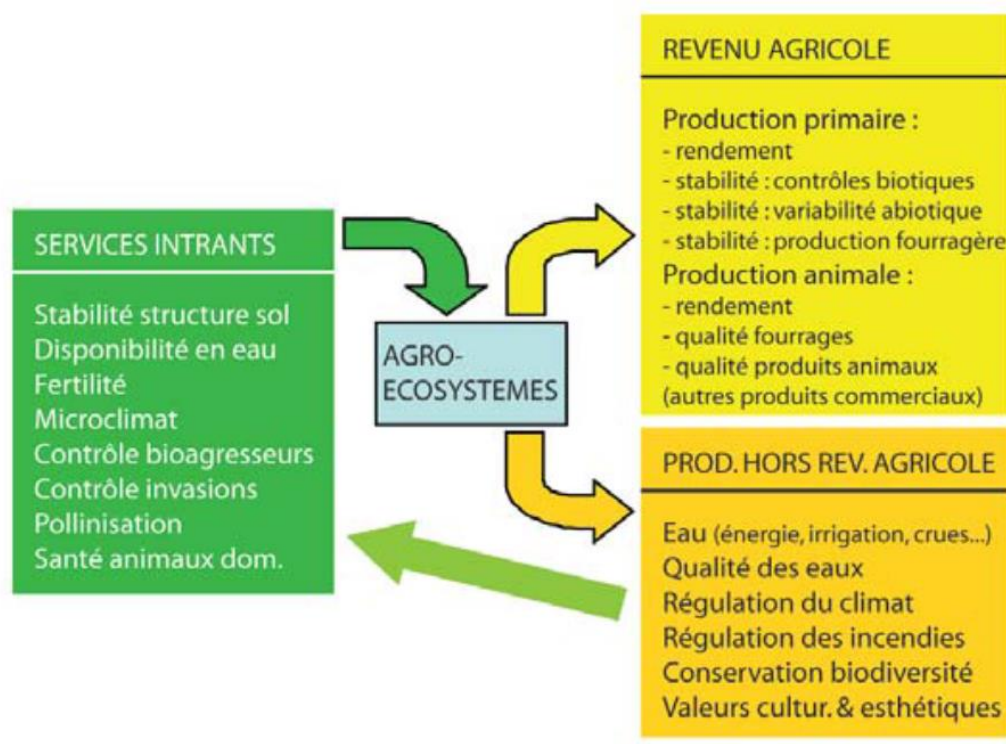


Figure 1: Schéma conceptuel de la classification de SE selon Le Roux et al (2008)

Les services intrants englobent les éléments qui favorisent l'approvisionnement en ressources, le maintien des caractéristiques physico-chimiques essentielles à la production agricole, et la régulation des interactions biotiques, qu'elles soient bénéfiques ou nuisibles.

Les services de production sont liés à la génération de revenus agricoles et englobent à la fois la production végétale et animale. Ils concernent non seulement les niveaux de production, mais aussi la stabilité au fil du temps et la qualité des produits obtenus.

Les services générés en dehors du revenu agricole direct englobent des aspects tels que la surveillance de la qualité de l'eau, la séquestration du carbone, la conservation des sols et de la biodiversité. Ce type de service ne sera pas évalué dans le cadre de ce travail.

1.2.3 Les services évalués dans ce travail

Les SE étudiés dans ce travail sont regroupés par type de services (Tableau 2). Les processus sur lesquels se basent le SE et le SE global correspondant sont présentés [selon Le Roux et al. (2008)]. Ce Tableau est repris et adapté des travaux précédant cette étude [Belin et Fockedey (2021) ; Dehaye et Dumont de Chassart (2022) ; Marto et Van Cottom (2023) ; Vandenbroeck (2023)].

Tableau 2 : Description des services écosystémiques étudiés dans ce travail, adaptée des travaux antérieurs [Belin et Fockedey, (2021) ; Dehaye et Dumont de Chassart (2022) ; Marto et Van Cottom (2023) ; Vandenbroeck (2023)]

Types de services	SE étudiés	Fonction de l'écosystème sur laquelle se base le SE	SE correspondant (selon Le Roux et al. 2008)
Intrants	Dynamique de la matière organique (MO)	Fragmentation et incorporation de la MO	Fertilité des sols
		Décomposition de la MO	
	Contrôle des adventices	Prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture	Contrôle des bioagresseurs
Production	Production végétale	Rendement du froment en grain et en paille	Production végétale

En outre, les fonctions de l'écosystème sur lesquelles se basent les SE ne représentent pas tout le processus soutenant le SE. Par exemple, la fertilité du sol n'est pas uniquement expliquée par les deux fonctions étudiées (la fragmentation et incorporation de la MO et la décomposition de la MO). De même que le SE de contrôle des bioagresseurs n'implique pas uniquement la prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de culture mais une multitude d'autres fonctions comme, par exemple, la régulation d'insectes ravageurs par les auxiliaires de cultures (Ratnadass, 2014).

La suite de cette revue de littérature décrira les connaissances actuelles des différents SE étudiés dans ce travail, avant de définir et décrire le terme pratiques culturales, et enfin fera un état des connaissances de l'impact des pratiques culturales sur les SE décrits.

1.3 La dynamique de la matière organique dans les sols de l'agroécosystème

La matière organique du sol (MOS) est un composant dynamique important de l'agroécosystème. Elle regroupe différents matériaux, allant de tissus végétaux ou animaux non-décomposés à l'humus en passant par différents états intermédiaires. L'humus étant l'état final de la MOS qui a pour particularité de ne présenter aucune empreinte de la structure anatomique du matériau dont il provient (Johnston et al., 2009).

Chimiquement, la MOS se compose de constituants organiques composés principalement de carbone (en fraction majoritaire), d'hydrogène, d'oxygène, d'azote, de soufre et de phosphore (Johnston et al., 2009).

La MOS joue un rôle important dans l'amélioration et le maintien des propriétés du sol (chimiques, physiques et biologiques). Bashir et al. (2021) présentent schématiquement l'enjeu de la MOS et son impact bénéfique sur ses propriétés (Figure 2).

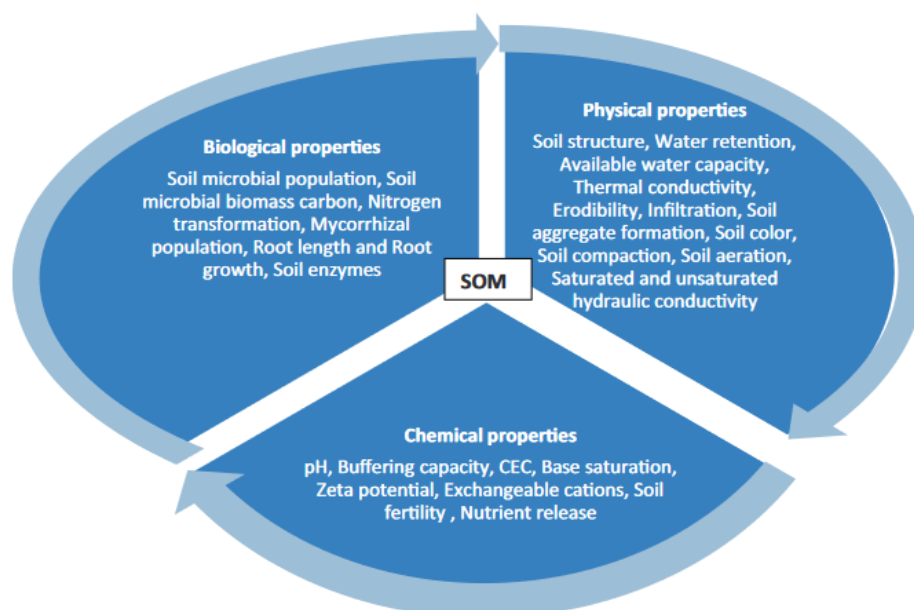


Figure 2 : Représentation de l'étendue de l'impact de la MOS (ici SOM) sur les propriétés du sol (Bashir et al., 2021)

Malgré cette importance capitale, la quantité de matière organique (MO) dans les sols de culture a tendance à décliner suite aux pratiques culturales post-révolution verte. Il est donc important de comprendre la dynamique de la MOS pour une gestion des stocks dans le temps. Ce travail s'attardera sur deux processus de la dynamique de la MOS : la fragmentation et l'incorporation de la matière organique au sol par l'activité des vers de terre et la décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes du sol.

1.3.1 La fragmentation et l'incorporation de la matière organique du sol par l'activité des vers de terre

1.3.1.1 Description et classification des vers de terre

L'intérêt que la communauté scientifique porte aux vers de terre (VDT) et à leur classification remonte à plusieurs décennies, avec par exemple des ébauches de taxinomie de VDT remontant à 1836 (Bouché, 1977). Bouché (1977) propose une classification basée sur la morphologie et le comportement, largement utilisée dans la littérature scientifique encore à l'heure actuelle (Bottinelli et al., 2020; Capowiez et al., 2022) et sur laquelle se basent les travaux précédant celui-ci. Cette classification comporte trois classes de VDT et se base principalement sur leurs interactions avec leur environnement et leur mode de vie dans le sol :

Les épigés : cette classe regroupe les petits VDT, généralement colorés qui vivent dans les premiers cm du sol. Ils ingèrent directement de la litière peu décomposée à la surface du sol. Ils sont généralement présents dans les sols forestiers et peu abondants dans les sols agricoles car ils nécessitent des milieux très riches en matière organique.

Les endogés Ils creusent des galeries inférieures à 1 mm de diamètre. Les galeries creusées ne sont pas forcément orientées verticalement (Bertrand et al., 2015) et forment des turricules à la surface du sol suite à l'ingestion des parties minérales et organiques du sol.

Les anéciques : cette classe regroupe les VDT de grande taille (de 200 à 1100 mm). Les anéciques creusent des galeries larges (supérieur à 1 mm de diamètre) et verticales, qui atteignent 1 mètre ou plus de profondeur, tout en consommant de la litière peu décomposée à la surface et forment des turricules (Bertrand et al., 2015). Ils réalisent donc de grands mouvements verticaux pour se nourrir en surface. Les galeries de ce type de VDT ont la particularité d'être semi-permanentes (elles sont réutilisées par le VDT) (Lemtiri et al., 2014).

En outre, il ne s'agit pas d'une classification en classes nettement séparées et exclusives ; ces trois catégories représentent trois pôles entre lesquels les espèces se placent. De ce fait, certaines espèces peuvent partager les caractéristiques de plusieurs catégories, et il existe des catégories intermédiaires (Bottinelli et al., 2020).

Bertrand et al. (2015) présentent dans leur revue de littérature les services des VDT apportés au système agricole en deux catégories : l'impact de l'activité des vers de terre sur la structure du sol et l'impact de l'activité de vers de terre sur la matière organique et les cycles des nutriments.

1.3.1.2 L'impact de l'activité des vers de terre sur la structure du sol

Les vers de terre jouent un rôle essentiel dans la structure du sol par leur activité de mélange des éléments constitutifs du sol et par la création de galeries qui y créent de la macroporosité (principalement les endogés et les anéciques). De ce fait, l'activité des vers de terre a tendance à améliorer la stabilité structurale des sols, leur porosité et leur capacité à infiltrer l'eau, ainsi qu'à diminuer leur érosion (Bertrand et al., 2015)

1.3.1.3 L'action des vers de terre sur la MOS

Les VDT ont un impact significatif sur la MOS en jouant plusieurs rôles dans le cycle du carbone, rôles différenciés en fonction du type écologique. Ainsi, les vers de terre anéciques et épigés ont un impact direct sur la MOS par l'ingestion puis la fragmentation et digestion de la litière de surface tandis que les VDT endogés auront tendance à ingérer le sol dans son entièreté : avec de la matière minérale et organique. De ce fait, la fraction organique du sol sera fragmentée et mixée et en partie liée à la matière minérale (formation de complexes organo-minéraux). Ensuite, le mélange fragmenté et lié est rejeté sous forme de turricules (Bertrand et al., 2015). De plus, l'activité de mélange des VDT permet d'incorporer la MO de surface au sol.

Les VDT et les microorganismes travaillent de pair dans la décomposition de la MOS. Leurs interactions peuvent être attribuées à différents mécanismes (Ahmed & Al-Mutairi, 2022; Brown, 1995) :

- Lorsque les vers ingèrent le sol, cela favorise la croissance de certains microorganismes grâce à l'ajout de mucus et met ces microorganismes en contact avec des résidus organiques.

- L'incorporation de la matière organique dans le sol crée des zones d'activité microbienne intense.
- Les vers de terre modifient la structure du sol, créant ainsi des habitats propices à l'activité microbienne.
- Les vers de terre sont responsables du transport horizontal et vertical des microorganismes, que ce soit en les transportant sur leur corps, en les hébergeant dans leur tube digestif, ou en les ingérant avec le sol ou la litière

1.3.2 La décomposition de la matière organique par les microorganismes du sol

L'intérêt de la MOS décrite précédemment montre l'importance d'une bonne gestion du stock de MOS. L'évolution du stock de la MOS étant un processus dynamique (avec des flux entrants et sortants), le processus de décomposition (flux sortant) est important à caractériser.

Ainsi, la décomposition de la matière organique est divisée en deux processus distincts selon Blume et al (2016) :

L'humification, ou stabilisation : ce processus correspond à la transformation et la liaison de la MO avec le sol. Les molécules organiques stabilisées étant liées avec les constituants minéraux du sol, cet état est relativement stabilisé contre la minéralisation. Il contribue par exemple à la structure des sols ou à sa capacité de rétention en eau. L'humus étant ensuite lentement minéralisé (processus suivant), cet état représente un stock de nutriments (Khosro Mohammadi, 2011).

La minéralisation : ce processus correspond à la dégradation complète de la MO en substances inorganiques et nutriments. Il est réalisé par les microorganismes (Condron et al., 2010; Hobara et al., 2014) et ceux-ci sont majoritairement composés de bactéries et de champignons (Condron et al., 2010). De façon générale, la minéralisation libère majoritairement du CO₂ (Hopkins & Gregorich, 2005) mais aussi les nutriments essentiels à la croissance des plantes tel que l'azote, le potassium, le phosphore, le soufre, le calcium, le sodium ou encore le magnésium (Blume et al., 2016). L'implication des microorganismes dans la minéralisation montre l'importance de l'étude et de la compréhension de la gestion des microorganismes pour la fertilité des sols.

L'importance de ces deux processus réside dans leur équilibre dynamique, pour avoir d'un côté la formation d'humus qui apporte des bénéfices au sol, et avoir d'un autre côté des nutriments accessibles aux plantes par la minéralisation.

De plus, une notion importante dans la décomposition de la MO par les microorganismes est le rapport C/N (carbone sur azote). Ce rapport indique la quantité de carbone sur la quantité d'azote d'un composé de MO (comme un compost ou un fumier) et renseigne sur le sort de l'azote, à savoir s'il aura tendance à être libéré et rendu disponible pour les plantes ou à être mobilisé par les microorganismes pour la décomposition de la MO apportée (Johnston et al., 2009; White, 2005).

1.3.2.1 La dynamique de la décomposition de la MOS

La décomposition de la MOS est un processus complexe, dont la dynamique, les produits et leur quantité changent en fonction des matériaux parents de la MOS (Berg & McClaugherty, 2014). De plus, la dynamique de la décomposition évolue au cours du temps et de façon non

linéaire (Keuskamp et al., 2013). En effet, l'hétérogénéité de la MOS est à prendre en compte pour représenter la dynamique de la MOS. Pour ce faire, la MOS doit être séparée en deux groupes (Wider & Lang, 1982) : les matériaux labiles, avec une vitesse de dégradation relativement élevée, et les matériaux récalcitrants avec une vitesse de dégradation relativement lente.

La caractérisation du SE de décomposition de la MO dans ce travail se base sur la perte de poids de thé au cours du temps (expérience présentée dans la partie 2.3.2).

L'approximation de ce processus de dégradation par perte de poids peut être décrite par l'équation (Keuskamp et al., 2013) :

$$W(t) = ae^{-k_1t} + (1 - a)e^{-k_2t} \quad (1a)$$

Avec :

- $W(t)$ le poids du substrat utilisé pour l'expérience après une période de temps t
- a la fraction labile de la MO
- $(1-a)$ la fraction récalcitrante de la MO
- k_1 et k_2 correspondant respectivement au taux de décomposition des fractions labiles et récalcitrantes de la MOS.

Dans le cadre de ce mémoire, cette équation peut être simplifiée dans la mesure où la décomposition de la partie récalcitrante de la MO n'a d'impact sur la perte de poids que pour de grandes périodes d'incubation (supérieures à la durée de l'expérience) ce qui donne l'équation simplifiée :

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

Dans ce travail, le service écosystémique de dégradation de la MOS est mesuré par deux paramètres calculés grâce à l'équation 1b (Keuskamp et al., 2013). Les calculs précis réalisés sont présentés dans l'annexe 1

- L'indicateur D_S :
Cet indicateur mesure le taux de stabilisation de la fraction labile de la MOS dans les champs d'essais et se rapporte au processus de stabilisation de la MOS décrit précédemment
- L'indicateur D_k :
Cet indicateur mesure le taux de décomposition de la fraction labile de la MOS dans les champs d'essais et se rapporte au processus de minéralisation décrit précédemment.

1.4 Le contrôle des plantes adventices

Le terme « adventice » se dit d'une plante qui pousse de façon spontanée dans une culture et dont la présence est plus ou moins dommageable à cette culture (Larousse, n.d.). Dans les cultures de froment (qui correspondent à la majorité des cultures étudiées dans ce travail), les pertes dues à la présence des adventices peuvent être plus grandes que les pertes dues aux insectes et aux maladies (Oerke, 2006). Le contrôle des plantes adventices représente donc un enjeu de taille dans les systèmes de production pour limiter les pertes (Khan et al., 2019).

Les mécanismes de nuisance peuvent aller de la simple compétition pour les ressources à des interactions allélopathiques. L'allélopathie se réfère aux effets positifs ou négatifs d'une plante sur une autre à travers la libération de composés secondaires dans le milieu (Alizadeh et al., 2023). Dans les cas des adventices, il s'agit d'interactions négatives. De plus, certaines plantes adventices peuvent avoir un impact négatif indirect sur les cultures de production en jouant un rôle d'hôte pour certains ravageurs (Khan et al., 2019).

1.4.1 La prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de cultures

Ce travail, au travers des expérimentations en champs décrites ultérieurement, porte une attention particulière au processus de prédation des graines d'adventices. Cette section sera donc dédiée à sa description et aux enjeux liées à ce processus.

Un auxiliaire de culture se définit comme étant un organisme vivant, fournissant des SE permettant de favoriser la production agricole (Joseph et al., 2018). La prédation des graines d'adventices par ces organismes correspond simplement à la consommation des graines de plantes néfastes à la culture, ce qui a pour impact de diminuer le nombre de germinations potentielles d'adventices dans les cultures.

Les auxiliaires de cultures impliqués dans la prédation des graines d'adventices dans les agroécosystèmes sont principalement des invertébrés (Osman et al., 2022), et de façon majoritaire les carabes (Tibi & Therond, 2018). Dans une moindre mesure, les oiseaux peuvent aussi contribuer à ce SE (Tibi & Therond, 2018)

Il existe deux types de prédation des graines : la prédation pré-dispersion qui intervient tandis que les graines d'adventices sont encore sur les plantes et la prédation post-dispersion qui intervient lorsque les graines d'adventices sont au sol (Osman et al., 2022).

Dans leur étude de cas menée en Hongrie sur la prédation de graines d'adventices, Osman et al. (2022) expliquent que, malgré des taux de prédation variant en fonction de la saison et du champ, la prédation des graines peut réduire le nombre de graines dans le sol de 50 %, ce qui montre l'enjeu de la gestion de ce SE.

1.5 Les pratiques culturales (PC)

Les pratiques agricoles se définissent globalement comme étant les méthodes et techniques utilisées dans les activités agricoles, ce qui englobe un éventail d'activités, depuis le type de travail de sol, l'utilisation d'engrais ou de produits phytosanitaires, jusqu'au type de culture et de rotation (Baaken, 2022; Meynard et al., 2023). Ces pratiques ponctuelles peuvent être regroupées en systèmes de production qui regroupent et parfois excluent différentes PC. Les systèmes s'écartant de la production conventionnelle rencontrés dans cette étude et en Wallonie sont les suivants :

- L'agriculture biologique : ce système de production labellisé et réglementé est défini par la Région wallonne comme suit : « La production biologique est un système global de gestion agricole et de production alimentaire qui allie les meilleures pratiques environnementales, un haut degré de biodiversité, la préservation des ressources naturelles, l'application de normes élevées en matière de bien-être animal et une méthode de production respectant la

préférence de certains consommateurs à l'égard de produits obtenus grâce à des substances et à des procédés naturels » (SPW, n.d.-a). Ce système exclu, par son règlement, l'utilisation de plusieurs pratiques culturales comme l'utilisation d'organismes génétiquement modifiés et restreint l'utilisation d'herbicides et pesticides artificiels. Elle représente 15 % des exploitations en Wallonie (SPW, n.d.-b), soit 12.7% de la surface agricole utile wallonne (*Chiffres du Bio*, n.d.)

- L'agriculture de conservation des sols (ACS) : Ce système cultural tend à conserver et améliorer la structure des sols en se basant sur 3 principes de base (*L'agriculture de Conservation* | *FAO*, n.d.) la perturbation mécanique minimale du sol (par exemple par un travail superficiel ou un semis direct), une couverture organique du sol permanente (par des résidus de culture ou des cultures de couverture) ainsi que la diversification des espèces cultivées. Le tout pour tendre à rendre le sol « autofertile » c'est-à-dire que le sol fournit aux plantes les services nécessaires pour obtenir un bon rendement (CRA-W. | Centre wallon de Recherches, n.d.)
- L'agriculture biologique de conservation : Ce système de culture tend à combiner les principes de l'ACS et celle de l'AB. En effet, l'AB a tendance à mobiliser une charge de travail du sol supplémentaire dans la prévention d'adventices (en remplaçant l'utilisation de pesticides par un labour par exemple) (CRA-W. | Centre wallon de Recherches, n.d.), alors que l'ACS a tendance recourir davantage aux herbicides en remplacement du labour ou d'autres types de travail du sol ayant un effet désherbant.

En plus d'être regroupées par système de production, les PC peuvent être regroupées par catégories, ce que fait L. Leveau dans son travail. En effet, comme expliqué dans le contexte de cette étude, ce travail s'intéresse non pas aux liens entre les systèmes culturaux (AB, AC, ACS ou ACB) et les SE mais s'intéresse surtout aux liens entre les pratiques culturales et les SE. De ce fait, les mesures ne sont pas réalisées en observant les différences entre les SE dans différents systèmes de cultures mais bien en analysant l'impact de chaque PC sur les indices de SE.

Ainsi, les pratiques culturales utilisées dans ce travail peuvent être classées en six catégories :

- Le travail du sol
- Les fertilisations et amendements
- Les produits phytosanitaires
- Les rotations
- Les couvertures de sol
- Les couverts intermédiaires

1.6 Liens entre les pratiques culturales et les services écosystémiques

Cette partie présente l'état de la littérature sur les connaissances qui existent sur l'impact des pratiques culturales sur les SE étudiés dans ce travail.

1.6.1 Le lien entre les pratiques culturales et l'activité des vers de terre

L'impact des PC sur le VDT est multiple et suscite l'intérêt des scientifiques depuis plusieurs décennies (Syers & Springett, 1984). Les PC peuvent avoir un impact à différents niveaux de

la communauté de VDT (Diallo et al., 2023): sur la diversité des espèces, sur le nombre d'individus (par espèce ou au total) ainsi que sur la biomasse de VDT (par espèce ou au total).

Plusieurs études ont démontré que le labour est généralement la PC avec le plus gros impact négatif sur les vers de terre (Bertrand et al., 2015; Diallo et al., 2023; Simonsen et al., 2010) en réduisant aussi bien le nombre d'individus, la biomasse totale que la diversité des espèces des agroécosystèmes (Bertrand et al., 2015). Ce travail mécanique du sol, par le retournement des mottes ou le passage des outils, blesse ou tue directement les VDT et les expose aux prédateurs. En outre, les VDT anéciques ont tendance à être plus touchés par le travail du sol car la destruction des galeries verticales qu'ils ont tendance à réutiliser les prive de leur habitat et empêche leur fuite face aux prédateurs (Lemtiri et al., 2014). De plus, l'intensité du labour, définie comme la combinaison de la profondeur et la fréquence de labour, est à prendre en compte dans l'évaluation de l'impact : un labour profond et récurrent à un impact plus néfaste sur la population de VDT qu'un labour superficiel et occasionnel (Bertrand et al., 2015). Inversement, les systèmes culturaux sans labour favorisent l'abondance des individus et des espèces des VDT (Lemtiri et al., 2014).

Les amendements organiques dans le sol ont montré dans certaines études un impact positif sur les populations de VDT (Simonsen et al., 2010; Spiegel et al., 2018). Cependant, d'autres expériences menées concluent ne pas avoir observé d'impact significatif après l'ajout d'amendements organiques (Diallo et al., 2023; Valdez et al., 2020).

La fertilisation minérale augmentant la production primaire des plantes, l'environnement des VDT s'en trouve amélioré avec globalement plus de nourriture et de cachettes face aux prédateurs (Lemtiri et al., 2014). De ce fait, la fertilisation minérale peut indirectement être bénéfique aux VDT (Diallo et al., 2023; Lemtiri et al., 2014; Spiegel et al., 2018).

L'impact de l'utilisation des pesticides sur l'abondance et la diversité des espèces de VDT fait débat dans la communauté scientifique, avec d'un côté des études montrant que les pesticides ont eu un impact négatif (Beaumelle et al., 2023; Pelosi et al., 2014), et d'un autre côté des études ne montrant pas d'effets des pesticides sur les populations de VDT (Diallo et al., 2023; Simonsen et al., 2010). Diallo et al. (2023) expliquent ces avis divergents par l'existence de facteurs complexes aggravant ou limitant l'impact des substances sur les VDT. Ces facteurs peuvent être liés aux produits utilisés (dose, molécules actives, persistance dans les sols, etc.) ou aux conditions environnementales durant l'application. De plus, la toxicité d'un produit sur les VDT dépend des espèces de VDT présents (Diallo et al., 2023; Pelosi et al., 2014). Or, la plupart des études sur la toxicité des pesticides sont menées sur une espèce de VDT et en laboratoire (loin des conditions des agroécosystèmes) (Bertrand et al., 2015).

En outre, Beaumelle et al. (2023) montre dans leur méta-analyse de 54 études que les pesticides à large spectre semblent avoir plus d'impact négatif sur la diversité de la faune du sol que les pesticides ciblés.

1.6.2 Le lien entre les pratiques culturales et l'activité des microorganismes dans le sol

Les microorganismes du sol et leur activité de décomposition de la MOS sont impactés par l'environnement et les caractéristiques physico-chimiques du sol (Khosro Mohammadi, 2011;

Naz et al., 2022). Ainsi, plusieurs PC influencent la décomposition de la MO par les microorganismes, directement ou indirectement.

De manière globale, la quantité de matière organique disponible influence directement la capacité de décomposition par les microorganismes, que ce soit par l'apport de résidus de culture ou par l'apport de fertilisation organique (Khosro Mohammadi, 2011)

Ensuite, les espèces de plantes présentes dans l'agroécosystème, et donc les cultures et intercultures, impactent aussi les microorganismes, en particulier ceux ayant des interactions avec les racines de ces plantes (Kowalchuk et al., 2002).

Comme expliqué précédemment, l'activité des VDT favorise aussi l'activité de décomposition de la matière organique par les microorganismes.

De plus, le labour impacte indirectement l'activité des microorganismes en apportant des modifications à leur environnement tel qu'une modification de l'accessibilité de la matière organique (qui est enfouie), la température du sol ou encore du pH.

Enfin, la fertilisation azotée tend à diminuer l'activité des microorganismes de décomposition de la MOS (Zang et al., 2016).

1.6.3 Lien entre les pratiques culturales et la prédation des graines d'adventices

L'intensité de la prédation des graines d'adventices est impactée par différentes pratiques culturales (Menalled et al., 2007), en impactant directement ou indirectement les auxiliaires de culture (par exemple en impactant l'habitat de ces auxiliaires) (Sarabi, 2019)

Ainsi, le labour impacte le taux de prédation de manière indirecte en réduisant l'accès des graines aux auxiliaires (le labour enfouit les graines présentes à la surface du sol). De plus, les perturbations du sol par son travail peuvent impacter directement les auxiliaires responsables de la prédation, comme par exemple les fourmis pour lesquelles le travail du sol perturbe les colonies (Baraibar et al., 2011).

L'utilisation de certains insecticides a quant à lui un impact direct sur les auxiliaires de culture en les tuant (Menalled et al., 2007).

En outre, la gestion des systèmes favorisant les habitats permanents pour les auxiliaires (bandes enherbées, proximité de prairies, etc.) peut améliorer le taux de prédation de graines d'adventices en offrant un habitat non détruit entre les cultures, favorisant le retour des auxiliaires pour la culture suivante (Sarabi, 2019).

2 Matériel et méthode

La campagne d'expériences réalisées dans ce mémoire s'est déroulée dans 20 champs d'essais mis à disposition par des agriculteurs·rices pour la recherche de L. Leveau. Dans chacun des champs a été délimitée une parcelle d'essais dans laquelle s'est déroulée l'ensemble des expériences. Par soucis de clarté et pour la suite de ce mémoire, le terme « parcelle » correspond à la partie délimitée du champ dans laquelle les expériences ont pris place, tandis que le terme « champ » se réfère à l'entièreté de la surface de la terre cultivée sous une même culture.

2.1 Réalisations antérieures au mémoire

Les expériences prenant place dans 20 parcelles déjà utilisées dans le mémoire précédant ce travail (Marto et Van Cottom, 2023), cette section décrit le procédé de sélection des champs par L. Leveau ainsi que la démarcation des parcelles d'essais dans ces 20 champs par Marto et Van Cottom (2023).

2.1.1 Sélection des parcelles

Tout d'abord, la sélection des 20 champs a été réalisée par L. Leveau sur base de critères obligatoires (Tableau 3). Ces derniers ont été choisis en concertation avec plusieurs experts afin de permettre une comparaison avec d'autres travaux similaires [tel que Boeraeve (2018)].

Tableau 3 : critères de sélection obligatoires pour les champs utilisés dans la thèse de L. Leveau

Région d'étude	Pratiques agricoles	Taille de la parcelle	Type de sol	Topographie
• Régions sablo-limoneuse et limoneuse • Proximité de l'UCLouvain (30 minutes en voiture maximum de l'université)	• Culture de froment d'hiver (<i>Triticum aestivum</i>) ou d'épeautre (<i>Triticum spelta</i>)	• Parcelle d'au moins 1 hectare	• Sol de type Aba (sol limoneux à horizon B textural non gleyifié et drainage favorable)	• Pente maximale de 10%

Tous les champs utilisés dans le cadre du travail de L. Leveau (60 champs au total) partagent ces mêmes caractéristiques, ce qui inclut donc les 20 champs utilisés dans ce travail.

En plus de ces critères obligatoires, la sélection se base aussi sur des critères où une diversification maximale est recherchée. Dans cette catégorie, la maximisation de la diversité au niveau de l'historique des pratiques culturales et du paysage environnant (type d'occupation du sol aux alentours de la parcelle) au sein de l'échantillon de champs permet de capturer la diversité des gestions des parcelles agricoles du Brabant wallon et d'observer l'impact d'un grand nombre de PC sur les SE.

2.1.2 Recensement des pratiques culturales des parcelles

Le recensement des pratiques culturales des champs a été effectué par L. Leveau au travers d'interviews. Celles-ci suivent un guide d'entretien qui se décline en deux parties.

Tout d'abord, des questions générales sur la parcelle et son historique sont posées pour déterminer les caractéristiques du champ, tel que l'existence de zones particulières (tâche de sable ou fusion de deux parcelles différentes par exemple) ou le type d'agriculture pratiquée (agriculture de conservation ou bio par exemple).

La seconde partie vise à compléter une ligne du temps sur dix ans de toutes les pratiques culturales (PC) appliquées au champ (annexe 2). Ces PC sont regroupées en catégories pour lesquelles une série de questions préétablies est posée afin de caractériser chaque pratique utilisée à chaque période. Les catégories sont : les cultures destinées à la récolte, les cultures de couverture du sol, les opérations de travail mécanique et manuel, les opérations de fertilisation et d'amendement, l'application de produits phytosanitaires et la lutte biologique ainsi que l'irrigation. Les données récoltées sont inscrites dans la ligne du temps et servent à calculer les indicateurs de PC. L'annexe 3 reprend l'ensemble des indicateurs calculés, leur abréviation, leur type et leur méthode de calcul.

Dans le cadre de ce mémoire, certaines pratiques culturales ont été écartées pour différentes raisons présentées à la section 2.2.

2.1.3 Mise en place des parcelles dans les 20 champs

Au sein des 20 champs employés dans la campagne d'expérimentation de ce mémoire ont été placées 20 parcelles d'essais par Marto et Van Cottom (2023). Chaque parcelle a d'abord été créée virtuellement à l'aide du logiciel QGIS (version 3.16) dans le courant du mois d'octobre 2022. Les coordonnées des coins et du centre de celles-ci sont importées sur un dispositif GPS afin de démarquer les parcelles dans le champ à l'aide de piquets blancs ¹d'environ un mètre de haut pour les coins et d'un drapeau d'environ 180 cm pour le centre. L'emplacement exact des lieux d'expériences de Marto et Van Cottom (2023) a ensuite été déterminé dans les 20 parcelles, en évitant les traces des machines agricoles (telles que les traces de pulvérisateurs).

En exemple, la Figure 3 montre la localisation de 4 dispositifs expérimentaux au sein de la parcelle n°51. En effet, cette figure montre le placement de deux dispositifs mis en place dans le cadre de ce travail (« Expériences de ce mémoire ») ainsi que l'emplacement de deux dispositifs du travail de Marto et Van Cottom (2023) (« Expériences antérieures »). De plus, la délimitation de la parcelle et la localisation des passages d'engins agricoles y sont représentées.

¹ Pour une meilleure visibilité lors de la phase mature des céréales, l'extrémité des piquets était peinte en rouge car la couleur blanche du piquet est difficilement discernable de la couleur des céréales avant la récolte (jaune).

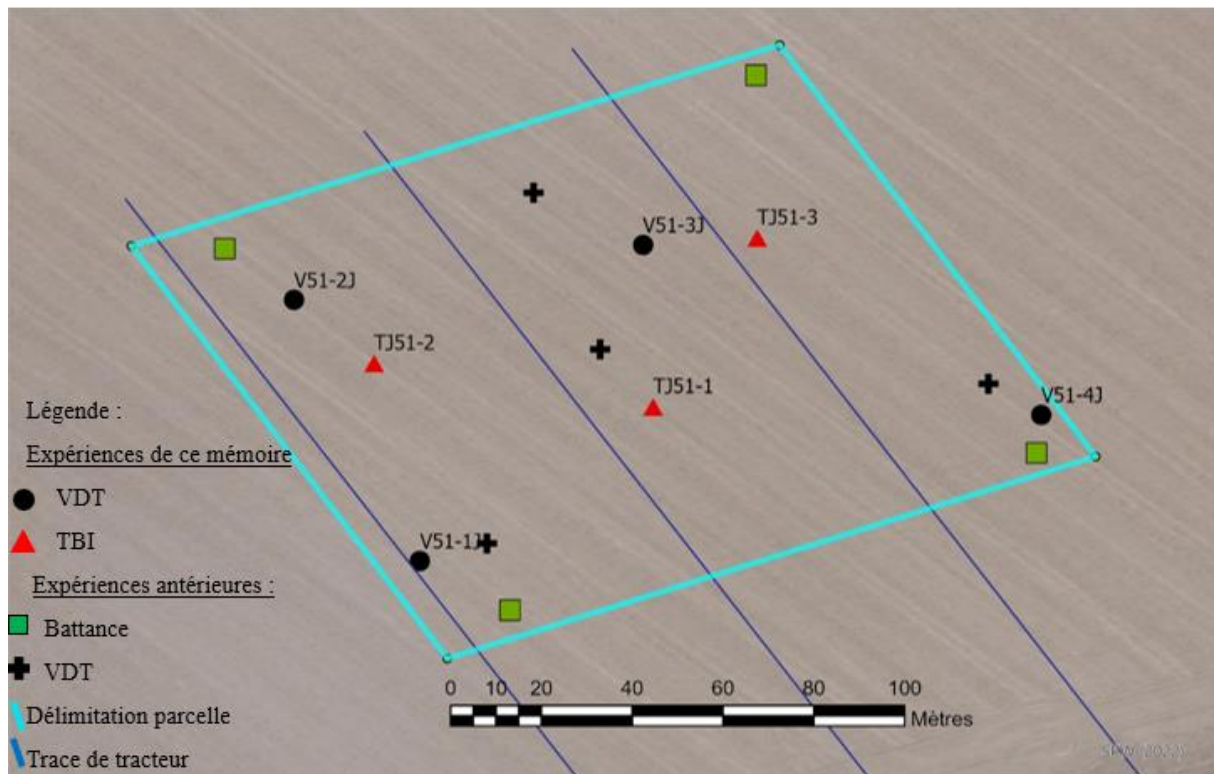


Figure 3 : Exemple de carte de positionnement des expériences de ce mémoire [cages à VDT et placettes de thés (TB)] et des expériences antérieures de Marto et Van Cottom (2023) (cages à VDT et placettes de battance) ainsi que les traces des machines agricoles. Parcelle n°51

2.2 Sélection des indicateurs de pratiques culturelles utilisés dans le travail

Une sélection de 44 indicateurs issue des 73 indicateurs calculés initialement par L. Leveau a été réalisée (Tableau 4). L'ensemble des 73 indicateurs est présenté en annexe 3. La sélection des indicateurs s'est basée sur différents critères :

- La redondance de la signification de certains indicateurs. En effet, certains indicateurs décrivent de façon très similaire une pratique culturelle donnée.
- Les SE étudiés dans ce travail ne sont qu'une partie des SE étudiés dans le travail de L. Leveau. Certaines PC n'ont pas d'intérêt à être comparées avec les SE étudiés dans ce travail.
- La sélection des indicateurs de PC effectuée dans les travaux précédant ce mémoire. Dans l'optique d'une comparaison des résultats avec les travaux antérieurs, une sélection similaire sera effectuée afin de pouvoir comparer les résultats précédents aux résultats de ce travail.

Les méthodes de calculs de ces indicateurs et de tous les indicateurs calculés par L. Leveau sont reprises dans l'Annexe 3.

Tableau 4 : Indicateurs des pratiques culturales et leur abréviation utilisées dans les analyses de l'impact des PC sur les SE étudiés dans ce travail

	Indicateur	Abréviation
Pratiques généralistes	Label biologique	AB
	Emploi du terme TCS	TCS
	Emploi du terme Agriculture de conservation	AC
	Emploi du terme Agriculture conventionnelle	Aconv
Cultures récoltées	Précédent du froment simplifié	PrecedentSimple
	Diversité des familles végétales récoltées	DivFamRec
	Diversité des espèces récoltées	DivEspRec
	Fréquence des récoltes de plusieurs espèces simultanément	EspRecAsso
	Nombre de variétés récoltées présentes par saison culturale et par surface cultivée	VarRecTotal ParSurf
	Fréquence de culture des céréales	FreqPoaceae
	Fréquence de culture récoltées sous le sol	FreqRecolteSol
	Fréquence de culture récoltées en automne	FreqRecolteAutomne
Couverture du sol	Fréquence des cultures sarclées	FreqSarclée
	Temps de cultures total	Tps_CulturesTout
	Temps de mulch mort	Tps_Mulch
	Temps de sol travaillé non semé	Tps_SolTravaille
	Nombre moyen de familles associées en interculture	FamParCV
Total	Nombre moyen d'espèces associées en interculture	EspParCV
	Diversité des familles totale	DivFamTot
Fertilisants et amendements	Diversité des espèces totale	DivEspTot
	Azote minéral total apporté	NminTot
	Azote organique total apporté	NorgTot
	Azote total apporté	Ntot
	Potassium total apporté	Ktot
Travail mécanique	Phosphore total apporté	Ptot
	Années depuis le dernier retournement	Temps_DernierLabour
	Fréquence des retournements	Freq_Labour
	Années depuis le dernier usage d'outil animé	Temps_DernierAnime
	Fréquence des travaux avec outils animés	Freq_OutilAnime
	Fréquence des travaux de fragmentation	Freq_Fragmentation
	Profondeur moyenne des travaux de fragmentation	Prof_Moy_Fragmentation
	Fréquence des travaux de mélange	Freq_Melange
	Fréquence des travaux de mélange profonds	Freq_MelProf
Utilisation de produits phytosanitaires	Profondeur cumulée de tous les types de travaux	ProfCum_Tout
	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	IFT_Triticum_aestivum_herb
	IFT fongicide moyen du Triticum aestivum	IFT_Triticum_aestivum_fong

Covariab les	IFT insecticide moyen du Triticum aestivum	IFT_Triticum_aestivum_insect
	IFT régulateur moyen du Triticum aestivum	IFT_Triticum_aestivum_reg
	Date de semis du Triticum aestivum avant les mesures de SE	Date_Semis_Triticum

2.3 Expériences

La mise en place des expériences a été effectuée sur plusieurs mois. Dans chaque parcelle, trois dispositifs expérimentaux ont été placés : les paniers à VDT, les placettes de thé et les cartes de prédation des graines d'adventices. L'agenda des mesures a été établi (Tableau 5).

Tableau 5 : Agenda des expériences et récoltes par semaine. Les dates du lundi sont données en première ligne (« semaine du ») et les lignes verticales épaisses signifient une discontinuité dans les dates des semaines. Les dates de récoltes des plantes ne sont pas indiquées car celles-ci varient en fonction des champs et de la date de moisson du champ. Chaque couleur représente les manipulations sur un dispositif expérimental à l'exception des semaines du 19 et 26 juin où deux manipulations différentes ont été réalisées simultanément.

Semaines du	6 mars 2023	13 mars 2023	3 avril 2023	17 avril 2023	15 mai 2023	29 mai 2023	19 juin 2023	26 juin 2023	4 septembre 2023
Lundi			Pose des sachets de thé	Relevé données des paniers 1	Relevé données des paniers 2	Fabrication de cartes de prédation		Reprise des sachets et des paniers	Pesée des plantes récoltées
Mardi			Pose des sachets de thé	Relevé données des paniers 1	Relevé données des paniers 2	Fabrication de cartes de prédation		Reprise des sachets et des paniers	Battage plantes
Mercredi			Pose des sachets de thé	Relevé données des paniers 1	Relevé données des paniers 2		Pose des cartes de prédation	Reprise des cartes de prédation	Pesée et analyse de l'humidité des grains
Jeudi			Pose des sachets de thé				Reprise des sachets et des paniers		
Vendredi							Reprise des sachets et des paniers		
Samedi	Mise en place des paniers	Mise en place des paniers							
Dimanche	Mise en place des paniers	Mise en place des paniers							

2.3.1 Paniers à vers de terre

L'expérience menée pour mesurer le SE d'enfouissement et de décomposition de la MO de la litière par les VDT est tirée de « l'Observatoire Participatif Des Vers de Terre » (OPVT) (*Protocole participatif - Paniers à Vers de Terre - EcoBioSoil*, n.d.) et plus précisément d'une version adaptée de leur protocole, réalisée par L. Leveau, A. Fockedey, J. Dumont de Chassart et J. Van Den Broeck. Cette adaptation modifie le protocole original afin de correspondre à l'étude de l'activité des VDT dans le cadre de la thèse de L. Leveau, à savoir dans des champs de froment ou d'épeautre en Wallonie.

Le principe général de cette expérience consiste en l'utilisation de paniers à VDT (Figure 4), remplis de paille sur lesquels sont analysés différents indicateurs d'activités des VDT : la formation de turricules et de cabanes au cours du temps et la quantité de paille incorporée et dégradée par les VDT. Cette expérience a été menée de mars 2023 à juin 2023.



Figure 4: Exemple de panier à vers de terre, photo prise juste après la mise en place.

2.3.1.1 Description des paniers

Les paniers ayant été utilisés depuis le début des mesures de la thèse de L. Leveau en 2021, la construction des paniers n'a pas été réalisée dans le cadre de ce travail et n'y est donc pas décrite. Les paniers sont faits de grillage quadrillé de carrés de 12 mm et composés de deux parties ; le panier en tant que tel et son couvercle. Ils mesurent 50 cm x 30 cm x 10 cm et sont remplis de 50g de paille sèche bio.

2.3.1.2 Préparation de la paille

La première étape de l'expérience est la préparation de la paille. Celle-ci est d'abord coupée en morceau de maximum 5 cm et mise en gros sac, et son taux d'humidité est calculé afin d'en déduire la masse sèche par gramme de paille. En effet, la paille étant un résidu de culture caractérisé par un certain pourcentage d'humidité, le protocole se base sur des masses de paille sèche afin de ne pas biaiser les mesures à cause de ce facteur pouvant varier en fonction de la paille utilisée (par son stockage, l'année de récolte, la température, etc.).

Pour ce calcul, 4 échantillons de 10,00 g de paille hachée sont placés dans une étuve à 60°C pour 4 jours. Les échantillons séchés sont ensuite pesés et la différence de masse entre la paille humide (avant séchage) et sèche (après séchage) est calculée pour chaque échantillon. Enfin, la moyenne des différences est calculée (Tableau 6).

Tableau 6: Calcul de l'humidité de la paille par 4 échantillons.

	Masse avant séchage [g]	Masse après séchage [g]	Différence [g]	Différence moyenne [g]
Echantillon 1	10,00	9,07	0,93	0,92
Echantillon 2	10,00	9,11	0,89	
Echantillon 3	10,00	9,02	0,98	
Echantillon 4	10,00	9,12	0,88	

Le pourcentage d'humidité est ensuite donné par l'égalité suivante :

$$\text{Hum [\%]} = (\text{Différence moyenne/Masse avant séchage}) * 100 \quad (2)$$

Soit dans le cas de ces mesures :

$$\text{Hum [\%]} = 0,92/10 * 100 = 9,2 \%$$

Ce pourcentage d'humidité permet ensuite de calculer la masse de paille humide nécessaire pour avoir dans chaque panier 50 g de paille sèche :

$$50 + 50 * 9,2\% = 54,6\text{g.}$$

Ensuite, 80 sachets de 54,6g de paille « humide » (ce qui représente donc 50g de matière sèche par sachet) ont été préparés pour le placement des paniers en champs. Une attention particulière a été portée au fait de ne pas utiliser les fonds de sacs de paille hachée qui comportait trop de poussière, ce qui pourrait fausser les résultats car la poussière de paille aurait tendance à être transportée par les vents plutôt que par les VDT.

La paille provenant du même ballot (du centre universitaire Alphonse de Marbaix), le pourcentage d'humidité de l'échantillon est supposé être représentatif de l'ensemble de la paille utilisée dans le cadre de ce travail.

2.3.1.3 Mise en place en champ

La mise en place en champ a été effectuée dans les parcelles d'essais des agriculteurs·rices déjà délimitée par Marto et Van Cottom (2023) dans leur travail.

Quatre paniers par parcelle ont été installés. Un panier a été placé dans chaque quart de parcelle d'essai, en évitant les passages de roues de tracteurs et les expériences encore en place avec leur chemin d'accès.

Le protocole original prévoyait trois paniers de mesures et un panier témoin modifié avec des mailles plus fines pour éviter que la faune de sol n'accède à la paille. Dans le cadre de cette expérience et au vu des conclusions précédentes, il a été choisi de ne pas mettre de panier témoin et de mettre 4 paniers de mesures. En effet, le panier témoin ne se décomposait que de manière négligeable. Il a donc été décidé qu'il serait plus intéressant de réaliser une mesure supplémentaire par parcelle.

Après identification de l'endroit de placement et marquage au GPS, la future zone recouverte par le panier a été désherbée. Cette étape a été réalisée à la main car les racines n'étaient pas encore profondes et la terre humide. Dans certains cas, un outil de désherbage peut être nécessaire pour retirer la plante entière (avec les racines) et éviter ainsi qu'elle ne repousse dans

le panier, perturbant les futures mesures. Il est cependant important de ne pas trop remuer la terre lors du désherbage pour éviter de simuler un travail du sol supplémentaire et fausser les résultats.

Ensuite, la zone désherbée est nivelée en grattant avec le fond du panier avant de le déposer au sol. Chaque panier (sans couvercle) est ancré par des agrafes d'environ 20 cm de profondeur à chaque coin du panier pour le maintenir au sol. De plus, un piquet de marquage d'un mètre de haut est positionné à côté du panier pour faciliter les futures recherches.

Après cela, un sachet de 50g de paille sèche (donc 54,6g de paille provenant du ballot dans ce cas) par panier a été déversé et la paille répartie de façon homogène sur toute la surface du fond du panier. Un volume de 25 cl d'eau a été versé sur toute la surface de la paille à l'aide d'une bouteille au bouchon perforé afin d'alourdir un peu la paille et éviter ainsi que le vent ne la déplace. Par la suite, cette opération n'est plus nécessaire car les céréales se développent et protègent le panier des grands vents.

Après quoi l'étiquette d'identification est attachée directement à une maille du panier. Le protocole original prévoyait de placer un petit piquet dans le panier pour attacher l'étiquette d'identification mais il a été choisi de l'attacher directement au panier pour éviter de devoir déplacer du matériel en plus lors de la mise en place.

Enfin, le couvercle du panier est placé et maintenu en place en pinçant légèrement les coins pour mettre en contact les mailles du couvercle avec le panier. Une première photo est ensuite prise.

2.3.1.4 Mesures en champ

Les mesures en champ s'effectuaient tous les mois comme illustré dans l'agenda présenté dans le Tableau 5 comme « relevé des données paniers ».

Ces mesures se déroulent en 3 étapes :

- Ouverture du couvercle du panier et désherbage de la paille

Le désherbage sert à retirer les repousses de céréales, les adventices ou les couverts permanents (comme du trèfle, présent dans plusieurs champs) qui repoussent et recouvre la paille. Il est important de ne pas déranger la paille car les structures des VDT doivent être observées dans les étapes suivantes. Dès lors, le désherbage s'effectue à la main si les plantes sont petites et sans racines trop profondes ou avec des ciseaux pour les plantes plus développées à enracinement plus profonds.

- Comptage des structures réalisées par les VDT : les turricules et les cabanes

Cette mesure s'effectue à l'aide d'une fiche de relevés de l'OPVT qui permet d'identifier les nouvelles cabanes et turricules, ceux déjà observés et disparus. De fait, chaque nouvelle structure est localisée sur un schéma du panier (par une croix pour un turricule et un carré pour les cabanes) et le nombre de structures observées est inscrit. Lors de l'observation suivante, les

structures observées précédemment sont notées « déjà observée » ou « disparue » afin d'éviter de compter deux fois une même structure.

- Estimation du recouvrement de la paille et photo du panier

Cette étape consiste en l'évaluation du recouvrement de la paille sur la surface du panier et s'effectue à l'aide de l'outil issu du protocole adapté (Figure 5).

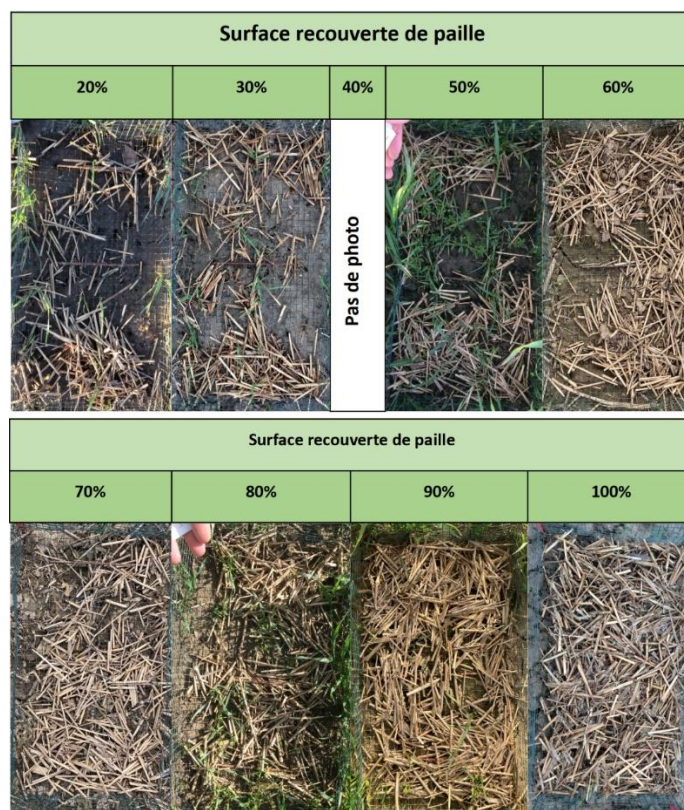


Figure 5 : Aide visuelle pour l'estimation de la surface de paille restante (L. Leveau)

De plus, une photo est prise du panier encore ouvert pour pouvoir observer l'évolution des paniers au cours du temps et les comparer visuellement entre les différents champs.

A la fin des mesures, le couvercle est remplacé.

2.3.1.5 Mesure à la récolte

En plus d'effectuer les mesures décrites au point 2.2.1.4, la dernière mesure (réalisée dans ce travail en juin 2023) comprend la récolte de la paille restante dans le panier en vue de quantifier la quantité de paille incorporée et décomposée par les VDT. De ce fait, chaque panier est vidé² et la paille mise en sachet (annoté avec l'identifiant du panier). Elle est ensuite lavée à l'eau courante en la disposant dans un tamis (avec des mailles de 0,5 cm maximum afin de ne pas perdre de paille) et en arrosant l'ensemble, tout en mélangeant le tout pour dissoudre et évacuer la terre.

² La récolte de la paille dans les paniers ne comprenait que ce qui était encore dans le panier. Dans ce mémoire et ceux qui lui ont précédé, la paille ayant traversé le fond du panier a été considérée comme incorporée et donc non-récoltée.

Après lavage, la paille humide est placée en sac microperforé à l'étuve à 60 degrés pendant 3 jours. Ensuite, la paille sèche est pesée et la quantité incorporée est calculée en soustrayant la masse de paille sèche restante aux 50 g de paille sèche placés initialement.

Lors de cette dernière mesure, les paniers sont retirés de la parcelle, avec leurs agrafes et leur tube de PVC marquant leur emplacement.

2.3.1.6 *Traitement des photos et nomenclature des points GPS*

Chaque photo prise est renommée selon la typologie suivante : « NCTN_aammjj » avec : NC le numéro du champs (de 41 à 60), T pour VDT, N le numéro du panier (de 1 à 4) suivi de la date au format ISO 8601 modifié (seulement deux chiffres pour l'année) (*ISO - ISO 8601 — Représentation de la date et de l'heure*, 2017). Ainsi, la photo du panier n°1 du champ 41 prise le 17 mai 2023 sera renommée « 41T1_230517 ».

De plus, chaque point GPS est nommé de la sorte : « VNC-NPJ » avec V pour VDT, NC le numéro du champ, NP le numéro du panier et J pour Jean. Par exemple, le point GPS du panier numéro quatre du champ 51 sera nommé « V51-4J ». Cette nomenclature permet de retrouver le numéro du panier si l'étiquette venait à s'effacer. De plus, la lettre « j » (qui est présente sur tous les points GPS des expériences de ce travail) a permis de trier facilement tous les points GPS de ce mémoire car la mémoire du dispositif GPS comprenait une multitude d'autres points.

2.3.2 *Tea bag*

Le protocole utilisé pour ce travail est le protocole « Tea Bag Index » développé par Keuskamp et al. (2013) et adapté pour la thèse de L. Leveau. Cette expérience consiste en l'enfouissement de trois placettes de huit sachets de thé (quatre sachets de thé vert « Lipton »³ et quatre sachets de thé rouge « Lipton »⁴) dans le sol dans chaque parcelle de champ étudiée⁵, pour une durée d'environ 90 jours. Ceci permet de calculer la vitesse de décomposition de la MO dans le sol sur base de la perte de poids en thé au cours de l'expérience grâce aux relations mathématiques présentées aux points 1.3.1.1. Les calculs précis sont présentés en Annexe 1.

Chaque placette comprenant huit sachets de thé, une parcelle d'essais comporte donc 24 sachets de thé enfouis. Pour toutes les mesures de masse liées à cette expérience (avant et après enfouissement), la précision nécessaire est de 10⁻⁴g.

2.3.2.1 *Calcul de la masse initiale de thé dans les sachets*

Pour quantifier la quantité de matière décomposée dans le sachet, il est nécessaire de tarer le contenant pour pouvoir calculer la masse de thé contenue initialement dans chaque sachet. Cette mesure s'effectue en calculant la masse moyenne des composants (à savoir la somme de la masse du sachet du fil et de l'étiquette) de cinq sachets de chaque thé (rouges et verts). Cette

³ EAN (European Article Number): 87 22700 05552 5

⁴ EAN: 87 22700 18843 8

⁵ Pour éviter toute confusion, les parcelles d'essais correspondent aux rectangles délimités dans les champs des agriculteurs dans lesquels sont réalisées toutes les expériences, tandis qu'une placette correspond à la ligne de sachet de thé réalisé pour l'expérience des Tea bag index

mesure donne ainsi deux valeurs : la masse moyenne des composants pour les sachets de thé vert et la masse moyenne des composants pour les sachets de thé rouge.

De plus, le taux d'humidité moyen de chaque thé (rouge et vert) est calculé en suivant la même logique que la détermination de l'humidité de la paille présentée à la section 2.3.1.2 :

- 1) Pesée du contenu des 10 sachets⁶ séchés à l'air libre pendant plusieurs jours (donnant la masse initiale)
- 2) Séchage de ce thé à l'étuve trois jours à 40°C
- 3) Pesée du thé sec (donnant la masse après séchage)
- 4) Calcul des taux d'humidité dans chaque sachet (pour le thé vert et pour le thé rouge) via la relation :

$$\text{Humidité [\%]} = [(masse du thé initiale - masse du thé après séchage) / masse initiale] * 100 \quad (3)$$

- 5) Moyenne des taux d'humidité pour les 5 sachets de thé vert et les 5 sachets de thé rouge

Ce calcul donne ainsi deux valeurs : Le taux d'humidité moyen pour le thé vert et le taux moyen d'humidité pour le thé rouge.

Ensuite, tous les sachets de thés qui seront placés en champs sont pesés et identifiés à l'aide d'un numéro inscrit sur les deux faces de l'étiquette.

Grâce à cette masse de chacun des sachets de thé [MI_hum], la masse moyenne des composants (pour les deux thés) [MC], et l'humidité moyenne de chacun des thés (vert et rouge) [Hum], la masse initiale sèche du contenu de chaque sachet [MI] peut être calculée via l'équation :

$$MI = (MI_hum - MC) - (MI_hum - MC) * Hum \quad (4)$$

Une attention particulière doit être portée au fait que la valeur d'humidité moyenne ainsi que la moyenne de la masse des composants sont propres à chaque thé (rouge et vert).

2.3.2.2 Mise en place

Les placettes d'enfouissement des sachets de thé correspondent à des lignes où les sachets de thé sont enfouis à 40 cm l'un de l'autre en alternant un sachet de thé vert et un sachet de thé rouge (Figure 6). Elles sont au nombre de trois par parcelle d'essais et sont disposées en fonction de la forme de celle-ci. Pour les parcelles relativement carrées, les placettes sont disposées en triangle équilatéral d'environ 40 m de côté, centré sur le point central de la parcelle, chaque placette correspondant à un coin du triangle (Figure 3). Pour les parcelles en rectangle allongé, les 3 placettes sont réparties sur une ligne au centre du rectangle, parallèle au grand côté, en mettant deux placettes aux extrémités de cette ligne centrale et une au milieu pour en couvrir toute sa longueur.

⁶ Cinq sachets de thé vert et cinq sachets de thé rouge

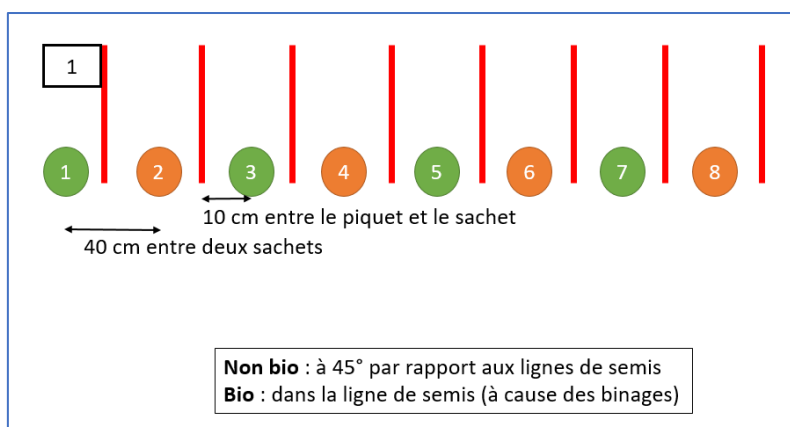


Figure 6 : Représentation schématique des placettes de l'expérience des sachets de thé (source : protocole adapté pour la thèse de L.Leveau) Les ronds verts numérotés symbolisent les sachets de thé vert tandis que les ronds oranges numérotés symbolisent les sachets de thé rouge. Les piquets sont représentés par les lignes oranges.

Les placettes sont placées à 45° des lignes de semis à l'exception des champs en AB pour lesquels les sachets de thé sont placés dans la ligne de semis (afin d'éviter d'être perturbées par les éventuels désherbages mécaniques).

L'enfouissement s'effectue à l'aide d'une bêche et débute en effectuant une première coupe verticale d'environ 5 cm de profondeur (numéro 1 de la Figure 7, cette coupe est parallèle à la placette). Ensuite une seconde coupe plus profonde (10 cm de profondeur environ) est effectuée à la base de la première et perpendiculairement à celle-ci (numéro 2 de la Figure 7) pour permettre après cela d'effectuer un levier afin d'écarter la première fente (la photo présentée à la Figure 7 a été prise durant cette étape). Le sachet de thé est glissé dans la première coupe, en dessous de la zone lissée par la bêche (à 6 cm de profondeur environ) en laissant l'étiquette et le fil à l'extérieur du sol et en tassant légèrement la fente pour bien mettre le sachet enterré en contact avec le sol.

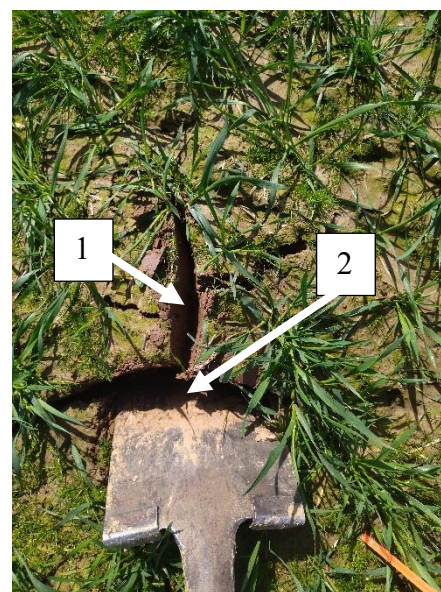


Figure 7 : Mise en place des sachets de thé dans le sol.

Un petit piquet de marquage de 40 cm est ensuite placé à 10 cm après le sachet de thé (Figure 6) pour le localiser. L'enfouissement du sachet suivant s'effectue 40 cm plus loin du sachet de thé précédent, en suivant la ligne de la placette et en alternant les sachets de thé vert et de thé rouge. Un piquet d'environ un mètre est placé au début de la placette et la position de cette dernière est enregistrée dans le GPS pour faciliter les recherches pour la récolte de l'expérience.

De plus, il est important de noter la date d'enfouissement du panier car le nombre de jours passés en champ influence la quantité de thé dégradé. Il faut donc prendre en compte les durées des expériences pour pouvoir comparer les résultats entre les champs.

2.3.2.3 Récolte des sachets de thé

Pour chaque placette, la récolte s'effectue aussi à l'aide d'une bêche. Celle-ci permet, après avoir localisé la placette, de rouvrir la terre en effectuant le même levier (au niveau de la fente numéro 2 de la Figure 7) ce qui permet de sortir le sachet de thé sans l'abimer. Comme expliqué précédemment, il est important de noter la date de récolte pour les futures analyses.

2.3.2.4 Calcul des paramètres

Après la récolte, les racines et particules de sol collées aux sachets sont retirées délicatement. Ces sachets sont placés à l'étuve à 60°C pendant trois jours. Le thé restant est ensuite pesé en ouvrant les sachets et déversant leur contenu dans un petit ravier sur une balance (la balance étant tarée au préalable) ce qui donne la masse finale sèche.

En outre les sachets de thé perforés ou traversés par une grosse racine ne sont pas pris en compte.

Les paramètres qui caractérisent le SE de décomposition de la MOS par les microorganismes sont les indicateurs de stabilisations (D_S) et de dégradation (D_k) de la MOS. Ceux-ci sont calculés sur base des relations établies dans la partie 1.3.2.1 (équation 1a et 1b). Le calcul détaillé est décrit dans l'Annexe 1.

2.3.3 Carte de prédation

L'expérience des cartes de prédation se base sur le protocole de la thèse de L. Leveau et sert à observer le taux de prédation de graines d'adventices. Pour ce faire, des cartes sur lesquelles sont collées des graines (10 graines de paturin annuel *Poa annua*) sont placées dans les parcelles d'essais durant une semaine. Ensuite, le nombre de graines présumées consommées par les auxiliaires de cultures est déduit du nombre de graines restantes à la récolte des cartes. Deux placettes de cinq cartes sont placées dans chaque champ d'essais et y restent sept jours.

2.3.3.1 Fabrication des cartes

La fabrication des cartes commence par la découpe de celles-ci dans du papier abrasif à gros grains (180), en réalisant des carrées de 5 cm par 5 cm. Des trous y sont réalisés à la perforatrice à deux coins situés sur une même diagonale de la carte. Elles sont ensuite enduites de colle repositionnable et les 10 graines y sont placées à la pince sur toute la surface de la carte. Ensuite, un objet cylindrique (comme un bocal en verre) est roulé sur la carte afin de faire adhérer les graines à la colle. La carte est enfin recouverte d'une fine couche de terre à l'aide d'un tamis très fin pour la soupoudrer et empêcher que les insectes ne restent collés. Les cartes, une fois réalisées, sont stockées sur des réglettes grâce à des épingles (Figure 8). Ceci permet d'éviter que les cartes ne se frottent les unes contre les autres, ce qui pourrait entraîner la perte de graines.

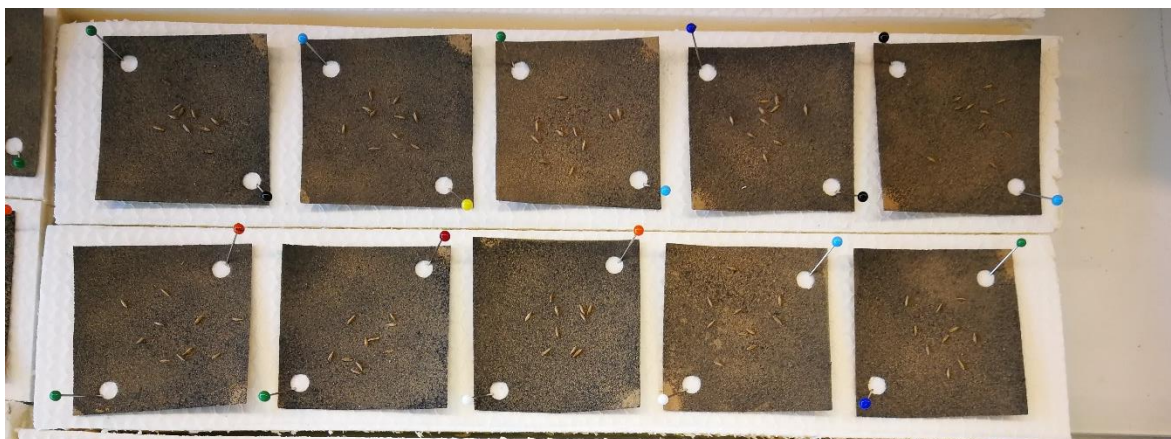


Figure 8 : Positionnement des cartes de prédation finalisées sur les réglettes. (L. Leveau)

2.3.3.2 Mise en place

La mise en place commence par la localisation des placettes. Celles-ci sont placées le long des traces de tracteur (chaque placette dans une trace différente), sur une ligne parallèle à la trace éloignée de 50 cm de celle-ci (à l'extérieur de la trace).

La première carte de la placette est donc placée à 50 cm perpendiculairement à la trace et sa position est marquée au GPS afin de noter le début de la ligne et faciliter les recherches de la reprise.

La carte est posée directement au sol et fixée en enfonçant en oblique des piquets en bois d'une dizaine de cm dans les trous aux coins de la carte comme illustre la Figure 9.



Figure 9 : Photo d'une carte de prédation après sa mise en place en champs (L. Leveau)

Après avoir posé la première carte, la seconde est placée selon le même schéma dix pas plus loin sur la ligne de la placette. Ainsi, les cartes sont espacées de 10 pas et chaque placette contient cinq cartes (et deux placettes par champ). La dernière carte de chaque placette est aussi marquée au GPS pour faciliter les recherches ultérieures.

La mise en place s'est effectuée le même jour dans toutes les parcelles, de même que la récolte (comme le montre l'agenda des expériences repris dans le Tableau 5) afin d'éviter une variation temporelle qui pourrait fausser les résultats.

2.3.3.3 Récolte

Le début de chaque placette est d'abord retrouvé à l'aide des coordonnées GPS de la première carte. Cette carte est retirée avec ses piquets et le nombre de graines restant est noté sur une feuille de relevé. La carte suivante se trouvant à dix pas de la première, la suite de la récolte s'effectue en marchant dix pas vers le point GPS de la fin de la placette pour y ramasser la seconde carte et compter les graines restantes. Cette étape est répétée pour les cinq cartes de la placette. Enfin, le nombre de graines prédatées par carte est déduit du nombre de graines restant en soustrayant ce dernier aux dix graines placées initialement. Le taux de prédation est calculé comme suit :

$$\text{Taux de prédation [\%]} = (\text{Graines prédatées})/10 * 100 \quad (5)$$

2.4 Calcul des rendements

Le calcul des rendements en paille et en grain a été effectué en prélevant, dans chaque parcelle, quatre échantillons d'un mètre carré de plantes entières juste avant la moisson des agriculteurs-rices. Ces échantillons ont ensuite été pesés puis battus pour séparer la paille du grain. Ensuite, pour chaque échantillon de grain, ont été calculés la masse, le poids à l'hl et la teneur en humidité (à l'aide d'un humidimètre).

Ces données ont permis de calculer :

- Le rendement surfacique en grain sec (RDTg, en t/Ha) selon la formule :

$$\text{RDTg} = \text{Masse Humide} - (\text{Masse Humide} * \text{Humidité}) \quad (6)$$

- Le rendement surfacique en paille (RDTp, en t/Ha) selon la formule:

$$\text{RDTp} = \text{Masse totale} - \text{Masse de grain (Humide)} \quad (7)$$

Le rendement surfacique du champ est déduit de la moyenne de ces quatre échantillons.

2.5 Analyses statistiques

Les résultats des expériences réalisées dans le cadre de ce mémoire ont été encodés à l'aide du logiciel Excel puis analysés à l'aide du logiciel R. Ces analyses sont structurées en trois parties. Tout d'abord, la réalisation de statistiques descriptives pour tous les types d'indicateurs (SE et PC). Ensuite, la significativité des résultats des expériences a été analysée. Enfin, les liens entre les indicateurs ont été établis (PC-PC, SE-SE et SE-PC) grâce à des analyses multivariées. Les résultats de ces analyses sont présentés dans la section 3 de ce travail et interprétés dans la section 4.

2.5.1 Analyse descriptive des indicateurs

Cette catégorie d'analyse reprend :

- Le calcul des statistiques chiffrées des données brutes afin de caractériser l'indicateur considéré (nombre de données, moyenne, écart-type, etc.).
- La réalisation des histogrammes des indicateurs de SE afin de mettre en avant la répartition de ces indicateurs sur l'ensemble des 20 champs.
- La réalisation de graphique en boîte de Tukey pour visualiser la variabilité des valeurs des indicateurs de SE intra et inter parcelles.

2.5.2 Analyse de la significativité des résultats

L'analyse de la significativité sur les indicateurs de SE permet de savoir s'il existe au moins une parcelle présentant des différences significatives de valeurs d'indicateurs de SE.

La significativité peut être établie par différents tests qui, pour certains, nécessitent des conditions sur les données. Ainsi, les données des indicateurs de SE ont été étudiées afin de déterminer la méthode d'analyse de la significativité la plus pertinente.

2.5.3 Analyses multivariées

Cette partie reprend trois types d'analyses statistiques qui ont été réalisées à l'aide des packages FactoMineR, Hmisc et factoextra du logiciel R :

- La réalisation de matrices de corrélations : cette technique permet de visualiser les liens entre les indicateurs grâce à l'élaboration de coefficients de corrélation pour chaque couple d'indicateurs (coefficient de Pearson). Une visualisation en « correlation plot » permet de relever visuellement les corrélations positives, négatives et l'absence de corrélation significative.
- La réalisation d'analyses en composantes principales (ACP) pour les variables quantitatives : cette technique permet de visualiser les liens qui existent entre les indicateurs quantitatifs en réduisant les dimensions d'un jeu de données à trois ou quatre composantes principales (en d'autres termes, réduire le nombre de variables à quelques composantes principales qui négligent les redondances et capturent un maximum de variabilité). Cette approche permet d'établir des visualisations graphiques des liens entre les variables (Husson et al., 2010).
- La réalisation de classifications hiérarchiques sur composantes principales (HCPC) : Cette technique se base également sur les composantes principales et établit un « clustering » en regroupant les champs avec des indicateurs similaires pour établir de nouvelles catégories. Cette technique montre donc la ressemblance des champs en les regroupant en sous-groupes.

3 Résultats

Il est important de noter que les données exposées dans cette section se rapportent à des statistiques descriptives plutôt qu'inférentielles. Par conséquent, ces résultats ne sont pas extrapolables à une échelle plus vaste que celle des 20 parcelles étudiées. Cependant, bien que les conclusions ne puissent être généralisées au-delà de ce contexte spécifique, les résultats obtenus devraient permettre d'identifier des tendances dans le cadre plus large de la thèse de L. Leveau.

3.1 Statistiques descriptives

3.1.1 Indicateurs de services écosystémiques

3.1.1.1 Explication générale des méthodes de statistiques descriptives

Les Figures 10 a et b donnent les graphiques en boîte de Tukey des indicateurs de SE issus de la campagne d'expériences décrite au point 2.3. Ce type de graphique permet de décrire visuellement la variabilité inter et intra-parcelles pour les différents indicateurs. En effet, ce graphique montre la distribution des valeurs des différents indicateurs de services écosystémiques pour chaque parcelle. Ceci permet de visualiser la variabilité des indices de SE pour chaque parcelle (variabilité intra-parcelle), en observant les boîtes, et entre les différentes parcelles (inter-parcelles), en comparant les boîtes. La ligne noire dans chaque boîte représente la médiane des données par parcelle. Le bas et le haut de la boîte montre les 25^{ème} et 75^{ème} quantiles des données par parcelle, autrement dit 50 % des valeurs prises par l'indicateur considéré par parcelle se trouvent dans la boîte. Ensuite, les moustaches (symbolisées par le T en pointillé) donnent l'étalement des données. Pour ce faire, l'espace interquartile est multiplié par 1,5. La valeur obtenue est additionnée et soustraite à la valeur de la médiane pour avoir un intervalle et les lignes horizontales des T sont tracées sur les valeurs maximales et minimales que les données prennent dans cet intervalle.

Enfin, les points situés à l'extérieur des boîtes et au-delà des moustaches montrent les outliers, repérés comme étant les valeurs excédant 1,5 fois l'espace interquartile⁷ De plus, la moyenne des valeurs est marquée sur les boîtes de Tukey par un point noir. Une attention particulière lors de l'interprétation des graphiques en boîte de Tukey doit être portée au fait que les échelles de chacun des graphiques sont différentes.

L'Annexe 4 donne les histogrammes de répartition des indicateurs de SE qui permettent la visualisation de l'étalement des valeurs des indicateurs pour l'ensemble des parcelles. En effet, un histogramme est un graphique qui donne, pour un intervalle de valeurs d'indicateurs (exprimé sur l'axe des x), le nombre de fois qu'un indicateur compris dans cet intervalle apparaît dans le jeu de données total ; autrement dit le nombre de fois qu'une expérience a eu un résultat compris dans l'intervalle.

⁷ Les outliers ne sont présents que dans les données du taux de prédateurs de graines d'adventices.

Le Tableau 7 donne les caractéristiques principales des indicateurs dans toutes les parcelles :

- L'unité
- L'abréviation utilisée
- La valeur minimale prise par l'indicateur
- La valeur du 1^{er} quartile
- La médiane, qui correspond à la valeur centrale, autrement dit, la valeur pour laquelle il existe autant de valeurs supérieures qu'inférieures
- La moyenne
- La valeur du 3^{eme} quartile
- La valeur maximale prise par l'indicateur
- L'écart type qui caractérise la dispersion des valeurs prises par l'indicateur autour de la moyenne.

3.1.2 Graphiques des statistiques descriptives

Figure 10 (sur deux pages) : Graphiques en Boîtes de Tukey des indicateurs de services écosystémiques décrits dans ce travail. Les moyennes de chaque parcelle pour tous les indicateurs sont symbolisées par un rond noir plein, les médianes par une ligne noire et les outliers par un point noir vide

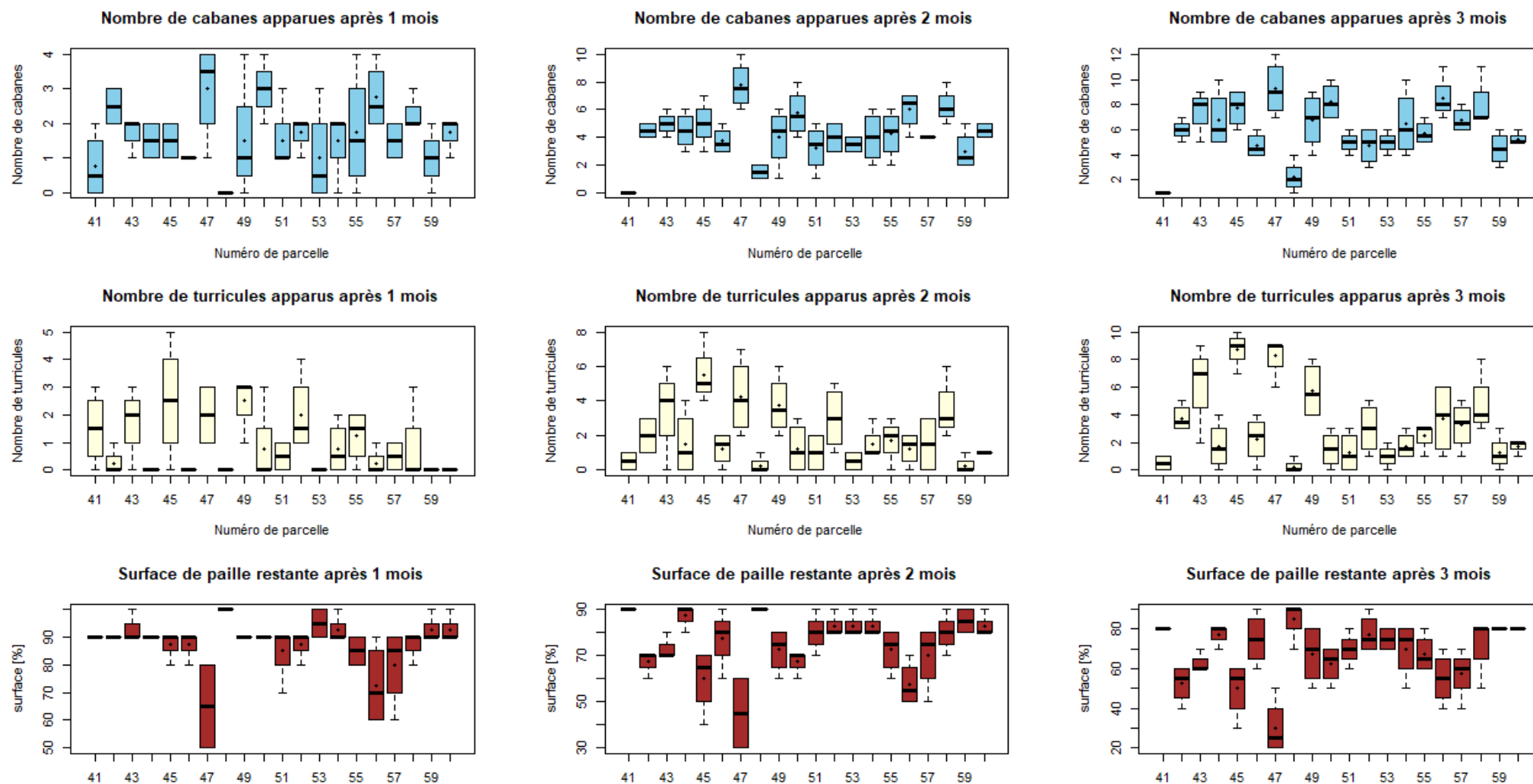


Figure 10a : Graphiques en boîte de Tukey des observations du nombre de cabanes et turricules apparus après un, deux et trois mois ainsi que de la surface de paille restante après un deux et trois mois

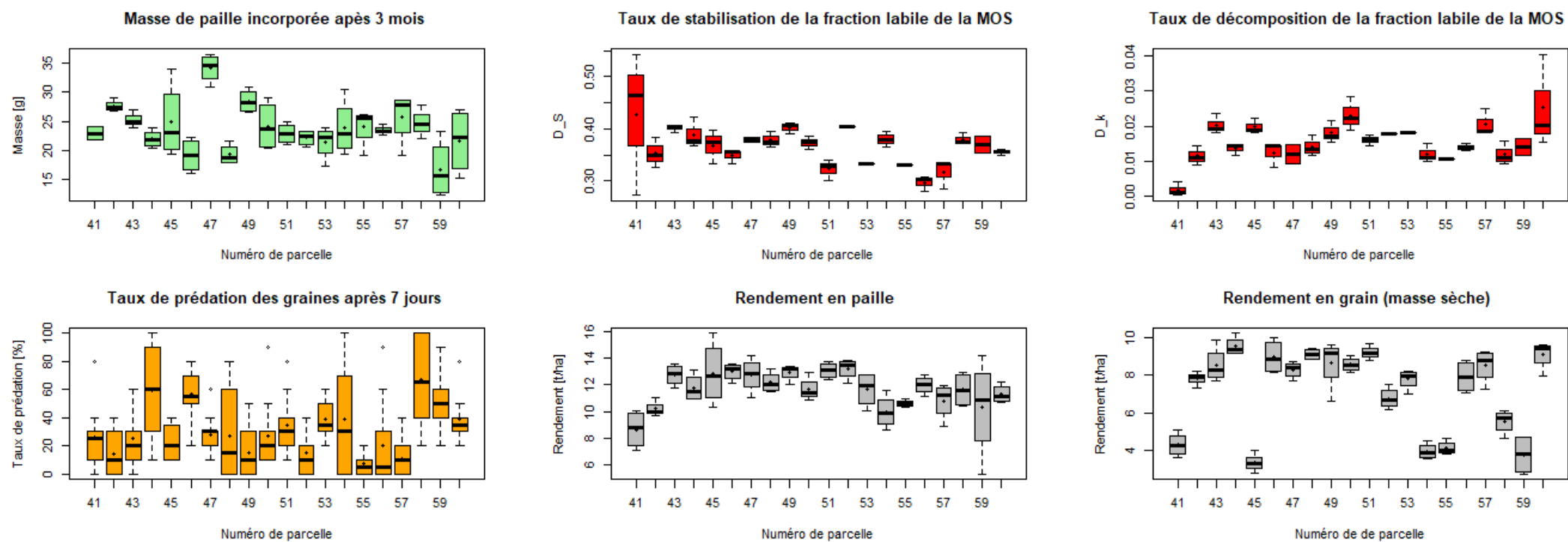


Figure 10b : Graphiques en boîte de Tukey des indicateurs de services écosystémiques de masse de paille incorporée après trois mois, du taux de stabilisation et décomposition de la matière organique du sol, du taux de prédation des graines d'adventices après sept jours ainsi que des rendements en grain sec et en paille.

Tableau 7 : Valeurs caractéristiques des indicateurs de SE

SE lié	Indicateurs de SE	Unité	Abréviation	Min	1er quartile	Médiane	Moyenne	3ème quartile	Max	Ecart type
Incorporation de la MO par les VDT	Nombre de cabanes apparues après 1 mois	#	T_cab1	0	1	2	1,654	2	4	1,115
	Nombre de cabanes apparues après 2 mois	#	T_cab2	0	3	4	4,303	5	10	1,898
	Nombre de cabanes apparues après 3 mois	#	T_cabf	1	5	6	6,105	7	12	2,330
	Nombre de turricules apparus après 1 mois	#	T_tur1	0	0	0	0,859	1	5	1,225
	Nombre de turricules apparus après 2 mois	#	T_tur2	0	0	1,5	1,947	3	8	1,918
	Nombre de turricules apparus après 3 mois	#	T_turf	0	1	2,5	3,171	4	10	2,778
	Surface de paille restante après 1 mois	%	T_surf1	50	90	90	87,56	90	100	10,089
	Surface de paille restante après 2 mois	%	T_surf2	30	70	80	74,87	80	90	13,808
	Surface de paille restante après 3 mois	%	T_surff	20	60	70	66,97	80	90	16,085
	Masse de paille incorporée après 3 mois	g	Masse_Inc	12,3	20,88	23,3	23,71	26,72	36,4	22,64
Prédation des graines d'adventices	Taux de prédation de graines d'adventices	#	P_graines	0	10	30	31,39	50	100	27,666
Production végétale	Rendement en grain (sec)	t/ha	R_grain	2,742	4,897	8,032	7,173	9,032	10,23	4,875
	Rendement en paille	t/ha	R_paille	5,327	10,75	11,77	11,68	12,92	15,85	2,885
Dégradation de la MO par les microorganismes	Taux de stabilisation	-	D_S	0,273	0,333	0,369	0,366	0,391	0,542	0,002
	Taux de décomposition	-	D_k	0,0004	0,012	0,015	0,016	0,018	0,040	0,0004

3.1.2.1 Indicateurs d'incorporation de la matière organique par les vers de terre

Les indicateurs d'incorporation de la matière organique par les VDT sont tirés de l'expérience des cages à vers de terre (section 2.3.1). Les indicateurs issus de ce dispositif expérimental sont au nombre de sept et peuvent être répartis en quatre catégories :

- Les indicateurs basés sur le nombre d'apparitions de turricules. Ces indicateurs sont calculés après un, deux et trois mois (respectivement T_tur1, T_tur2 et T_turf).
- Les indicateurs basés sur le nombre d'apparitions de cabanes. Ces indicateurs sont calculés après un, deux et trois mois (respectivement T_cab1, T_cab2 et T_cabf).
- Les indicateurs basés sur la surface de recouvrement de la paille du panier. Ces indicateurs sont observés après un, deux et trois mois (respectivement T_surf1, T_surf2, T_surf).
- L'indicateur basé sur la quantité de paille incorporée par les VDT. Celui-ci est calculé uniquement à la fin de l'expérience (Masse_inc).

Les indicateurs de SE basés sur le nombre de cabanes et le nombre de turricules sont des indicateurs cumulés (Figure 10a). En effet, le nombre d'apparitions après deux mois (pour les turricules et les cabanes) correspond au nombre d'apparitions après un mois auquel s'ajoute le nombre de structures observées en plus entre le premier et le deuxième mois. De même, pour les indices issus du nombre d'apparitions après trois mois, ils correspondent à la somme du nombre d'apparitions après deux mois et du nombre d'apparitions supplémentaires entre le deuxième et le troisième mois. Le nombre d'apparitions moyen des structures augmente donc au fil des mois⁸. La dispersion des données dans l'ensemble est plus importante pour les apparitions de turricules que pour les cabanes. En effet, les indicateurs qui se basent sur les turricules possèdent un écart-type plus important que les indicateurs basés sur l'apparition des cabanes, et ce à chaque observation (un, deux et trois mois).

Les différences d'indicateurs inter-parcelle semblent être plus marquées au troisième mois (Figure 10a).

Les histogrammes de répartition des indicateurs d'incorporation de la MO par les VDT donnés en Annexe 4 montrent deux tendances au sein des données. Une répartition relativement symétrique autour de la moyenne est observable pour les indicateurs issus du nombre d'apparitions de cabanes et la masse de paille incorporée après trois mois. Ensuite, une répartition asymétrique des données est observable pour les indicateurs basés sur le nombre d'apparitions des turricules et sur la surface de paille restante.

Les données des indices du SE d'incorporation de la MO par les VDT ne présentent pas d'outliers.

Sur l'ensemble des 80 cages à VDT mises en champs, quatre ont été endommagées au cours de l'expérience (deux lors du premier mois, et deux lors du deuxième mois). Ainsi, 78 cages furent disponibles pour les observations après un mois et 76 pour les observations suivantes. Le

⁸ Comme expliqué dans la section 3.1.1, une attention particulière doit être portée au fait que les échelles des axes des ordonnées sont différentes pour tous les graphiques.

nombre d'observations disponibles pour tous les SE est repris dans les histogrammes en Annexe 4.

3.1.2.2 Indicateur de prédation des graines d'adventices

L'indicateur de prédation des graines d'adventices est donné par le taux de prédation des graines après 7 jours. Il est calculé grâce au dispositif expérimental des cartes de prédation (section 2.3.3). L'indicateur a une moyenne de 31,39 et présente une grande variabilité dans son ensemble avec un écart-type de 27,666. De plus, les données considérées par parcelle présentent aussi une grande variabilité, avec des parcelles présentant des taux très variables (allant, par exemple, de 0 à 100 % pour la parcelle 54). Ceci est visible sur les boîtes de Tukey qui sont, pour la plupart, très étalées (Figure 10).

L'histogramme de répartition de cet indicateur (Annexe 4) montre une asymétrie signifiant que les valeurs faibles du taux de prédation sont plus présentes dans les mesures.

La Figure 10b montre aussi que les mesures de cet indicateur présentent des outliers.

3.1.2.3 Indicateurs de dégradation de la matière organique par les microorganismes

Les indicateurs de dégradation de la MO par les microorganismes sont les indicateurs D_S (pour la stabilisation de la partie labile de la MO) et D_k (pour la dégradation de la partie labile de la MO). Le dispositif expérimental et les calculs liés à ces indicateurs sont présentés dans la section 2.3.2. Les indicateurs D_S et D_k ont une moyenne de, respectivement, 0,366 et 0,016.

Les indicateurs présentent des valeurs assez dissemblables entre les parcelles (les boîtes de Tukey sont assez éparpillées) par rapport à la similarité des résultats entre les placettes de chaque parcelle (illustrée par des boîtes de Tukey qui sont, pour la plupart, relativement peu étalées).

Cependant, les numéros d'identification de l'entièreté des sachets de thé vert du champ 53 et d'une partie des sachets de thé vert du champ 52 se sont effacés durant la période en champ, rendant impossible leur identification.

Ainsi, la parcelle 52 ne possède qu'une valeur pour l'indicateur D_S et D_k (qui correspond à la seule placette pour laquelle les identifiants ont pu être lus). En effet, l'indicateur D_k étant calculé grâce à l'indicateur D_S (les calculs de D_S et D_k sont décrits dans Annexe 1), des données manquantes pour D_S rendent impossible le calcul de D_k. Une solution aurait pu être envisagée en calculant les D_k des placettes sans valeur de D_S au départ de la valeur de D_S de la placette où l'identification des sachets de thé vert fut possible. Cependant, il a été choisi d'écarter cette solution car les valeurs de D_S des autres parcelles montrent parfois une variabilité entre les placettes d'une même parcelle. Le D_k alors calculé serait faussé. Les analyses qui suivent considèrent donc le champ 52 comme n'ayant qu'une seule valeur de D_k et de D_S.

De plus, la perte de poids à la fin de l'expérience pour le champ 53 a dû être calculée sur base d'une masse moyenne initiale calculée au départ de cinq autres sachets de thé vert. Ce faisant, les valeurs de D_S et D_k se retrouvent certainement faussées car la perte de poids est à la base

du calcul de ces indicateurs (Annexe 1) et les mesures des masses initiales des sachets montrent une variabilité autour de la moyenne (Annexe 5), Ainsi, la parcelle 53 sera écartée des analyses multivariées présentées à la section 3.3.

Par ailleurs, des résultats d'indicateurs de D_S et D_k de placettes de différentes parcelles ont été écartés car le calcul de l'indicateur D_S donne des valeurs négatives. Ceci survient pour une placette de la parcelle 47 et deux placettes de la parcelle 55. Cette mesure aberrante s'explique par un temps d'incubation trop long ou une activité des microorganismes du sol importante. Dans ce cas, la simplification de l'équation 1a (partie 1.3.1.1) n'est plus correcte, dans le sens où la décomposition de la matière organique stable rentre en ligne de compte dans le calcul.

3.1.2.4 Indicateurs de production végétale

Les indicateurs de production végétale sont au nombre de deux, avec le rendement en paille et le rendement en grains. Ces deux indicateurs montrent des tendances assez dissemblables, avec peu de variation entre les parcelles pour le rendement en paille et des variations assez importantes entre les parcelles pour le rendement en grains. Ceci est visible sur la Figure 10 mais aussi sur leurs histogrammes respectifs (Annexe 4). En effet, la répartition des valeurs prises pour le rendement en paille montre un nombre d'apparitions des valeurs entre 10 et 15 t/ha majoritaire, tandis que la répartition du nombre d'apparition des valeurs de rendement en grains s'étale de façon relativement homogène sur l'ensemble des valeurs prises par le rendement dans les différentes parcelles (avec cependant un nombre plus élevé d'apparitions des résultats entre 8 et 10 t/ha).

Les moyennes des rendements sont de 7,173 t/ha pour le grain et 11,68 t/ha pour la paille et ces valeurs ne comportent pas d'outliers.

Lors du battage du blé, un échantillon de la parcelle 42 a cependant été perdu à cause d'une erreur d'utilisation de la moissonneuse batteuse. Il est aussi important de noter que les parcelles 52, 55 et 58 étaient des cultures d'épeautre et non de froment.

3.2 Analyse de significativité des données issues de la campagne expérimentale

Les analyses présentées jusqu'à maintenant décrivent les indicateurs sans considérer les différences entre les parcelles en détail. Dans cette partie, la significativité des données sera testée. Autrement dit, les données sont analysées pour savoir s'il existe des preuves statistiquement significatives qui permettent d'affirmer qu'il existe au moins une parcelle donnant des résultats d'indicateurs différents des autres parcelles. Ce critère est important car les analyses des relations entre les différents indicateurs de SE et de PC (section 3.3) se basent sur les différences entre les parcelles. Ceci donnera donc des indices sur la pertinence des réalisations des analyses multivariées sur les différentes données récoltées par la campagne d'expérience.

Il existe plusieurs tests permettant d'établir la significativité des jeux de données tels que l'analyse de la variance (ANOVA) ou le test de Kruskal-Wallis.

L'ANOVA est une méthode statistique répandue qui se base sur un rapport de variances (et donc sur l'écart des points à la moyenne) pour établir la significativité : le rapport de la variance inter-parcelle et de la variance intra-parcelle. Plus le rapport entre ces deux variances est élevé plus la probabilité qu'au moins une parcelle soit différente des autres est grande. Ce test est paramétrique et nécessite une distribution normale des variables (donc des indicateurs de SE) ainsi qu'une homogénéité dans la distribution de leurs variances.

Le test de Kruskal-Wallis est une méthode statistique utilisée dans les cas de distribution non normale et correspond à la version non-paramétrique de l'ANOVA (McKight & Najab, 2010). Il ne se base pas sur les moyennes et l'écart des points à celles-ci (les variances) comme l'ANOVA mais sur les médianes et la comparaison des rangs des données. Il ne nécessite pas de distribution particulière des données.

Aucun indicateur ne rencontrant les conditions pour effectuer une ANOVA (la méthodologie pour arriver à cette conclusion est décrite dans l'Annexe 6), les données sont soumises au test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

3.2.1 Résultats du test de Kruskal-Wallis

Le Tableau 8 reprend les résultats du test de Kruskal-Wallis réalisé dans le logiciel R sur l'ensemble des indicateurs de SE mesurés.

Tableau 8 : Résultats du test de Kruskal - Wallis effectué sur les données d'indicateurs de SE. La signification des abréviations est reprise dans le Tableau 7

Abréviation	Statistique du test	P-valeur
T_cab1	35,84931	1,10E-02
T_cab2	40,90784	2,48E-03
T_cabf	48,20639	2,39E-04
T_tur1	42,26081	1,63E-03
T_tur2	38,466699	5,17E-03
T_turf	49,40867	1,60E-04
T_surf1	43,73282	3,90E-04
T_surf2	53,08682	4,54E-05
T_surff	47,18208	3,36E-04
Masse_inc	40,96489	2,44E+03
P_graines	73,37857	2,50E-08
R_grain	64,5807	7,14E-07
R_paille	44,40918	8,29E-04
D_S	32,64027	1,84E-02
D_k	39,91554	2,14E-03

Les valeurs prises par les P-valeurs des statistiques du test étant inférieures à un niveau de significativité de 0.05, les conclusions de ce test sont que, pour tous les indicateurs de SE, il existe au moins une parcelle qui montre une médiane significativement différente des autres. Ce qui sous-entend qu'au moins une parcelle montre des valeurs d'indicateurs de SE différentes des autres et donc que les données sont significativement différentes entre elles.

3.3 Analyses multivariées

Cette section constitue le cœur de ce mémoire qui, pour rappel, a pour objectif d'explorer l'impact de pratiques culturelles (illustrées par les indicateurs de PC présentées dans le Tableau 4) sur les services écosystémiques (illustrés par les indicateurs de SE présentés dans le Tableau 2). Les analyses multivariées permettent de comprendre les liens entre les différents indicateurs en étudiant les valeurs prises par ceux-ci pour chaque parcelle.

Dans le cadre des analyses multivariées, les résultats des expériences menées sont donc moyennés par parcelle afin d'avoir, pour chaque parcelle, une seule valeur d'indicateur de SE.

Trois analyses multivariées seront pratiquées : l'étude des corrélations entre indicateurs par l'observation de corrélogrammes, la réalisation d'une analyse en composantes principales (ACP) et la classification (ou clustering) hiérarchique sur composantes principales (HCPC).

Le corrélogramme est une représentation graphique de la matrice de corrélation qui attribue à chaque combinaison de deux variables une valeur de coefficient de corrélation. Celui-ci étant une valeur adimensionnelle qui permet de mesurer l'intensité avec laquelle les deux variables sont reliées (Bogaert, 2020). Cette technique observe donc les liens des variables deux à deux.

L'ACP est une technique d'analyse multivariée qui est employée pour extraire et représenter les informations les plus pertinentes présentes dans une table de données. L'ACP résume ces informations en quelques variables appelées composantes principales, lesquelles résultent d'une combinaison linéaire des variables d'origine. Ces composantes principales permettent de résumer l'essentiel de l'information, appelé aussi variance totale ou inertie, en supprimant la redondance et ne gardant que l'essentiel. Le nombre de composantes principales est toujours inférieur ou égal au nombre de variables initiales. Ce type d'analyse se base sur l'entière du jeu de données pour établir des liens entre les variables. Dans le cadre de ce travail, toutes les données soumises à une ACP sont centrées et réduites. Il s'agit en effet d'une condition obligatoire dans le cas de données avec des unités différentes.

L'HCPC se base aussi sur les composantes principales établies dans l'ACP pour créer des groupes sur base des ressemblances observables entre les individus.

Ces techniques d'analyses multivariées seront d'abord appliquées aux indicateurs de SE, afin d'observer les interactions existantes entre elles, puis appliquées aux indicateurs de SE et de PC pour observer les liens entre les pratiques culturelles et les services écosystémiques.

3.3.1 Observation de l'impact des indicateurs de services écosystémiques entre eux

3.3.1.1 *Corrélogramme*

La Figure 11 montre le corrélogramme illustrant la valeur du coefficient de corrélation pour toutes les combinaisons d'indicateurs de services écosystémiques. Ce corrélogramme illustre le coefficient de corrélation par une couleur. Ainsi, le rouge signifie une corrélation négative et le bleu une corrélation positive. La force de corrélation est exprimée par la teinte sur une échelle continue : plus celle-ci s'approfondit, plus la corrélation est intense. Seules les corrélations significatives avec un niveau de confiance fixé à 95% sont illustrées (une case blanche signifie

donc que le coefficient n'est pas significatif, autrement dit que l'incertitude liée à la valeur de corrélation est trop grande que pour pouvoir interpréter la corrélation).

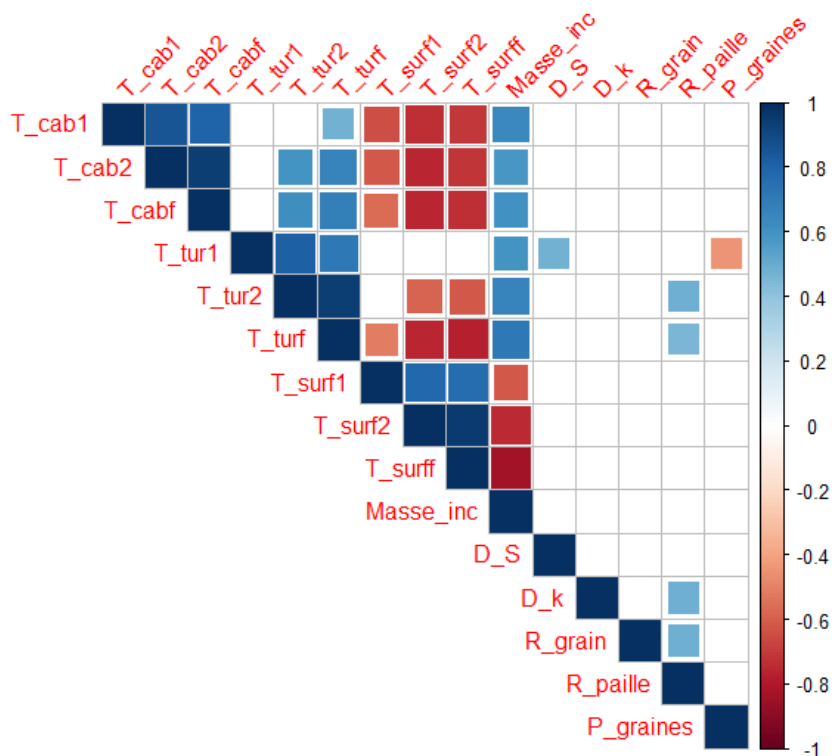


Figure 11 : Représentation en corrélogramme de la matrice de corrélation des indicateurs de services écosystémiques. Ce corrélogramme, illustre le coefficient de corrélation par une couleur (échelle sur la droite de la figure) : le rouge signifie une corrélation négative et le bleu une corrélation positive. La force de corrélation est exprimée par la teinte, plus celle-ci s'approfondit, plus la corrélation est intense. Les valeurs non significatives ne sont pas représentées (niveau de confiance à 95 %). La signification des abréviations est reprise dans le Tableau 7.

Les mesures cumulées et la surface recouverte de paille sont corrélées avec leurs homologues au fil du temps. Ceci est logique et n'apporte pas directement d'informations car la valeur de l'indicateur au temps +1 est dépendant de la valeur au temps 0 (par exemple le nombre d'apparitions de cabanes après trois mois est corrélé avec le nombre d'apparitions de cabanes après deux mois, cet indicateur correspond au nombre de cabanes apparues après deux mois auquel s'ajoute le nombre d'apparitions supplémentaires entre le deuxième et le troisième mois).

En outre, les indicateurs de SE d'incorporation de la MO par les VDT sont fortement et significativement corrélés entre eux, à l'exception du nombre d'apparitions de turricules après un mois qui présente quelques valeurs non significatives. Ceci peut être dû au fait que l'observation du nombre de turricules est compliquée lorsqu'il y a une forte couverture de paille.

Les indices de surface recouverte par la paille (T_surf) sont inversement corrélés aux autres indices d'incorporation de MO par les VDT car une activité forte de VDT impliquerait une diminution rapide de la surface du panier recouverte par de la paille et donc des valeurs faibles

de cet indicateur. Le lien inverse est attendu par rapport aux autres indicateurs, pour lesquels une forte activité de VDT impliquerait de grandes valeurs d'indicateurs (nombre de cabanes, de turricules et masse de paille incorporée).

Les corrélations significatives entre les indicateurs de différents SE observées dans ce travail ne sont pas nombreuses. Le rendement en paille est légèrement corrélé positivement au rendement en grains, à l'indicateur de décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes du sol et au nombre d'apparitions de turricules après deux et trois mois.

L'indicateur de prédation de graines d'adventices est légèrement corrélé négativement au nombre d'apparitions de turricules après un mois tandis que ce dernier est légèrement corrélé positivement à l'indicateur de stabilisation de la MOS par les microorganismes du sol (D_S).

3.3.1.2 Analyse en composantes principales

La méthode d'analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée aux résultats des expériences afin d'observer les corrélations entre les indicateurs de services écosystémiques. Cette technique prend en compte l'ensemble des variables pour établir les liens entre celles-ci, ce qui diffère donc des graphiques de corrélation qui prennent les variables deux à deux.

Il a été choisi de réduire le nombre d'indicateurs de services écosystémiques liés à l'incorporation de la MO par les VDT au nombre de 4 : le nombre de cabanes apparues après trois mois (T_cabf), le nombre de turricules apparus après trois mois (T_turf), la surface de paille restante après trois mois (T_surff) et la masse de paille incorporée après trois mois (Masse_inc). Ainsi, les observations faites après un et deux mois sont écartées des analyses qui suivent car ces indicateurs sont redondants avec leurs homologues observés au troisième mois (T_cabf, T_turf et T_surff) et n'apportent que peu d'informations supplémentaires dans l'ACP. En effet, le caractère cumulatif du nombre de cabanes et de turricules implique une redondance dans l'information liée à ces indicateurs. De plus la surface de paille restante au temps t dépendant aussi de la surface de paille restante au temps t-1, ceci implique une répétition des informations qui sera écartée de l'ACP.

Ainsi, en éliminant la redondance, l'ACP donnera une représentation plus concentrée des données, tout en conservant les informations essentielles.

En outre, la donnée manquante pour la parcelle 53 des D_S et D_k pose un problème dans la réalisation de l'ACP. En effet, l'ACP doit être réalisée sur un ensemble de données quantitatives et le manque de données pour un indicateur d'une parcelle entraînerait, sans estimation de ces valeurs manquantes, la perte des données des autres indicateurs pour cette parcelle. La gestion des données manquantes peut être gérée par différentes méthodes dans le cas d'une ACP (Josse et al., 2009). La plus simple consisterait à moyenner les valeurs des indicateurs D_S et D_k des autres parcelles pour déterminer les valeurs manquantes de la parcelle 53, mais cette méthode est peu précise. D'autres techniques plus sophistiquées permettent de compléter les données en tenant compte des ressemblances entre les parcelles telles que l'imputation via un modèle d'ACP à k dimensions (Josse et al., 2009). Cette technique sera utilisée pour imputer des valeurs

pour les indicateurs D_S et D_k de la parcelle 53. Ceci est valable aussi pour les différentes ACP réalisées dans le cadre de ce travail.

La Figure 12 donne les graphiques des variables de l'ACP pour les dimensions 1 et 2 (Figure 12a) et 2 et 3 (Figure 12b).

Le nombre de dimensions pris en compte dans l'ACP des SE est déterminé arbitrairement en étudiant la « quantité totale » de variations expliquées par les dimensions. En effet, chaque dimension explique un certain pourcentage de la variation des données (appelé inertie). Pour avoir une interprétation représentative, il faut considérer un certain nombre de dimensions pour capturer un pourcentage élevé de variabilité des données. Ainsi, les trois premières dimensions ont été retenues car la somme de l'inertie expliquée par celles-ci vaut 73,2 % ce qui signifie que 73,2 % de la variabilité des données sont représentées sur les graphiques cette l'ACP.

De plus, les labels repris dans les graphiques correspondent aux noms des indicateurs pour lesquels la projection sur le plan factoriel est bien représentée. En d'autres termes, l'angle formé par le vecteur et le plan de projection est trop grand. Ceci s'observe par la taille des vecteurs. Si un vecteur est petit, il n'est pas bien représenté sur le plan factoriel. Ainsi, il n'est pas interprétable et n'est donc pas labélisé.

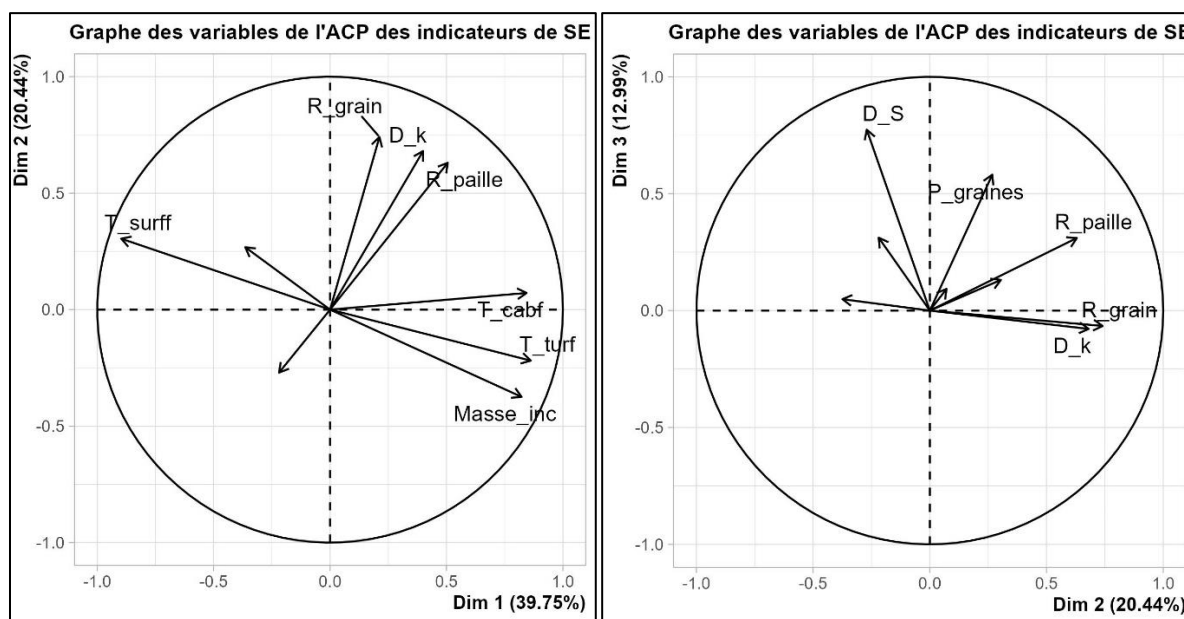


Figure 12 : Graphiques des variables de l'ACP des indicateurs de SE pour la dimension 1 et 2 (à gauche, 12a) et pour la dimension 2 et 3 (à droite 12b). La signification des abréviations est reprise dans le Tableau 7

Le graphique des variables de l'ACP des indicateurs de SE effectuées sur les première et deuxième dimensions (Figure 12a) montre une corrélation des indicateurs du service écosystémique d'incorporation de la MO par les VDT entre eux et une indépendance de ces indicateurs avec les autres indicateurs représentés (R_grains, D_k et R_paille). De plus, les indicateurs de rendements (paille et grain) et l'indicateur de décomposition de la MO labile par les microorganismes sont corrélés entre eux.

Ce graphique montre aussi par quelles variables les axes sont expliqués. Ainsi, l'axe 1 (Dim1) est expliqué quasiment intégralement par les indicateurs du SE d'incorporation de la MO par les VDT (T_cabf, T_turf, Masse_inc et T_surff). L'axe deux, lui, est construit sur base des indicateurs de rendements (R_grain, R_paille) et de décomposition de la MO labile par les microorganismes.

Pour des raisons de clarté, la première ACP représentée sur la Figure 12 sera appelée ACP_SE1 dans la suite de ce rapport. Elle correspond donc à l'ACP des indicateurs de SE avec comme indicateurs de SE d'incorporation de la MO par les VDT les indicateurs mesurés après 3 mois (T_cabf, T_turf, T_surff et Masse_inc).

La Figure 12 a montré l'importance que prennent les indicateurs d'incorporation de la MO par les VDT dans l'explication de l'axe 1 (l'axe 1, qui capture le plus grand pourcentage de variabilité des données, est quasiment entièrement construit sur base des indicateurs de SE des VDT). La Figure 13 montre une ACP réalisée sur les mêmes données (des indicateurs de SE) mais en n'utilisant qu'un seul indicateur pour le SE lié au VDT⁹. Ainsi, le nombre de cabanes et de turricules apparus après trois mois et la surface de paille incorporée après 3 mois sont utilisés comme variables quantitatives supplémentaires et ne sont donc pas repris pour la construction des axes. Ils sont cependant représentés sur le graphique des variables par des flèches bleues pointillées. Cette deuxième ACP sera nommée ACP_SE2.

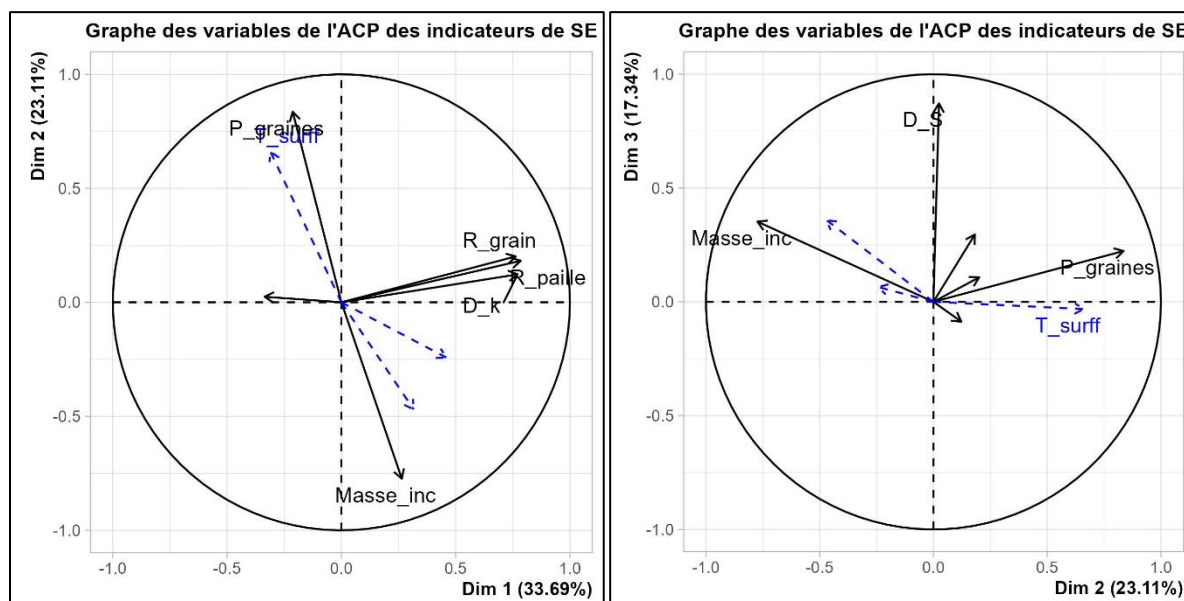


Figure 13 : ACP des indicateurs de SE avec un seul indicateur du SE d'incorporation de la MO par les VDT. Les graphiques montrent la projection sur la dimension 1 et 2 (à gauche, 13a) et pour la dimension 2 et 3 (à droite 13b). Les indicateurs de SE écartés pour les calculs des composantes principales sont représentés en flèches pointillées bleues. La signification des abréviations est reprise dans le Tableau 7

La Figure 13 montre les graphiques des variables de l'ACP des indicateurs de SE pour les dimensions une et deux (Figure 13 a) ainsi que les dimensions deux et trois (Figure 13 b). Ces

⁹ L'indicateur conservé est la masse de paille incorporée après 3 mois car il s'agit du seul indicateur l'indicateur exempt d'interprétations.

trois dimensions décrivent un total de 74,14% de la variabilité totale du jeu de données, raison pour laquelle ces trois dimensions sont observées.

Une fois encore, les vecteurs sont labellisés si la projection sur le plan factoriel est bien représentée. En d'autres termes, si l'angle formé par le vecteur et le plan de projection n'est pas trop grand.

La première dimension de l'ACP réalisée avec un seul indicateur du SE des VDT (Figure 13a) est semblable à la deuxième dimension de l'ACP_SE1. Ainsi, la première dimension de la Figure 13 est décrite par le rendement en paille et en grain ainsi que le taux de décomposition de la matière organique par les microorganismes.

En outre, la deuxième dimension de l'ACP_SE2 est décrite par le taux de prédation de graines d'adventices (P_graines) et la masse de paille incorporée par les VDT après trois mois, là où la deuxième dimension de l'ACP_SE1 n'est expliquée que par les indicateurs de SE d'incorporation de la MO par les VDT.

Enfin la troisième dimension de l'ACP_SE2 est décrite par le taux de stabilisation de la partie labile de la MO par les microorganismes (D_S).

Les graphiques des individus de la Figure 14 donne la projection des individus (parcelles) sur le plan de l'ACP_SE2 sur les dimensions une et deux (14a) et deux et trois (14b).

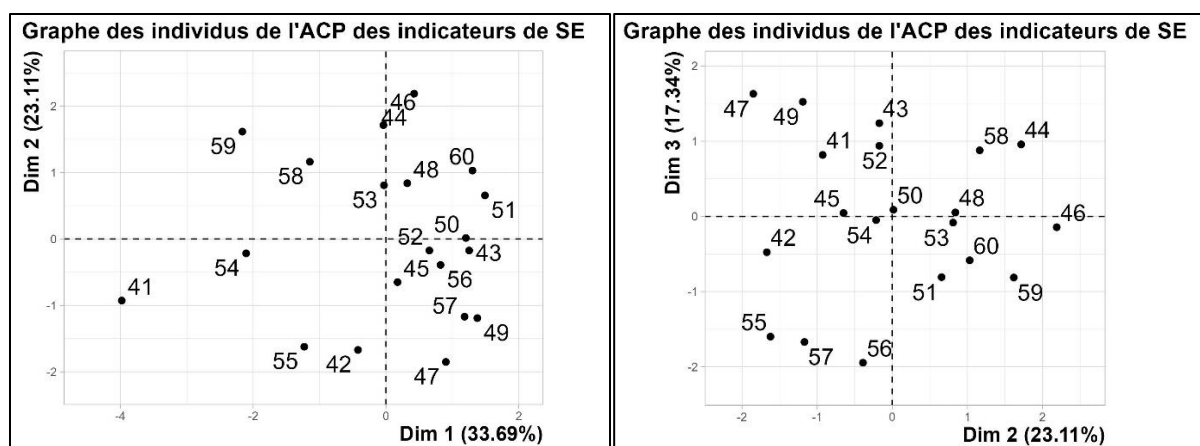


Figure 14 : Graphiques des individus des variables de l'ACP_SE2 sur le plan des dimensions 1 et 2 (à gauche 14a) et 2 et 3 (à droite 14b)

Ainsi, le graphique des individus de cette ACP (Figure 14) peut être interprété sur base de la construction des axes décrits à la Figure 13. Dans ce graphique, sont représentées par des points les 20 parcelles. Leur position par rapport aux axes montre quelles sont les tendances des résultats des indicateurs de SE pour les parcelles. En effet, un point proche d'un axe sera fortement corrélé à celui-ci. De plus, la qualité de projection d'un point sur le plan factoriel, autrement dit la possibilité d'interprétation de sa position sur le plan, est décrite par sa distance avec l'origine. Ainsi, des points trop proches de l'origine ne pourront pas être interprétés sur le graphique des individus (comme le point de la parcelle 52 de la Figure 14 a).

De plus, une proximité dans les points peut être traduite par une ressemblance. Il faut toutefois considérer les distances entre les points des trois dimensions (en considérant les Figures 14 a et b) pour conclure à une ressemblance entre les parcelles.

3.3.2 Observation de l'impact des indicateurs de pratiques culturelles sur les indicateurs de services écosystémiques

3.3.2.1 *Corrélogramme*

La Figure 15 montre le corrélogramme illustrant la valeur du coefficient de corrélation pour toutes les combinaisons d'indicateurs de services écosystémiques et de pratiques culturelles. Similairement au corrélogramme des indicateurs de SE (Figure 11), la Figure 15 illustre le coefficient de corrélation par une couleur. Ainsi, le rouge signifie une corrélation négative et le bleu une corrélation positive. La force de corrélation est exprimée par la teinte, plus celle-ci s'approfondit, plus la corrélation est intense. Seules les corrélations significatives avec un niveau de confiance fixé à 95% sont illustrées (une case blanche signifie donc que le coefficient n'est pas significatif, autrement dit que l'incertitude liée à la valeur de corrélation est trop grande que pour pouvoir interpréter la corrélation).

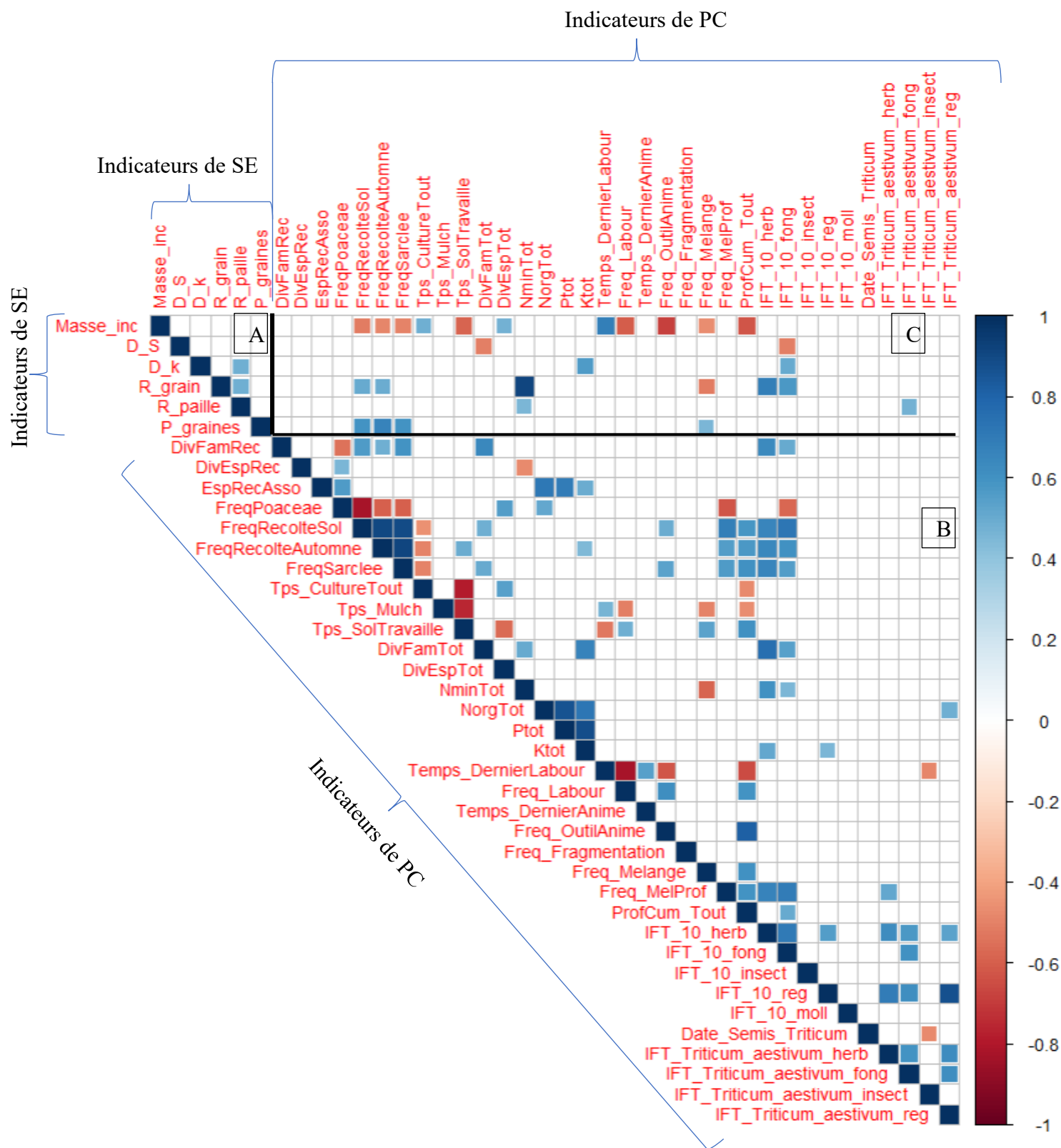


Figure 15 : Représentation en corrplot de la matrice de corrélation des indicateurs de services écosystémiques et des pratiques culturales. Ce corrélogramme, illustre le coefficient de corrélation par une couleur (échelle sur la droite de la figure) : le rouge signifie une corrélation négative et le bleu une corrélation positive. La force de corrélation est exprimée par la teinte, plus celle-ci s'approfondit, plus la corrélation est intense. Les valeurs non significatives ne sont pas représentées (niveau de confiance à 95 %). La sous figure 15a montre les corrélations entre les indicateurs de SE, la sous-figure 15b montre les corrélations entre les PC et la figure 15 c montre les corrélations entre les PC et les SE. Les significations des abréviations des indicateurs de PC sont expliquées dans le tableau 4 et celles des indicateurs de SE le tableau 7

La Figure 15 donne donc la corrélation entre toutes les combinaisons de couples d'indicateurs de PC et de SE. Ce graphique est légendé en 3 parties pour faciliter l'interprétation.

La première partie (Figure 15a) correspond aux corrélations des indicateurs de SE entre eux. Cette partie est donc similaire à la Figure 11 mais avec uniquement la masse de paille incorporée (Masse_inc) comme indicateur de SE d'activité de VDT.

La seconde partie (Figure 15b), correspond aux corrélations des indicateurs de PC entre eux. Ces corrélations seront utilisées pour interpréter l'impact des PC sur les SE dans la section 4.2

La troisième partie (Figure 15c), correspond aux corrélations entre les indicateurs de SE et les indicateurs de PC. Cette partie montre, pour chaque indicateur de SE, quelles PC impactent significativement cet indicateur de SE. Pour rappel, les indicateurs de PC reprennent dix ans d'historique. Ainsi, cette partie de figure montre que :

- La masse de paille incorporée par les VDT est
 - Corrélée négativement à la fréquence des récoltes des cultures sous le sol (FreqRecolteSol), à la fréquence de cultures récoltées en Automne (FreqRecolteAutomn), à la fréquence des cultures sarclées (FreqSarclée) ainsi qu'au temps de sol travaillé non-semé, qui correspond au temps cumulé durant lequel la terre est à nu, sans culture, couvert ou mulch (Tps_SolTravail). La masse de paille incorporée est aussi corrélée positivement à la fréquence de labour (Freq_Labour), à l'indicateur de fréquence d'utilisation d'outils animés (Freq_OutilAnime), à l'indicateur de fréquence des travaux de mélange du sol (Freq_Melange) et à l'indicateur de profondeur cumulée de tous les types de travaux (ProfCum_Tout).
 - Corrélée positivement à l'indice du temps de culture vivante sur le sol (Tps_CultureTout), à l'indicateur de diversité des espèces cultivées pendant dix ans (DivEspTot) et au temps écoulé depuis le dernier labour (Temps_DernierLabour).
- L'indicateur de stabilisation de la MO du sol par les microorganismes (D_S) est corrélé négativement à l'indicateur de diversité des familles cultivées pendant dix ans (DivFamTot) et à l'indice de fréquence de traitement avec fongicides sur dix ans (IFT_10_fong).
- L'indicateur de décomposition de la MO par les microorganismes est corrélé positivement à l'indicateur d'apport total de fertilisants en potassium (Ktot), et l'indice de fréquence de traitement en fongicide sur dix ans (IFT_10_fong).
- Le rendement en grain est corrélé :
 - Positivement à la fréquence des récoltes des cultures sous le sol (FreqRecolteSol), à la fréquence de cultures récoltées en Automne (FreqRecolteAutomn), à l'indicateur total d'apport de fertilisants azotés d'origine minérale (NminTot) et à l'indice de fréquence de traitements en herbicides et fongicides sur dix ans (respectivement IFT_10_herb et IFT_10_fong).
 - Négativement à l'indicateur de fréquence des travaux de mélange du sol (Freq_Melange).

- Le rendement en paille est corrélé positivement à l'indicateur total d'apport de fertilisants azotés d'origine minérale (NminTot) et à l'indice de fréquence de traitement moyen du *Triticum aestivum* en fongicides (IFT_Triticum_aestivum_fong).
- L'indice de prédation de graines d'adventices est corrélé positivement à la fréquence des récoltes des cultures sous le sol (FreqRecolteSol), à la fréquence de cultures récoltées en Automne (FreqRecolteAutomne), à la fréquence des cultures sarclées (Freq_Sarclée) et à l'indicateur de fréquence des travaux de mélange du sol (Freq_Melange).

3.3.2.2 Analyse en composante principale.

La partie 3.3.2.2 de ce mémoire identifie les liens qui existent entre les différents indicateurs (de PC et de SE) en réalisant une ACP sur l'ensemble des indicateurs de SE utilisés dans l'ACP_SE2, combinée avec l'ensemble des indicateurs de PC décrites dans la partie 2.2. Cette ACP reprenant ces deux types d'indicateurs sera appelée ACP_SE/PC. Cette partie montre les graphiques interprétables de cette ACP.

La Figure 16 donne les graphiques des variables de l'ACP des indicateurs de PC et de SE pour les dimensions 2 et 3 (16a) ainsi que les dimensions 3 et 4 (16b). Ces quatre dimensions reprennent 62,47 % de la variabilité du jeu de données. De plus, les variables qui ne sont pas bien représentées sur le plan de l'ACP, autrement dit pour lesquelles l'angle formé entre le vecteur et le plan de l'ACP est trop important, ne sont pas labellisées. La gestion des données manquantes¹⁰ a été effectuée de façon identique aux ACP réalisées sur les indicateurs de SE (ACP_SE1 et ACP_SE2) ; par imputation via un modèle d'ACP à k dimensions (Josse et al., 2009).

¹⁰ Comme pour les ACP des champs précédents, les seules données manquantes sont les indicateurs de dégradation de la MO par les microorganismes du champs 53.

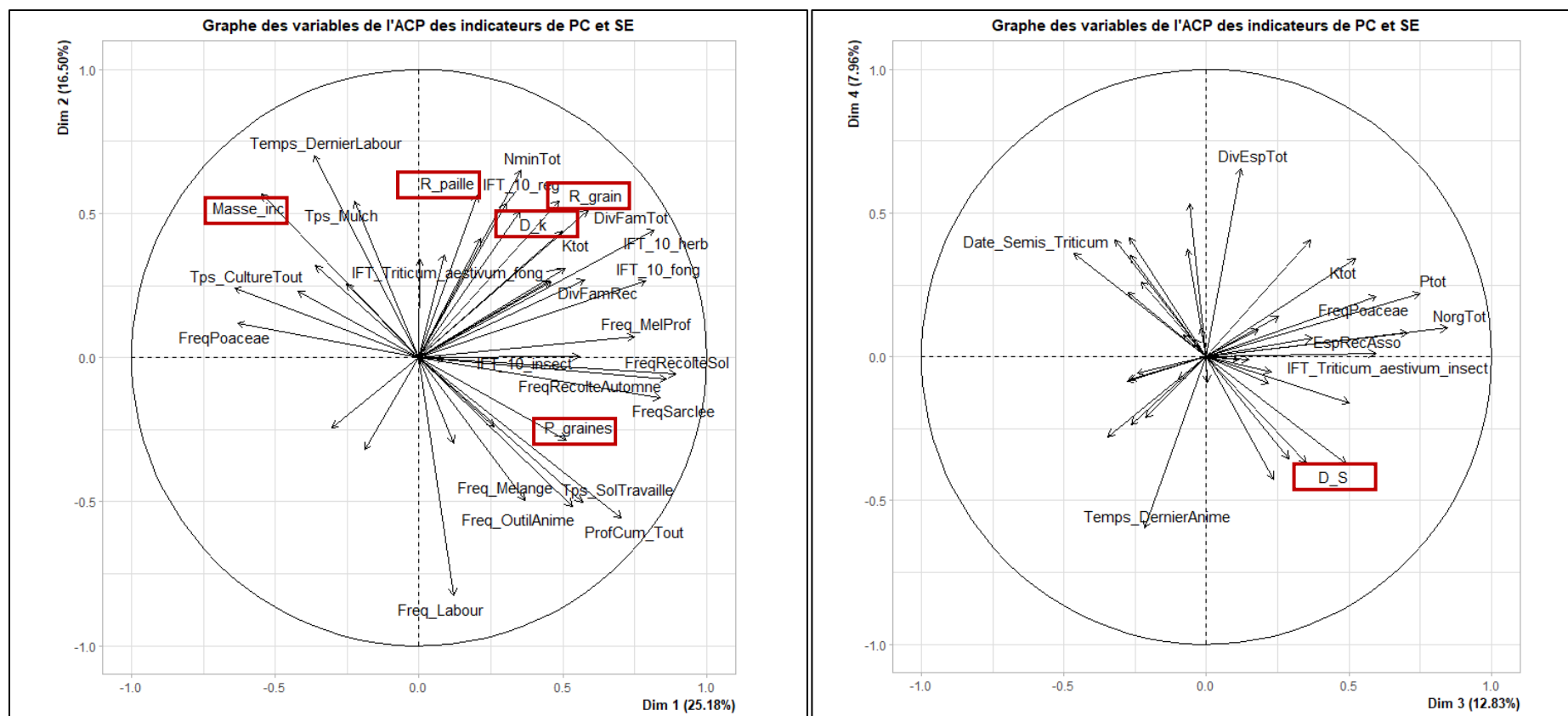


Figure 16 : Graphiques des variables de l'ACP des indicateurs de PC et de SE pour les dimensions 1 et 2 (16a) ainsi que les dimensions 3 et 4 (16b). Les labels des variables qui ne sont pas bien représentées par la projection sont retirés. Les vecteurs des indicateurs de SE sont encadrés en rouge. La signification des abréviations des indicateurs de SE est reprise dans le Tableau 7 et la signification des abréviations des indicateurs de PC est reprise dans le Tableau 4.

Les graphiques 16 a et b montrent les graphiques des variables de l'ACP des indicateurs de PC et de SE. Cette ACP regroupe donc l'entièreté des indicateurs de PC sélectionnés (à la section 2.2) et les indicateurs de SE de l'ACP_SE2. Les vecteurs montrant les indicateurs de SE ont été mis en avant par un cadre rouge.

La position relative des vecteurs exprime la corrélation entre ceux-ci. Ainsi, le lien existant entre les indicateurs de SE et de PC peut être observé sur les graphiques des variables de l'ACP en observant l'angle formé entre les vecteurs considérés : un angle obtus exprime une corrélation négative, un angle aigu une corrélation positive et un angle droit exprime une indépendance entre les variables. Ces liens sont issus de l'interprétation statistique des données dans son ensemble et pas en observant les liens des indicateurs deux à deux comme pour les corrélogrammes. Ainsi, plusieurs tendances peuvent être observées :

Le SE d'incorporation de la MO par les VDT, représenté par l'indicateur de masse de paille incorporée après trois mois (Masse_inc) :

- Est corrélé négativement à l'indicateur de fréquence des travaux de mélange du sol (Freq_Melange), l'indicateur de fréquence d'utilisation d'outils animé (Freq_OutilAnime) ainsi que de labour (Freq_Labour), à l'indicateur de profondeur cumulée de tous les types de travaux (ProfCum_Tout) et de temps de sol travaillé non semé qui correspond au temps cumulé durant lequel la terre est à nu, sans culture, couvert ou mulch (Tps_SolTravaille). Dans une moindre mesure, cet indicateur masse de paille incorporée est aussi corrélé négativement à la fréquence des cultures sarclées (Freq_Sarclée) et la fréquence de cultures récoltées en Automne (FreqRecolteAutomne), la fréquence des récoltes des cultures sous le sol (FreqRecolte_Sol), ainsi que la fréquence des travaux de mélange profond (Freq_MelProf).
- Est relativement indépendant des indices de fréquence de traitements (IFT) sur dix ans d'herbicides, de fongicides et de régulateurs de chaque culture de la rotation (respectivement IFT_10_herb et IFT_10_fong, IFT_10_reg), ainsi qu'à l'indicateur total d'apport de fertilisants azotés d'origine minérale (NminTot) et de potassium (Ktot). De plus, l'indicateur de masse de paille incorporée tend à être indépendant de l'indicateur de diversité des familles cultivées pendant dix ans (DivFamTot) et de diversité des familles végétales récoltées sur dix ans (Div_FamRec).
- Est corrélé positivement au temps écoulé depuis le dernier labour (Temps_DernierLabour), au temps cumulé de mulching mort sur dix ans (Tps_Mulch), à l'indice du temps de culture vivante sur le sol (Tps_CultureTout) ainsi qu'à la fréquence de culture de Poacées sur la parcelle depuis dix ans (FreqPoaceae).

Le processus de SE d'incorporation de décomposition de la MO labile du sol (D_k) et le SE de production végétale, représenté dans ce cas-ci par le rendement en paille (R_paille) et en grain (R_grain) tendent à être :

- Corrélés entre eux

- Modérément corrélés négativement à la fréquence de culture de poacées sur la parcelle depuis dix ans (FreqPoaceae) et l'indicateur de fréquence de labour (Freq_Labour).
- Relativement indépendant de l'indicateur de fréquence des travaux de mélange du sol (Freq_Melange), de l'indicateur de fréquence d'utilisation d'outils animés (Freq_OutilAnime), de l'indicateur de profondeur cumulée de tous les types de travaux (ProfCum_Tout) et de temps de sol travaillé non-semé, qui correspond au temps cumulé durant lequel la terre est à nu, sans culture, couvert ou mulch (Tps_SolTravail). De plus, ces indicateurs de SE tendent à être indépendants du temps écoulé depuis le dernier labour (Temps_DernierLabour), du temps cumulé de mulching mort depuis dix ans (Tps_Mulch), de l'indice du temps de culture vivante sur le sol (Tps_CultureTout) ainsi que de la fréquence de cultures de poacées sur la parcelle depuis dix ans (FreqPoaceae).
- Corrélés positivement aux IFT sur dix ans d'herbicides, de fongicides et de régulation (respectivement IFT_10_herb, IFT_10_fong), à l'indicateur de diversité des familles cultivées pendant dix ans (DivFamTot) et de diversité des familles végétales récoltées sur dix ans (Div_FamRec), à l'indicateur total d'apport de fertilisants azotés d'origine minérale (NminTot) et de potassium (Ktot). Dans une moindre mesure, ces indicateurs de SE sont corrélés positivement à la fréquence de mélange profond (Freq_MelProf).

L'indicateur de SE de prédation de graines d'adventices :

- Est corrélé négativement au temps écoulé depuis le dernier labour (Temps_DernierLabour), au temps cumulé de mulching mort depuis dix ans (Tps_Mulch), au temps de culture vivante sur le sol (Tps_CultureTout) ainsi qu'à la fréquence de cultures de poacées sur la parcelle depuis dix ans (FreqPoaceae).
- Est indépendant des IFT sur dix ans d'herbicides, de fongicides et de régulation (respectivement IFT_10_herb, IFT_10_fong), à l'indicateur de diversité des familles cultivées pendant dix ans (DivFamTot) et de diversité des familles végétales récoltées (Div_FamRec) ainsi que de l'indicateur total d'apport de fertilisants azotés d'origine minérale (NminTot) et de potassium (Ktot).
- Est corrélé positivement à l'indicateur de fréquence des travaux de mélange du sol (Freq_Melange), à l'indicateur de fréquence d'utilisation d'outils animés (Freq_OutilAnime) ainsi qu'au labour (Freq_Labour), à l'indicateur de profondeur cumulée de tous les types de travaux (ProfCum_Tout), au temps de sol travaillé non-semé, qui correspond au temps cumulé durant lequel la terre est à nu, sans culture, couvert ou mulch (Tps_SolTravail). Dans une moindre mesure, l'indicateur de SE de prédation de graines d'adventices est aussi corrélé positivement à la fréquence des cultures sarclées (Freq_Sarclée), à la fréquence de cultures récoltées en Automne (FreqRecolteAutomne), à la fréquence des récoltes des cultures sous le sol (FreqRecolte_Sol), ainsi qu'à la fréquence des travaux de mélange profond (Freq_MelProf).

L'indicateur de stabilisation de la partie labile de la MO par les microorganismes (D_S) (Figure 16b) tend à être :

- Corrélié négativement à la date de semis du froment ou de l'épeautre (Date_Semis_Triticum) et dans une moindre mesure à la diversité des espèces cultivées sur dix ans (DivEspTot).
- Indépendant du temps écoulé depuis le dernier usage d'outils animés (Temps_DernierAnime), de la fertilisation totale en potassium (Ktot) et en phosphore (Ptot) ainsi que de la fréquence de culture de poacées sur 10 ans (FreqPoaceae).
- Modérément corrélié positivement à l'indice de fréquence de traitement aux insecticides sur *Triticum aestivum* sur dix ans (IFT_Triticum_aestivum_insect), à la fréquence des récoltes de plusieurs espèces simultanément (EspRecAsso) et à l'azote organique total apporté (NorgTot).

En outre, la présence d'un grand nombre de variables rend difficile l'expression des dimensions par les variables comme effectué dans les ACP_SE1 et ACP_SE2.

3.3.2.3 Classification hiérarchique sur composantes principales

La Figure 17 montre le graphique des individus sur le plan factoriel des dimensions 1 et 2, auquel a été appliqué une classification par HCPC. Ainsi, les parcelles ont été classées dans 4 groupes selon leurs ressemblances à des indicateurs donnés par l'ACP_SE/PC. Ce Clustering a été réalisé sur base des 8 premières dimensions pour rassembler plus de 90% de la variance du jeu de données de l'ACP_SE/PC.

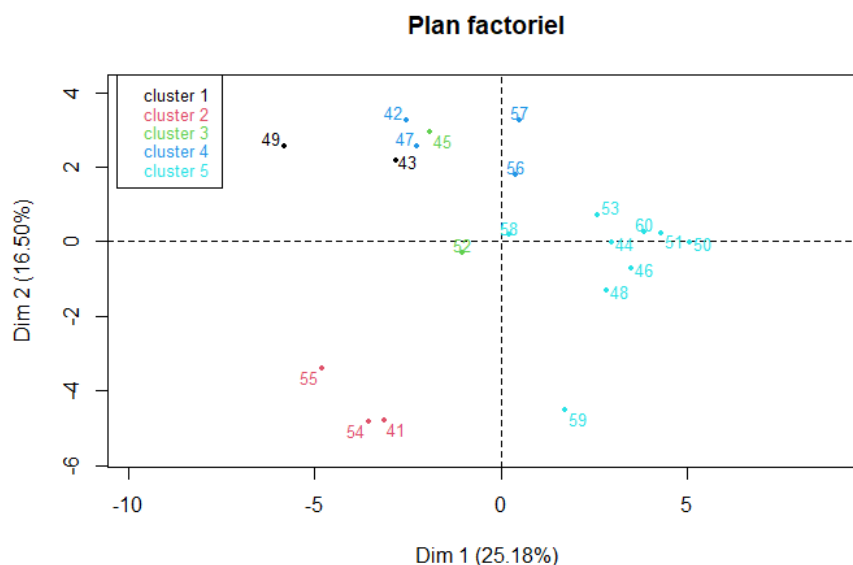


Figure 17 : HCPC des données de l'ACP_SE/PC. Les nombres correspondent au numéro des parcelles. Celles-ci sont regroupées par couleur sur base de leurs ressemblances en termes de valeur des indicateurs de SE et de PC

La Figure 17 montre donc la projection des individus uniquement sur la dimension une et deux mais la classification (symbolisée par les couleurs) prend en compte les huit premières dimensions ce qui explique la division des parcelles en deux groupes vert et rouge malgré leur proximité. Par exemple, les parcelles 45 et 47 sont similaires sur la projection sur les deux premières dimensions mais différentes dans les dimensions suivantes de l'ACP, ce qui explique

pourquoi elles ne sont pas reprises dans le même groupe. Ainsi, la Figure 18 donne ainsi le même clustering mais sur les dimensions 3 et 4.

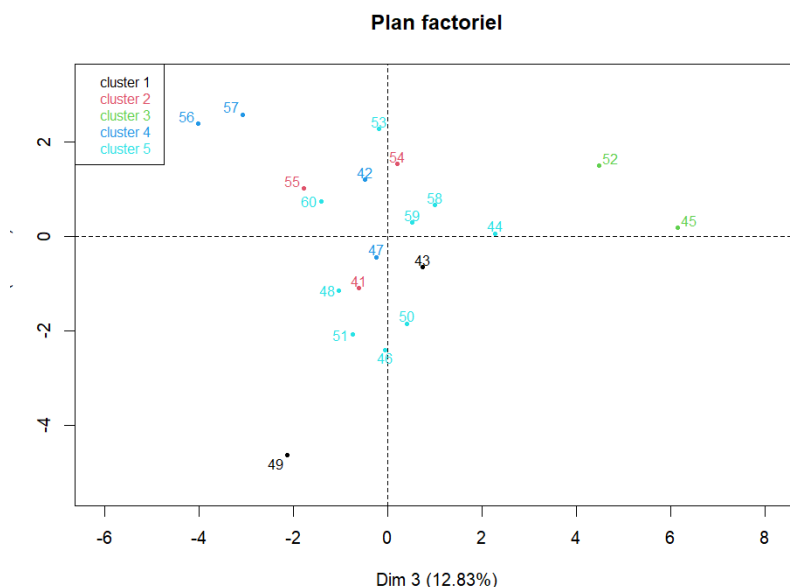


Figure 18 : : HCPC des données de l'ACP_SE/PC représenté sur les dimensions 3 et 4. Les nombres correspondent au numéro des parcelles. Celles-ci sont regroupées par couleur sur base de leurs ressemblances en termes de valeur des indicateurs de SE et de PC

Le nombre de groupes optimal a été déterminé en étudiant le graphique du nombre de clusters optimal, basé sur la somme des carrés intra-cluster (en Annexe 7).

Ce clustering sera discuté et interprété dans la section 4.3.

3.3.3 Analyse en composantes principales des indicateurs de PC

Une dernière ACP a été réalisée. Celle-ci se base exclusivement sur les indicateurs de pratiques culturelles des 20 parcelles. La Figure 19 donne le graphique des variables de cet ACP (qui, pour la suite, sera nommée ACP_PC). Les dimensions 1 et 2 ne représentent que 43% de la variabilité totale du jeu de données, ainsi il serait utile de considérer les dimensions supérieures. Cependant, les graphiques des dimensions supérieures ne sont pas bien interprétables car les individus et les variables ne sont pas bien représentés sur les plans de l'ACP. Ainsi, uniquement le graphique de la dimension une et deux de cet ACP sera exposé.

Cette faible représentativité de l'ACP_PC sera prise en compte dans son analyse à la section 4.4

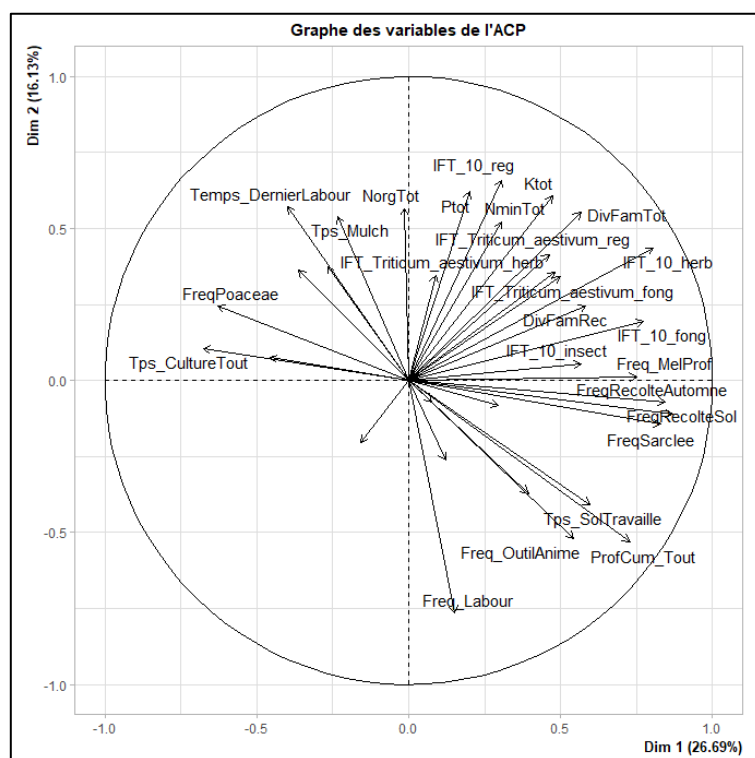


Figure 19 Graphique des variables de l'ACP des indicateurs de PC pour les dimensions 1 et 2. Les labels des variables qui ne sont pas bien représentées par la projection sont retirés. La signification des abréviations des indicateurs des PC est reprise dans le Tableau 4.

Une deuxième classification hiérarchique sur composante principale est réalisée. Celle-ci est construite sur base des indicateurs de PC et permet d'identifier 5 groupes de parcelles dont les indicateurs de PC sont semblables. La Figure 20 montre cette classification sur le graphique des individus de la dimension 1 et 2 de l'ACP_PC. Le nombre de groupes optimal a été déterminé en étudiant le graphique du nombre de clusters optimal, basé sur la somme des carrés intra-cluster (en Annexe 7).

Le clustering a été établi en prenant huit dimensions en compte pour interpréter 84% de la variance totale. Cette classification sera interprétée et mise en relation avec les systèmes de production de chaque parcelle à la section 4.1.

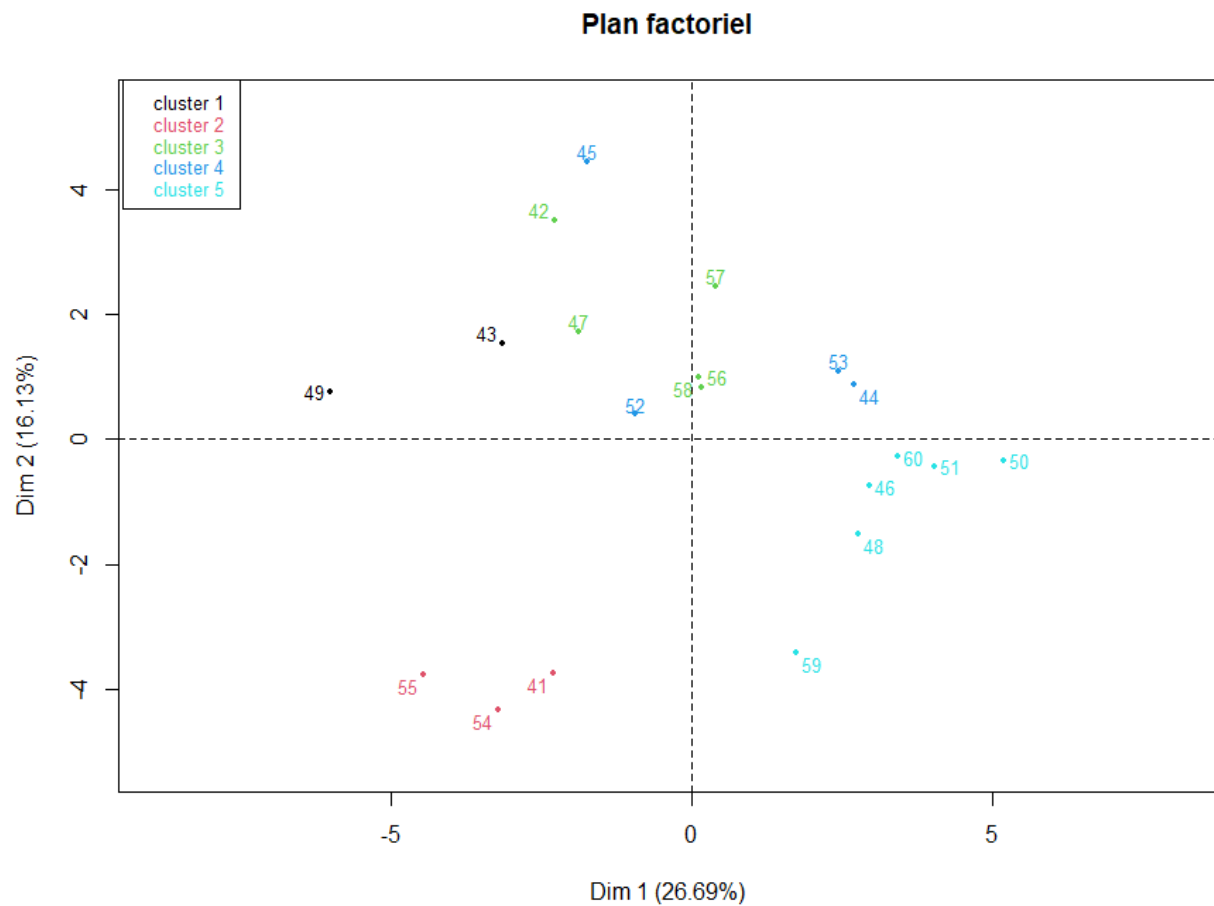


Figure 20 : HCPC sur base des indicateurs de pratiques culturelles. Les nombres correspondent au numéro des parcelles. Celles-ci sont regroupées par couleurs sur base de leurs ressemblances en termes de valeur des indicateurs de PC.

4 Discussion - Interprétation

Pour établir les liens entre les différents indicateurs, plusieurs analyses multivariées ont été réalisées, et ce sur différentes données :

- Une ACP et un graphique des corrélations ont été réalisés uniquement avec les données par parcelles des indicateurs de services écosystémiques (section 3.3.1, ACP_SE et ACP_SE2).
- Une ACP et un clustering ont été réalisés sur l'ensemble des données, c'est-à-dire sur les indicateurs de PC et de SE et montrent directement les liens entre les indicateurs de SE et de PC (section 3.3.2, ACP_SE/PC).
- Une ACP et un clustering ont été réalisés uniquement sur les indicateurs de PC afin d'établir les ressemblances des parcelles en termes de PC (section 3.3.3, ACP_PC).

Cette section interprétera ces analyses multivariées de différentes façons. Tout d'abord, elle comparera les clusterings réalisés par l'ACP_PC aux systèmes de production des différents champs de l'étude (section 4.1). Ensuite, une interprétation des résultats des liens entre les indicateurs de PC et de SE obtenus par l'ACP_SE/PC sera effectuée (section 4.2). Enfin, la section 4.4 mettra en relation les résultats de l'ACP_PC (donc l'ACP réalisée sur base des PC des 20 parcelles) directement avec les résultats des expériences de la section 2.3.

4.1 Comparaison de la classification sur composantes principales des parcelles sur base des pratiques culturales avec les systèmes de culture

L'objectif du mémoire est de comprendre l'impact des pratiques culturales sur les indicateurs de services écosystémiques étudiés. Ainsi, ce travail se concentre sur l'impact des PC en tant que telles, et pas sur l'impact des systèmes de production des parcelles présentés à la section 1.5 (AC, AB et ACS).

Le Tableau 9 met en relation le clustering réalisé sur les PC (Figure 20) et les systèmes de production de chaque champ afin de voir si les analyses multivariées réalisées auraient pu s'effectuer en observant les systèmes de production ce qui aurait simplifié ces analyses.

Tableau 9 : Comparaison des regroupements des parcelles par clustering sur base des PC et par système de production : agriculture de conservation des sols (ACS), agriculture biologique (AB), agriculture biologique de conservation (ACB) et agriculture conventionnelle (AC).

N° du cluster	N° de parcelle	Système de production
1	43	ACS
	49	ACS
2	41	AB
	54	AB
	55	AB
3	42	ACS
	47	ACS
	56	ACS
	57	ACS
	58	ABC
4	44	AC
	45	ABC
	52	AC
	53	AC
5	46	AC
	48	AC
	50	AC
	51	AC
	59	AB
	60	AC

Même si les systèmes de production sont relativement bien regroupés par le clustering, ce tableau montre que les parcelles qui suivent un même système de production peuvent aussi différer en termes de PC. En effet, à l'exception des groupes 1 et 2 du clustering, aucun groupe ne reprend des parcelles selon le même système de production. Par exemple, ceci signifie qu'en terme de PC la parcelle 59 (en AB) ressemble plus à la parcelle 51 (en AC) qu'aux autres parcelles en AB. Ceci peut être dû au fait que beaucoup de pratiques sont considérées dans l'ACP du clustering. De plus, à l'exception de l'AB, les systèmes de production ne sont pas clairement labellisés ou certifiés ce qui pourrait permettre une certaine interprétation et variation des pratiques culturelles inhérentes au système de production.

Cette interprétation nuance le choix qui a été fait de considérer les impacts de pratiques culturelles de façon ponctuelle plutôt que de considérer le système de production de la parcelle pour identifier les impacts sur les indicateurs de SE. D'un côté, considérer les systèmes de cultures plutôt que les PC « ponctuelles » ne représenteraient pas réellement les pratiques réalisées en champs pour certaines parcelles (telles que la parcelle 59). D'un autre côté, le Tableau 9 montre aussi que dans le cas des données de ce travail, considérer les champs par

système de production pourrait aussi être représentatif des PC appliquées aux champs pour la plupart des parcelles.

4.2 Interprétation des résultats de corrélations entre les indicateurs de pratiques culturales et les indicateurs de services écosystémiques

Cette section met en relation les résultats de corrélations significatives entre les indicateurs de PC et les indicateurs de SE des résultats des expériences de cette étude (décrits à la section 3.3.2) avec les liens entre les pratiques culturales et les SE rencontrés dans la littérature (section 1.6). Ainsi, les interprétations présentées ne portent que sur les liens tangibles et sujets à interprétation.

4.2.1 Incorporation de la MO par les VDT

Selon l'indicateur de masse de paille incorporée par les VDT, le SE d'incorporation de la MO par les VDT tend à être impacté de façon négative principalement par certaines pratiques de travail du sol comme la fréquence et la profondeur de labour. Ce lien est aussi décrit dans la littérature comme étant le facteur principal de l'impact des PC sur ce SE.

De plus, l'utilisation de pesticides ne semble pas avoir d'impact sur ce SE ce qui concorde partiellement à la revue de la littérature. En effet, le lien entre les pesticides et l'activité des VDT fait débat dans la communauté scientifique, avec d'un côté des études montrant un impact négatif et d'un autre des études ne soulignant pas d'impact significatif de cette PC sur l'activité des VDT. Les résultats de ce mémoire tendent à montrer une indépendance entre l'utilisation des pesticides et le SE d'incorporation de la matière organique par les VDT.

En outre, une utilisation des techniques de mulch récurrente montre un impact positif sur l'activité des VDT. En effet, cette technique apporte de la MO et donc un apport de nourriture aux VDT. De plus, le mulch constitue une couverture du sol et pourrait aussi protéger les VDT des prédateurs après la récolte. Enfin, le mulch est une technique qui peut apporter de la MO à des moments où le sol n'en disposerait normalement pas (après une récolte par exemple). Cette technique pourrait ainsi favoriser la continuité de la nutrition des VDT.

4.2.2 Prédation des graines d'adventices

Le SE de prédation des graines d'adventices représenté dans ce mémoire par le taux de prédation des graines montre une corrélation positive significative avec les fréquences de récolte des cultures sous le sol et des cultures sarclées. D'une certaine façon, ces corrélations s'opposent aux travaux résumés dans la section 1.6.3. En effet, les PC perturbant le sol, inhérentes aux cultures sarclées et aux cultures sous le sol devraient, selon les travaux présentés à la section 1.6.3, être inversement corrélées au SE de prédation de graines d'adventices en causant la destruction des habitats et l'enfouissement des graines. De plus, l'indicateur de prédation de graines d'adventices est, dans ce travail, corrélé positivement à la fréquence du mélange du sol. Ce résultat est contradictoire et s'oppose aussi aux conclusions des travaux présentés à la section 1.6.3. Ces contradictions questionnent sur la qualité des données de l'indicateurs de SE de prédation de graines d'adventices.

4.2.3 Stabilisation de la MO par les microorganismes

Le service écosystémique de stabilisation de la MO par les microorganismes est, au travers de l'indicateur du taux de stabilisation, inversement corrélé à l'application de fongicide. Ce lien semble logique car le terme « microorganisme » regroupe différentes entités microscopiques dont certains champignons. En posant l'hypothèse selon laquelle les champignons du sol sont impactés négativement par les fongicides appliqués aux cultures, ces produits impacteraient négativement le service de stabilisation en tuant une partie des microorganismes responsables du processus de stabilisation, ou en réduisant leur activité globale.

En outre, le processus de stabilisation de la MO par les microorganismes est, selon les résultats de la campagne d'expériences, impacté négativement par la diversité des familles végétales cultivées sur 10 ans. Le lien entre les espèces présentes dans l'agroécosystème et l'activité des microorganismes est connu et mentionné dans la section 1.6.3.

4.2.4 Décomposition de la MO par les microorganismes

Le service écosystémique de décomposition de la MO par les microorganismes est, au travers de l'indicateur du taux de décomposition, corrélé positivement à l'amendement en Potassium. Ce lien est plausible car, comme décrit à la section 1.6.2, les microorganismes sont impactés par les caractéristiques chimiques du sol. Cependant, le SE de décomposition de la MO est aussi corrélé positivement à la fréquence d'utilisation de fongicides ce qui n'est pas en accord avec la section 1.3.2. En effet, dans cette section il est expliqué que les organismes qui sont principalement responsables de ce processus de décomposition sont les bactéries et les champignons. En supposant que les fongicides utilisés sur les cultures impactent négativement les champignons du sol, ces produits impacteraient négativement le service de décomposition en tuant une partie des microorganismes responsables du processus de stabilisation, ce qui n'est pas le cas ici. Cette contradiction pourrait s'expliquer par le lien entre la stabilisation et la décomposition de la MO. En effet, comme illustré à la section 1.3.1 la MO suit, en se dégradant, deux itinéraires opposés. D'un côté, elle peut suivre un itinéraire de décomposition (caractérisée ici par D_k) ou un itinéraire de stabilisation en humus (caractérisé par D_S). Favoriser un processus revient, pour un même apport de MO, à défavoriser l'autre processus. Ce lien pourrait ainsi biaiser l'analyse de liens existants entre les PC et ces indicateurs de SE.

4.2.5 Rendement en grain

Dans ce travail, le rendement en grain est fortement corrélé à la quantité totale d'azote minéral apporté. Ce lien semble logique étant donné l'importance de cet élément pour les besoins de la plante. En outre, le rendement en grain est aussi corrélé positivement à la fréquence d'utilisation d'herbicides et insecticides sur 10 ans. Ce lien pourrait s'expliquer par un impact bénéfique de ces produits sur le développement de la plante en réduisant globalement la quantité de pathogènes sur la parcelle mais ce lien est complexe à déterminer. Cependant, la Figure 15 B montre une corrélation entre ces indices de fréquence de traitements en herbicides et insecticides avec l'apport d'azote minéral. Ceci pourrait illustrer un problème dans l'observation des corrélations entre les PC et les SE à cause de corrélations entre PC qui

empêchent de discerner quelle est la PC qui impacte réellement le SE. Ce phénomène, appelé colinéarité, intervient lorsque deux ou plusieurs variables explicatives (ici les PC) sont corrélées entre elles.

4.2.6 Rendement en paille

Dans les résultats de ce travail, le rendement en paille est corrélé positivement à la quantité totale d'azote apportée sur 10 ans ce qui semble logique étant donné l'importance de cet élément pour les besoins de croissance de la plante.

En outre l'étude de l'impact des PC sur les rendements en grain et en paille a été effectuée sans prendre en compte la différence de cultures (froment ou épeautre) et de variétés. Ceci sera commenté à la section 4.4.

4.3 Interprétation du clustering réalisé sur base des composantes principales de l'ACP_SE/PC

Le clustering sur base de l'ACP_SE/PC regroupe les parcelles sur base de leurs ressemblances en termes de PC et de leurs valeurs d'indicateurs de SE. Ainsi, la façon dont les PC et les SE sont regroupés, au travers des clusters de parcelles, peut montrer les relations entre les PC et les SE. Le Tableau 10 reprend, pour chaque parcelle, son numéro de cluster. Ces numéros sont tirés de la Figure 17 présentés à la section 3.3.2.3.

Tableau 10 : Tableau montrant les groupes de parcelles de l'HCPC sur base des composantes principales de l'ACP_SE/PC. Les principaux systèmes de production des parcelles sont aussi indiqués : agriculture de conservation des sols (ACS), agriculture biologique (AB), agriculture biologique de conservation (ACB) et agriculture conventionnelle (AC).

N° cluster	Parcelle n°	Système de production
1	43	ACS
	49	ACS
2	41	AB
	54	AB
	55	AB
3	45	ABC
	52	AC
4	42	ACS
	47	ACS
	56	ACS
	57	ACS
5	44	AC
	46	AC
	48	AC
	50	AC
	51	AC
	53	AC
	58	ABC
	59	AB
	60	AC

En interprétant la position sur le plan de l'ACP_SE/PC des parcelles et la projection des vecteurs des indicateurs sur ce même plan (Figure 16a), il est possible de donner quelques caractéristiques des différents clusterings, et dans certains cas, souligner des liens entre les SE et les PC.

Les parcelles du **cluster n°1** possèdent une activité d'incorporation de la MO assez importante et un travail du sol relativement peu intense. Ces deux parcelles n'ont, en effet pas été labourées depuis plus de 10 ans. Elles sont aussi caractérisées par un temps élevé de mulch sur 10 ans. Ce cluster montre ainsi les bénéfices d'un travail peu intense du sol sur le SE d'incorporation de la MO par les VDT.

Les parcelles du **cluster n°2** se distinguent par leur absence ou leur faible utilisation de produits phytosanitaires et d'azote minéral sur 10 ans. Ces parcelles étant labellisées en AB, ce cluster semble logique car les PC citées sont exclues de ce système de production. Ces parcelles sont aussi caractérisées par une fréquence de labour relativement élevée. Elles présentent aussi des valeurs de rendements en paille et en grain ainsi qu'un taux de décomposition de la MO relativement faible.

Les parcelles du **cluster n°3** ne sont pas très bien représentées par les dimensions 1 et 2 (Figure 17) mais se distinguent des autres parcelles sur la dimension 3 et 4 (Figure 18) par l'utilisation d'une relativement grande quantité d'azote organique et de Phosphore sur 10 ans. Le clustering ne distingue pas ces parcelles par une valeur d'un indicateur de SE particulière. Le pourcentage de variance totale expliquée par les dimensions 3 et 4 étant faible (20,8%), cette observation est à considérer avec recul

Les parcelles du **cluster n°4** montrent une longue période depuis le dernier labour et un temps cumulé de mulch important sur 10 ans. Elles présentent aussi une relativement grande activité d'incorporation de MO par les VDT et un taux de dégradation de la MO relativement élevé.

Les parcelles du **cluster n°5** tendent à montrer une utilisation relativement grande de pesticides depuis 10 ans et une fréquence des cultures récoltées sous le sol, d'automne et sarclées importante. Le clustering ne distingue pas ces parcelles par une valeur d'un indicateur de SE particulière.

En outre, le système de production de chaque parcelle est aussi indiqué dans le Tableau 10. Au même titre que le Tableau 9, le Tableau 10 montre que l'utilisation des systèmes de productions des parcelles et non des PC ponctuelles pour l'observation de l'impact des PC sur les SE pourrait, dans le cas des données de cette année, fonctionner pour la plupart des parcelles. En effet, les parcelles sont relativement bien regroupées en système de production par le clustering. Il existe cependant quelques exceptions telles que les parcelles 58 et 59.

4.4 Comparaison du clustering des parcelles sur base des indicateurs de pratiques culturales et des indicateurs de services écosystémiques

Cette section interprète la position des individus de l'ACP_PC sur le plan de projection de cette ACP (de dimension 1 et 2) et les valeurs moyennes des différents indicateurs de services écosystémiques pour chaque parcelle. Cette représentation permet de croiser les résultats de l'analyse multivariée sur les PC avec les résultats des expériences réalisées dans le cadre de ce mémoire (2.3.2) pour visualiser et interpréter d'une autre façon les impacts des PC sur les SE.

Ainsi, la Figure 21 représente le graphique des individus de l'ACP_PC colorés selon la moyenne par parcelle de la masse de paille incorporée par les VDT (Masse_inc, [Figure 21a]), du taux de graines d'adventices prédatées (P_graines [Figure 21b]), des indicateurs de stabilisation et décomposition de la MO par les microorganismes (respectivement D_S [Figure 21c] et D_k [Figure 21d]), et des rendements en grain et en paille (respectivement R_grain [Figure 21e], R_paille [Figure 21f]).

La Figure 21 place donc les parcelles selon les dimensions 1 et 2 de l'ACP_PC décrites par les graphiques des variables présentées à la section 3.3.3 et donne pour chaque parcelle sa valeur moyenne de l'indicateur. Ainsi, la position de la parcelle est interprétable comme un « résumé » de ses PC et sa couleur comme sa valeur d'indicateur de SE.

Ce graphique permet de mettre en avant l'évolution des valeurs des indicateurs de SE le long des deux dimensions principales de l'ACP_PC et met ainsi en lumière l'existence des tendances et/ou gradient dans les variations des indicateurs de SE en fonction des différentes PC.

En outre, cette visualisation graphique constitue plus un outil exploratoire des données qui peut suggérer des tendances, mais elle ne fournit pas une validité statistique formelle car ne prend pas en compte les valeurs statistiques des données. De plus, le pourcentage des variations totales des données expliqué par ces dimensions étant relativement faible (43%), les conclusions de cette technique de comparaison sont à interpréter avec précaution et recul.

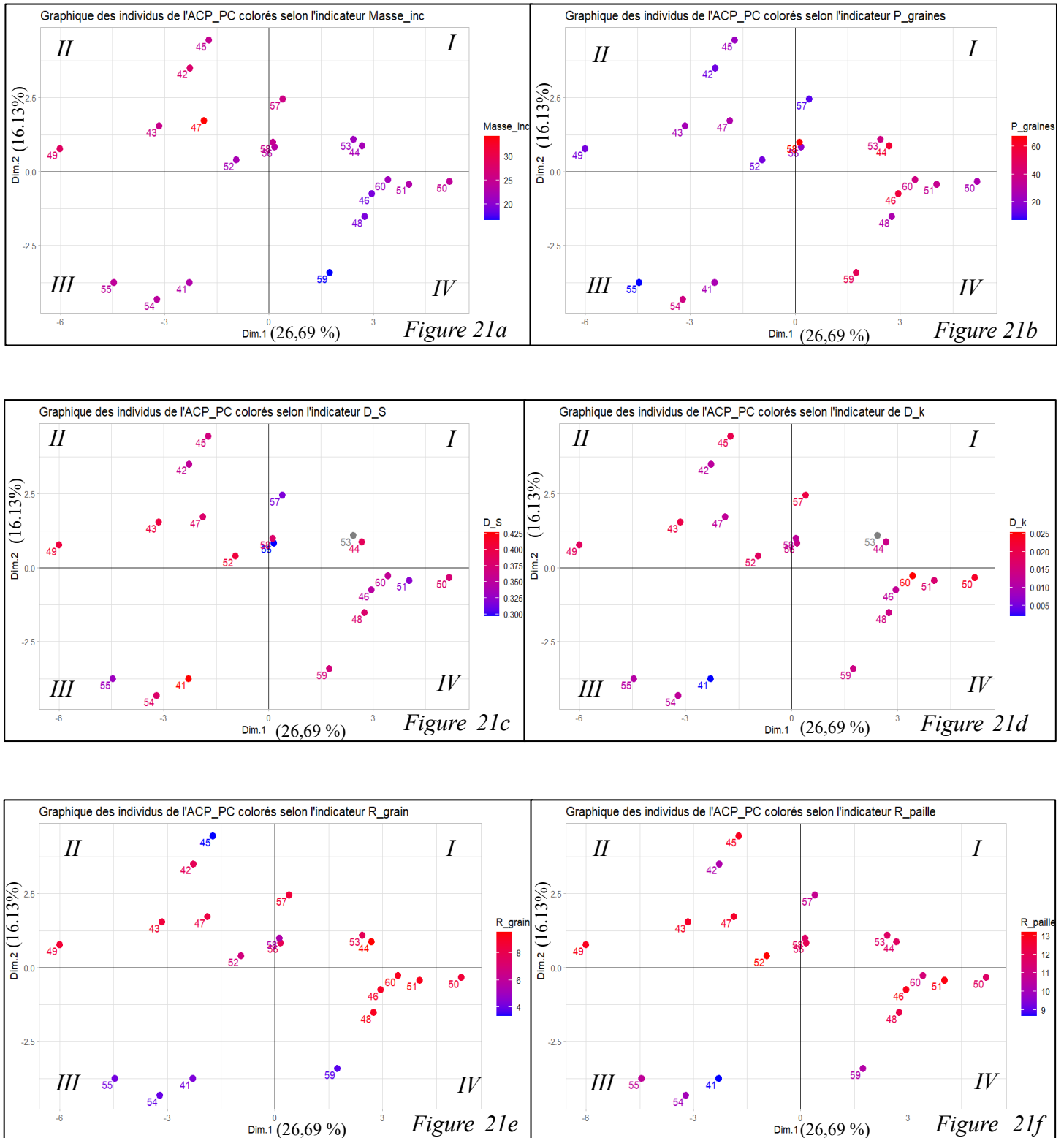


Figure 21 : Graphiques des individus de l'ACP_PC colorés selon la valeur moyenne des indicateurs de services écosystémiques des parcelles de : masse de paille incorporée par les VDT (Masse_inc, [21a]), du taux de graines d'adventices prédatées (P_graines[21b]), des indicateurs de stabilisation et décomposition de la MO par les microorganismes (respectivement D_S [21c] et D_k [21d]), et des rendements en grain et en paille (respectivement R_grain [21e], R_paille [21f]). L'échelle des couleurs correspondante est montrée à droite de chaque graphique. Les cadrans sont numérotés de 1 à 4 en chiffres romains selon la numérotation du plan cartésien. Les pourcentages de variabilité expliqués par les dimensions 1 et 2 sont respectivement de 26,69 % et 16,13 % et sont indiqués à côté des légendes des axes.

La Figure 21a montre un gradient négatif¹¹ oblique depuis le cadran II vers le cadran IV. En effet, sur base de la masse de paille incorporée par les VDT, les parcelles présentes dans le cadran 2 montrent une activité de VDT importante là où les parcelles représentées dans le cadran 4 montrent une activité des VDT relativement faible. En interprétant ce gradient avec le graphique des variables de l'ACP_PC (Figure 19), cela montre que les parcelles caractérisées par un apport de matière organique relativement important (soit par un apport direct de matière organique, soit par une durée cumulée de mulch importante sur 10 ans) montrent une activité des VDT plus importante que les parcelles caractérisées par une intensité forte de labour (définie dans la partie 1.6.1 comme étant la combinaison de la profondeur et de la fréquence de labour).

Cette tendance est logique car, comme expliqué dans la revue de la littérature recensant les liens entre les PC et ce SE (section 1.6.1), les PC avec l'impact négatif majeur sur les VDT sont les PC de travail intensif du sol tandis que les PC favorisant l'apport de MO dans le sol ont un impact positif sur cette mésofaune.

En outre, la fréquence de culture des poacées montre aussi, par l'interprétation des Figures 19 et 21a, une influence positive sur l'activité des VDT. Ceci pourrait être dû aux résidus de cultures que laissent ces cultures, qui peuvent être importants (Hiel et al., 2018) même en exportant les pailles. Ceci constituerait ainsi une source supplémentaire de MO.

La Figure 21b montre un faible gradient positif horizontal le long de l'axe de la dimension 1. Sur base du taux de prédation de graines d'adventices, cela signifie que l'activité de prédation de graines d'adventices tend à être plus importante pour les parcelles présentant une fréquence de traitements importante en insecticides et fongicides ainsi qu'une fréquence haute de récolte de culture racinaire et d'automne et une fréquence relativement grande de mélange profond du sol.

Ces résultats ne sont pas en accord avec les influences des PC sur le SE recensées dans la revue de la littérature, section 1.6.3. En effet, celle-ci explique que l'utilisation d'insecticides tend à impacter négativement la prédation des graines directement (en tuant les auxiliaires responsables de la prédation) et que le travail du sol détruit l'habitat des auxiliaires et diminue la quantité de graines disponibles pour la prédation.

Ceci pourrait être un exemple de la limitation des données de ce travail. En effet, cette conclusion vraisemblablement biaisée pourrait venir du protocole expérimental qui ne décrirait pas bien l'indicateur de SE ou d'une mauvaise interprétation des outils de l'ACP_PC. Cette analyse multivariée présente dans ce cas-ci plusieurs défauts tels que seulement les deux premières dimensions soient interprétables (comme expliqué dans la section 3.3.3, les variables ne sont pas bien représentées sur les dimensions supérieures à deux, celles-ci sont donc peu interprétables) ce qui cumule seulement 43 % de la variance totale. De plus, l'échantillon des

¹¹ Dans les interprétations qui suivent, un gradient négatif signifie que les valeurs des indicateurs de SE diminuent le long de ce gradient. Par exemple, un gradient oblique négatif du cadran 2 vers le cadran 4 signifie que les valeurs de SE diminuent le long de la droite imaginaire allant du centre du cadran 2, passant par l'origine et par le centre du cadran 4.

parcelles ne représente que 20 individus ce qui peut être assez restreint pour établir des conclusions sur le lien entre autant de PC sur les SE.

En outre, les corrélations entre les PC (illustrées dans le graphique des corrélations, Figure 15b) peuvent aussi empêcher de voir l'impact réel d'une PC sur un SE. En effet, si deux PC montrent une corrélation dans le jeu de données, il n'est pas possible d'attribuer séparément l'impact de ces PC sur le SE.

La Figure 21c¹² ne montre pas de gradient notable. Une faible différence est cependant visible entre le cadran 2 et le cadran 4. En effet, les parcelles du second cadran tendent à montrer un taux de stabilisation de la MO par les microorganismes sensiblement supérieur aux parcelles du cadran 4. Les PC caractérisant le second cadran (visible à la Figure 19) favorisant l'apport de MO au sol (par un apport direct de matière organique, par une durée cumulée de mulch importante sur 10 ans ou encore par les résidus de culture des Poaceae) tandis que le cadran 4 est décrit par un fort travail du sol, cette tendance semble logique. En effet, comme expliqué dans la section 1.6.2, l'apport de matière organique impacte l'activité des microorganismes du sol de façon positive. Le travail du sol, lui, pourrait impacter négativement le taux de stabilisation de la MO par une stimulation de la dégradation et non de l'humification de la MO (Slepetiene & Slepetys, 2005)

La Figure 21d¹² ne montre pas de gradient ou tendance notable. Cependant, en comparant la Figure 21c et la Figure 21d, une certaine tendance apparaît. En effet, la parcelle 41 qui montre une valeur très faible de D_k montre une valeur très grande de D_S . Inversement, les parcelles 60, 57, 51 montrent des valeurs fortes de D_k et des valeurs très faibles de D_S . Ceci illustre une relation opposée entre les deux processus mais uniquement pour les extrema. En effet, pour les parcelles ayant un taux de décomposition moyen, leur taux de stabilisation tend à être similaire à leur taux de décomposition.

Cette relation semble logique et suit le raisonnement décrit au point 4.2.4. En effet, comme illustré à la section 1.3.1, la MO suit en se dégradant deux itinéraires opposés. D'un côté, elle peut suivre un itinéraire de décomposition (caractérisée ici par D_k) ou un itinéraire de stabilisation en humus (caractérisé par D_S). Favoriser un processus revient, pour un même apport de MO, à défavoriser l'autre processus. En outre, certaines parcelles ne suivent pas cette tendance et présentent des taux élevés pour les deux processus telles que les parcelles 52 et 43.

La Figure 21e montre deux gammes de valeurs de rendement en grain avec, pour les parcelles relativement proches de l'axe horizontal, des valeurs hautes et homogènes et pour les parcelles éloignées de l'axe horizontal, des valeurs relativement faibles et homogènes. La parcelle 45 montre une valeur de rendement très inférieure comparée aux parcelles proches sur le plan de l'ACP_PC. Or, la variété cultivée était une variété ancienne, ce qui peut expliquer son faible rendement. En effet, la génétique a un impact important sur le rendement. De plus, les parcelles 52, 55 et 58 sont des cultures d'épeautre et non de froment. Ainsi, la Figure 22 montre le même

¹² La parcelle 53 est grisée car les valeurs de D_S et D_k ont été écartées pour les raisons présentées dans la section 3.1.2.3

graphique que la Figure 21e si on néglige les parcelles d'épeautre et la parcelle 45 afin d'observer les variations sur une échelles plus fine (l'ACP reste cependant la même).

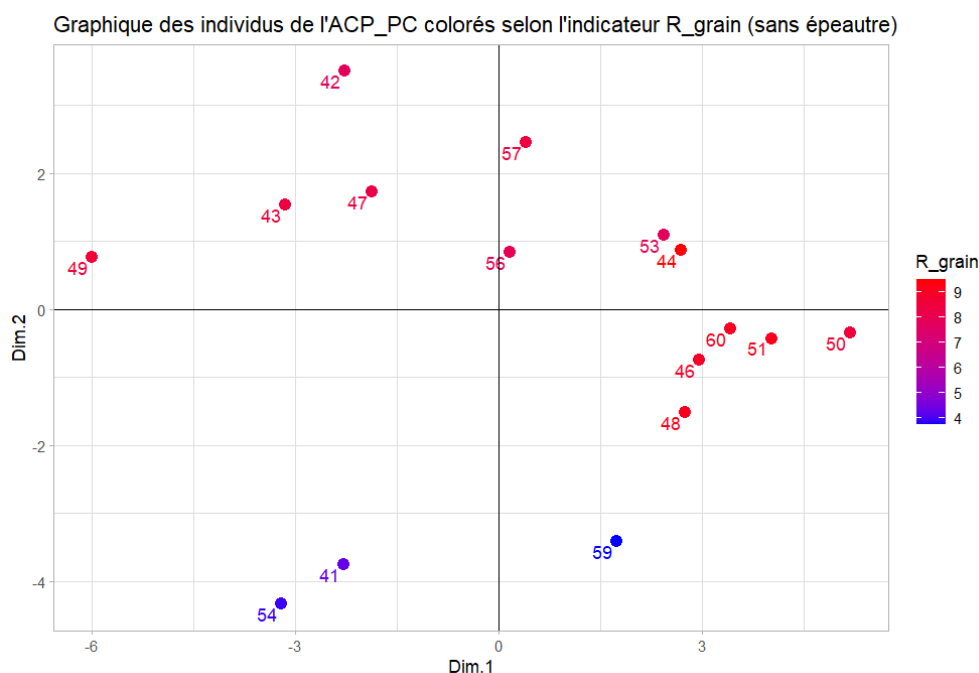


Figure 22 : Graphique des individus de l'ACP_PC colorés selon la valeur moyenne des indicateurs de services écosystémiques des parcelles des rendements en grain en écartant les parcelles d'épeautre (52, 55 et 58) et la parcelle 45. L'échelle des couleurs correspondante est montrée à droite du graphique.

La Figure 22 montre deux groupes distincts de rendement en grain : les parcelles 41, 54 et 59 et les autres. Ces trois parcelles correspondent aux 3 parcelles restantes en AB (après retrait des parcelles d'épeautre et la parcelle 45). Même s'il a été choisi de ne pas considérer, dans ce travail, les systèmes de production des parcelles mais bien les PC « ponctuelles », il a été jugé utile ici d'observer les positions sur le plan de l'ACP des parcelles en AB. En effet, ces trois parcelles se placent à l'opposé des pratiques culturelles d'utilisation de pesticides et d'engrais azoté d'origine minérale, ces pratiques étant exclue de l'AB. Ces parcelles montrent des rendements en grain faibles comparativement aux autres parcelles. Cette observation est logique car les rendements en AB sont généralement inférieurs aux rendements des autres systèmes de production.

La Figure 21f montre aussi une tendance binaire, avec des parcelles à fort rendement en paille et des parcelles à faible rendement en paille. Comme expliqué dans l'interprétation de la Figure 21e, la parcelle 45 était une culture de froment de variété ancienne de très grande taille. Ceci explique son fort rendement en paille comparativement à ses parcelles voisines sur le plan de l'ACP. En effet, les variétés de froment relativement grandes tendent à montrer un plus grand rendement en paille (Vancutsem et al., 2005). La Figure 23 montre le même graphique que la Figure 21f mais en écartant les parcelles d'épeautre et la parcelle 45 afin d'observer les variations sur une échelles plus fine.

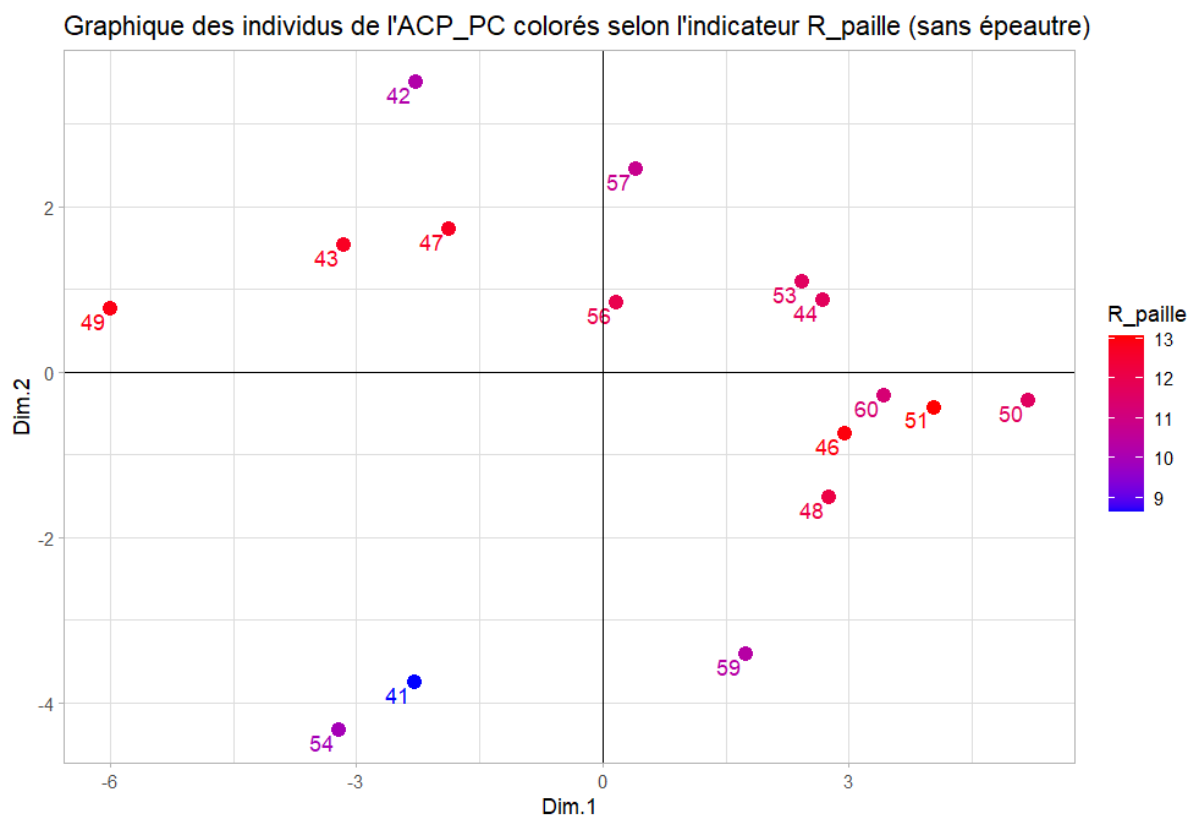


Figure 23 : Graphique des individus de l'ACP_PC colorés selon la valeur moyenne des indicateurs de services écosystémiques des parcelles des rendements en paille, en écartant les parcelles d'épeautre et la parcelle 45. L'échelle des couleurs correspondante est montrée à droite du graphique.

La tendance observée dans l'interprétation de la Figure 22 est, dans une moindre mesure, visible sur la Figure 23. En effet, les trois parcelles en AB montrent globalement des valeurs plus faibles que les autres, même si cette tendance est moins marquée dans le cas du rendement en paille.

En outre, la décision d'exclure l'épeautre de la comparaison a été prise uniquement dans le contexte des Figures 21e et 21f, car l'hypothèse selon laquelle le froment et l'épeautre interagissent de manière similaire sur les services écosystémiques a été prise pour l'ensemble des mesures de la thèse.

5 Approfondissement d'une thématique

Comme expliqué dans le contexte de l'étude, chaque mémoire réalisé dans le cadre de la thèse de L. Leveau poursuit un objectif spécifique en plus des analyses des liens entre les services écosystémiques et les pratiques culturelles. Ce travail a opté pour un approfondissement visant à améliorer le système de partage des résultats des expériences aux agriculteurs·rices.

Les résultats des expériences étaient, jusqu'à présent, présentés aux agriculteurs·rices sous forme de rapport au format PDF généré en R Markdown (extension du langage R permettant de réaliser des rapports sous différents formats, alliant un logiciel d'édition de texte et de calcul) et envoyé par mail. Chaque agriculteur·rice recevait un rapport par parcelle. Pour améliorer le partage des résultats aux agriculteurs·rices, il a été choisi de développer une application web interactive simple d'utilisation. Cette application permettrait aussi de diffuser, moyennant quelques modifications, les résultats finaux de la thèse de L. Leveau. Ainsi, le développement de l'application a été pensé pour permettre, sans trop de modifications, la diffusion des résultats finaux de la thèse.

Le logiciel choisi pour la construction de cette application est l'extension Shiny du logiciel R. Ce choix a été motivé par différentes raisons.

Tout d'abord, ce logiciel est facile à manipuler et ne nécessite pas de connaissance poussée en informatique pour l'édition d'une application. Il s'appuie sur le langage R enseigné dans le cadre des études de bioingénieurs et pourrait donc facilement être adapté, ultérieurement, à la publication des résultats de la recherche de L. Leveau.

Ensuite, ce logiciel possède plusieurs fonctionnalités intéressantes dans le cadre de la publication des données de ce travail. De fait, l'application Shiny permet de générer un portail d'identification donnant accès aux données d'une parcelle uniquement à son propriétaire. En effet, le partage des données étant soumis au RGPD, certaines informations publiées ne peuvent être consultées que par l'agriculteur·rice concerné. De plus, les applications Shiny sont interactives, ce qui veut dire que l'utilisateur peut interagir avec l'application pour générer des données. Ceci permet, par exemple, aux agriculteurs·rices ayant mis à disposition deux parcelles d'observer les résultats de ses deux parcelles sous le même identifiant, là où il recevait précédemment deux rapports.

Une version démonstrative de l'application générée dans le but de partager les résultats des expériences réalisées sur les 20 parcelles de la saison 2022-2023 (donc les expériences réalisées dans le cadre de ce mémoire et dans le cadre du travail de Marto et Van Cottom [2023]) est disponible à l'adresse suivante : https://jdesimpel.shinyapps.io/App_mem2/

Cette version diffère légèrement de la version destinée aux agriculteurs·rices. En effet, cette version démonstrative permet, grâce au menu déroulant « login », d'observer les résultats des 20 parcelles. De ce fait, les données sont anonymisées, les noms présentés ne sont donc pas les noms des agriculteurs·rices mais des noms pris au hasard. Si l'application est destinée à être utilisée pour partager des résultats, la version conçue pour les agriculteurs·rices inclura une

étape d'identification. En utilisant l'identifiant de l'agriculteur·rice, cette version permettra l'observation exclusive des données spécifiques de sa ou ses parcelles. Il ou elle pourra cependant tout de même comparer ses résultats aux autres parcelles mais sans en connaître les propriétaires.

En outre, il convient de noter que certaines descriptions sont tirées des rapports écrit par L. Leveau, notamment les descriptions des protocoles des expériences réalisées par Marto et Van Cottom (2023).

6 Conclusion

Ce travail a permis, au travers des expériences en champs, de récolter des informations chiffrées sur la fourniture de quatre services écosystémiques sur les 20 parcelles étudiées : l'incorporation de la matière organique par les vers de terres, la dégradation de la matière organique par les microorganismes du sol, la prédation des graines d'adventices et la production végétale. Ces données ont été soumises à plusieurs analyses multivariées : des analyses en composantes principales, des classifications hiérarchiques sur composantes principales et des matrices de corrélations. Ceci a permis de tirer plusieurs conclusions sur les indicateurs des services écosystémiques et sur les liens entre les pratiques culturales et les services écosystémiques.

Tout d'abord, les indicateurs du service écosystémique d'incorporation de la matière organique par les vers de terre (qui sont le nombre de cabanes et de turricules apparus après un, deux et trois mois, la surface de paille recouvrant le fond du panier après un, deux et trois mois ainsi que la masse de paille incorporée par les vers de terre après trois mois) sont fortement corrélés entre eux. Ce travail s'est donc exclusivement basé sur l'indicateur mesuré de façon précise et non sujette à interprétation subjective : la masse de paille intégrée par les vers de terre après une période de trois mois. Au travers des analyses réalisées sur cet indicateur, il a été conclu que le service écosystémique d'incorporation de la matière organique par les vers de terre est clairement influencé négativement par un travail du sol intensif (en termes de fréquence et de profondeur). En outre, ce service écosystémique est influencé de façon positive par les pratiques favorisant l'apport de matière organique, et plus précisément par la réalisation de mulch sur la parcelle.

Ensuite, les indicateurs du service écosystémique de dégradation de la matière organique par les microorganismes (qui sont le taux de stabilisation et le taux de décomposition de la matière organique par les microorganismes) montrent une certaine relation inverse entre eux. En effet, plusieurs parcelles montrant un taux de stabilisation élevée présentent un taux de décomposition faible et inversement. De ce lien, il a été conclu que favoriser un processus revient à défavoriser un autre, ce qui peut compliquer l'étude de l'impact réel des pratiques culturales sur ces deux indicateurs de service écosystémique. Il a cependant été souligné que l'indice de fréquence de traitement de la parcelle aux fongicides est néfaste au processus de stabilisation de la matière organique.

Les conclusions tirées de l'évaluation du service écosystémique de prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de cultures par le protocole des cartes de prédation sont que l'indicateur utilisé ne représente pas bien le SE. En effet, les conclusions des analyses multivariées vont à l'encontre du fonctionnement de ce SE en affirmant, par exemple, que ce service écosystémique est corrélé positivement à l'utilisation d'insecticides. Ceci couplé à une forte hétérogénéité des valeurs de l'indicateur au sein des parcelles amène à la conclusion que le protocole n'est pas adapté à ce travail.

La production végétale, par ses indicateurs de rendement en paille et en grain, est fortement corrélée à l'emploi d'azote minéral. En outre, les parcelles cultivées en épeautre et non en froment ont été écartées de l'interprétation des résultats sur les rendements pour comparer ce qui est comparable. La production en grain est aussi corrélée à l'indice de traitement en fongicide et insecticide. Ces deux pratiques culturales étant corrélées à l'apport d'azote minéral, il n'est pas possible de savoir si leur impact est réellement bénéfique. Globalement, les corrélations entre les pratiques culturales pourraient nuire aux conclusions et ce pour toutes les interprétations. Il est donc nécessaire d'augmenter le nombre d'individus dans l'échantillon, autrement dit d'augmenter le nombre de parcelles utilisées dans les analyses multivariées. Cette démarche est programmée dans les prochaines étapes de la thèse de Leveau par l'interprétation des données des 60 parcelles récoltées depuis 2020.

De plus, en comparant les regroupements de parcelles sur base de leur ressemblance en termes de PC avec les principaux systèmes de production des parcelles (AC, AB, ACS, ABC), il a été conclu que, dans le cas des données de ce mémoire, les systèmes de production pourraient relativement bien représenter les PC mises en œuvre sur les parcelles. Ainsi, le choix de l'utilisation des PC ponctuelles et non des systèmes de production de chaque champ dans l'établissement des liens entre les pratiques culturales et les services écosystémiques pourrait ne pas être la seule méthode pertinente d'analyse des interactions. En effet, dans ces conditions il pourrait être intéressant d'observer, plus généralement, l'impact des systèmes de production des parcelles et les services écosystémiques.

Outre l'analyse des relations entre les services écosystémiques et les pratiques culturales, ce mémoire a également poursuivi un objectif particulier en se concentrant sur l'amélioration du processus de communication des résultats des expériences aux agriculteurs·rices. Ainsi, une application (ShinyApp) interactive, visant à communiquer les résultats des expériences appliquées à la parcelle de chaque agriculteur·rice, a été développée. Une version de démonstration est disponible en suivant le lien : https://jdesimpel.shinyapps.io/App_mem2/

Bibliographie

- Ahmed, N., & Al-Mutairi, K. A. (2022). Earthworms Effect on Microbial Population and Soil Fertility as Well as Their Interaction with Agriculture Practices. *Sustainability*, 14(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/su14137803>
- Alizadeh, Z., Motafakkerazad, R., Salehi-Lisar, S. Y., & Zarrini, G. (2023). Evaluation of the allelopathic effect of wheat and redroot pigweed on growth indices and antioxidant system activity in intercropping. *Journal of Plant Protection Research*, 63(1), 97–112. Scopus. <https://doi.org/10.24425/jppr.2023.144508>
- Ameen, A., & Raza, S. (2017). Green Revolution: A Review. *International Journal of Advances in Scientific Research*, 3(12), Article 12. <https://doi.org/10.7439/ijasr.v3i12.4410>
- Baaken, M. C. (2022). Sustainability of agricultural practices in Germany: A literature review along multiple environmental domains. *Regional Environmental Change*, 22(2), 39. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01892-5>
- Baraibar, B., Carrión, E., Recasens, J., & Westerman, P. R. (2011). Unravelling the process of weed seed predation: Developing options for better weed control. *Biological Control*, 56(1), 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2010.09.010>
- Bashir, O., Ali, T., Baba, Z. A., Rather, G. H., Bangroo, S. A., Mukhtar, S. D., Naik, N., Mohiuddin, R., Bharati, V., & Bhat, R. A. (2021). Soil organic matter and its impact on soil properties and nutrient status. In *Microbiota and Biofertilizers, Vol 2: Ecofriendly Tools for Reclamation of Degraded Soil Environs* (pp. 129–159). Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_7
- Beaumelle, L., Tison, L., Eisenhauer, N., Hines, J., Malladi, S., Pelosi, C., Thouvenot, L., & Phillips, H. R. P. (2023). Pesticide effects on soil fauna communities—A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 60(7), 1239–1253. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14437>
- Berg, B., & McClaugherty, C. (2014). *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38821-7>
- Bertrand, M., Barot, S., Blouin, M., Whalen, J., de Oliveira, T., & Roger-Estrade, J. (2015). Earthworm services for cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 553–567. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0269-7>
- Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2016). *Scheffer/Schachtschabel Soil Science*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30942-7>
- Dendoncker, N., Boeraeve, F., Crouzat, É., Dufrêne, M., König, A., & Barnaud, C. (2018). How can integrated valuation of ecosystem services help understanding and steering agroecological transitions ? *Ecology and Society*, 23(1). <https://doi.org/10.5751/es-09843-230112>

- Bogaert, P. (2020). *Probabilités pour scientifiques et ingénieurs: Introduction au calcul des probabilités*. De Boeck Supérieur.
- Bommarco, R., Kleijn, D., & Potts, S. G. (2013). Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4), 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.012>
- Borém, A., & de Paula Corrêdo, L. (2022). The Agriculture Eras. In D. Marçal de Queiroz, D. S. M. Valente, F. de Assis de Carvalho Pinto, A. Borém, & J. K. Schueller (Eds.), *Digital Agriculture* (pp. 1–12). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14533-9_1
- Bottinelli, N., Hedde, M., Jouquet, P., & Capowiez, Y. (2020). An explicit definition of earthworm ecological categories – Marcel Bouché’s triangle revisited. *Geoderma*, 372, 114361. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114361>
- Bouché, M. B. (1977). Strategies lombriciennes. *Ecological Bulletins*, 25, 122–132.
- Brown, G. G. (1995). How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity? In H. P. Collins, G. P. Robertson, & M. J. Klug (Eds.), *The Significance and Regulation of Soil Biodiversity: Proceedings of the International Symposium on Soil Biodiversity, held at Michigan State University, East Lansing, May 3–6, 1993* (pp. 247–269). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0479-1_22
- Capowiez, Y., Decaëns, T., Hedde, M., Marsden, C., Jouquet, P., Marchan, D. F., Nahmani, J., Pélosi, C., & Bottinelli, N. (2022). Faut-il continuer à utiliser les catégories écologiques de vers de terre définies par Marcel Bouché il y a 50 ans ? : Une vision historique et critique. *Étude et Gestion Des Sols*, 29(spécial), 51–58.
- Chiffres du Bio.* (n.d.). Biowallonie. Retrieved 9 October 2023, from <https://www.biowallonie.com/chiffres-du-bio/>
- Costanza, R., d’Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O’Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world’s ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), Article 6630. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Costanza, R., De Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S., & Grasso, M. (2017). Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 28, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>
- CRA-W. | Centre wallon de Recherches, agronomiques. (n.d.). *VIDEO: L’agriculture biologique de conservation (Projet DiverIMPACTS)*. CRA-W | Centre wallon de Recherches agronomiques. Retrieved 7 October 2023, from <https://www.cra.wallonie.be/fr/video-lagriculture-biologique-de-conservation-projet-diverimpacts>

- De Groot, R., Van der Perk, J., Chiesura, A., & van Vliet, A. (2003). Importance and threat as determining factors for criticality of natural capital. *Ecological Economics*, 44(2), 187–204. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00273-2](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00273-2)
- Diallo, A., Hoeffner, K., Guillocheau, S., Sorgniard, P., & Cluzeau, D. (2023). Combined effects of annual crop agricultural practices on earthworm communities. *Applied Soil Ecology*, 192, 105073. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105073>
- Dumont de Chassart, Joachim ; Dehaye, Grégoire. Impact des pratiques culturelles sur les services écosystémiques à travers une étude participative dans la région sablo-limoneuse du Brabant wallon. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, 2022. Prom. : Bertin, Pierre ; Leveau, Lola. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:35754>
- Evenson, R. E., & Gollin, D. (2003). Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science*, 300(5620), 758–762. <https://doi.org/10.1126/science.1078710>
- Farber, S., Costanza, R., Childers, D. L., Erickson, J., Gross, K., Grove, M., Hopkinson, C. S., Kahn, J., Pincetl, S., Troy, A., Warren, P., & Wilson, M. (2006). Linking Ecology and Economics for Ecosystem Management. *BioScience*, 56(2), 121–133. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)056\[0121:LEAEFE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)056[0121:LEAEFE]2.0.CO;2)
- Finisdore, J., Rhodes, C., Haines-Young, R., Maynard, S., Wielgus, J., Dvarskas, A., Houdet, J., Quétier, F., Lamothe, K. A., Ding, H., Soulard, F., Van Houtven, G., & Rowcroft, P. (2020). The 18 benefits of using ecosystem services classification systems. *Ecosystem Services*, 45, 101160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101160>
- Fockedey, Aline. Etude de l'impact des pratiques agricoles sur les services écosystémiques à travers une recherche participative dans la région limoneuse et sablo-limoneuse du Brabant Wallon. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, 2021. Prom. : Bertin, Pierre ; Leveau, Lola. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:32869>
- Fróna, D., Szenderák, J., & Harangi-Rákos, M. (2019). The Challenge of Feeding the World. *Sustainability*, 11(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/su11205816>
- Gliessman, S. R. (2004). Agroecology and Agroecosystems. In R. Diane & C. Francis (Eds.), *Agronomy Monographs* (pp. 19–29). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr43.c2>
- Hiel, M.-P., Barbieux, S., Pierreux, J., Olivier, C., Lobet, G., Roisin, C., Garré, S., Colinet, G., Bodson, B., & Dumont, B. (2018). Impact of crop residue management on crop production and soil chemistry after seven years of crop rotation in temperate climate, loamy soils. *PeerJ*, 6, e4836. <https://doi.org/10.7717/peerj.4836>
- Hopkins, D. W., & Gregorich, E. G. (2005). Carbon as a substrate for soil organisms. *Biological Diversity and Function in Soils*, 57–79.

Husson, F., Josse, J., & Pages, J. (2010). *Principal component methods—Hierarchical clustering—Partitional clustering: Why would we need to choose for visualizing data?* <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15851062>

ISO - ISO 8601—Représentation de la date et de l'heure. (2017, February 21). ISO. <https://www.iso.org/fr/iso-8601-date-and-time-format.html>

Johnston, A. E., Poulton, P. R., & Coleman, K. (2009). Chapter 1 Soil Organic Matter. In *Advances in Agronomy* (Vol. 101, pp. 1–57). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00801-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00801-8)

Joseph, C., Delattre, D., & Sarthou, J.-P. (2018). *Auxiliaires des cultures: Définition.* <https://doi.org/10.17180/9Z65-4M22>

Josse, J., Husson, F., & Pagès, J. (2009). Gestion des données manquantes en Analyse en Composantes Principales. *Journal de la société française de statistique*, 150(2), 28–51. http://www.numdam.org/item/JSFS_2009__150_2_28_0/

Keuskamp, J. A., Dingemans, B. J. J., Lehtinen, T., Sarneel, J. M., & Hefting, M. M. (2013). Tea Bag Index: A novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(11), 1070–1075. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>

Khan, M. A., Ahmad, S., & Raza, A. (2019). Integrated weed management for agronomic crops. In *Agronomic Crops: Volume 2: Management Practices* (pp. 257–281). Scopus. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9783-8_14

Khatun, N. (2021). Applications of Normality Test in Statistical Analysis. *Open Journal of Statistics*, 11(01), Article 01. <https://doi.org/10.4236/ojs.2021.111006>

Khosro Mohammadi. (2011). Soil management, microorganisms and organic matter interactions: A review. *AFRICAN JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY*, 10(86). <https://doi.org/10.5897/AJBX11.006>

Kowalchuk, George. A., Buma, D. S., de Boer, W., Klinkhamer, P. G. L., & van Veen, J. A. (2002). Effects of above-ground plant species composition and diversity on the diversity of soil-borne microorganisms. *Antonie van Leeuwenhoek*, 81(1), 509–520. <https://doi.org/10.1023/A:1020565523615>

L'agriculture de conservation | FAO. (n.d.). Retrieved 7 October 2023, from <https://www.fao.org/conservation-agriculture/fr/>

Larousse, É. (n.d.). *Définitions: Adventice - Dictionnaire de français Larousse.* Retrieved 4 October 2023, from <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/adventice/1239>

Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., Herzog, F., Lavorel, S., Lifran, R., Roger-Estrade, J., Sarthou, J.-P., & Trommetter, M. (2008). *Agriculture et*

biodiversité. *Valoriser les synergies* (Expertises Collectives, p. 116 p.) [Other]. INRA. <https://doi.org/10.15454/chz5-0922>

Leite-Moraes, A. E., Rossato, F. G., Susaeta, A., Binotto, E., Malafaia, G. C., & de Azevedo, D. B. (2023). Environmental impacts in integrated production systems: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 420. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138400>

Lemtiri, A., Colinet, G., Alabi, T., Cluzeau, D., Zirbes, L., Haubruge, E., & Francis, F. (2014). Impacts of earthworms on soil components and dynamics. A review. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/163467>

Liu, Q., Sun, X., Wu, W., Liu, Z., Fang, G., & Yang, P. (2022). Agroecosystem services: A review of concepts, indicators, assessment methods and future research perspectives. *Ecological Indicators*, 142, 109218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109218>

McKight, P. E., & Najab, J. (2010). Kruskal-Wallis Test. In I. B. Weiner & W. E. Craighead (Eds.), *The Corsini Encyclopedia of Psychology* (1st ed., pp. 1–1). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0491>

Menalled, F. D., Smith, R. G., Dauer, J. T., & Fox, T. B. (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>

Meynard, J.-M., Cerf, M., Coquil, X., Durant, D., Le Bail, M., Lefèvre, A., Navarrete, M., Pernel, J., Périnelle, A., Perrin, B., Prost, L., Reau, R., Salembier, C., Scopel, E., Toffolini, Q., & Jeuffroy, M.-H. (2023). Unravelling the step-by-step process for farming system design to support agroecological transition. *European Journal of Agronomy*, 150, 126948. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126948>

Moonen, A.-C., & Bàrberi, P. (2008). Functional biodiversity: An agroecosystem approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 127(1), 7–21. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.02.013>

Naz, M., Dai, Z., Hussain, S., Tariq, M., Danish, S., Khan, I. U., Qi, S., & Du, D. (2022). The soil pH and heavy metals revealed their impact on soil microbial community. *Journal of Environmental Management*, 321, 115770. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115770>

Oerke, E.-C. (2006). Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–43. Scopus. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>

Osman, M. G. A., Szalai, M., Zalai, M., Dorner, Z., & Kiss, J. (2022). Assessing the Importance of Natural Regulating Mechanisms in Weed Management: The Case of Weed Seed Predation in a Winter Wheat Field and in Adjacent Semi-Natural Habitat in Northern Hungary. *Agronomy*, 12(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112666>

Pelosi, C., Barot, S., Capowiez, Y., Hedde, M., & Vandenbulcke, F. (2014). Pesticides and earthworms. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 199–228. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0151-z>

Power, A. G. (2010). Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2959–2971. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>

Protocole participatif—Paniers à Vers de Terre—EcoBioSoil. (n.d.). Retrieved 18 December 2023, from <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/protocole-participatif-paniers-a-vers-de-terre>

Ratnadass, A. (2014). Actions via les auxiliaires. Approche systémique de l'intensification écologique pour le contrôle des bio-agresseurs. In *Conception de systèmes horticoles innovants: Bases biologiques, écologiques et socio-économiques / Lauri Pierre-Eric (ed.), Navarrete Mireille (ed.), Parrot Laurent (ed.), Simon Sylvaine (ed.)* (pp. 169–180). INRA. https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=575113

Sarabi, V. (2019). Factors that influence the level of weed seed predation: A review. *Weed Biology and Management*, 19(3), Article 3. <https://doi.org/10.1111/wbm.12186>

Simonsen, J., Posner, J., Rosemeyer, M., & Baldock, J. (2010). Endogeic and anecic earthworm abundance in six Midwestern cropping systems. *Applied Soil Ecology*, 44(2), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.11.005>

Slepetiene, A., & Slepetys, J. (2005). Status of humus in soil under various long-term tillage systems. *Geoderma*, 127(3), 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.001>

Spiegel, H., Mosleitner, T., Sandén, T., & Zaller, J. G. (2018). Effects of two decades of organic and mineral fertilization of arable crops on earthworms and standardized litter decomposition. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 69(1), 17–28. <https://doi.org/10.2478/boku-2018-0003>

SPW. (n.d.-a). *Agriculture—État de l'environnement wallon*. Etat de l'environnement wallon. Retrieved 7 October 2023, from http://etat.environnement.wallonie.be/cms/render/live/fr_BE/sites/eew/home/Infographies/infographie-agriculture.html

SPW. (n.d.-b). *Principes et informations générales—Portail de l'agriculture wallonne*. Agriculture en Wallonie. Retrieved 7 October 2023, from <http://agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/agriculture/home/productions-agricoles/qualite/production-biologique/principes-et-informations-generales.html>

Sumberg, J., & Giller, K. E. (2022). What is 'conventional' agriculture? *Global Food Security*, 32, 100617. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100617>

Syers, J. K., & Springett, J. A. (1984). Earthworms and soil fertility. In J. Tinsley & J. F. Darbyshire (Eds.), *Biological Processes and Soil Fertility* (pp. 93–104). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-6101-2_8

Tibi, A., & Therond, O. (2018). *Services écosystémiques fournis par les espaces agricoles*. éditions Quae. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-2917-8>

- Valdez, A. S., Bosch-Serra, À. D., Yagüe, M. R., Poch, R. M., & Puigpinós, E. (2020). Earthworm community and soil microstructure changes with long-term organic fertilization. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(7), 957–970. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1648792>
- Van Cottom, Balthazar ; Marto, Fiona. Impact des pratiques culturales sur les services écosystémiques de l'agroécosystème en région limoneuse et sablo-limoneuse du Brabant Wallon. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, 2023. Prom. : Bertin, Pierre ; Leveau, Lola. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:43382>
- Vancutsem, F., Bodson, B., Minsier, F., & Falisse, A. (2005). *Variétés, phytotechnie et rendement en paille du froment d'hiver*. <https://www.gembloux.ulg.ac.be/phytotechnie-temperce/LIVREBLANC/LBfev2005/PBpdf/7Paille.pdf>
- Van Den Broeck, Joy. Impact des pratiques culturales sur les services écosystémiques liés aux auxiliaires de culture et à la production végétale dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse wallonnes. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, 2023. Prom. : Leveau, Lola ; Bertin, Pierre. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:38934>
- Wallace, K. J. (2007). Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biological Conservation*, 139(3), 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.07.015>
- White, R. E. (2005). *Principles and Practice of Soil Science: The Soil as a Natural Resource*. John Wiley & Sons.
- Wider, R. K., & Lang, G. E. (1982). A Critique of the Analytical Methods Used in Examining Decomposition Data Obtained From Litter Bags. *Ecology*, 63(6), 1636–1642. <https://doi.org/10.2307/1940104>
- Wik, M., Pingali, P., & Brocai, S. (2008). *Global Agricultural Performance: Past Trends and Future Prospects*. <http://hdl.handle.net/10986/9122>
- Zang, H., Wang, J., & Kuzyakov, Y. (2016). N fertilization decreases soil organic matter decomposition in the rhizosphere. *Applied Soil Ecology*, 108, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.07.021>

Etude de l'impact des pratiques culturelles sur les services écosystémiques à travers une recherche collaborative dans la région limoneuse et sablo-limoneuse du Brabant wallon

Présenté par Jean Desimpel

Dans un contexte où la promotion de la durabilité des systèmes est devenue un objectif sociétal, ce document contribue à la promotion de la durabilité des systèmes agricoles en région wallonne en s'inscrivant dans le cadre des travaux de recherche de L. Leveau, qui se concentrent sur la substitution des intrants commerciaux par des services écosystémiques.

Ainsi, ce mémoire caractérise, par une campagne expérimentale, les liens existants entre un ensemble de pratiques culturelles et quatre services écosystémiques dans 20 champs situés en région limoneuse et sablo-limoneuse du Brabant Wallon. Ce mémoire, succédant à quatre autres travaux similaires, représente le dernier travail de récoltes des données de la thèse de L. Leveau. Cette recherche participative se base sur des parcelles mises à disposition par des agriculteurs·rices dans lesquelles sont placés les dispositifs expérimentaux et pour lesquelles l'historique de culture est connu.

Les services écosystémiques étudiés dans ce mémoire sont l'incorporation de la matière organique par les vers de terre, la dégradation de la matière organique par les microorganismes (stabilisation et décomposition), la prédation des graines d'adventices par les auxiliaires de cultures et la production végétale. Chacun de ces services écosystémiques est illustré par un ou plusieurs indicateurs quantitatifs de services écosystémiques. En croisant ces indicateurs de services écosystémiques avec les indicateurs de pratiques culturelles, de l'historique de chaque parcelle sur 10 ans, ce travail a permis d'exposer plusieurs liens existants entre les pratiques culturelles et les services écosystémiques étudiés sur les 20 parcelles de l'étude.

En effet, les analyses ont montré que le service écosystémique d'incorporation de la matière organique par les vers de terre était impacté négativement par le travail du sol et positivement par la pratique du mulch. Les expériences réalisées pour quantifier le service de prédation de graines d'adventices n'ont pas montré de résultats probants et donc aucun lien cohérent avec les pratiques culturelles n'a pu être établi. Les services écosystémiques de stabilisation et de décomposition de la matière organique ont montré une relation inverse compliquant l'établissement de lien avec les pratiques culturelles. L'utilisation de fongicides sur 10 ans a cependant montré un impact négatif sur la stabilisation de la matière organique. De plus, le service de production végétale, par le rendement en paille et en grain, est impacté positivement et de façon majoritaire par l'utilisation d'azote minérale.