

Faculté des bioingénieurs

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

Auteurs : Aline Fockedey
Xavier Belin

Promoteurs : Ir. Lola Leveau (doctorante UCLouvain/ELI/ELIA)
Prof. Pierre Bertin (UCLouvain/ELI/ELIA)

Lecteurs : Prof. Richard Lambert (UCLouvain/ELI/ELIA)
Dr. Briec Hardy (CRA-W)

Année académique 2020-2021

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

Remerciements

Remerciements de Aline et de Xavier

Ce mémoire n'aurait pas pu être réalisé sans l'aide de nombreuses personnes.

La première personne à remercier est bien évidemment Lola pour le temps qu'elle nous a accordé (entre autres) par de petites formations, des réunions hebdomadaires et ses relectures. Nous tenons aussi à remercier tout particulièrement Pierre Bertin lui aussi pour ses conseils et ses relectures mais aussi pour la transmission de sa passion pour le monde agricole à travers ses cours.

Les membres du laboratoire ELIA méritent notre reconnaissance, tout particulièrement Thomas et Pierre VT pour leur aide technique et leur sympathie, Charlotte pour ses conseils sur les relevés de flore adventice, Nicolas pour ses conseils sur le test USDA et évidemment les membres de l'administration.

Plusieurs personnes nous ont apportés des conseils ou aidés à obtenir du matériel, nous aimerions remercier : Eléonore Malice (CRA-W) pour ses conseils sur les adventices, Damien Rosillon (CRA-W) pour les informations transmises sur les relevés de pluviométrie du réseau Pameseb, Baptiste Delhez (ELIE) pour ses conseils en géomatique et le prêt du GPS, Charles Bielders (ELIE) pour ses conseils par rapport à nos questionnements sur la mesure de la battance, William Gyselynck (AGRO) pour ses renseignements au sujet du protocole de dégradation de la matière organique, Rémi Desmet (AGRO) pour les outils de travail manuel du sol, Hugues Falys pour son accord de prélèvement de matière organique d'essais, le laboratoire MOCA pour ses analyses de sol et ses prêts de tarières, le laboratoire GERU pour sa mise à disposition de matériel et enfin Benjamin Colling (SMCS) pour ses conseils concernant les analyses statistiques.

Nous n'oublions pas les agriculteurs qui nous ont accueillis dans leurs champs et nous ont accordé du temps pour des entretiens riches en informations et découvertes et particulièrement les quelques-uns qui sont venus à notre rencontre sur le terrain. Cette confrontation avec le terrain nous semble un aspect important venant compléter notre formation.

Nous pensons aussi que c'est le moment de remercier la faculté d'agronomie pour les enseignements de qualité dispensés au cours de ces cinq dernières années. Ce fut riche, ce fut finalement très court et la moindre des choses que l'on puisse dire c'est que ça en a valu la peine !

Dans un autre registre pas si éloigné que cela de la faculté, nous nous devons de remercier ceux qui nous ont, bien malgré eux, accompagnés et soutenus au quotidien dans cette aventure. Dans le désordre, les membres internes et externes du Squat du trèfle : Margot, Justine, Renaud, Alexis, Sophie et Francis. Merci aussi à Aurélien pour sa relecture du mémoire.

Remerciements particuliers de Aline

Mes remerciements vont à Xavier, pour la passion de l'agronomie qu'on a pu partager durant nos études et notre mémoire, sa curiosité insatiable et sa bonne humeur ! Mener cette aventure en binôme aura été un véritable plaisir, et les nombreuses anecdotes ne manquent pas d'en témoigner !

Un second merci est adressé à Lola, pour sa disponibilité et son accompagnement motivant, bienveillant et de grande qualité. Ce mémoire aura été une expérience très agréable en sa compagnie, et je garde, entre autres, de bons souvenirs des discussions lors des trajets chez les agriculteurs.

Je tiens aussi à remercier ma famille, pour sa bienveillance, son écoute et ses encouragements durant de nombreuses années, me conduisant jusqu'à cet aboutissement, et Aurélien, pour son attention et son soutien très appréciables !

Enfin, à toi... un tendre et profond merci... en te consacrant la passion et l'énergie investie dans ces études et ce mémoire.

Remerciements particuliers de Xavier

Avant toute chose, Aline mérite toute mon admiration pour ses grandes qualités humaines, ses qualités de joueuse de whist, sa motivation et sa passion pour l'agriculture wallonne. Ce travail aura été une étape importante – parmi d'autres passées et à venir – d'une grande aventure. Je souhaite remercier Lola pour sa patience et ses conseils. Je lui souhaite bonne chance pour la suite ! Aussi, Pierre VT et Charlotte pour leur disponibilité et pour avoir partagé avec moi un peu de leur passion pour l'artisanat (PVT) et la botanique (les deux). Je tiens aussi à mentionner certains cokoteurs du kot carrefour : John et Thomas pour m'avoir proposé leur aide lors de difficultés avec R, Erwan et Nolwen pour leurs conseils et enfin Ahmad pour son grand cœur.

Comme on peut s'en douter, les personnes les plus importantes n'ont pas encore été citées. Elles ont fait bien plus que d'allumer un feu : je tiens à remercier mes parents, Christel et Vincent, et ma sœur Alice pour ces années de soutien. J'aimerais rendre un hommage à mes grands-parents Zéphyrin et Gabrielle ainsi que Victor et Gerogette, qui ne quitteront jamais mes pensées.

« Dès ma plus tendre enfance, je fus mêlé à la vie paysanne. Très jeune, je fus chargé des travaux légers de la ferme et j'ai toujours partagé les travaux des champs avec mes frères aînés.

[...]

A 13 ans, comme mes frères, je suivis les cours de la section A3 à Fleurus. Aimant l'étude [...], je vins [...] à l'école d'agriculture de Carlsbourg où j'allais acquérir de solides bases techniques et une formation d'homme.

J'espère parachever cette formation générale et technique en vue d'être apte à faire progresser l'agriculture et d'aider les agriculteurs dans ce travail de la terre dont l'amour reste ancré en moi et dont je garde la nostalgie.

Mais les capitaux nécessaires pour m'installer fermier ne me permettront pas [...] de goûter cette joie de travailler la terre toujours fidèle, mais parfois ingrate, et de collaborer ainsi à l'œuvre créatrice de Dieu. »

*Victor Derzelle, monographie de fin d'étude,
à Carlsbourg (Derzelle 1958)*

*« Ta del chance te meme, ta que ca a fait, va travailli po le skol. Faizan !
A ti age j'esteu d'un l'fouatche ou a l'campagne, bat les grain, bat le four ou reneti
les pétrales »¹*

Zéphyrin Belin à Jandrain-Jandrenouille

Il y a des moments où il convient de remercier ceux qui, souvent sans le savoir, nous ont transmis une part du feu qui les anime. Ils sont innombrables mais ils sont bien présents dans chaque action.

¹ Transcription phonétique du wallon de Hesbaye brabançonne. « Tu as de la chance quand même, t'as que ça à faire, vas travailler pour l'école. Fainéant ! A ton âge j'étais à la forge ou dans les campagnes à battre le grain, à battre le foin ou nettoyer les betteraves. »

Résumé

Ce mémoire explore les liens existants entre les pratiques culturales (PC) et les services écosystémiques (SE) sur un échantillon de 20 parcelles dans la région limoneuse et sablo-limoneuse de Wallonie. Il a été réalisé dans le cadre de la première année de relevés de la thèse de L. Leveau. Cette recherche offre une nouvelle perspective d'évaluation de la durabilité des systèmes de production. En effet, la plupart des études sur ce sujet mesurent l'impact d'une PC spécifique (ex. : le labour) sur l'agroécosystème, toutes choses restant égales par ailleurs. L'approche utilisée dans ce mémoire vise à analyser simultanément l'effet d'une grande diversité de PC issues de différents systèmes de culture sur les SE intrants. Pour cela, l'historique cultural de chaque parcelle a été récolté sur dix ans et mis en lien avec les SE évalués sur froment ou épeautre en 2020-2021. Cette méthodologie possède le potentiel de formuler des relations de corrélations pouvant être constatées dans des systèmes très différents et dans des conditions réelles.

Les SE étudiés concernent le sol et les ennemis de la culture. Les principaux résultats ressortant des analyses multivariées réalisées sur cet échantillon sont les suivants : un travail fréquent et profond du sol s'accompagne généralement d'une utilisation élevée de produits phytosanitaires, mais pas systématiquement d'apports en engrais élevés. L'on constate que ces systèmes intenses en travail du sol cultivent un moins grand nombre de variétés et d'espèces récoltées en association, et leurs rotations comprennent plus rarement des prairies temporaires. Un travail du sol plus intense, en particulier de labour, correspond à une plus faible teneur en matière organique et activité des vers de terre. Cela concorde également avec une faible stabilité des agrégats, induisant une vitesse de formation de la croûte de battance plus élevée. Si les champs peuvent être distingués selon leurs apports en azote, phosphore et potassium, qui vont généralement de pair, cela ne semble pas influencer la fourniture en SE. Enfin, un résultat surprenant à noter est que, sur cet échantillon, les PC ne semblent pas affecter la compaction du sol. Par ailleurs, ce phénomène entretient très peu de liens avec les autres SE mesurés.

Certains termes utilisés par les agriculteurs du réseau pour décrire leurs pratiques sont également liés à des PC observées sur le terrain. L'on retrouve principalement une opposition entre les agriculteurs dits « conventionnels », avec un travail du sol important, et ceux pratiquant l'agriculture « de conservation », avec un travail du sol réduit.

Finalement, une grande part de ce travail consisté à la mise au point de protocoles intéressants pour les agriculteurs et nécessitant peu de matériel et de temps. Des pistes d'amélioration de ceux-ci sont donc proposées pour les prochaines années.

Table des matières

Introduction.....	1
1. Etat de l'art.....	2
1.1. Défis de l'agriculture belge aujourd'hui	2
1.2. Les services écosystémiques	4
1.2.1. Contexte.....	4
1.2.2. Les agroécosystèmes.....	5
1.2.3. Sélection des indicateurs	6
1.3. SE intrants.....	7
1.3.1. SE liés au sol.....	8
1.3.1.1. Introduction	8
1.3.1.2. Dynamique de la MO.....	9
1.3.1.3. Structure du sol	18
1.3.2. SE liés au contrôle naturel des ennemis de la culture.....	23
1.3.2.1. Présence d'adventices.....	23
1.3.2.2. Présence de maladies cryptogamiques	25
1.4. Objectifs.....	26
2. Matériel et méthode.....	28
2.1. Réalisations antérieures au mémoire.....	28
2.1.1. Constitution du réseau d'agriculteurs et sélection d'indicateurs d'intérêt.....	28
2.2. Organisation générale	29
2.2.1. Domaine spatial de la recherche.....	29
2.2.2. Etalement temporel des expérimentations et de la récupération de l'historique cultural 29	
2.2.3. Communication avec les agriculteurs.....	30
2.3. Collecte de l'itinéraire cultural.....	30
2.4. Expériences en champ.....	32
2.4.1. Plan expérimental.....	32
2.4.2. Considérations générales	33
2.4.3. Indicateurs de SE liés au sol	33
2.4.3.1. Incorporation de la MO.....	33
2.4.3.2. Décomposition de la MO par les microorganismes	36
2.4.3.3. Teneurs en carbone organique stable et labile	37
2.4.3.4. Stabilité des agrégats (test USDA).....	38
2.4.3.5. Evolution de la croûte de battance.....	39

2.4.3.6.	Structure du sol (test VESS).....	42
2.4.4.	SE liés aux ennemis de la culture.....	43
2.4.4.1.	Infestation par les adventices	43
2.4.4.2.	Maladies cryptogamiques.....	45
2.4.5.	Récapitulatif des indicateurs obtenus	46
2.5.	Analyses statistiques.....	46
2.5.1.	Analyses réalisées.....	46
2.5.2.	Diversité de méthodes d'analyses multivariées	48
3.	Résultats.....	49
3.1.	Généralités sur les résultats.....	49
3.2.	Analyses des données des pratiques culturales	49
3.3.	Résultats et analyses des indicateurs de SE.....	49
3.3.1.	Distribution générale des résultats	49
3.3.2.	Analyses statistiques générales	53
3.3.3.	Résultats détaillés par expérience	53
3.3.3.1.	Incorporation de la MO par les VDT (T_...).....	53
3.3.3.2.	Décomposition de la MO (D_k et D_s)	54
3.3.3.3.	Teneurs en carbone organique stable et labile (C_...)	54
3.3.3.4.	Stabilité des agrégats, test USDA (U).....	54
3.3.3.5.	Evolution de la croûte de battance (B_dlim)	55
3.3.3.6.	Structure du sol, test VESS (V).....	56
3.3.3.7.	Infestation par les adventices (A_...).....	56
3.3.3.8.	Maladies : présence de septoriose des feuilles (M).....	57
3.4.	Analyses multivariées.....	57
3.4.1.	Analyse en composantes principales et classification à partir des indicateurs de SE	57
3.4.1.1.	ACP1_SE et ACP2_SE	57
3.4.1.2.	Classification HCPC2_SE sur ACP2_SE	62
3.4.2.	ACP avec les pratiques culturales en variables actives.....	64
3.4.2.1.	ACP3_PC sur les pratiques culturales.....	64
3.4.2.2.	Classification HCPC3_PC sur ACP3_PC.....	68
3.4.3.	Matrice de corrélation	70
3.4.3.1.	Matrice de corrélation des SE	70
3.4.3.2.	Matrice de corrélation entre pratiques culturales et indicateurs de SE... 71	
4.	Discussion.....	76
4.1.	Introduction de la discussion	76
4.2.	Pratiques culturales (PC)	76

4.3. Expérimentations (indicateurs de SE)	76
4.3.1. Commentaires généraux	76
4.3.2. Incorporation de la MO (T_...)	77
4.3.3. Décomposition de la MO (D_s et D_k)	80
4.3.4. Teneur en carbone organique stable et labile (C_...)	80
4.3.5. Stabilité des agrégats (U)	81
4.3.6. Evolution de la croûte de battance (B_dlim)	82
4.3.6.1. Répartition initiale des calibres d'agrégats sur les placettes	82
4.3.6.2. Génération de l'indicateur de pente de Dlim	82
4.3.6.3. Limites liées au protocole	83
4.3.7. Structure du sol (V)	85
4.3.8. Infestation par les adventices (A_...)	86
4.3.8.1. Discussion à propos des données	86
4.3.8.2. Limites et pistes d'amélioration du protocole	87
4.3.9. Maladies : présence de septoriose des feuilles (M)	88
4.4. Analyses multivariées	88
4.4.1. Discussion à propos des liens entre services écosystémiques	88
4.4.2. Discussion des liens entre pratiques culturales et services écosystémiques	91
4.4.2.1. Première dimension similaire pour les trois analyses en composante principales	91
4.4.2.2. Autres dimensions des trois analyses en composantes principales	94
4.4.2.3. Conclusion	96
4.4.3. Discussion autour des classifications des champs étudiés	97
Conclusion	98
Bibliographie	101

Index des figures

Figure 1 : Schéma représentant la fourniture de deux services écosystémiques, l'un direct envers la société, l'autre direct envers le gestionnaire de l'agroécosystème et donc indirectement envers la société.....	5
Figure 2 : Dynamique et transformation de l'azote dans l'écosystème sol-plante.	8
Figure 3 : Turricule et cabane de vers de terre.....	11
Figure 4 : Lien entre le rapport de la fraction de MO grossière sur la fraction de MO fine et le ratio d'enrichissement en carbone organique total (%).	15
Figure 5 : Dynamique du changement de biomasse en fonction de différents paramètres climatiques et pratiques culturales.	17
Figure 6: Évolution de la surface d'un sol agricole fragmenté.....	21
Figure 7 : Incidence des techniques culturales sur la pression en maladies en froment.	26
Figure 8 : Schéma temporel des pratiques culturales, expérimentations et de la prise d'information durant 2020-2021.....	30
Figure 9 : Plan d'expérimentation pour une parcelle cultivée en agriculture non-bio (17) et en agriculture bio (20)..	34
Figure 10 : Panier à vers de terre rempli de paille.	35
Figure 11 : Schéma de la dynamique de décomposition des Tea Bag (TB) verts, se décomposant rapidement, et rouges, dont la décomposition est plus lente.....	37
Figure 12 : Dispositif numérique mis en place pour évaluer la répartition des calibres d'agrégats	40
Figure 13 : Classes pour l'évaluation du niveau d'infestation du blé en septoriose	46
Figure 14: Histogrammes de distribution des données pour chaque indicateur de SE....	52
Figure 15 : Distribution de la surface initiale couverte par les catégories de surface conservées.....	55
Figure 16 : Analyse en composantes principales des variables « indicateurs de services écosystémiques » ACP1_SE (à gauche) et ACP2_SE (à droite) réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse, en fonction de leur contribution aux composantes 1 et 2.....	58
Figure 17 : Graphes des individus « champs » de l'analyse en composante principale ACP2_SE réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse sur base d'indicateurs de services écosystémiques.....	60
Figure 18 : Graphes des variables « indicateurs de services écosystémiques » (en noir) de l'analyse en composante principale ACP2_SE réalisée sur 19 parcelles en région	

limoneuse et sablo-limoneuse., avec les « indicateurs de pratiques culturelles » et certains « indicateurs de services écosystémiques » (en bleu) en variables supplémentaires.....	60
Figure 19 : Arbre hiérarchique (à gauche) et graphe du plan factoriel « champs » (à droite) associés à la classification hiérarchique basée sur l'analyse en composante principales construites à partir d'indicateurs de services écosystémiques mesurés en 2020-2021 sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse.....	62
Figure 20 : Arbre hiérarchique (à gauche) et graphe du plan factoriel « champs » (à droite) associés à la classification hiérarchique basée sur l'analyse en composante principales construites à partir d'indicateurs de services écosystémiques mesurés en 2020-2021 sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse.	64
Figure 21 : Graphe des individus « champs » (en noir) de l'analyse en composante principales réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse sur base d'indicateurs de services écosystémiques.....	66
Figure 22 : Variables « indicateurs de pratiques culturelles » (en noir) de l'analyse en composante principales réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse, avec les « indicateurs de services écosystémiques » et certains « indicateurs de pratiques culturelles » (en bleu) en variables supplémentaires.	67
Figure 23 : Arbre hiérarchique associé à la classification hiérarchique basée sur l'analyse en composante principales construites à partir de l'historique culturelle des années 2010 à 2020 de 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse.....	68
Figure 24 : Arbre hiérarchique (à gauche) et graphe du plan factoriel « champs » (à droite) associés à la classification hiérarchique basée sur l'analyse en composante principales construites à partir de l'historique culturelle des années 2010 à 2020 de 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse.....	69
Figure 25 : Corrélogramme des 24 indicateurs de services écosystémiques (+ une variable numéro de champ) mesurés via 8 expériences sur 20 parcelles en froment ou épeautre en 2020-2021.....	70
Figure 26 : Corrélogramme de 42 indicateurs de pratiques culturelles (récoltés pour les années 2010 à 2020) et des 24 indicateurs de services écosystémiques (+ une variable numéro de champ) mesurés via 8 expériences sur 19 parcelles en froment ou épeautre en 2020-2021.....	74
Figure 27: Histogramme de répartition des observations de la surface couverte par la surface sombre.	84

Index des tableaux

Tableau 1 : Correspondance des SE selon la classification du Common International Classification for Ecosystem Services (CICES 2013), Le Roux et al. (2008) et Tibi et Therond (2018).....	6
Tableau 2 : SE étudiés dans le mémoire ainsi que leur correspondance avec la classification de Le Roux et al. (2008).....	7
Tableau 3 : Mécanismes par lesquels les vers de terre affectent les plantes.	10
Tableau 4: Catégories de composés de la matière organique selon la méthode d'extraction	15
Tableau 5: Paramètres et pratiques influant les communautés adventices.....	24
Tableau 6: SE étudiés dans la thèse de L. Leveau.....	29
Tableau 7 : Récapitulatif des indicateurs clés calculés à partir de l'historique cultural des parcelles entre 2010 et 2021, selon différentes catégories de pratiques culturales (PC) renseignées dans la première colonne.	31
Tableau 8 : Score de stabilité des agrégats obtenu après immersion dans l'eau distillée.	38
Tableau 9 : Classes de surface utilisées dans l'évaluation de la surface de plaque.	41
Tableau 10 : Extrait du tableau VESS montrant un sol de qualité 1 (= score VESS) avec les caractéristiques y correspondant.	42
Tableau 11 : Classes de densité et de phénologie utilisées pour les relevés d'adventices avec le protocole CASIMIR (INRA 2017a).....	43
Tableau 12 : Correspondance des classes de densité avec les valeurs utilisées pour obtenir les indicateurs de densité.....	44
Tableau 13 : Score de Koshibayev et Miminjanov (2016) correspondant à la surface de feuille présentant des symptômes de septoriose.....	46
Tableau 14 : Récapitulatif des indicateurs clefs issus des expériences renseignées dans la première colonne.	47
Tableau 15 : Résumé chiffré des indicateurs de SE.....	50
Tableau 16 : Résumé des variables « indicateurs de services écosystémiques » corrélées aux dimensions 1, 2 et 3 de l'analyse en composante principale (ACP2_SE) réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse..	61
Tableau 17 : Variables « indicateurs de services écosystémiques » corrélées aux dimensions 1, 2 et 3 de l'analyse en composante principale (ACP3_PC) réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse.	65

Abréviations

AB = Agriculture Biologique

ABC = Agriculture Biologique et de Conservation

AC = Agriculture de Conservation

AConv = Agriculture Conventiennelle

ACP = Analyse en Composantes Principales

AEC = Agroécosystème

AE = Agroécologie

AFM = Analyse Factorielle Multiple

AFMD = Analyse Factorielle de Données Mixtes

AIC = Agriculture Intelligente face au Climat

ASD = Agriculture en Semis Direct

ATCS = Agriculture en Technique Culturelle Simplifiée

BBCH = *Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie*

CEA = Capacité d'Echange Anionique

C_{org} = Carbone organique

C:N = rapport Carbone-Azote

C = Carbone

C_{org} = Carbone organique

CEC = Capacité d'Echange Cationique

CICES = *Common International Classification for Ecosystem Services*

Comm. pers. = Commentaire personnel

CRA-W = Centre de Recherche Agronomique de Wallonie

DEPE = l'Expertise scientifique collective, à la Prospective et aux Etudes

EEA = *European Environment Agency*

EFESE = programme d'Evaluation Française des Ecosystèmes et Services Ecosystémiques

ELIA = *Earth and Life Institute*

FAO = Food and Agriculture Organisation

HCPC = Classification Hiérarchique sur Composante Principale

IFT = Indice de Fréquence de Traitement

INRA = Institut National de Recherche Agronomique

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

MC = Matrice de Corrélacion

MEA = *Millenium Ecosystem Assessment*

MO = Matière Organique
MOP = Matière Organique Particulaire
m.s. = masse sèche
N_{org} = Azote organique
N_{min} = Azote minéral
N = Azote
OPVT = Observatoire Participatif des Vers de Terre
P = Phosphore
PC = Pratiques Culturelles
PEPA = *Plant Ecophysiology and Agriculture*
PP = Produit Phytosanitaire
SE = Service Écosystémique
SMCS = Support en Méthodologie et Calcul Statistique
TB = *Tea Bag*
TBI = *Tea Bag Index*
TCS = Techniques Culturelles Simplifiées
TP = Toutes les Plantes cultivées
USDA = *United State Department of Agriculture*
VESS = *Visual Evaluation of Soil Structure*
VDT = Vers De Terre

Introduction

A l'heure où la durabilité des systèmes devient une préoccupation centrale de la société, la recherche agronomique en collaboration avec les agriculteurs devient essentielle pour mieux comprendre les dynamiques en jeu derrière les différents systèmes de production. Cette collaboration est importante pour permettre de mieux orienter le développement de l'agriculture et de justifier certaines pratiques innovantes issues du monde agricole sur base de méthodes scientifiques rigoureuses.

Ce mémoire s'insère dans le cadre de la thèse de L. 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 rapproche 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). Il contribue aux aspects d'évaluation des services écosystémiques et explore les liens qui peuvent exister entre certaines pratiques culturales et la fourniture en services écosystémiques.

Le corps de ce document est scindé en quatre parties. L'« état de l'art » apporte un éclairage sur l'origine du concept de service écosystémique. Il dresse également l'état des connaissances actuelles de services écosystémiques liés au sol et aux bioagresseurs permettant à l'agroécosystème d'assurer sa fonction principale de production de denrées alimentaires. L'on y retrouve également l'objectif général poursuivi et sa subdivision en objectifs spécifiques rédigés formellement.

La partie « Matériel et méthodes » présente brièvement les réalisations antérieures au mémoire, la démarche globale du mémoire au cours de l'année 2020-2021 et les protocoles spécifiques utilisés afin de répondre aux objectifs cités précédemment.

Les « Résultats » exposent les premières données issues des protocoles qui seront utilisés les prochaines années. Ils montrent aussi les premières analyses multivariées réalisées à partir de ces données et d'informations récoltées auprès des agriculteurs sur leurs pratiques culturales des dix dernières années.

La « Discussion » offre une réflexion critique autour des résultats produits et propose des pistes d'améliorations pour les protocoles utilisés. En s'appuyant sur la littérature, elle met en lumière, à partir l'échantillon de vingt parcelles étudiées, les liens de corrélation intéressants entre pratiques culturales et services écosystémiques. Elle signale également certaines dissonances avec la littérature, en proposant de nouvelles hypothèses mais en suggérant également que les conclusions ultérieures de la thèse, se basant sur un plus grand échantillon, devraient être plus consistants et pourraient différer.

Le document se termine par une conclusion générale sur les travaux réalisés durant cette année 2020-2021.

1. Etat de l'art

1.1. Défis de l'agriculture belge aujourd'hui

Le siècle passé, l'agriculture a remporté une importante victoire, celle d'augmenter considérablement les surfaces agricoles et leur rendement afin de faire face aux pénuries alimentaires jusque-là très fréquentes, et d'autant plus craintes par une augmentation conséquente de la population mondiale (Hazell et Wood 2008). Cela a été permis grâce à un ensemble de facteurs : l'amélioration végétale, les progrès en agronomie, la synthèse d'engrais et de produits phytosanitaires (Hazell et Wood 2008) et la mécanisation (Tilman 1998). De ce fait, la plupart des pays industrialisés ont atteint et dépassé la suffisance alimentaire au milieu du XXe siècle (Hazell et Wood 2008). La problématique de famine n'est aujourd'hui plus liée à un déficit de production, mais à une distribution inégale des revenus (Hazell et Wood 2008).

Ainsi, la notion de sécurité alimentaire (*food security*) se décline en quatre axes : une disponibilité de nourriture, un accès à la nourriture, une alimentation adaptée aux besoins nutritionnels et une stabilité dans le temps (Simon 2012). Au-delà de l'accès à une alimentation équilibrée, la dimension temporelle est donc essentielle. Aujourd'hui, le développement de l'agriculture n'est donc plus uniquement envisagé en termes de rendement à court terme, mais également en termes de protection de l'environnement afin de préserver une durabilité des agroécosystèmes (AEC), c'est-à-dire les écosystèmes propres à l'agriculture, et de ne pas mettre en péril la capacité des générations futures à se nourrir. Dans cette logique, l'agriculture « durable » se base sur le principe de répondre aux besoins d'aujourd'hui sans compromettre la capacité des générations futures à atteindre les leurs (Lichtfouse et al. 2009).

Depuis les années 70, de nombreux travaux ont été réalisés afin d'explorer plus en profondeur les menaces pesant sur les écosystèmes et de les catégoriser en neuf limites planétaires. Parmi celles-ci figurent la perte de biodiversité et la perturbation des flux des cycles biogéochimiques de l'azote (N) et du phosphore (P) qui sont signalées par les experts comme ayant franchi la zone d'incertitude (Campbell et al. 2017). Celle-ci correspond à une zone où l'on considère que l'humanité peut être mise en danger. L'on constate que ces deux limites planétaires sont étroitement liées à l'agriculture. En effet, l'agriculture, actrice principale de l'AEC, est à la fois impactante et impactée par les défis environnementaux de notre époque (Smith et Gregory 2013). L'impact qu'elle a sur l'environnement peut être positif ou négatif dans de nombreux domaines (production, biodiversité, paysage...) et à l'échelle de l'agriculteur ou de la société, selon la manière dont l'agriculture est conduite.

Un rapport de la FAO publié en 2017 estime ainsi que « la clé d'une croissance agricole durable réside dans une utilisation plus efficace des terres, de la main-d'œuvre et des autres intrants grâce au progrès technologique, à l'innovation sociale et à de nouveaux modèles commerciaux. Pour que l'agriculture [...] puisse répondre aux défis futurs, l'innovation devra non seulement améliorer l'efficacité avec laquelle les intrants sont transformés en

productions, mais aussi préserver les ressources naturelles rares et réduire les déchets (OCDE, 2011 ; Troell et al., 2014). Les pratiques agricoles requises pour préserver et utiliser plus efficacement les ressources naturelles différeront en fonction des conditions et des besoins locaux. » (FAO 2017).

La FAO considère également que d'un point de vue planétaire « les agriculteurs obtiennent une meilleure qualité et quantité de production en passant d'une dépendance aux intrants chimiques à une approche holistique et intégrée basée sur la gestion des écosystèmes » (FAO 2017). Si cela est général et peut-être pas applicable à tous les contextes, la compréhension et la gestion des écosystèmes semblerait néanmoins présenter un potentiel intéressant.

Une série de type d'agricultures et de pratiques agricoles tels que l'agriculture de conservation, l'agriculture agroécologique, l'agriculture intelligente face au climat (AIC) (*climate-smart agriculture*), l'agroforesterie, les systèmes intégrés culture-élevage-énergie, et la lutte intégrée contre les nuisibles y sont présentés comme pouvant fournir un certain nombre de co-bénéfices environnementaux. Cependant, le rapport indique aussi que pour que ceux-ci puissent être adoptés correctement, ils nécessitent des innovations et de l'investissement technique en recherche et développement. En outre, la FAO estime que l'investissement dans de nouvelles formes de recherche et développement, plus proches des besoins des agriculteurs, est indispensable (FAO 2017).

En Belgique, des modifications importantes ont également pu être observées ces dernières décennies. De tout temps, le marché a eu un impact considérable et a concurrencé les préoccupations agronomiques pour le choix des rotations effectuées. Cela a participé au développement dans la majeure partie des fermes des rotations courtes (bi- et triennales et monocultures) (exemple : betterave, blé, escourgeon) durant la fin du XXe siècle et jusqu'à récemment. Cependant, l'on observe et entend, notamment dans l'échantillon d'agriculteurs qui ont participé à ce mémoire, que beaucoup d'agriculteurs viennent de changer considérablement leurs rotations lors de la dernière décennie. Ils considèrent que les cultures classiques n'ont plus la capacité de rentabilité qu'elles avaient auparavant. Ne pouvant plus compter sur les rotations triennales classiques, ces agriculteurs ont besoin de se réinventer, de tester de nouvelles cultures et d'évaluer leur potentiel économique. Certains suivent au plus près les fluctuations du marché afin de décider l'assolement qui sera en place pour l'année, entraînant parfois des complications d'un point de vue agronomique. Aussi, les agriculteurs engagés dans certains modèles cultureaux nouveaux - agriculture de conservation... - cherchent des rotations plus longues pour leurs apports agronomiques tels que la réduction de la pression des ennemis de la culture (maladies, adventices...). Une partie des agriculteurs belges est donc en questionnement, et la recherche sur le terrain est une piste pour identifier des indicateurs agronomiques, économiques et sociaux permettant de répondre à ces questionnements. Ces indicateurs pourraient permettre de quantifier l'effet de changements de pratiques agricoles, notamment sur les services écosystémiques (Balloy et al. 2017).

La notion de « service écosystémique », qui sera approfondie au point 1.2., est un concept qui a été développé pour exprimer l'utilité que la nature procure à la société. Dernièrement, une trajectoire envisagée pour optimiser et rentabiliser au mieux ces services au niveau agricole est celle de l'agriculture écologiquement intensive, c'est-à-dire une agriculture « intensive en écologie », ou autrement dit « une agriculture utilisant préférentiellement et intensivement les fonctionnalités naturelles qui caractérisent fondamentalement les écosystèmes » (Griffon 2013). Ce modèle d'agriculture écologiquement intensive est promu par le gouvernement wallon depuis 2014 (Gouvernement wallon 2014).

En parallèle, un nouvel objectif qui a émergé dans la recherche agronomique est celui d'identifier dans quelle mesure les intrants non renouvelables pourraient être remplacés par ces services écosystémiques (Chabert 2017; Boeraeve 2018). Cela est d'autant plus important pour certains engrais de synthèse, comme le phosphore, dont la longévité de viabilité économique en termes de ressources minérales est estimée à quelques décennies (Singh et Rengel 2007). Une partie de la population utilisant actuellement ces ressources finies y aura probablement de moins en moins accès dans le futur.

1.2. **Les services écosystémiques**

1.2.1. **Contexte**

Les services écosystémiques (SE) sont définis comme les contributions des structures et des fonctions des écosystèmes au bien-être humain (Burkhard et Maes 2017). Ils peuvent résulter d'interactions entre processus biotiques et abiotiques (Turkelboom et al. 2013). Les SE se réfèrent aux sorties - biens et services - finales des écosystèmes, consommées ou utilisées par l'homme (Turkelboom et al. 2013). De ce fait, l'humanité est fortement dépendante du bon fonctionnement de l'écosystème et du capital naturel qui permettent des flux de SE de la nature vers la société (Burkhard et Maes 2017). Si des évaluations monétaires de ces processus naturels existent, certains économistes considèrent qu'une inclusion d'approches non-monétaires et non marchandes de biens et services serait plus appropriée qu'une approche purement économique (Burkhard et Maes 2017).

Bien que mise en évidence à partir des années 70 par le *Massachusetts Institute of Technology* dans le rapport de l'étude *Study of Critical Environmental Problems*, cette notion de SE a surtout pris de l'ampleur depuis les années 2000. La publication du *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA) en 2005 a conduit l'Europe à établir un plan de Stratégie Biodiversité à l'horizon 2020. Cela s'est traduit entre autres par la réalisation d'une cartographie et une évaluation des SE au sein de chaque état membre. Le *Mapping and Assessment of Ecosystem and their Services* (MAES) est un groupe qui a été constitué en 2013 avec comme mission de coordonner l'élaboration d'un cadre d'analyse cohérent entre les différents états (Tibi et Therond 2018).

Les SE pouvant être très variables, plusieurs types de classification ont été proposées sur base de différents critères. Si une pluralité de types de classification est plus adéquate pour garder une information la plus complète et exacte possible (Costanza 2008), cela rend les comparaisons entre études utilisant des classifications différentes plus compliquées

(Turkelboom et al. 2013). Comme réponse à cette difficulté, un *Common International Classification for Ecosystem Services* (CICES) a été mis en place par l'*European Environment Agency* (EEA), afin d'avoir un cadre d'analyse commun. Des déclinaisons du CICES ont été créées, notamment au niveau belge (CICES-Be) afin de mieux s'adapter aux contraintes locales. Elles tiennent par exemple compte de la haute densité de population et de l'usage multifonctionnel des sols, caractéristiques du pays. La classification CICES divise les SE en trois sections, elles-mêmes subdivisées (CICES 2021) : (1) Services d'approvisionnement : bois, céréales... (2) Service de régulation : régulation du climat, pollinisation... (3) Service culturels : paysage, activités éducatives... (Turkelboom et al. 2013).

Si le CICES permet d'homogénéiser la classification des SE, il reste très global et est peu adapté à des études sur les systèmes agricoles spécifiquement.

1.2.2. Les agroécosystèmes

En France, le programme d'Évaluation Française des Écosystèmes et Services Écosystémiques (EFESE) a été initié en 2013 (Tibi et Therond 2018). Six types d'écosystèmes ont été étudiés en profondeur. La délégation à l'Expertise scientifique collective, à la Prospective et aux Études (DEPE) de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) a réalisé une synthèse sur le volet « écosystèmes agricoles » (EFESE-EA) plus spécifiquement.

L'AEC (figure 1) se caractérise par une forte anthropisation du milieu à des fins de production de biomasse principalement (Tibi et Therond 2018). Il est constitué de deux systèmes en étroite interaction. Le premier est le système biophysique (ou écologique), comprenant des composantes biotiques et abiotiques, et le second, le système socio-économique, incluant les personnes qui gèrent et agissent sur cet écosystème. Ce mémoire s'intéresse essentiellement au système biophysique, qui est décrit plus en détail ci-dessous.

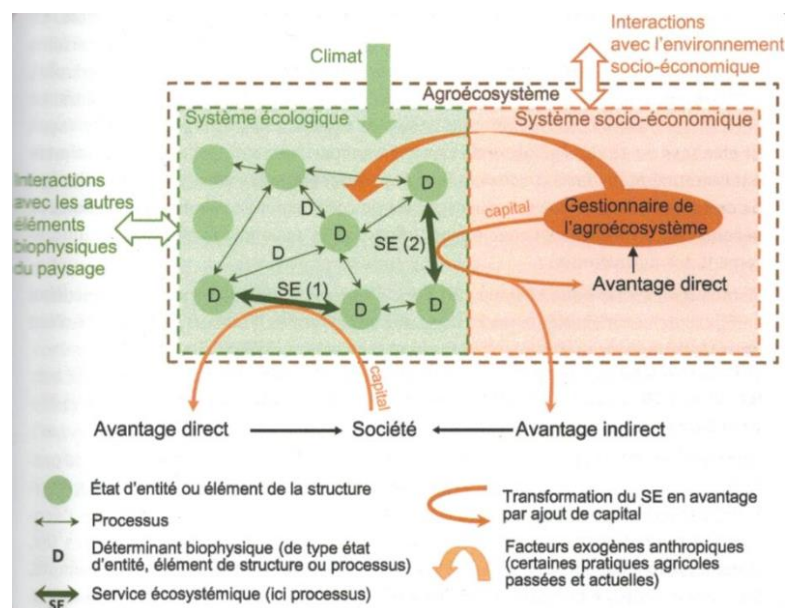


Figure 1 : Schéma représentant la fourniture de deux services écosystémiques, l'un direct envers la société, l'autre direct envers le gestionnaire de l'agroécosystème et donc indirectement envers la société. L'agroécosystème possède deux composantes : le système écologique et le système socio-économique. Source : Tibi et Therond (2018).

A côté de sa finalité de production, l'agriculture génère également un large panel de SE impactant la société, tels que la qualité de l'eau, la pollinisation, le cycle des nutriments, la rétention de l'eau, la séquestration du carbone (C), et la conservation de la biodiversité (Dale et Polasky 2007).

L'INRA a représenté les SE selon des classification plus appropriées aux AEC que la CICES (tableau 1). La représentation choisie dans le cadre de la thèse de L. Leveau est celle de Le Roux *et al.* (2008), car celle-ci est facilement appropriable par les agriculteurs et applicable à l'échelle de la parcelle, qui est celle de l'étude. Ce mémoire s'intéresse spécifiquement aux SE **intrants** car ceux-ci rendent compte de la capacité de certains systèmes de culture à réduire leurs intrants de synthèse tout en maintenant de bonnes conditions de production. Ils correspondent aux SE « qui contribuent à la fourniture de ressources et au maintien des supports physico-chimiques de la production agricole, et qui assurent la régulation des interactions biotiques, positives ou négatives » (maintien de la fertilité du sol, pollinisation...) (Lavorel *et al.* 2008). Par opposition à ceux-ci, les SE **produits** peuvent soit contribuer au revenu agricole direct (production végétale et animale), soit présenter directement un intérêt pour la société (qualité de l'eau, valeur esthétique du paysage...).

Tableau 1 : Correspondance des SE selon la classification du Common International Classification for Ecosystem Services (CICES 2013), Le Roux *et al.* (2008) et Tibi et Therond (2018).

CICES 2013	Le Roux 2008 <i>et al.</i> (INRA)	Tibi et Therond 2018 (INRA)
SE de support et de régulation	Services intrants	SE intrants
SE d'approvisionnement	Services produits contribuant au revenu agricole direct	SE rendus aux gestionnaires de l'agroécosystème
	Services produits hors revenu agricole direct	

1.2.3. Sélection des indicateurs

L'évaluation de la fourniture en SE d'une exploitation agricole nécessite l'emploi d'indicateurs. Ceux-ci sont des variables qui « fournissent des renseignements sur d'autres variables plus difficiles d'accès » et qui « servent de repères pour prendre une décision » (Gras 1989).

Lebacqz *et al.* (2013) propose une méthodologie en trois étapes pour la sélection d'indicateurs liés à la durabilité des écosystèmes pertinents et peu redondants :

1. La **contextualisation** définit les objectifs de l'analyse, les échelles spatiales et temporelles, les acteurs concernés et leur implication.
2. La **comparaison et l'évaluation d'indicateurs** existants permettent, *via* une série de critères de pertinence, de faisabilité et de valeur pour l'utilisateur final (annexe 1.2.1.), de prioriser les indicateurs. Ces critères dépendent de la contextualisation.
3. La **sélection d'un set d'indicateurs** permet de représenter l'ensemble du système de manière appropriée, en veillant à respecter les critères de parcimonie, de consistance et de suffisance (annexe 1.2.1.). En effet, il ne suffit pas de lister une série d'indicateurs qui sont en lien avec l'objet d'étude, mais de construire une combinaison cohérente d'indicateurs qui rend compte de la complexité du système.

En ce qui concerne les SE plus spécifiquement, l'évaluation des indicateurs existants peut se baser notamment sur leur lien avec le SE qu'ils mesurent. L'étude de Boeraeve (2018), qui s'applique également à des AEC belges, utilise un cadre d'analyse pour la mesure des SE structuré en quatre catégories :

- i) Indicateurs d'état de l'écosystème, représentant un potentiel de production, de régulation ou de service culturel que possède l'écosystème ;
- ii) Indicateurs de processus ou de fonction de l'écosystème, mesurant l'activité ou le flux effectif dans l'écosystème ;
- iii) Services écosystémiques, correspondant aux fonctions (ii) lorsqu'elles produisent un bénéfice à la société ;
- iv) Bénéfices, désignant l'avantage procuré à l'humain.

La catégorie « bénéfiques » permet de se rendre réellement compte de l'apport que produit une certaine fonction de l'écosystème, soit le gain réel pour la société. Elle est plus facile à appréhender en tant qu'humain.

1.3. SE intrants

Pour rappel, l'objectif principal de l'AEC est la production de biomasse végétale ou animale (Tibi et Therond 2018). Dans ces systèmes agricoles, la production de végétaux résulte généralement des interactions entre les SE intrants et les intrants exogènes apportés par les agriculteurs, les différenciant des écosystèmes (semi-)naturels, pour lesquels les interventions humaines sont très limitées. Si l'indicateur de rendement, très utilisé et populaire, reste essentiel dans l'évaluation de la performance des AEC, il semble indispensable de s'intéresser également aux SE intrants qui se trouvent en amont de cette production. Cela vient en effet questionner la dimension temporelle de durabilité de l'AEC.

Ce document scinde les SE intrants en deux catégories se référant à deux des composantes principales de l'AEC. D'une part, le sol, possédant des propriétés bio-physico-chimiques plus ou moins adéquates au développement des plantes. D'autre part, les ennemis

Tableau 2 : SE étudiés dans le mémoire ainsi que leur correspondance avec la classification de Le Roux et al. (2008). En Brun clair : SE liés au sol ; en vert clair : SE liés au contrôle des ennemis de la culture ; MO = matière organique. Le code couleur attribué aux différentes fonctions est suivi tout au long de ce mémoire pour les différents tableaux afin d'en faciliter la lecture. La « décomposition de la MO » et la « stabilité structurale » possèdent deux couleurs faisant référence à deux méthodes de mesure différentes réalisées dans ce mémoire. Source : adapté de Le Roux et al. (2008).

SE intrants étudiés	Fonctions et propriétés de l'écosystème	Correspondance avec les fonctions et propriétés de l'écosystème de Le Roux et al. (2008)	Correspondance avec les SE de Le Roux et al. (2008)
Dynamique de la MO	Fragmentation de la MO	<ul style="list-style-type: none"> • Dynamique de la MO : minéralisation, décomposition • Dynamique des éléments nutritifs : transformations élémentaires, solubilisation 	Fertilité des sols
	Décomposition de la MO		
Structure du sol	Stabilité structurale	<ul style="list-style-type: none"> • Structuration des sols : porosité, agrégation • Stabilisation par les racines • Matière organique du sol 	Stabilité structurale du sol (contrôle de l'érosion, résistance à la compaction)
	Compaction (= 1/porosité)		
Contrôle des ennemis de la culture	Présence d'adventices	<ul style="list-style-type: none"> • Habitats et ressources pour les auxiliaires • Prédation, parasitisme, pathogénicité 	Contrôle des bioagresseurs
	Présence de maladies		

de la culture, impactant la quantité, la qualité et la stabilité du rendement. A côté du sol et des ennemis des cultures, le rendement est également défini par le potentiel génétique des cultures et le climat (White 2006).

Le tableau 2 résume les SE intrants étudiés dans ce mémoire ainsi que leur correspondance avec la classification de Le Roux *et al.* (2008), particulièrement adaptée aux AEC. Un cadre théorique de chacune de ces fonctions de l'écosystème est présenté dans la suite du document, dans leur ordre d'apparition dans le tableau.

1.3.1. SE liés au sol

1.3.1.1. Introduction

Le sol est un compartiment complexe en interaction avec le reste de la biosphère. Sa capacité à produire une végétation est déterminée par ses dimensions biologiques, chimiques et physiques. La « fertilité du sol » est un concept aux multiples facettes qui ne possède pas de définition faisant consensus dans la littérature (Patzel, Sticher, et Karlen 2000). Dans ce document, il désigne la capacité du sol à maintenir une production satisfaisante à long terme (Singh et Rengel 2007).

Pour pouvoir se développer correctement, les plantes doivent disposer – en plus de conditions d'éclairement et de température adéquates – de nutriments en qualité et quantité suffisantes, de CO₂, d'O₂, et d'eau (White 2006). L'N, un élément très important au développement de la plante, est uniquement prélevé sous forme minérale, c'est-à-dire de nitrate (NO₃⁻) ou d'ammonium (NH₄⁺) (figure 2). Ceux-ci peuvent provenir de trois sources différentes :

- L'altération de la roche-mère,
- Les apports exogènes sous forme minérale,
- La transformation d'azote organique (N_{org}) contenue dans la matière organique (MO) du sol,

en azote minéral (N_{min}) via l'activité des organismes du sol. La MO désigne des résidus de matériel végétal et animal mort et d'excrétions, potentiellement combinés à des composés minéraux, indépendamment de son stade de décomposition. Des apports exogènes de N_{org} peuvent accroître ce stock et donc le potentiel de la dynamique de la MO. Comme indiqué sur la figure 2 pour le N, l'activité biologique du sol permet de boucler le cycle des nutriments.

Dans une optique d'optimisation des SE afin de permettre une réduction d'apports d'intrants non renouvelables, la compréhension de la dynamique de la MO est indispensable.

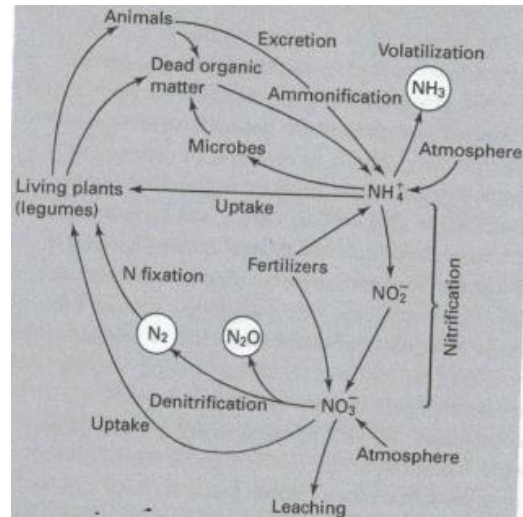


Figure 2 : Dynamique et transformation de l'azote dans l'écosystème sol-plante. La fixation du N est spécifique à certaines familles végétales telles que les Fabacées (légumineuses). Source : White (2006).

En Wallonie, la teneur de carbone organique² (C_{org}) dans la couche labourée des terres cultivées a baissé de 12,5% entre 1955 et 2005 (Goidts et Van Wesemael 2007), avec un taux de $-0,2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Goidts, Van Wesemael, et Van Oost 2009). En effet, une grande partie des sols de la région limoneuse est proche du seuil critique de 2% de MO, caractérisé par une vulnérabilité à la compaction et à l'érosion (Van Wesemael, Suzanna Lettens, et Van Orshoven 2011). Or, comme mentionné ci-dessus, la MO est un élément essentiel de la fertilité. En effet, les processus biologiques sont liés à la teneur et la qualité de la MO dans les sols. (Singh et Rengel 2007).

Certaines caractéristiques chimiques telles que le pH influencent également les possibilités de prélèvements des nutriments par les plantes.

A côté de ces processus biologiques et chimiques directs et indirects qui régissent la disponibilité des nutriments dans le sol, la composante physique est également essentielle pour la fertilité de l'AEC. L'organisation structurale du sol influence par exemple la protection physique et les conditions de température, d'humidité et d'oxygène dans lesquelles croissent les plantes (White 2006).

1.3.1.2. Dynamique de la MO

Lorsque des débris végétaux ou animaux se retrouvent en surface ou dans le sol dans des conditions favorables, ils sont décomposés par des organismes du sol.

1.3.1.2.1. Fragmentation par la mésofaune

La mésofaune fragmente et digère la MO, réduisant la taille des particules et les altérant chimiquement (White 2006). Les deux principaux groupes impliqués dans ce processus de renouvellement de la MO sont les arthropodes (arachnides, insectes, myriapodes...) et les annélides (vers de terre, vers enchytréides...). En région tempérée, les vers de terre (VDT) constituent la majeure partie de la biomasse animale des sols (Blouin 2013).

1.3.1.2.1.1. Activités des vers de terre

Selon Edwards (2004) les VDT, ou lombrics, font partie des auxiliaires les plus reconnus pour leur contribution à la formation et à la maintenance du sol. Il s'agit d'un sous ordre (*Lumbricina*) comptant plus de 8 000 espèces et appartenant à l'ordre des *Oligochaeta*. Considérés comme d'importants « ingénieurs de l'écosystème » (Blouin 2013), ils contribuent de manière très importante au renouvellement de la structure (point 1.3.1.3), à l'aération, au drainage et à la fertilité du sol (Edwards 2004c).

Sept mécanismes, repris dans le tableau 3, peuvent résumer la manière dont les VDT affectent les plantes (Edwards 2004a). Les processus physiques et chimiques indirects sont détaillés ci-après.

² L'on considère généralement que la MO est composée à 58% de C, même si certaines études montrent des variations en fonction des sols (Pribyl 2010). Un facteur 1,72 est donc utilisé pour passer du C à la MO.

Tableau 3 : Mécanismes par lesquels les vers de terre affectent les plantes. Source : (Edwards 2004a)

Type de processus	Mécanismes par lesquels les VDT affectent les plantes
Biologique indirect	<ul style="list-style-type: none"> • La dispersion et les changements dans les populations et l'activité des microorganismes bénéfiques ; • Les changements dans les populations et les impacts sur les parasites et des agents pathogènes des plantes ;
Biologique direct	<ul style="list-style-type: none"> • La production de substances influençant la croissance des plantes (nutriments et régulateurs) ; • L'abrasion des racines et l'ingestion de parties de plantes vivantes par les VDT ; • Les interactions des VDT avec les graines ;
Physique indirect	<ul style="list-style-type: none"> • Les modifications de la structure du sol ;
Chimique indirect	<ul style="list-style-type: none"> • Les changements dans la disponibilité spatio-temporelle des nutriments.

a. Physique indirect

Par leur activité de bioturbation, qui consiste en la réduction de la taille et surtout le mélange de la MO en surface avec des particules minérales dans l'intestin des VDT, ils participent au processus de formation d'agrégats stables et d'enfouissement de la MO (Le Bayon et al. 2021; Edwards 2004c). Les agrégats qu'ils produisent possèdent des propriétés physiques intéressantes, telles qu'une amélioration du drainage et de la capacité de rétention en eau. Différents auteurs ont estimé que jusqu'à 50% des agrégats des couches de surface du sol sont produits par les VDT.

En transportant jusqu'à 250 T de sol d'horizons profonds vers la surface par hectare chaque année, soit 1 (~ région tempérée) à 5 (~ région tropicale) cm de sol, ils enfouissent progressivement les cailloux, constituant un processus intéressant pour l'agriculture.

Les galeries creusées par les VDT accroissent la porosité et donc l'aération du sol. En région tempérée, l'on compte entre 100 à 800 trous de VDT par m² (Edwards 2004c), tous usages du sol confondus. Certaines espèces de VDT, telles que les *Lumbricus terrestris* sont capables de creuser des galeries très profondes et de traverser des couches d'argiles, augmentant ainsi le drainage et la capacité d'infiltration du sol. Des études ont enregistré des galeries de *L. terrestris* allant jusqu'à un mètre de profondeur (Shipitalo et Butt 1999; Nuutinen et Butt 2003). Ces galeries accroissent également l'aération des horizons plus profonds, réduisant les couches anaérobies (Edwards 2004c).

L'augmentation de l'infiltration dans le sol permet de réduire le ruissellement et l'érosion, d'augmenter la disponibilité en eau pour les plantes et d'augmenter le drainage. Toutefois, cela peut parfois poser problème car des éléments minéraux et produits phytosanitaires peuvent se retrouver plus rapidement dans la nappe phréatique avant d'être dégradés.

b. Chimique indirect

En transformant et transportant la MO, les VDT participent à rendre les nutriments tels que le N, le P et le potassium (K) disponibles pour les plantes. En effet, en se nourrissant ils promeuvent l'activité microbiologique, qui contribue à la dégradation et la stabilisation de la MO (point 1.3.1.2.2.). Lors de la digestion par les VDT, le ratio carbone sur azote (C:N) de la MO diminue progressivement, et le N_{org} est transformé en nitrate et ammonium.

Les VDT semblent également avoir un potentiel de dépollution des sols (Edwards 2004c).

1.3.1.2.1.2. Classification écologique des vers de terre

De manière générale, l'on distingue trois groupes de VDT sur base de leur fonction dans l'écosystème sol (Edwards 2004b; Le Guédard et al. 2017; White 2006) :

- Les épigés sont situés en surface du sol et fragmentent la litière en particules plus fines, stimulant l'activité microbologique. Ils produisent des turricules, qui correspondent à des déjections de VDT, en surface du sol.
- Les endogés habitent les 20 cm supérieurs du sol et produisent des galeries horizontales temporaires très ramifiées et riches en turricules. Ils dégradent la MO se trouvant sous la surface, la mélangent au sol et augmentent l'aération. Ils ingèrent de la MO et de la matière inorganique (sol), produisant des agrégats très stables. Ils sont relativement tolérants aux périodes de famine ;



Figure 3 : Turricule (haut) et cabane (bas) de vers de terre
Source : Aline Fockedey

- Les anéciques (dont *L. terrestris*) creusent des galeries verticales allant jusqu'à plusieurs mètres de profondeur, favorisant l'infiltration et augmentant la porosité du sol. Ils se nourrissent principalement de litière et de MO du sol. Ces VDT produisent des turricules en surface du sol (figure 3), réduisant le ruissellement et l'érosion, ou dans leurs galeries, adsorbant des contaminants présents dans le sol. Ils réalisent également en surface du sol des cabanes à VDT (figure 3), formés de turricules, de sol et de litière. Ce groupe de VDT est très important en termes de décomposition de la MO, de recyclage des nutriments et de formation des sols. Leur taux de reproduction est assez lent comparativement à celui des autres lombrics.

1.3.1.2.1.3. Facteurs influençant les vers de terre

La quantité et la diversité de VDT dans les sols peuvent être très variables d'un sol à l'autre (Edwards 2004c). Un certain nombre d'études se sont donc déjà intéressées aux facteurs influençant l'abondance et l'activité des VDT (Guillocheau et al. 2020).

a. La saison

En région tempérée, l'activité des VDT est plus importante en automne et au printemps. Ils descendent dans le sol lorsque les conditions sont trop froides ou trop sèches en surface.

b. Le pédoclimat et la disponibilité en matière organique

Le pédoclimat détermine indirectement la quantité potentielle de VDT que peut contenir un sol via la quantité de biomasse pouvant s'y accumuler et s'y décomposer. La disponibilité en MO est un critère souvent limitant pour les populations de VDT (Edwards 2004c). Des études montrent en effet des liens évidents entre la teneur en MO et l'abondance de VDT, notamment suite à des apports d'engrais de ferme (Edwards 2004b)

Cependant, il semblerait que ce soit plus souvent la qualité que la quantité de MO qui limite l'abondance des VDT. Les litières possédant un ratio C:N autour de 20:1 sont plus intéressantes pour les VDT que celles avec un ratio de 60:1 (Edwards 2004b). Ce ratio est généralement d'environ 7 à 15 pour les coupes vertes, 20 pour la MO en décomposition, 25 à 40 pour l'humus grossier et peut être supérieur à 70 pour la paille (Matschullat et al. 2018).

En région tempérée, les sols agricoles possèdent un ratio C:N tournant autour de 14, ceux en prairie permanente de 11 et ceux en forêt de 21 ou plus.

La température affecte directement les VDT. Ils sont actifs entre 0 et 25-30°C, avec un optimum entre 10 et 20°C en milieu tempéré. La température influence également la composition de la communauté (Edwards 2004b). Les climats tempérés ayant des taux de décomposition de la MO moins élevés, la litière y reste donc plus abondante, favorisant ainsi les épigés et anéciques (Edwards 2004b).

Dans nos régions, la variabilité de l'activité des VDT est souvent attribuée à des déficits d'humidité du sol plutôt qu'à des extrêmes de température. En outre, la pluie détermine également positivement l'activité des VDT en région tempérée (Edwards 2004c).

c. La texture, la profondeur et le pH du sol

Les sols de texture intermédiaire sont plus favorables aux VDT que les sols contenant une fraction importante de sables ou d'argiles. Une étude a mis en avant une relation positive entre le contenu en argiles, variant entre 5 et 25%, et l'abondance de VDT (Edwards 2004b). L'effet principal de la texture sableuse semblerait être un effet indirect influençant l'humidité du sol, même si l'effet direct abrasif du sable a également été mis en avant. Inversement, des sols contenant une grande proportion d'argiles peuvent être mal drainés, entraînant une anaérobie peu propice à la vie des VDT.

Des sols de faible profondeur peuvent limiter le développement d'espèces de VDT spécialisés dans un enfouissement profond (Edwards 2004b).

Les VDT sont très abondants dans les sols de pH allant de 5 à 7,4, et rares en deçà de 4,5. L'irrigation des champs peut avoir un effet négatif sur les populations de VDT à cause de l'accumulation en sels qu'elle peut générer.

d. L'occupation du sol

Le type d'occupation du sol influence de manière conséquente l'abondance de VDT (Guillocheau et al. 2020). Une étude réalisée en Bretagne en 2012 a par exemple constaté 7 fois plus de lombrics en cultures annuelles qu'en forêt, et 1,6 fois plus en prairie qu'en cultures annuelles (Cluzeau et al. 2012). Malgré une grande variabilité, les terres agricoles contiennent en moyenne 100 VDT/m² de grande culture et environ 400 VDT/m² de prairie.

e. Les interactions entre espèces

Des interactions de compétition, prédation, parasitisme et maladies peuvent également affecter les VDT.

f. La gestion des sols

Enfin, la gestion des sols affecte également de manière conséquente les populations de VDT (Guillocheau et al. 2020; Edwards 2004b).

L'abondance de VDT dans les systèmes de culture dépend de l'intensité et de la fréquence des perturbations (Edwards 2004b). Le labour affecte les VDT en les blessant mécaniquement, en détruisant les galeries et en les exposant aux oiseaux. Plus la fréquence de labour augmente, moins les populations de VDT sont capables de se régénérer entre deux passages. Avec les pratiques de non-labour, les populations de VDT ne sont plus limitées que

par la présence de MO permettant leur développement (Edwards 2004c). La diversité des VDT est également affectée par la fréquence et l'intensité de travail du sol (Chan 2001). Différents types de travail du sol affectent différemment les différentes catégories de VDT (Ernst et Emmerling 2009). Les espèces anéciques, très importantes pour la pédogenèse, diminuent avec l'intensité du labour, alors que les espèces endogées augmentent. Selon Ernst et Emmerling (2009), ces différences sont dues à une modification de la répartition du C_{org} dans le profil de sol et à un potentiel de dégâts mécaniques variable. Un travail réduit accroît la quantité de C_{org} du sol dans la couche arable, augmentant la densité, la biomasse et la diversité d'espèces de la communauté de VDT.

L'application d'engrais organiques sur des terres agricoles a généralement un effet bénéfique sur les VDT, allant parfois jusqu'à doubler ou tripler leur population en une saison (Edwards 2004b). Cependant, des lisiers trop jeunes peuvent avoir des effets néfastes à court terme sur les VDT à cause de leur teneur élevée en ammonium et sels.

Les engrais inorganiques sont indirectement favorables aux VDT via l'augmentation des résidus de culture (Edwards 2004b). Toutefois, les VDT étant sensibles à l'ammoniac, les fertilisants à base d'ammoniac ont un effet direct défavorable aux VDT.

Certaines molécules contenues dans certains herbicides, fongicides et insecticides peuvent être très toxiques pour les VDT (Edwards 2004b). Les herbicides affectent en outre indirectement les VDT en réduisant la disponibilité en MO.

En termes de rotations, les cultures de céréales laissent généralement plus de résidus de culture que les plantes racines, et nourrissent donc davantage les VDT (Edwards 2004b).

1.3.1.2.1.4. *Indicateurs – protocoles*

Différents types de protocoles de comptage de VDT existent afin d'évaluer l'abondance de VDT dans différents écosystèmes. Parmi ceux-ci, l'on peut citer (OPVT 2021) :

- Le protocole Moutarde, qui consiste à arroser le sol à l'aide d'une solution à base de moutarde afin de faire remonter les VDT, irrités, à la surface et de les compter ;
- Le protocole Test Bêche Vers de Terre, qui consiste à extraire 6 blocs de sol à la bêche et à compter les VDT.

Cependant, ces méthodes (1) n'offrent qu'une estimation ponctuelle de l'abondance des VDT et (2) ne mesurent qu'un potentiel d'incorporation de MO, ce qui les classe dans la catégorie d'« indicateur d'état » en ce qui concerne l'évaluation des SE d'un AEC (point 1.2.3.).

Un autre protocole a récemment été mis en place afin d'observer l'activité réelle des VDT (« indicateur de fonction »). Celui-ci propose d'observer l'activité des VDT à travers trois indicateurs : le nombre de cabanes ou petits monticules créés par les VDT, le nombre de turricules produits par les VDT et l'évolution d'une surface de paille déposée en surface du sol tous les quinze jours durant environ 6 mois (OPVT 2021).

1.3.1.2.2. *Décomposition de la MO par les micro-organismes*

1.3.1.2.2.1. *Activité des micro-organismes*

La fragmentation réalisée par la mésofaune stimule l'activité des micro-organismes du sol, principalement fongiques et bactériens (Singh et Rengel 2007), qui participent également à la décomposition de la MO. En effet, via un processus de **minéralisation**, ils convertissent des nutriments provenant de la MO, initialement sous forme organique, en formes inorganiques simples qui deviennent dès lors disponibles pour les plantes (White 2006). La minéralisation de la MO a notamment lieu à l'intérieur de l'intestin des VDT, abritant des microorganismes.

Pour réaliser cette décomposition, les micro-organismes récupèrent l'énergie contenue dans le substrat en oxydant une partie du C, qu'ils rejettent sous forme de CO₂ (White 2006). Leur activité s'accompagne en effet d'une **respiration**.

En parallèle à ces deux phénomènes, un troisième processus a lieu, appelé **immobilisation** (White 2006). Il s'agit de l'incorporation dans les cellules des micro-organismes d'une fraction du C, du N, du P et du soufre contenus dans le substrat de départ (MO). Ces nutriments-là ne sont donc plus disponibles pour les plantes jusqu'à leur décomposition.

Finalement, les micro-organismes sont également responsables de la synthèse de composés organiques complexes plus résistants à la décomposition (White 2006). Ce processus est appelé **l'humification** et les composés stables formés, l'humus.

Si ces processus ont lieu en même temps, la fraction de nutriments et d'énergie allouée à chacun d'entre eux est variable. La respiration est déterminée en fonction de l'abondance et de l'activité des micro-organismes. Les deux autres processus sont en concurrence, et leur importance dépend de la qualité de MO. Afin de prédire si un surplus d'éléments sera disponible pour les plantes, l'on se réfère au rapport C:N de la MO (White 2006). Lorsque C:N est supérieur à 20, la teneur en N est relativement faible et la majorité du N sera mobilisée par les microorganismes. A l'inverse, lorsque C:N est inférieur à 20, la teneur en N est supérieure aux besoins des microorganismes. La minéralisation est alors supérieure à l'immobilisation. On dit qu'il y a minéralisation nette, c'est-à-dire que le N devient disponible pour les plantes. La limite de C:N = 20 est approximative, car cela peut légèrement varier en fonction des microorganismes.

Le taux de renouvellement de la MO a été estimé en région tempérée pour différents types de MO, dont la paille (White 2006). En moyenne, 1/3 de la MO était encore présent après un an, et 1/5 après cinq ans.

1.3.1.2.2.2. *Classification des composés de la MO*

Les composés de MO sont classiquement distingués sur base de leurs méthodes d'extraction disponibles dans le tableau 4.

Il est également possible de diviser la MO en deux classes selon leur granulométrie par tamisage à l'eau (Chartin et al. 2019) : la fraction grossière (de 20 µm à 2 mm) et la fraction fine (< 20 µm), exprimant tous deux une masse de MO/masse de sol.

Tableau 4: Catégories de composés de la matière organique selon la méthode d'extraction (White 2006).

Catégories de la MO et leurs caractéristiques	Dernière étape d'extraction
Carbone organique dissous	Dissolution
Matière macro-organique (> 200 µm)	Tamisage
Matière organique particulaire (MOP) (entre 50 et 200 µm) : principalement débris de végétaux, animaux et microbiens grossiers et récents, partiellement fragmentés et humifiés	Flottation
Fraction humifiée (humus) (< 50 µm) : généralement fortement liée à des argiles, formant ainsi des complexes argilo-humiques. Trois types de composés humiques : <ul style="list-style-type: none"> • Les acides fulviques, qui se dissolvent dans les bases • Les acides humiques, qui précipitent avec les bases • Les humines, non extractibles par des bases 	Bases fortes

La fraction grossière (~ MO labile) correspond à la fraction de MO entre 20 µm et 2 mm, regroupant les micro-agrégats, petits macro-agrégats et MOP. Il s'agit de MO rapidement minéralisable, dont le temps de résidence dans le sol est faible et qui est donc impliquée dans la fertilité des sols. Elle favorise également la formation d'agréats (point 1.3.1.3.1.), améliorant différentes propriétés liées à la structure du sol, tel que l'infiltration et la rétention en eau.

La fraction fine (~ MO stable) correspond « aux MO stabilisées chimiquement en association avec des minéraux d'argiles et/ou physiquement au sein de micro-agrégats, et de MO récalcitrante (humus) » (Chartin et al. 2019). Le temps de résidence de ce C_{org} est supérieur à 100 ans, participant à des dynamiques de stockage du C dans le sol et donc à la régulation du climat. Il s'agit d'une partie de l'humus et de la fraction humifiée, citées ci-dessus. Malgré le fait que la MO stable ne participe pas autant que la MO labile à la régénération de la fertilité de l'écosystème, ces complexes argilo-humiques confèrent une capacité d'échange cationique (CEC) (point 1.3.1.2.2.3) élevée aux sols. L'humus possède également de bonnes capacités de rétention en eau et de chélation des ions métalliques, diminuant la toxicité de ceux-ci (White 2006).

On observe que la teneur en C_{org} labile d'un sol répond plus rapidement à des variations dans la gestion du sol que le C_{org} stable et que le C_{org} total du sol. En effet, des changements

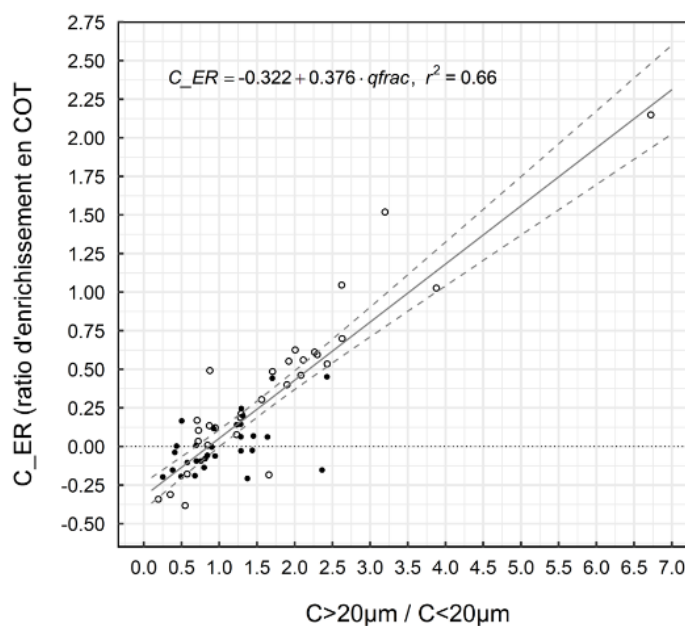


Figure 4 : Lien entre le rapport de la fraction de MO grossière sur la fraction de MO fine et le ratio d'enrichissement en carbone organique total (%). Un rapport de ~ 0,8 est nécessaire pour maintenir la même quantité de MO au cours du temps. Source : Chartin et al. (2019)

de pratiques agricoles peuvent être ressentis après 5 ans au niveau de la MO labile, alors que cela tourne plutôt autour de 10 ans pour le $C_{org\ total}$.

Afin de maintenir la teneur en $C_{org\ total}$ constante, il est estimé qu'il faut garder un rapport (parfois appelé q_{frac}) de fraction grossière ($C_{org\ labile}$) sur fraction fine ($C_{org\ stable}$) de l'ordre de 0,5 à 1 (Chartin et al. 2019) (figure 4). Au-delà, le $C_{org\ total}$ augmentera dans le futur, en deçà, on risque d'épuiser les ressources en MO du sol.

L'étude de Chartin *et al.* (2019) montre que la respiration potentielle d'un sol (indicateur de l'activité des microorganismes) est corrélée positivement au C_{org} et surtout à la fraction grossière du C_{org} du sol sans l'être avec la fraction fine du C_{org} . La fraction grossière du C_{org} est également corrélée positivement aux contenus en C et N microbiens (annexe 1.3.1.1.).

Chartin *et al.* (2019) ont constaté une fraction grossière de C_{org} supérieure pour les exploitations en agriculture de conservation par rapport à celles en agriculture conventionnelle. Ils ont également remarqué que l'intensité du travail du sol, la fréquence de la mise en prairie d'un champ et la durée de mise en culture expliquaient la variance du $C_{org\ total}$.

En prairie, les teneurs en fraction fine de C_{org} sont plus élevées et moins variables qu'en culture. L'on estime que la plupart des prairies aient atteint leurs capacités maximales en C stable. Grâce aux données disponibles des prairies, il est d'ailleurs possible d'exprimer le potentiel maximum de stabilisation en C d'un sol de culture, et donc leur déficit de saturation en C stable.

Il est considéré qu'une teneur en $C_{org\ total}$ de 1,15%, qui correspond à environ 2% de MO, est le seuil minimum afin que le sol puisse assurer ses principales fonctions agronomiques (Chartin et al. 2019). En deçà, la stabilité des agrégats est impactée. Les cultures en région limoneuse en Wallonie possèdent des gammes de teneur en $C_{org\ total}$ variant de 0,5 à 9,2 %C de la masse sèche (m.s.), en C stable variant de 0,20 à 2,6 %C m.s. et en C labile variant de 0,16 à ~1,23 %C m.s (annexe 1.3.1.2.).

En conclusion, « La fraction grossière » $C > 20\ \mu m$ est donc cruciale pour le maintien et la restauration des niveaux de C_{org} dans les sols agricoles car :

- Elle est la fraction la plus réactive d'un point de vue biologique ;
- À long terme elle permet d'alimenter la fraction fine ($C < 20\ \mu m$), assurant ainsi le stockage de C stable ;
- Cette fraction reflète l'effet intégré des pratiques culturales sur les 10 dernières années et plus encore » (Chartin et al. 2019).

1.3.1.2.2.3. Disponibilité des nutriments

A la suite des processus de minéralisation de la MO et d'altération de la roche-mère, les éléments minéraux sont libérés dans la solution du sol. Une grande partie des minéraux chargés positivement (principalement Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ et NH_4^+)³ s'adsorbent aux surfaces d'argiles, d'acides fulviques et d'acides humiques, chargées négativement. La propriété des

³ Le NH_4^+ étant rapidement transformé en NO_3^- par nitrification dans le sol, sa concentration dans la solution du sol, et donc sur la capacité d'échange, est généralement faible.

sols à retenir des cations de cette manière est appelée la capacité d'échange cationique (CEC) (Razzaghi, Arthur, et Moosavi 2021) et se mesure en nombre de moles de cations adsorbés par masse de sol (cmol/kg). (White 2006). La CEC varie entre 3 et 160 cmol/kg pour les minéraux argileux, et entre 60 et 300 cmol/kg de m.s. pour la MO.

La capacité d'échange anionique (CEA) se base sur le même principe que la CEC. Les sols ont une faible capacité de rétention des anions et l'affinité des nitrates sur la CEA est faible (UCDavis s. d.). Les nitrates sont donc vulnérables à la lixiviation (White 2006).

Les phosphates provenant de la minéralisation sont rapidement adsorbés aux argiles et oxydes du sol, dont une partie sera ensuite progressivement occluse dans des oxydes, et donc ne sera plus disponible pour les plantes.

1.3.1.2.2.4. Facteurs influençant la décomposition de la MO

a. La disponibilité du substrat

Les pratiques culturales restituant une partie de la production végétale ou d'excréments animaux au sol stimulent l'activité des microorganismes.

b. L'activité de la biomasse du sol

Les propriétés du sol et conditions environnementales ont un impact sur l'activité des micro-organismes (figure 5) :

- Les conditions d'anoxie et de sécheresse réduisent leur activité ;
- Le pH, en-deçà de 4, fige leur activité ;
- En accélérant leur métabolisme, la température accroît fortement leur activité ;
- L'utilisation de certains produits chimiques toxiques (chloroforme, toluène) peut avoir un effet de stérilisation des sols, réduisant ainsi leur abondance ;
- La réduction de la taille des mottes et agrégats du sol expose une plus grande surface de MO aux microorganismes et accélère ainsi la dégradation. Certaines pratiques culturales ont cet effet-là.

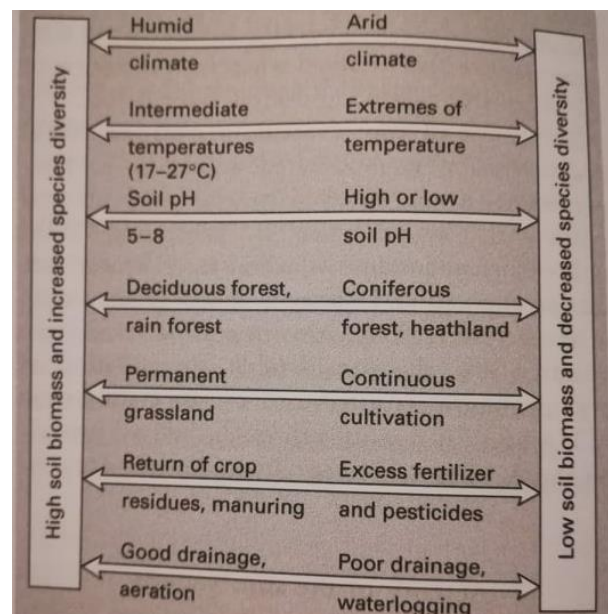


Figure 5 : Dynamique du changement de biomasse en fonction de différents paramètres climatiques et pratiques culturales. Source : White 2006

1.3.1.2.2.5. Indicateurs – protocoles

a. Activité des micro-organismes

Une méthode d'évaluation de la dégradation de la MO simple, peu coûteuse et standardisée a été développée en 2010 (Teatime4Science 2016b). Il s'agit du *Tea Bag Index* (TBI), qui est une mesure de la quantité de thé décomposé après 3 mois d'enfouissement dans le sol. Le Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W) a déjà utilisé un protocole adapté du TBI dans plusieurs essais de terrain.

La méthode du *litter bag* est une méthode semblable à celle du TBI, dans laquelle des sachets en nylon de 1 mm de maille remplis de paille sont enterrés (en fin d'hiver pour les *LEVA bag*) pendant 4 mois (Ranjard 2016; ESA 2017).

b. Teneurs en matière organique stable et labile

Le projet Carbiosol propose un protocole de laboratoire rigoureux afin de pouvoir mesurer la quantité de MO stable et labile (Chartin et al. 2019). Ce protocole permet aussi de doser le N total présent dans le sol, permettant d'en évaluer le rapport C/N.

1.3.1.3. Structure du sol

Dans cette partie seront abordés les concepts de stabilité structurale, de sensibilité à la battance et de compactage. Les propriétés structurales du sol, et en particulier la stabilité des agrégats, influencent la production végétale et la durabilité de l'AEC (Amézketa 1999).

Les structures du sol sont « les arrangements, à toutes échelles d'espace et à tous les niveaux d'investigation, des constituants solides des couvertures pédologiques entre lesquels subsistent des vides. » (Baize 2013). On retrouve : les réseaux cristallins des minéraux, les complexes argileux, les agrégats, les horizons et les paysages. On peut aussi distinguer « structures macroscopiques », et « microscopiques » qui nécessitent de l'outillage adapté pour leur étude (Baize 2013).

Dans la littérature, les deux composantes principales de la structure macroscopique du sol sont la stabilité structurale (ou stabilité des agrégats) et la masse volumique apparente, souvent décrite en termes de compaction du sol, représentant la mesure inverse de la porosité (White 2006).

1.3.1.3.1. Stabilité structurale du sol et sensibilité à la battance

La stabilité des agrégats, est un indicateur de la cohésion des particules de sol (Interreg IV 2012). Il s'agit de la capacité des agrégats à résister à une dégradation, généralement due à l'impact de la pluie ou à un excès d'eau. Lorsqu'elle est faible, les agrégats sont rapidement fragmentés par la pluie et vont fermer les cavités du sol, réduisant parfois fortement l'infiltration de l'eau.

La battance, directement liée à la stabilité structurale de la surface, est le phénomène menant à la formation d'une croûte (ou plaque homogène) à la surface du sol sous l'action de la pluie. Cette croûte est une fine couche et se caractérise par une faible porosité et une forte résistance à la pénétration. La croûte de battance, en agriculture, est la cause de ruissellements favorisant l'érosion des terres et elle peut aussi limiter la germination des semences (Richard et Boiffin 1990; Valentin et Bresson 1998; Kozlowski 2012; White 2006).

Une surface de terre à l'état fragmentaire passe par deux grandes étapes différentes sous l'action de la pluie (figure 6). D'abord il y a formation d'une croûte structurale. Lors de cette étape l'infiltrabilité de la surface diminue. Ensuite une croûte sédimentaire, pour laquelle l'infiltrabilité est minimale, lui succède. La croûte sédimentaire résulte d'un tri granulométrique des particules de sol lié à l'accumulation d'eau en surface lors d'épisodes pluvieux (Boiffin et Bresson 1990). Il est possible de savoir facilement à quelle étape une

surface se trouve en observant sa morphologie. On appelle cet aspect de la surface le « faciès ». Chaque faciès possède des propriétés propres.

Le phénomène de battance est lié au détachement des particules de sol et à leur déplacement à la surface du sol. (1) D'abord, le détachement des particules est causé par différents phénomènes : (a) la désagrégation des agrégats par l'augmentation de la pression interne lors de l'humectation d'agrégats secs, (b) la désagrégation due à l'impact des gouttes de pluie, (c) la fissuration par gonflement et rétraction et (d) des phénomènes de dispersion physico-chimique. Ces phénomènes ont plus ou moins d'importance en fonction du type de sol et de son état d'humidité. (2) Ensuite, la formation de la croûte dépend du transport des particules et de leur sédimentation. (3) Enfin le compactage dû aux impacts de gouttes de pluie est parfois considéré comme important (Boiffin et Bresson 1990).

L'érosion causée par le ruissellement en terres agricoles peut mener en aval à des dégâts matériels pouvant être associés à des risques environnementaux. En amont, au niveau de la parcelle, la formation de ravines entraîne la perte progressive de la couche superficielle. Une érosion chronique diminue durablement l'épaisseur du sol et sa fertilité. A plus court terme, la culture peut être impactée par un arrachage des plantes en amont et un enfouissement sous la terre en aval. De plus, les éléments présents dans les horizons de surface (pesticides, fertilisants et éléments métalliques) sont entraînés vers l'aval et peuvent mener à de la phytotoxicité, à l'altération de la qualité des eaux et/ou à l'eutrophisation des eaux superficielles (Baize, Duval, et Richard 2013).

a. Facteurs influençant la stabilité structurale et la battance, l'érosion et la germination

La teneur en MO, la présence de résidus en surface et la stabilité structurale limitent la vitesse de formation d'une croûte de battance. A l'inverse, une texture plutôt argilo-limoneuse, un sol travaillé finement, une forte intensité de pluie et un sol sec avant la pluie sont des facteurs favorables à la formation rapide d'une croûte de battance. (Boiffin 1984; Valentin et Bresson 1997; White 2006). L'état hydrique des agrégats et la répartition des calibres (ou « finesse de travail du sol ») sont deux paramètres majeurs de la sensibilité d'un sol à la battance. Enfin, les sols limoneux et sablo-limoneux sont considérés comme ayant une faible à très faible stabilité structurale et une forte sensibilité à la battance (Baize 2018).

Plusieurs paramètres de la surface d'un sol influent sur l'infiltrabilité d'une parcelle et par conséquent sur le risque de ruissellement et à terme d'érosion. Parmi ces facteurs, on retrouve : l'état d'avancement de la croûte de battance, la rugosité de la surface, la couverture du sol par la végétation ou la MO, la présence de macropores, l'activité biologique du sol, la présence d'algues, de pierres et enfin de traces de roue à la surface du sol (Le Bissonnais et al. 2005).

L'effet de la battance sur la germination puis la levée des semences est souvent mentionnée comme l'un des aspects négatifs du phénomène. Pour assurer une bonne germination, les semences ont besoin d'une certaine température et humidité, d'un certain taux d'oxygène et de pouvoir émerger sans rencontrer d'obstacle infranchissable. La croûte de battance agit comme obstacle à la levée mais aussi, limite le renouvellement de l'oxygène

sous sa surface lorsqu'elle est saturée en eau. Lors du dessèchement, la croûte se fissure et l'oxygène revient dans le sol (Richard et Boiffin 1990).

Les micro-organismes jouent un rôle dans la disponibilité en oxygène. Ils consomment 100 à 1000 fois plus d'oxygène que la semence et en consomment d'autant plus que de la MO est disponible.

En ce qui concerne les obstacles mécaniques, la capacité de la plantule à émerger de la croûte dépend de la poussée qu'elle est capable d'exercer (le blé a une force d'émergence de 30 à 35 g et la betterave 5 à 10 g). Une plantule peut parvenir à traverser la croûte, la percer ou utiliser une fissure pour rejoindre la surface. Si elle n'y parvient pas, elle meurt.

b. Indicateurs – protocoles

Stabilité structurale

Il existe une méthode de mesure de la stabilité structurale reconnue et développée par Le Bissonais en 1996 (Baize 2018). Elle se base sur une observation de la réaction d'agrégats de sol à l'action de l'eau sous différents régimes. L'objectif est de reproduire les conditions d'humectation d'un sol sec exposé à la pluie.

Il existe d'autres méthodes plus simples qui utilisent ce même concept d'exposition d'agrégats à l'action de l'eau mais en se basant sur des critères visuels et un système de classe. Il s'agit par exemple du « Slake test » ou du test « USDA » (Interreg IV 2012).

Sensibilité à la battance

Les mesures mentionnées ci-dessus pourraient être utilisées dans le but d'évaluer la sensibilité d'un sol à la battance, étant donné son lien avec la stabilité des agrégats (Baize 2018).

Il existe d'autres approches plus spécifiques pour évaluer la battance. Il est possible d'une part d'observer directement des changements morphologiques en surface, par exemple avec l'approche de Boiffin (1984) ou la méthode FCR (Faciès-Couvert-Rugosité) (Evrard 2008; Le Bissonais et al. 2005). D'autre part, il est possible d'adopter une approche indirecte se basant sur la capacité d'infiltration du sol ou l'augmentation de sa résistance à la pénétration (Valentin et Bresson 1997; 1998).

Boiffin (1984) a réalisé le suivi de caractères morphologiques de la surface de sols agricoles sous l'action de la pluie dans le but d'étudier la battance. Il a mis au point différentes méthodes de suivi concernant : la surface de plaque homogène, la taille des agrégats en surface (mesurée directement : D_{min} , *le plus petit agrégat non encore incorporé à la plaque* ; ou calculée : D_{lim} , *le dernier calibre d'agrégat incorporé à la plaque*) et l'aspect général de la surface (les faciès). Ces paramètres évoluent en fonction de la pluie cumulée et de son énergie cinétique cumulée.

Il propose dans sa thèse un modèle de remplissage interstitiel pour représenter de façon simplifiée l'évolution de l'état de la surface du sol au cours de la phase de formation de la croûte. L'hypothèse de ce modèle est que les plus petits agrégats sont incorporés à la plaque en premier. L'indicateur morphologique D_{lim} est lié à ce modèle, il représente la taille limite théorique au-delà de laquelle les agrégats ne sont pas encore incorporés à la plaque

homogène. La conception du modèle implique que D_{lim} est lié à la surface de plaque ainsi qu'à l'épaisseur des plaques. D_{lim} a plusieurs avantages : il est indépendant de la répartition initiale des agrégats de surface et est corrélé à la diminution de l'infiltrabilité et à l'énergie cinétique cumulée de la pluie (Monnier, Boiffin, et Papy 1986; Boiffin 1984).

Dans sa thèse, Boiffin (1984) considère l'indicateur D_{lim} comme plus intéressant que D_{min} car moins lié à la distribution initiale des agrégats du sol.

Cependant, dans d'autres articles publiés plus tard

par lui ou par d'autres personnes, D_{min} continue à être utilisé et est considéré comme ayant une évolution indépendante de la distribution initiale des calibres d'agrégats en surface (Boiffin et Bresson 1990; Boiffin 1984; Monnier, Boiffin, et Papy 1986; Valentin et Bresson 1998). Il est possible qu'il y ait eu une certaine confusion autour des termes D_{lim} et D_{min} chez certains auteurs et aussi que D_{min} ait été conservé pour son apparente facilité à être mesuré.

Enfin, concernant la notation des faciès (figure 6), à l'heure actuelle quatre faciès différents peuvent être décrits (Boiffin et Bresson 1990; Evrard 2008; Le Bissonnais et al. 2005) :

- Le faciès F0 : état fragmentaire initial du sol. Toutes les particules de surface sont distinctes les unes des autres.
- Le faciès F1 : phase de croûte structurale. Elle est séparée en deux phases :
 - Le faciès F11 : état fragmentaire altéré de la surface. Présence exclusive d'une croûte structurale.
 - Le faciès F12 : apparition localisée de croûtes sédimentaire.
- Faciès F2 : état continu avec croûte sédimentaire.

1.3.1.3.2. Compactage du sol

a. Tassement, compactage et semelle de labour

Le tassement est un terme général regroupant différents processus : le scalpage, l'orniérage et le compactage. Le compactage (ou la compaction) est responsable du tassement au sens restreint du terme, c'est-à-dire qu'il correspond à une perte de macroporosité du sol liée au rapprochement des particules de sol sous l'effet d'une pression (Mathieu et Lozet 2011; Hamza et Anderson 2005; Roger-Estrade, Boizard, et Richard 2013).

Le tassement affecte généralement la couche de sol travaillé. Cependant, en cas de fortes contraintes, il peut se propager au-delà de la semelle de labour et l'on parle alors de tassement (ou compactage) profond (Roger-Estrade, Boizard, et Richard 2013). Le compactage profond des sols est très persistant et le retour en arrière de façon naturelle peut

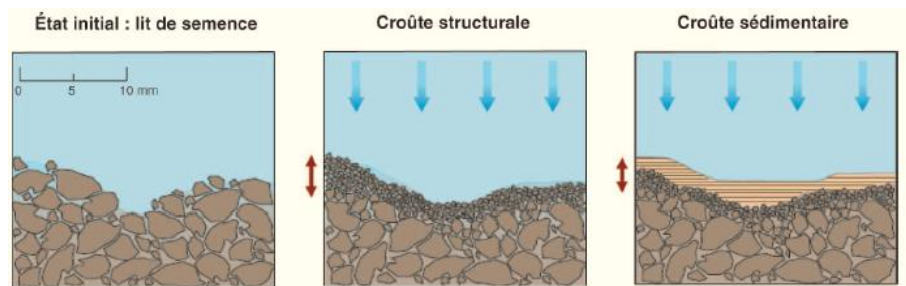


Figure 6: Évolution de la surface d'un sol agricole fragmenté. Image de gauche : représentation de la couche de surface d'un lit de semence au faciès F0. Image centrale : faciès F1. Image de droite : faciès F2. Source (Denis Baize 2013).

s'avérer extrêmement lent (Hamza et Anderson 2005). L'horizon induré de la semelle de labour est lié au tassement profond. Dans les cultures, le tassement en profondeur est principalement lié au passage des machines.

La réduction de l'espace poral a de nombreuses répercussions sur le sol : augmentation de la densité apparente, réduction de la capacité d'infiltration, anoxie, réduction de la minéralisation et dénitrification. Ces sols compactés mènent à de plus faibles rendements, liés à des difficultés pour la plante d'accéder aux nutriments, à l'eau et à l'oxygène ainsi qu'à une pression accrue des pathogènes liée à l'anoxie (Hamza et Anderson 2005; Tow et al. 2011). La racine a des difficultés à se déplacer dans les sols compactés.

b. Facteurs influençant le tassement

La sensibilité des sols au tassement augmente avec son humidité et diminue avec sa densité apparente. Dès lors, la réalisation de certains travaux à des taux d'humidité trop élevés intensifie le phénomène, et ce d'autant plus que la densité apparente du sol est faible (Boiffin, Guerif, et Stengel 1990; Hamza et Anderson 2005).

Plusieurs pratiques sont reconnues pour lutter contre le compactage par augmentation de la porosité du sol : l'apport de MO, le décompactage mécanique (effet peu durable) et l'insertion de plantes à racines puissantes dans la rotation (Hamza et Anderson 2005).

La MO du sol joue un rôle à plusieurs niveaux sur les agrégats : elle lie les particules de sol entre elles, réduit leur mouillabilité et améliore leur cohérence. Cependant, les effets de la MO sont fonction du type de MO, du ratio C:N et du degré de résistance de la MO à la décomposition. (Hamza et Anderson 2005). Elle joue aussi un rôle tampon qui limite la profondeur atteinte par la compaction. Les effets de la MO sur les particules de sol restent cantonnés aux horizons travaillés et n'ont pas d'impact sur le compactage profond du sol (Hamza et Anderson 2005).

Le décompactage (travail profond du sol avec un décompacteur) est une solution pouvant amener des résultats intéressants sur la structure du sol et notamment l'infiltration de l'eau mais ils ne sont pas durables : les sols décompactés sont à nouveau compactés au bout de quelques années si rien n'est changé dans les pratiques (Hamza et Anderson 2005).

Pour réduire le compactage, il existe aussi des pratiques minimisant l'impact du tracteur sur le sol : la réduction du nombre de passages dans le champ, la réalisation de plusieurs opérations en un seul passage, le passage systématique aux mêmes endroits, les pratiques de faible travail du sol, le poids des engins, la répartition du poids et enfin le type de pneumatiques, leur niveau de pression et la vitesse de déplacement (Hamza et Anderson 2005).

c. Indicateurs - protocoles

La densité apparente, la résistance du sol à la pénétration et le taux d'infiltration de l'eau dans le sol sont des mesures classiquement utilisées permettant de caractériser différents aspects du compactage du sol (Hamza et Anderson 2005).

La méthode « VESS » (*Visual Evaluation of Soil Structure*), ou « bêche » (Roger-Estrade, Boizard, et Richard 2013), est souvent utilisée pour évaluer la qualité structurale globale d'un

profil de sol d'une trentaine de centimètres (Guimarães, Ball, et Tormena 2011) et observer le phénomène de compactage (Guimarães et al. 2017).

1.3.2. SE liés au contrôle naturel des ennemis de la culture

Des études estiment que le déficit le plus important dans les bénéfices économiques des fermes est attribué aux ravageurs et maladies (Chabert 2017). Avec les adventices, ces bioagresseurs pénalisent le rendement, mais également la stabilité des rendements entre les années. Dès lors, les SE de régulation des ennemis de la culture présentent un grand intérêt pour le monde agricole et les chercheurs.

1.3.2.1. Présence d'adventices

1.3.2.1.1. Concepts importants

a. Définitions

La « flore adventice » peut être définie comme suit : l'ensemble des plantes herbacées ou ligneuses indésirables à l'endroit où elles se trouvent (Gasquez 2018). Cette flore adventice est présente sous deux formes différentes sur une parcelle : une partie se trouve dans la banque de graines et une partie sous forme de plantes ayant germées à la surface.

La flore adventice des cultures est constituée d'espèces géophytes⁴ et thérophytes⁵ ayant des écologies très différentes. Les géophytes - rumex, chardon, chiendent... - survivent dans le sol sous forme de racine ou rhizome et peuvent se multiplier par fractionnement involontaire lors de travaux du sol. Les thérophytes - séneçon, vulpin... - survivent sous forme de semence en se maintenant dans la banque de graines. Les thérophytes peuvent être classées en fonction de leur période de germination préférentielle : les automnales, les hivernales, les printanières, les estivales et les indifférentes (Gasquez 2018).

b. Services écosystémiques et nuisibilité

La diversité fonctionnelle des communautés d'adventices influe positivement (+) ou négativement (-) sur plusieurs SE : la production de biens cultivés (-), le maintien des organismes utiles (+), la couverture du sol (+), la conservation de la biodiversité (+) et la conservation des espèces à forte valeur patrimoniale (+) (Kazakou et al. 2018).

Dans la caractérisation des SE, l'accent est généralement mis sur la diversité fonctionnelle, obtenue en attribuant des rôles écologiques aux espèces, plutôt que la diversité spécifique, obtenue par simple comptage des espèces (Kazakou et al. 2018). Une étude permet d'accéder à des ressources concernant les caractères fonctionnels de nombreuses plantes (Taugourdeau et al. 2020).

A côté de ces SE, il est possible d'établir une classification des nuisibilités liées à la présence d'adventices sur une parcelle agricole (Cordeau, Chauvel, et Guillemain 2018). Selon cette classification, on sépare nuisibilité primaire et secondaire. Dans la nuisibilité primaire des adventices, on retrouve :

⁴ Plante dont les organes de multiplication sont enfouis dans le sol.

⁵ Plante annuelle à cycle plus ou moins court dont les organes de survie sont exclusivement les semences.

- La nuisibilité primaire directe. Elle comprend les pertes de rendement liées à l'allélopathie, au parasitisme et à la compétition pour les ressources limitantes.
- La nuisibilité primaire indirecte. Elle comprend la baisse de l'état sanitaire des cultures, les coûts liés aux travaux culturaux, les gênes à la récolte, le réensemencement et la baisse de la qualité de la récolte.

Enfin, la nuisibilité secondaire consiste en la propagation des adventices dans le paysage et l'augmentation du stock semencier général.

1.3.2.1.2. Facteurs influençant les adventices

La communauté d'adventices d'une parcelle est le reflet des pratiques agricoles mises en place sur la parcelle ainsi que de son environnement global. Les espèces adaptées aux pratiques se maintiennent ou progressent tandis que les espèces moins adaptées régressent.

Cette communauté, issue de l'application de filtres, aura un impact en termes de services écosystémiques (Kazakou et al. 2018).

Ces filtres sont divers et peuvent influencer sur différentes étapes du cycle des adventices. Le tableau 5 fournit une liste des pratiques et autres facteurs influant sur les communautés d'adventices. L'annexe 1.3.2.1. contient un schéma des leviers de contrôle des adventices en agriculture.

Deux facteurs peuvent influencer sur la nuisibilité des adventices pour la culture : leur densité et leur stade phénologique (Cordeau, Chauvel, et Guillemain 2018). La densité d'infestation d'une culture est l'expression du potentiel d'infestation, c'est-à-dire de la banque de graines. Cette expression est fonction de la culture, de l'itinéraire phytotechnique et des conditions climatiques (Lonchamp et Barralis 1988).

Tableau 5: Paramètres et pratiques influant les communautés adventices (Chauvel et al. 2018). Certains effets de ces pratiques sur les adventices sont disponibles dans un tableau en annexe 1.3.2.2.

Pratiques liées à la/au ...	Paramètres et pratiques influant sur la composition des communautés d'adventices
Rotation	<ul style="list-style-type: none"> • Diversité des cultures dans la rotation • Diversité des dates de semis dans la rotation • Prairie temporaire dans la rotation • Culture de printemps ou d'été dans une succession culturale à base de céréales d'hiver
Semis	<ul style="list-style-type: none"> • Semis tardif • Semences certifiées • Densité de semis
Désherbage	<ul style="list-style-type: none"> • Herse étrille et houe rotative • Binage • Désherbage chimique et type de produit utilisé
Compétitivité de la culture	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité en azote au début du cycle cultural • Présence de résidus végétaux en surface • Variété compétitives et densité de semis
Travail du sol	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité de travail du sol • Type de travail du sol (retournement, superficiel, ...) • Faux semis
Récolte	<ul style="list-style-type: none"> • Récupération des menues pailles lors de la récolte de céréales

1.3.2.1.3. Indicateurs – protocoles

Les différentes mesures pouvant être réalisées sur les adventices pour expliquer les pertes de rendement sont les suivantes : la densité, la surface foliaire relative, la biomasse produite, le rapport biomasse adventice/culture (Cordeau, Chauvel, et Guillemain 2018), le

recouvrement, le nombre d'espèces (Dessaint 2018) et la phénologie (INRA 2017b). Les résultats de ces mesures varient en fonction de la période du relevé.

La densité d'infestation est le nombre d'individus par unité de surface. En ce qui concerne la flore levée, elle peut être approchée par une notation visuelle selon une échelle d'abondance comme l'échelle Barralis (Dessaint 2018; Lonchamp et Barralis 1988). La densité est considérée comme ayant un faible pouvoir explicatif seule.

La surface foliaire relative et les mesures liées à la biomasse sont quant à elles considérées comme plus intéressantes. La biomasse des adventices peut aller jusqu'à expliquer 30% des pertes de rendement dues aux adventices en céréales d'hiver (Cordeau, Chauvel, et Guillemain 2018). La combinaison de plusieurs indicateurs permet de mieux expliquer l'impact des adventices sur le rendement (Florez et al. 1999).

Le potentiel d'infestation se traduit par la quantité de diaspores (semences et bourgeons viables) dans le sol (Lonchamp et Barralis 1988). Les mesures rigoureuses du stock semencier d'une parcelle sont réalisées à partir de carottes de sol (Dessaint 2018). En champ, la flore levée sur tout le cycle d'une culture représente en moyenne 10% du stock semencier (Dessaint, Chadoeuf, et Barralis 1997).

1.3.2.2. Présence de maladies cryptogamiques

La présence et la sévérité des maladies cryptogamiques dans les cultures est déterminé par l'interaction entre trois éléments : l'agent phytopathogène, la plante hôte et l'environnement (Agrios 2004). Les agents phytopathogènes sont capables d'infecter un certain spectre de plantes, et lorsque les conditions environnementales sont favorables, ils peuvent déclencher des réactions chez celles-ci. Ils induisent des modifications de la physiologie de la plante, qui s'expriment à travers des symptômes.

1.3.2.2.1. *Maladies en froment et épeautre*

Un grand nombre d'agents cryptogamiques peuvent provoquer des maladies fongiques sur le blé tendre, ou froment, (Decarrier 2017), dont les principales sont résumées à la figure 7. La septoriose des feuilles du blé tendre en est l'une des majeures, au niveau mondial et européen (Fones et Gurr 2015), mais également belge (Livre Blanc Céréales 2017) et français (Decarrier 2017). Il s'agit de la maladie foliaire la plus dévastatrice du froment en Wallonie, provoquée par *Zymoseptoria tritici* (espèce dominante) et *Septoria tritici* (rencontrée de manière sporadique dans les champs) (Livre Blanc Céréales 2017). Elle est en effet très fréquente et fortement nuisible sur le froment (Masson 2012), mettant en péril son rendement, mais également sa qualité - contenu en protéines et en gluten - (Castro et Simón 2016). En France, sa nuisibilité moyenne interannuelle a été évaluée à 17 quintaux/ha, et peut atteindre jusqu'à 50 quintaux/ha dans les situations les plus exposées (Masson 2012). Selon le Livre Blanc des Céréales, aucune variété de froment ne lui est totalement résistante. En outre, de par la rapidité d'adaptation de son pathogène principal, elle est devenue résistante à la plupart des fongicides. L'épeautre (*T. aestivum spelta*) et le froment (*T. aestivum vulgare*) étant tous deux des sous-espèces de *Triticum aestivum*, ils sont sensibles aux mêmes agents pathogènes.

Principales maladies du blé tendre	Incidence des techniques culturales mises en œuvre							
	Destruction des repousses (1)	Rotation	Travail du sol/ enfouissement et/ou broyage des résidus	Date de semis (2)	Densité de semis	Fertilisation azotée	Choix variétal	Mélanges variétaux
Piétin-verse	+	+++	+	++	+	+	+++	
Oïdium	+		=	-	+	++	+++	+
Septorioses		+/=	+	++	=/+	=/+	++	
Rouille jaune	+		=	-/+	+	++	+++	+
Rouille brune	+		=	++	=/+	++	+++	+
Fusarioses épis		+++	+++	+	+	+	++	

(1) la gestion des repousses par des opérations de déchaumage influence la survie estivale de la rouille brune.

(2) des semis tardifs peuvent favoriser l'oïdium et la rouille jaune et à l'inverse réduire le développement de la septoriose ou de la rouille brune.

Légende : +++ forte ++ moyenne + faible = sans effet - effet négatif

Figure 7 : Incidence des techniques culturales sur la pression en maladies en froment (Decarrier 2017)

1.3.2.2. Facteurs influençant la présence et la sévérité de la septoriose

Des facteurs climatiques et agronomiques (figure 7) peuvent influencer l'établissement de la septoriose en froment.

a. Le climat

Des températures et une humidité insuffisantes limitent le développement de la septoriose des feuilles. Elle se propage principalement sur la plante par les éclaboussures des gouttes de pluie. De ce fait, les événements pluvieux en début de croissance (Fones et Gurr 2015) et à la montaison favorisent son développement dans la culture (Decarrier 2017).

b. Les pratiques culturales

Le choix variétal influence grandement l'infection du froment et de l'épeautre par la septoriose (Decarrier 2017; Crémer, Bernes, et Escarnot 2020). Les variétés résistantes limitent les dégâts de la septoriose et sont considérées comme le premier levier agronomique (Fones et Gurr 2015).

Les semis tardifs de froment échappent aux premières contaminations, réduisant l'inoculum en sortie d'hiver (Decarrier 2017). Une date de semis plus précoce expose le froment à des conditions thermiques et pluviales plus propices à l'établissement de la septoriose (Fones et Gurr 2015). En parallèle, la densité de semis influence également la pression de maladies : une densité élevée favorise l'infection par le pathogène (Decarrier 2017).

La présence de résidus en surface pourrait accroître les chances d'infection. Un travail d'enfouissement de ceux-ci permettrait donc de les diminuer.

De manière générale, les rotations permettent également de diminuer la pression en maladies (Chabert 2017).

1.4. Objectifs

L'objectif de ce mémoire s'inscrit dans un cadre plus large qui est celui de la thèse de L. Leveau visant à : « identifier, via une approche collaborative et multidisciplinaire, si certains systèmes de grandes cultures appliqués actuellement dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse wallonne se rapprochent du modèle conceptuel théorique du remplacement des intrants issus de ressources non renouvelables par des services agro-écosystémiques, tout

en maintenant au même niveau ou en améliorant les aspects liés aux dimensions économiques et sociales du métier d'agriculteur.ice ». Dans ce contexte, il débute l'étude des 60 champs qui seront analysés au cours de trois années de thèse en s'intéressant aux 20 premiers.

Pour cela, une diversité de systèmes agricoles - conventionnel ou raisonné, biologique, de conservation ... - et de pratiques agricoles (labour, traitements phytosanitaires ...) sont explorés. Cependant, contrairement aux nombreuses études comparant des **systèmes cultureaux** tels que le biologique et le conventionnel, l'objectif ici est d'étudier plus spécifiquement les **pratiques culturelles** (PC). Cela pour différentes raisons :

Premièrement, au sein d'un même système cultural, les combinaisons de pratiques peuvent varier grandement et de façon différente en fonction de l'aspect auquel on s'intéresse, tels que le travail du sol ou le contrôle des maladies. Au niveau des pratiques, deux systèmes cultureaux différents peuvent se rapprocher sur certains points mais être très éloignés sur d'autres. Les agriculteurs s'inscrivant dans un même système cultural possèdent donc des sets de pratiques très hétérogènes.

Deuxièmement, d'un point de vue temporel, cette classification n'est pas toujours satisfaisante car la durée depuis laquelle le système est implémenté sur une parcelle n'est pas toujours prise en compte, alors qu'elle est susceptible d'influencer les résultats des indicateurs, et donc de biaiser la détermination des liens de corrélation.

L'étude des pratiques culturelles permet de surpasser ces difficultés et propose une nouvelle caractérisation des agricultures en utilisant des indicateurs plus fins, pouvant prendre des valeurs modulables dans le temps, et comparables entre toutes les fermes.

L'objectif général de ce mémoire est d'identifier les liens existants entre l'itinéraire cultural et les fournitures de SE intrants sur des parcelles de grandes cultures brabançonnaises à sol limoneux (Aba). Dans les faits, cela se traduit par la réalisation des objectifs spécifiques suivants :

- Evaluer la fourniture de services écosystémiques (SE) intrants en champ principalement à travers des méthodes de terrain ;
- Mettre au point les protocoles des expériences afin de standardiser leur utilisation pour les années de mesure suivantes ;
- Participer à la récolte de l'historique cultural auprès des agriculteurs afin de permettre leur transformation en une série d'indicateurs de PC pertinents ;
- Analyser les liens potentiels entre les PC et les SE

2. Matériel et méthode

2.1. Réalisations antérieures au mémoire

2.1.1. Constitution du réseau d'agriculteurs et sélection d'indicateurs d'intérêt

Un réseau de 20 agriculteurs a été constitué en 2019 par L. Leveau dans le cadre de sa thèse. L'objectif de ce réseau était double :

D'une part, les concertations entre L. Leveau, N. Biot, les agriculteurs et des experts scientifiques ont permis de définir un set d'indicateurs cohérent et approprié à l'évaluation de plusieurs SE sur le terrain (Leveau, Falys, et Bertin 2019a; 2019b; Biot 2020).

En ce qui concerne le choix d'indicateurs, une attention particulière a été accordée à la compréhensibilité et l'intérêt pour les agriculteurs. Aussi, un ordre de préférence a été établi en fonction du type d'indicateur selon Boeraeve (2017). Ainsi, les indicateurs de type « bénéfique » ont été privilégiés car ils permettent de mieux rendre compte de la manière dont des changements dans l'écosystème affectent l'humain et la société. Lorsque ceux-ci n'étaient pas disponibles, des indicateurs de type « fonction », et enfin « état », ont été choisis.

Pour ce qui est des protocoles, ils ont été sélectionnés par L. Leveau sur base d'un compromis entre les différents critères suivants : la rapidité d'exécution, la simplicité, le coût et la rigueur. Les méthodes VESS et USDA (points 2.4.3.4. et 2.4.3.6.) et ont été évaluées par rapport à ces paramètres par N. Biot (2020).

D'autre part, ce réseau de fermes a servi de base pour la création de l'échantillon de parcelles qui sont analysées dans la thèse de L. Leveau.

Le but étant de récolter des avis et d'étudier des pratiques variées, une attention particulière a été accordée à la diversité des profils d'agriculteurs dans le réseau. Une série de critères ont donc été utilisés pour sélectionner les participants, tels que la taille de la ferme, le type de ferme (mixte ou culture uniquement) ou encore le type de système ou modèle cultural (agriculture de conservation, agriculture biologique, agriculture raisonnée, non-labour...). D'un point de vue logistique, leur proximité avec Louvain-la-Neuve figurait également parmi les critères. Finalement, les agriculteurs du réseau se sont aussi engagés à fournir les informations concernant l'historique cultural de la parcelle étudiée.

Suite au protocole de sélection, douze indicateurs de SE ont été retenus pour être analysés de 2020 à 2023 dans le cadre de la thèse de L. Leveau (tableau 6).

Indicateurs de SE étudiés	Type d'indicateur
Incorporation de la MO par les vers de terre	Fonction
Dégradation de la MO par les micro-organismes du sol	Fonction
Teneur en MO stable et labile	Etat & Fonction
Stabilité des agrégats	Fonction
Evolution de la croûte de battance	Bénéfice
Compaction du sol	Fonction
Présence d'adventices	Bénéfice
Présence de maladies	Bénéfice
Activité des auxiliaires des cultures	Fonction
Rendement en grain	Bénéfice
Stock de carbone dans le sol	Bénéfice
Biodiversité des plantes cultivées	Bénéfice

Tableau 6: SE étudiés dans la thèse de L. Leveau. La colonne « type d'indicateur » fait référence à la classification des SE de Boeraeve et al. (2017). En orange (1-6) : SE liés au sol. En vert (7-9) : SE liés aux ennemis de la culture. En jaune (10) : SE liés à la production. En gris (11-12) : SE rendus à la société. Les SE en gras font l'objet de ce mémoire et seront développés plus amplement.

2.2. Organisation générale

2.2.1. Domaine spatial de la recherche

Chez chacun des 20 agriculteurs, une parcelle a été sélectionnée pour cette année 2020-2021. Elles se trouvaient maximum à 40 minutes en voiture de Louvain-la-Neuve. Dans chaque parcelle, une zone carrée d'expérimentation de 1 ha a été installée. Ces zones d'expérimentation ont dû répondre à une série de contraintes afin de fournir un cadre de base homogène pour la recherche :

- Posséder un sol de type « Aba » selon la carte numérique des sols de Wallonie, qui correspond à un sol limoneux à drainage favorable avec un horizon B textural (Laboratoire de Géopodologie – FUSAGx 2007). Ces sols sont constitués de 65 à 100 % de limon, 0 à 30 % d'argile et 0 à 12 % de sable.
- Posséder une pente de maximum 10 %
- Posséder un historique cultural homogène, c'est-à-dire le même itinéraire technique sur l'ensemble de l'hectare durant les 10 dernières années
- Être placée à minimum 20 mètres des bords de la parcelle
- Être emblavée en froment d'hiver ou épeautre cette année 2020-2021.

Pour les parcelles 4 et 15, n'ayant pas la possibilité de contenir un carré respectant ces différents critères, un rectangle de 118 sur 85 mètres a été retenu.

2.2.2. Etalement temporel des expérimentations et de la récupération de l'historique cultural

Deux types d'information ont été récoltés sur les parcelles étudiées :

L'historique cultural des dix dernières années a été collecté pour les 20 parcelles en trois sessions. D'abord en été 2020 (L. Leveau et A. Fockede), ensuite en hiver 2020-2021 (L.

Leveau) à la suite de désistements et finalement en juin 2021 (A. Fockedey) afin de compléter la dernière année.

Au cours de ce mémoire, six expériences en champ (figure 8) ont été réalisées. L'une d'entre elles concernant la « MO stable et labile » a été en partie réalisée par L. Leveau. En plus de ces données, celles de deux expériences réalisées par L. Leveau ont été aussi utilisées pour les analyses de résultats : « dégradation de la MO » et « présence de maladies ». Enfin, deux autres expériences de L. Leveau ne sont pas exploitées dans ce mémoire suite aux dates trop tardives de disponibilité des résultats.

2.2.3. Communication avec les agriculteurs

Au début de l'année académique 2020-2021, les agriculteurs ont reçu un récapitulatif des différentes expériences prévues sur leur parcelle. Le contact avec eux a été entretenu tout au long de l'année, et plus particulièrement au moment du semis. Cela a été important, entre autres pour démarrer les premières expériences dès le semis. A côté de cela, les agriculteurs ont été prévenus à chaque passage afin qu'il n'y ait pas de risque de traitements récents et qu'ils soient au courant des personnes présentes sur leur champ.

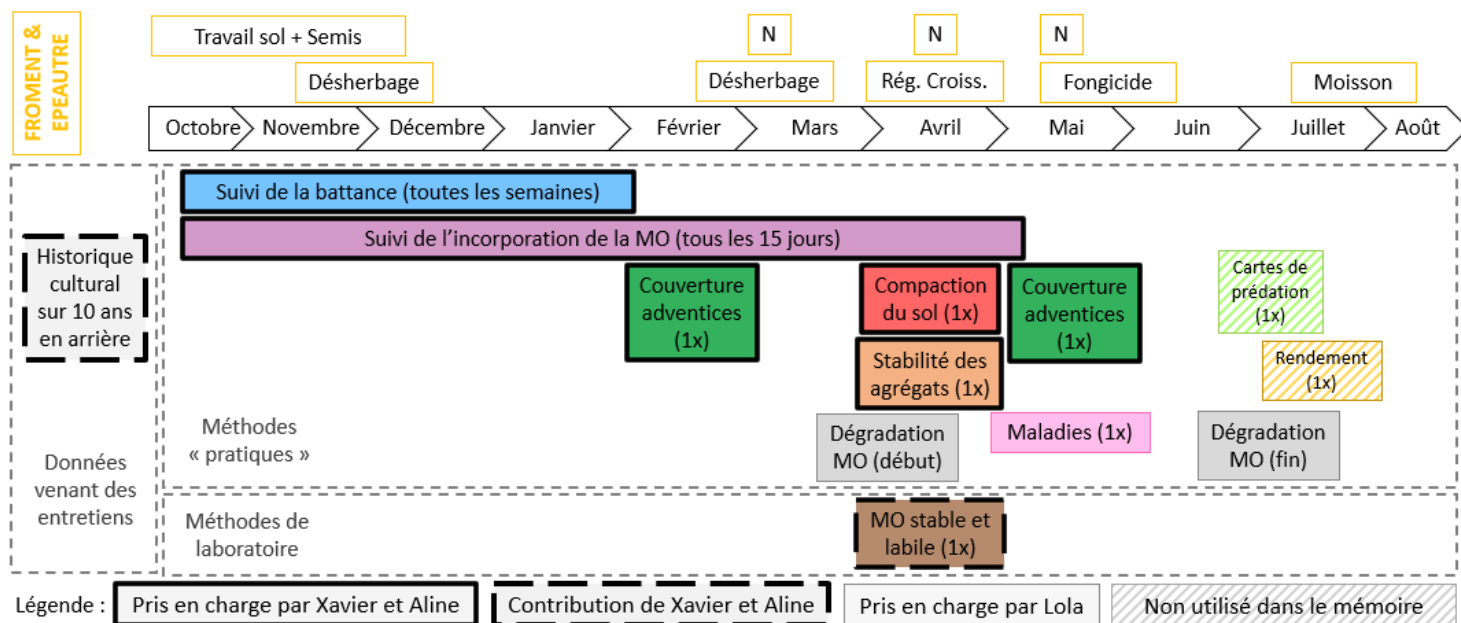


Figure 8 : Schéma temporel des pratiques culturales, expérimentations et de la prise d'information durant 2020-2021. Le code couleur attribué aux expériences est suivi tout au long de ce mémoire pour les différents tableaux. Source : adapté de L. Leveau (2020)

2.3. Collecte de l'itinéraire cultural

L'itinéraire cultural a été collecté sous forme de ligne du temps en reprenant toutes les pratiques culturales (PC) réalisées sur la parcelle depuis 2010 (annexe 2.3.1.). Elles ont été regroupées en différentes catégories d'information, conçues principalement par L. Leveau :

- Pratiques générales : termes utilisés par les agriculteurs pour caractériser leur système agricole, labellisation biologique, mesures agri-environnementales et irrigation.
- Cultures récoltées : variété, date de semis, date récolte et parties végétales restituées à la parcelle.
- Couverts : espèces, variétés et date semis.

Tableau 7 : Récapitulatif des indicateurs clés calculés à partir de l'historique cultural des parcelles entre 2010 et 2021, selon différentes catégories de pratiques culturales (PC) renseignées dans la première colonne. Sauf indication contraire, ces indicateurs ont donc été calculés sur une période de 10 ans. A chaque indicateur correspond une abréviation (utilisée dans les analyses statistiques) et le type de données obtenues : cercle noir = variable quantitative, cercle transparent = variable qualitative. SE = services écosystémiques, TP = toutes les plantes cultivées, F & A = Fertilisants et amendements et PP : produits phytosanitaires. * = Moyenne annuelle. Source : Adapté de L. Leveau.

	Indicateur	Abréviation	var	ACP1 &2_SE	ACP3_ PC
	Emploi du terme { Agriculture de conservation, Agroécologie, (oui - non) pour décrire leur système agricole Agriculture conventionnelle,	AC		☒	☒
		AE	○	☒	☒
		Aconv		☒	☒
Cultures récoltées	Nombre de familles végétales différentes récoltées *	DivFamRec	●	☒	☒
	Nombre d'espèces végétales différentes récoltées *	DivEspRec	●	☒	☑
	Nombre de cultures où plusieurs espèces sont récoltées *	EspRecAsso	●	☒	☒
	Nombre de cultures avec plusieurs variétés d'une même espèce associées (uniquement associées, pas par morceaux) *	VarRecAsso	●	☒	☑
	Nombre de cultures avec plusieurs variétés d'une même espèce récoltées, mais dont les variétés sont chacune sur un morceau de champ différent *	VarRecMorceaux	●	☒	☒
	Moyenne du nombre de variétés végétales récoltées par espèce sur toutes les saisons culturales (seules, associées et par morceaux)	VarRecTotal	●	☒	☒
	Moyenne du nombre de variétés végétales récoltées sur toutes les saisons culturales (seules, associées et par morceaux) / surface de la parcelle	VarTotal_ParSurf	●	☒	☒
	Nombre de cultures de poacées *	FreqPoaceae	●	☒	☒
	Nombre de cultures récoltées sous le sol *	FreqRecolteSol	●	☒	☑
	Nombre de cultures sarclées *	FreqSarclee	●	☒	☒
Date du semis du froment ou de l'épeautre en 2020	Date_Semis_2020	●	☒	☒	
Couverture du sol	Durée de cultures principales et dérobées *	Tps_Culture	●	☒	☒
	Durée de prairies *	Tps_Prairie	●	☒	☑
	Durée de couverts présents seuls *	Tps_Couvert	●	☒	☒
	Durée sous plantes vivantes (culture principale, prairie ou couvert) *	Tps_CultureTout	●	☒	☑
	Durée de mulchs morts suivant une culture principale ou un couvert du sol *	Tps_Mulch	●	☒	☒
Couverts	Durée sous plantes vivantes ou mulch (sol non nu) *	Tps_Soltravail	●	☒	☑
	Nombre de familles végétales de couvert différentes *	DivFamCV	●	☒	☒
	Nombre d'espèces végétales de couverture différentes *	DivEspCV	●	☒	☑
Total	Nombre moyen d'espèces associées en interculture	EspParCV	●	☒	☒
	Nombre de familles végétales cultivées différentes *	DivFamTot	●	☒	☒
Fertilisations et amendements	Nombre d'espèces végétales cultivées différentes *	DivEspTot	●	☒	☒
	Apports d'azote minéral *	NminTot	●	☒	☒
	Dose maximale d'azote minéral apportée en une fois	NminMax	●	☒	☒
	Apports d'azote organique *	NorgTot	●	☒	☒
	Apports d'azote *	NTot	●	☒	☑
	Nombre d'applications d'engrais organique *	FreqOrga	●	☒	☑
	Apports de potassium *	KTot	●	☒	☑
Travail mécanique	Apports de phosphore *	PTot	●	☒	☑
	Nombre d'années depuis le dernier retournement	AnnéesDepuis_Labour	●	☒	☑
	Retournement du sol en 2020	Labour_2020	●	☒	☒
	Fréquence des usages d'outils retournant le sol *	Freq_Labour	●	☒	☒
	Fréquence des usages d'outils mélangeant le sol sans le retourner *	Freq_Mel	●	☒	☒
	Fréquence des usages d'outils mélangeant le sol sans le retourner < 4 cm *	Freq_MelTresSup	●	☒	☒
	Fréquence des usages d'outils mélangeant le sol sans le retourner > 3 et < 16 cm *	Freq_MelSup	●	☒	☒
	Fréquence des usages d'outils mélangeant le sol sans le retourner > 15 cm *	Freq_MelProf	●	☒	☒
	Fréquence des usages d'outils fragmentant le sol sans le retourner, ni le mélanger *	Freq_Frag	●	☒	☒
	Fréquence des usages d'outils fragmentant le sol sans le retourner, ni le mélanger < 4 cm *	Freq_FragTresSup	●	☒	☒
	Fréquence des usages d'outils fragmentant le sol sans le retourner, ni le mélanger > 3 et < 16 cm *	Freq_FragSup	●	☒	☒
	Fréquence des usages d'outils fragmentant le sol sans le retourner, ni le mélanger > 15 cm *	Freq_FragProf	●	☒	☒
	Fréquence des usages d'outils hors éléments semeurs *	Freq_Outils	●	☒	☑
Profondeur moyenne de travail des outils retournant le sol	ProfMoy_Labour	●	☒	☒	
Profondeur moyenne de travail des outils mélangeant le sol sans le retourner	ProfMoy_Mel	●	☒	☑	

	Profondeur moyenne de travail des outils fragmentant le sol sans le retourner, ni le mélanger	ProfMoy_Frag	●	☒	☒
	Profondeur cumulée des travaux retournant le sol *	ProfCum_Labour	●	☒	☒
	Profondeur cumulée des travaux mélangeant le sol sans le retourner, hors éléments semeurs *	ProfCum_Mel	●	☒	☒
	Profondeur cumulée des travaux fragmentant le sol sans le retourner, ni le mélanger *	ProfCum_Frag	●	☒	☒
	Profondeur cumulée de tous les travaux du sol sauf les éléments semeurs *	ProfCum_Tout	●	☒	☑
Produits phytosanitaires	IFT moyen *	IFT	●	☒	☑
	IFT en herbicides *	IFT_herb	●	☒	☑
	IFT en fongicides *	IFT_fong	●	☒	☑
	IFT en insecticides *	IFT_insect	●	☒	☑
	IFT en régulateurs *	IFT_reg	●	☒	☒
	IFT en molluscicides *	IFT_moll	●	☒	☒
	IFT moyen en culture de froment	IFT_froment	●	☒	☒
	IFT en herbicides moyen en culture de froment	IFT_froment_herb	●	☒	☒
	IFT en fongicides moyen en culture de froment	IFT_froment_fong	●	☒	☒
	IFT en insecticides moyen en culture de froment	IFT_froment_insect	●	☒	☒
IFT en régulateurs moyen en culture de froment	IFT_froment_reg	●	☒	☒	

- Travail mécanique : type d'outils, profondeur et date d'intervention.
- Fertilisants et amendements : type de fertilisant ou amendement, quantité et date d'application.
- Produits phytosanitaires (PP) : type de produit, quantité et date d'application.

Ensuite, des indicateurs résumant ces informations ont été élaborés principalement par L. Leveau afin qu'ils soient utilisables dans des analyses statistiques (tableau 7). En ce qui concerne les traitements phytosanitaires, la notion d'indice de fréquence de traitement (IFT) a été utilisée. Elle correspond à la somme des ratio entre les doses de PP effectivement utilisées par hectare comparée à la dose maximale autorisée du PP en question, durant une campagne culturale (Syngenta 2021).

2.4. Expériences en champ

2.4.1. Plan expérimental

Le plan expérimental a été conçu à l'aide du logiciel QGIS afin de faciliter la mise en place des expérimentations sur le terrain (figure 9). Le choix des emplacements des expériences est un compromis entre les protocoles trouvés dans la littérature et la bonne couverture de l'ensemble de la zone d'expérimentation. Les deux expériences « rendement » et « prédation de graines d'adventices » ont été prises en compte pour l'élaboration de ce plan, même si ces données ne sont pas utilisées dans ce rapport.

Les coins de la zone d'expérimentation, les placettes d'expériences et les traces de roues des pulvérisateurs ont été représentés sur QGIS. Le géoréférencement des coins et des placettes des deux premières expériences - la battance et l'incorporation de la MO - a permis de marquer leur emplacement sur le terrain à l'aide d'un GPS, avec environ trois mètres de précision. Les autres expériences ont par la suite été mises en place par rapport aux coins, aux expériences déjà installées et aux traces de pulvérisateurs. Cela a été fait pour une question de gain de temps et afin de s'assurer de la distance entre expériences (précision du

GPS ~ 3 m sur champ). En effet, un écart de cinq mètres a été prévu entre celles-ci⁶ afin d'éviter quelque influence de l'expérience-même ou du déplacement des expérimentateurs. Afin de faciliter la mise en place sur le terrain et de limiter les dégâts à la culture, il a été demandé aux agriculteurs de réaliser les traces de passage juste après le semis. A l'installation et à chaque relevé de mesure, les placettes ont été atteintes en empruntant les traces de passage et ensuite en se déplaçant perpendiculairement à celles-ci jusqu'aux placettes. Lorsque les traces de passage n'étaient pas encore présentes, une estimation de leur futur emplacement a été faite grâce aux plans QGIS.

En agriculture biologique, étant donné l'absence de traces de passage, un passage a été prévu au milieu du carré (figure 9).

2.4.2. Considérations générales

Concernant l'analyse des données, deux hypothèses sont posées :

- La variance est considérée homogène au sein de la zone d'expérimentation, et donc entre les différentes placettes, pour chacune des expériences.
- L'intervalle de temps entre les relevés sur différents champs est considéré comme ayant un effet négligeable sur les résultats des observations.

2.4.3. Indicateurs de SE liés au sol

Dans cette partie, les protocoles de base issus de la littérature ne sont pas explicités dans leur entièreté, mais les éléments les plus importants sont mentionnés et les adaptations apportées précisées. Les protocoles de l'incorporation de la MO et de l'évolution de la croûte de battance ayant fait l'objet d'une adaptation importante par rapport aux informations initiales disponibles, les protocoles précis réadaptés sont disponibles en annexe. Enfin, certaines parties des protocoles (feuilles de terrain...) sont aussi présentes en annexe.

Les protocoles employés pour ce mémoire ont été en partie sélectionnés et/ou réalisés à l'aide de la base de données interne « Protocoles PEPA » (annexe 2.4.3.1.).

2.4.3.1. Incorporation de la MO

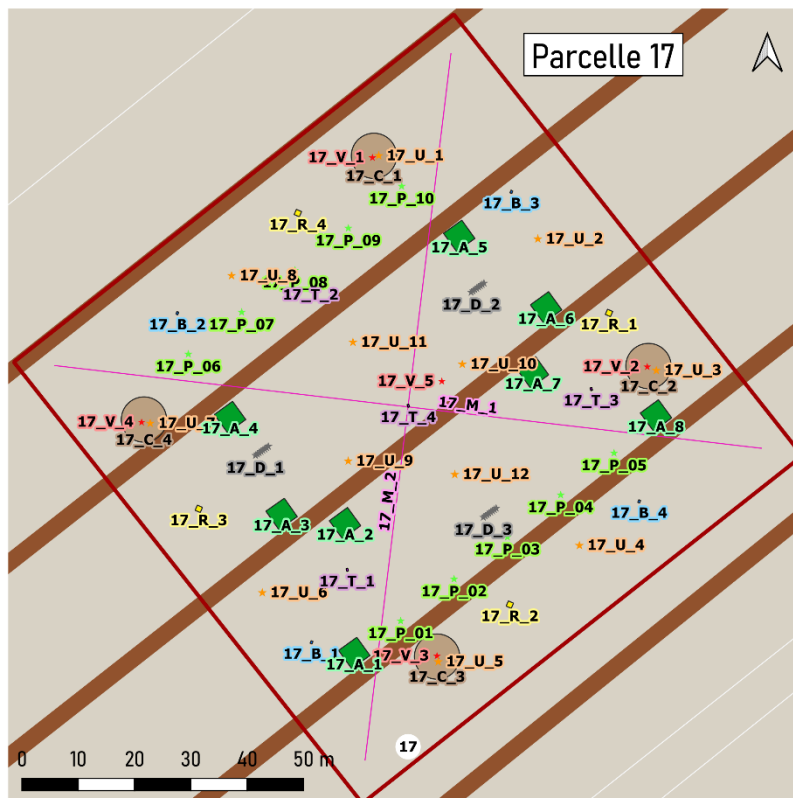
2.4.3.1.1. But de la mesure

Le protocole présenté dans ce document provient de l'observatoire participatif des vers de terre (OPVT) développé par l'observatoire de Rennes (EcoBioSoil 2021). Il a pour objectif d'évaluer l'activité des vers de terre (VDT) à la surface d'un écosystème en mesurant l'incorporation de la paille dans le sol au cours du temps à travers plusieurs indicateurs.

2.4.3.1.1. Protocole général

L'observation des indicateurs est réalisée via le suivi de paniers à VDT mesurant 50 x 30 x 10 cm et dont les surfaces sont faites en grillage à mailles carrées d'un cm de côté (figure 10). En automne, quatre paniers sont fixés au sol à l'aide d'agrafes en ligne avec un mètre de

⁶ Sauf les expériences ponctuelles « MO stable et labile », « stabilité des agrégats » et « compaction du sol » qui ont été réalisées aux mêmes endroits pour limiter les dégâts dans les cultures.



Parcelle de l'échantillon de parcelles 2020-2021 de la thèse de Lola Leveau en Wallonie (Belgique)

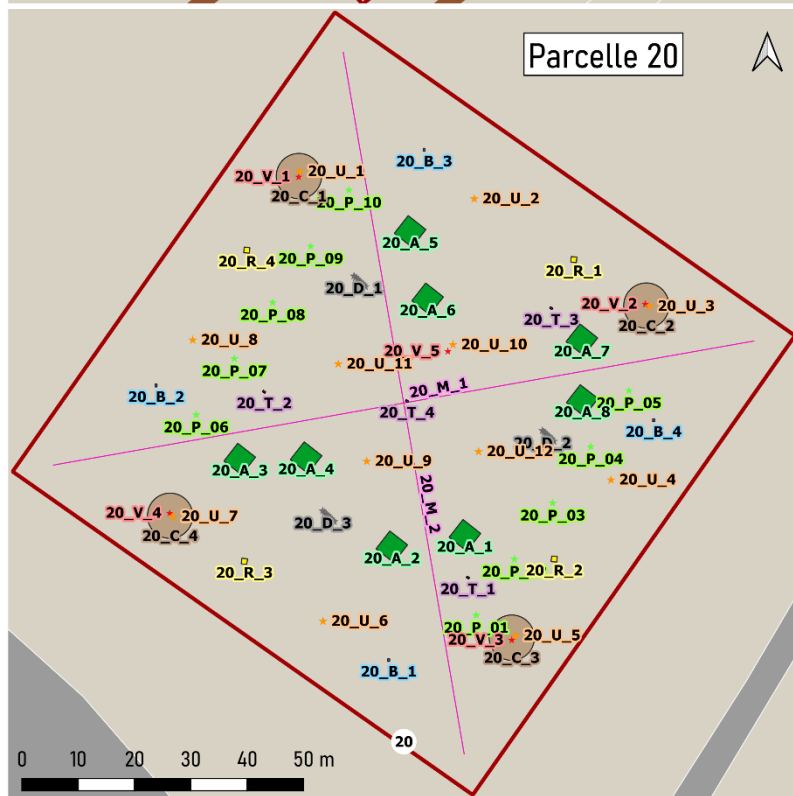
Expériences

- Présence d'adventices (8)
- Evolution de la battance (4)
- Matière organique stable et labile (4)
- Rendement (4)
- Incorporation de la matière organique (4)
- Présence de maladies (2)
- * Stabilité des agrégats (test USDA) (12)
- * Compaction du sol (test VESS) (5)
- * Dégradation de la matière organique (3)
- * Prédation de graines d'adventices (10)

Parcelles

- Zone d'expérimentation (1 ha)
- Parcelle agricole
- Zones de passage du tracteur

Données : Service Public de Wallonie (SPW)
 Système de coordonnées : EPSG 31370
 Auteurs : Aline Fockedeey et Xavier Belin (2021)



Parcelle de l'échantillon de parcelles 2020-2021 de la thèse de Lola Leveau en Wallonie (Belgique)

Expériences

- Présence d'adventices (8)
- Evolution de la battance (4)
- Matière organique stable et labile (4)
- Rendement (4)
- Incorporation de la matière organique (4)
- Présence de maladies (2)
- * Stabilité des agrégats (test USDA) (12)
- * Compaction du sol (test VESS) (5)
- * Dégradation de la matière organique (3)
- * Prédation de graines d'adventices (10)

Parcelles

- Zone d'expérimentation (1 ha)
- Parcelle agricole
- Trace de roue des pulvérisateurs

Données : Service Public de Wallonie (SPW)
 Système de coordonnées : EPSG 31370
 Auteurs : Aline Fockedeey et Xavier Belin (2021)

Figure 9 : Plan d'expérimentation pour une parcelle cultivée en agriculture non-bio (17) et en agriculture bio (20). Les traces de passage du tracteur impliquent une contrainte supplémentaire dans la disposition des expériences. Dans la légende, les nombres entre parenthèses indiquent le nombre de placettes d'expériences par champ.

distance entre eux. L'un d'entre eux est un panier témoin recouvert de tulle dont les mailles mesurent un millimètre, ne permettant pas aux VDT de passer. Cinquante grammes de paille hachée en tronçons de cinq centimètres sont introduits dans chacun des paniers, formant une couche homogène en surface du sol. L'observation a lieu environ tous les quinze jours de l'automne au printemps. Lors de chaque observation, trois informations sont collectées dans une fiche expérimentale standard (annexe 2.4.3.1.1.) :

- La part de la surface du panier recouverte par la paille (5 catégories)
- Le nombre de cabanes observables
- Le nombre de turricules observables⁷

Le protocole a été modifié dans sa disposition. Les quatre paniers à VDT ont été éloignés de façon à former un triangle isocèle sur la parcelle de 1 ha avec les trois paniers non-témoins (figure 9) aux coins du triangle et le panier témoin au centre. L'expérience a été réalisée de cette façon afin d'avoir une meilleure représentativité de l'activité d'incorporation de la MO par les VDT au sein de la parcelle. Ils ont été installés avec le côté le plus long dans le sens du semis, et remplis de paille de froment bio provenant de la ferme universitaire de Louvain. Le niveau de la terre a été égalisé afin d'augmenter la surface de contact du panier avec le sol. Dans le cas des parcelles gérées en semis direct, un coup de binette a été effectué pour éliminer le couvert en surface.



Figure 10 : Panier à vers de terre rempli de paille. Des cabanes de vers de terre très distinctes sont visibles dans les cercles rouges. Source : A. Fockedey (2021)

Les observations se sont étalées du semis de froment d'hiver jusqu'à début mai. En restant en contact avec les agriculteurs, l'installation a été réalisée au maximum quelques jours après le semis. Néanmoins, pour les champs 3, 16 et 20, à la suite de difficultés météorologiques, de changement de parcelle et de communication, elles ont été réalisées respectivement 8, 55 et 17 jours après le semis. La fréquence entre les premiers relevés a légèrement été adaptée afin de regrouper les collectes de données sur quelques jours par quinzaine.

Les cabanes et turricules étant apparues au cours du temps ont été cumulées sur 2, 4 mois et l'ensemble de la saison (jusque fin mars), générant les indicateurs suivants :

- Le nombre de cabanes apparues en 2 mois (**T_cab2 [cabanes]**)
- Le nombre de cabanes apparues en 4 mois (**T_cab4 [cabanes]**)
- Le nombre de cabanes apparues sur la saison (**T_cabF [cabanes]**)
- Le nombre de turricules apparues en 2 mois (**T_tur2 [turricules]**)
- Le nombre de turricules apparues en 4 mois (**T_tur4 [turricules]**)
- Nombre de turricules apparues sur la saison (**T_turF [turricules]**)

⁷ Une photo a systématiquement été prise afin de garder une trace. Pour de plus amples informations sur la méthodologie utilisée pour l'identification et la mesure de ces indicateurs, se référer à l'annexe 2.4.3.1.2.

En fin d'expérience, il a été décidé d'évaluer plus précisément la surface recouverte par la paille. En effet, les classes de recouvrement proposées par l'OPVT étant très larges, elles ne permettaient pas de distinguer les différents champs. La classe 1, correspondant à entre 40 % et 100 % de la surface du panier recouverte par la paille, était attribuée à presque tous les paniers du début à la fin de l'expérience. Les paniers ont été laissés un mois supplémentaire afin d'observer davantage de différences entre les champs (jusque début mai), où une dernière photo a été prise. Une estimation plus précise du recouvrement de paille a été réalisée visuellement sur base de ces photos, à l'aide de dix classes de 10 % d'écart (**T_surf [%]**).

Enfin, un nouvel indicateur a été proposé : la masse sèche de paille en fin d'expérience (début mai) (**T_poids [g de matière sèche (m.s.)]**). En effet, l'objectif étant d'évaluer la contribution des VDT à l'enfouissement de la MO, il a paru pertinent de mesurer la biomasse ayant disparu. Cela a également permis de prendre en compte la composante 3D, contrairement à la surface de paille qui semblait parfois donner des résultats peu représentatifs du volume de paille encore présent. La paille a donc été rincée à l'eau de ville, puis mise à l'étuve à 65°C durant quatre jours et finalement pesée. En fin d'expérience, il s'agit donc d'une masse sèche, contrairement aux 50 g pesés en début d'expérience à l'humidité ambiante du laboratoire au mois d'octobre. Un second indicateur lié au poids a également été calculé. Il s'agit de la soustraction du poids du témoin en fin d'expérience par la moyenne des témoins actifs sur la parcelle, reflétant ainsi la diminution de paille durant l'expérience en fonction des conditions de la parcelle (**T_dimPoids [g de matière sèche (m.s.)]**).

Le protocole de mesure précis (A. Fockedey, 2021) est disponible à l'annexe 2.4.3.1.2.

2.4.3.2. Décomposition de la MO par les microorganismes

2.4.3.2.1. Protocole d'origine et but de la mesure

Le protocole utilisé pour la mesure de la décomposition de la MO est une adaptation du Tea Bag Index (TBI) développé par les chercheurs de Teatime4Sciences (Teatime4Science 2016b). Celui-ci consiste à mesurer la quantité de thé décomposé dans le sol après 3 mois d'enfouissement de sachets de thé ou *tea bag* (TB) standardisés, comme indicateur de la dégradation de la MO. Les modifications du protocole ont été apportées par le CRA-W et Greenotec, ayant déjà réalisé des campagnes de mesures de terrain. Le choix de ce protocole permet *a priori* d'obtenir des données comparables aux mesures du CRA-W, qui a lieu dans une zone géographique semblable. C'est également la raison pour laquelle le choix s'est tourné vers les TBI plutôt que la méthode du *litter bag*.

2.4.3.2.2. Protocole général

Cette expérience a été réalisée par L. Leveau avec l'aide de T. Dagbert (technicien PEPA). L'enfouissement a eu lieu au début du mois d'avril, qui correspond à la même période que le CRA-W.

Trois lignes de 8 sachets de thé (4 thé vert Lipton et 4 thé rouge Rooibos par ligne), écartés de 40 cm les uns des autres, ont été enterrés par champ. Les 24 TB ont été enfouis à environ

8 cm de profondeur. Les sachets de thé ont été pesés avant l'expérience, puis récupérés après trois mois d'enfouissement. Ils ont ensuite été séchés à l'étuve et pesés à nouveau.

Deux paramètres (S et K) peuvent être calculés à l'issue de l'expérience, grâce aux poids initiaux et finaux des TB verts et rouges et de caractéristiques propres à ceux-ci (Teatime4Science 2016a). Ces paramètres indiquent deux phases différentes de la décomposition de la MO. En effet, durant le processus de décomposition de la MO l'on distingue la première phase, durant laquelle le taux de décomposition est élevé, de la deuxième phase caractérisée par une activité plus faible lorsque la majorité des composés labiles ont déjà été décomposés.

Le facteur de stabilisation S (**D_S [-]**) (calculé à partir des TB verts), mesure la part du matériel stabilisé (matériaux les plus récalcitrants) et donne un aperçu de la quantité de MO labile dégradée (Teatime4Science 2016a; TRANSAE 2021) (figure 11). Le taux de décomposition K (**D_K [-]**) (calculé à partir des TB rouges), évalue le taux de décomposition initial (= matériel frais, possédant encore une grande fraction de MO labile). Les paramètres S et K, dont les calculs sont disponibles en annexe 2.4.3.2.1., donnent une idée respectivement de la quantité de MO dégradée ainsi que de la vitesse de décomposition de la MO.

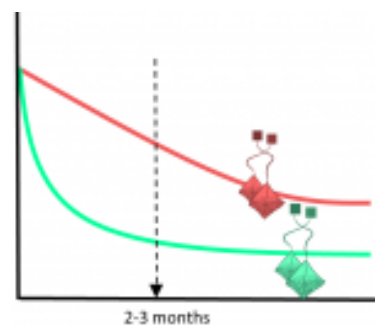


Figure 11 : Schéma de la dynamique de décomposition des Tea Bag (TB) verts (en bas), se décomposant rapidement, et rouges (en haut), dont la décomposition est plus lente. L'abscisse représente le temps depuis l'enfouissement des TB, l'ordonnée le poids sec de ceux-ci, représentant indirectement l'activité des microorganismes. La mesure des TB rouges après 3 mois indique le taux de décomposition initial de la MO. La mesure des TB verts après 3 mois exprime la part de MO stabilisée. Source: Teatime4Science (2016)

2.4.3.3. Teneurs en carbone organique stable et labile

2.4.3.3.1. But de la mesure

Le protocole suivi pour cette expérience provient du projet Carbiosol (Chartin et al. 2019). Il permet d'évaluer les teneurs en carbone organique stable et labile, et d'en calculer leur rapport qui est un indicateur reflétant la dynamique de la MO dans le sol. Cette expérience est indépendante de la saison (Chartin et al. 2019).

2.4.3.3.2. Protocole général

Quatre échantillons⁸ composites de cinq prélèvements à la tarière dispersés en croix dans un cercle de quatre mètres de diamètre ont donc été prélevés par champ. La profondeur des trous était de 30 cm, sauf dans le cas où une semelle de labour était rencontrée. Le prélèvement s'est alors limité à la zone homogène au-dessus de celle-ci. De ce mélange composite, environ 1 L de terre a été séché à l'air libre durant une semaine. La suite des manipulations en laboratoire a été réalisée par L. Leveau en suivant le protocole Carbiosol.

Deux granulométries de terre différentes (< 2 mm et < 20 µm) ont été obtenues. Leur teneur en carbone total (C_{tot}) et inorganique (C_{inorg}) a été mesurée, permettant d'en déduire

⁸ Ce nombre d'échantillon a été déterminé *via* une analyse de taille d'échantillon réalisée en mars 2021 par L. Leveau dans une parcelle de la ferme universitaire similaire aux parcelles de l'étude.

leur teneur en carbone organique ($C_{org} = C_{tot} - C_{inorg}$). Les trois indicateurs d'intérêt qui en résultent sont :

- C_{org} de la MO fine ($< 20 \mu m$) (**C_s [g / 100 g de terre sèche] ou [%C m.s.]**), correspondant à la MO stable ;
- C_{org} de la MO grossière (entre $20 \mu m$ et $2 mm$) (**C_l [g / 100 g de terre sèche] ou [%C m.s.]**), correspondant à la MO labile. Il a été calculé indirectement grâce aux deux granulométries mesurées : $C_{org \text{ MO grossière}} = C_{org < 2 mm} - C_{org < 20 \mu m}$;
- $qfrac$ représentant la dynamique de la MO durant les dernières années, a été calculé à partir de ces deux premiers (**C_q [-]**) : $qfrac = \frac{C_{org \text{ de MO grossière}}}{C_{org \text{ de MO fine}}}$.

2.4.3.4. Stabilité des agrégats (test USDA)

2.4.3.4.1. But de la mesure

La méthode choisie pour évaluer la stabilité des agrégats du sol est la méthode USDA (Interreg IV 2012). Comme dit précédemment, elle a été testée par N. Biot en 2020.

2.4.3.4.2. Protocole général

Le protocole consiste à récolter une dizaine d'agrégats de 0,5 à 1 cm de calibre entre 0 et 1,5 cm de la surface. Une fois séchés à l'air libre, leur stabilité après un ou plusieurs cycles d'immersion dans l'eau distillée est évaluée en suivant un système de classes (tableau 8) (**U [-]**). Un score faible correspond à un agrégat très peu stable, tandis qu'un score élevé reflète un agrégat avec une forte cohésion. Sur base de réflexions de N. Biot l'année précédente, deux classes ont été ajoutées à la classification de départ afin d'affiner davantage les résultats et mieux distinguer les différents sols (Biot 2020).

Tableau 8 : Score de stabilité des agrégats obtenu après immersion dans l'eau distillée.
Source : adapté de Prosenol (2012)

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

A côté de cela, des modifications supplémentaires ont été apportées par rapport au protocole initial. Puisqu'une croûte de battance était observée dans la plupart des champs, conformément au protocole USDA, la moitié des agrégats ont été prélevés sous la surface du sol et l'autre moitié directement en surface. Comme le protocole USDA suggérait 16 échantillons et N. Biot 10, 12 échantillons ont été prélevés.

Concernant la partie en laboratoire, le terme « dissolution », correspondant au mélange de deux phases avec la formation d'une nouvelle phase homogène (IUPAC 2021), indiqué

dans le protocole, a été considéré comme inadéquat. C'est donc le temps de désagrégation (correspondant à la perte de structure de l'agrégat) des échantillons plutôt que celui de dissolution, ou de traversée des mailles du filtre, qui a été pris en compte. Ainsi, lorsqu'un agrégat formait un tapis au fond du filtre en 30 secondes, il a obtenu un score de 2, considérant que le bas du verre bloquait son passage à travers des mailles.

2.4.3.5. Evolution de la croûte de battance

2.4.3.5.1. But de la mesure

Le protocole réalisé pour cette expérience a été adapté de Boiffin (1984). Il a pour but d'évaluer la sensibilité des différents champs à la battance en suivant l'évolution de critères morphologiques de la surface du sol en fonction de paramètres climatiques.

2.4.3.5.2. Protocole général

Les relevés de battance ont été réalisés entre le 16/10/2020 et le 05/02/2021 avec un passage environ tous les dix jours, à la suite d'un épisode pluvieux. Sur chaque parcelle agricole d'un ha. Quatre placettes d'expérimentation de 35*50 cm ont été installées et suivies. Les observations ont commencé le plus tôt possible après le semis, en même temps que l'installation des paniers à VDT. Il était important de passer avant la première pluie suivant le semis car l'obtention de l'indicateur D_{lim} (calibre calculé du dernier agrégat incorporé à la plaque de battance) nécessite la connaissance de l'état initial du sol (faciès F0).

Les mesures qui ont été réalisées sont les suivantes : (1) la pluviométrie, (2) la répartition initiale des calibres d'agrégats, (3) l'évolution de la surface de plaque homogène, (4) le faciès des placettes et (5) l'évolution de D_{min} qui est le calibre du plus petit agrégat présent à la surface du sol. Une photo de chacune des quatre placettes a été prise lors de chaque visite en champs, deux sont visibles dans l'annexe 2.4.3.5.1. Le paramètre D_{lim} a pu être obtenu indirectement en utilisant les données de pluviométrie, de répartition initiale des calibres d'agrégats et l'évolution de la surface de plaque.

Afin de pouvoir suivre correctement l'évolution de la croûte de battance, le protocole de Boiffin nécessite de partir d'un sol fragmenté. A cette fin, les parcelles en semis direct, couvertes de végétation en surface, ont subi des modifications afin de simuler un semis (annexe 2.4.3.5.2.). Sur l'une des parcelles en semis direct (la 11), huit placettes ont été installées par paire, afin d'avoir un aperçu de l'évolution de la surface avec et sans travail manuel du sol. Aussi, lorsqu'il était impossible d'installer l'expérience avant la première pluie, la placette a été retravaillée en surface pour les mêmes raisons qu'en semis direct.

A chaque passage, une photo de chaque placette a été réalisée. Un appareil Nikon D5300 était posé sur un trépied, le miroir à +/- 1,1 m du sol et avec une ouverture de 36 mm (annexe 2.4.3.5.2.) pour être dans les mêmes conditions que Boiffin. Autant que possible, les placettes n'ont pas subi d'éclairement direct du soleil lors de la prise de vue. Elles ont aussi nécessité un désherbage régulier lors de presque chaque passage afin de faciliter l'évaluation ultérieure des photos.

2.4.3.5.3. Récolte des données pluviométriques

Un pluviomètre simple (modèle Kerbl ES56129) a été placé au centre de chacune des 20 parcelles à une hauteur de 1 m sur un tuteur en bambou. Il a été relevé lors de chaque passage.

Il est arrivé trois fois lors des relevés de pluviométrie (champs 9, 13 et 17) que le pluviomètre ait été renversé et ne fournisse donc aucune information. Pour obtenir des données pour ces relevés, une valeur a été calculée en réalisant la moyenne des données pluviométriques des parcelles visitées le même jour et ayant été visitées pour la dernière fois à la même date que la parcelle problématique. Les parcelles relativement plus éloignées par rapport aux parcelles les plus proches n'ont pas été considérées pour réaliser cette moyenne.

D'autres sources d'informations ont été identifiées pour obtenir des données pluviométriques : la plateforme en ligne Agromet (CRA-W 2021), les données radar de l'IRM (comm. pers. Simon Ridley, UCL/ELIE) et le réseau Pameseb (Rosillon 2020). Des comparaisons entre les relevés des pluviomètres sur les zones expérimentales et des stations Pameseb ont été réalisées. Des différences claires ont été notées et les données Pameseb ont finalement été sélectionnées parce que des biais (point 4.3.6.3.) aux pluviomètres ont été observés sur le terrain et que cela a permis d'obtenir un jeu de donnée complet et cohérent. La station la plus proche de chaque parcelle a été à chaque fois utilisée. Les distances sont visibles en annexe 2.4.3.5.3.

2.4.3.5.4. Répartition des agrégats à la surface du sol

Afin de connaître l'état du sol au début de l'expérience, la proportion de la surface couverte par des agrégats de calibre inférieur ou égal à 2, 5, 10, 20, 30, 40 et 50 mm a été évaluée.

Les calibres des agrégats inférieurs ou égaux à 2 et 5 mm ont d'abord été estimés sur place lors de l'installation de chaque placette. Par la suite, l'estimation des autres calibres d'agrégats, et finalement une réévaluation des calibres 2 et 5 mm, a été réalisée visuellement via le logiciel de traitement d'image GIMP (version 2.10.20). Des rectangles représentant 10% de la surface de la placette ainsi qu'un jeu de gabarits volants (figure 12) ont été utilisés. Cette mesure étant chronophage, il a été considéré que 50% de la surface (un rectangle sur deux) était suffisante pour réaliser cette évaluation de la répartition des calibres d'agrégats.

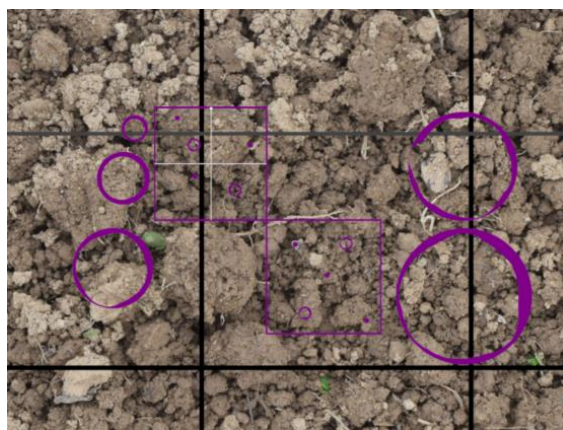


Figure 12 : Dispositif numérique mis en place pour évaluer la répartition des calibres d'agrégats. En rose : gabarit volant utilisé pour l'estimation de la répartition des calibres d'agrégats à la surface de la placette. Les cercles représentent les calibres de 5, 4, 3, 2, 1, 0,5 et 0,2 cm. En noir, les lignes délimitant les rectangles de 10%. En gris : une ligne délimitant des carrés de 5%. En blanc : lignes délimitant des carrés de 0,25%. Source : X. Belin

L'encodage des observations a nécessité une certaine réflexion étant donné la diversité des surfaces observées dont certaines n'ont pas été rencontrées par Boiffin. Des informations complémentaires sur ces modifications sont disponibles en annexe 2.4.3.5.4. Un exemple de l'Excel d'encodage se trouve en annexe 2.4.3.5.5.

2.4.3.5.5. Evaluation de la surface de plaque

Cette mesure sert, avec la répartition des calibres, à créer l'indicateur Dlim. La mesure a été réalisée pour chaque placette à partir des photos.

La plaque est considérée comme une surface homogène au sein de laquelle les agrégats sont plus ou moins liés les uns aux autres.

Différentes approches ont été essayées pour réaliser l'estimation de la surface de plaque. (1) D'abord, le logiciel ImageJ a été utilisé dans le but d'entourer toutes les surfaces de plaque. (2) Ensuite, une approche d'estimation visuelle à l'aide d'un gabarit a été testée avec le logiciel « Capture NX-D ». (3) Le logiciel ImageJ a de nouveau été utilisé pour réaliser une analyse sur base de la luminosité des reliefs des placettes. L'approche a été abandonnée du fait qu'elle ne fonctionnait pas sur les placettes peu avancées et que l'éclairage n'était pas identique entre les photos. (4) Finalement, L. Leveau a pris en charge la réalisation de cette mesure et du protocole associé.

La méthode mise en place par L. Leveau se base sur un système de classes de surface de plaque (tableau 9) et l'utilisation d'aides visuelles. Chaque placette a été découpée en 12 carrés identiques qui ont été évalués les uns après les autres avec le logiciel GIMP.

2.4.3.5.6. Suivi de l'évolution de Dmin

Cette mesure a été mise au point cette année en s'inspirant des informations que Boiffin fournit dans sa thèse.

A l'aide d'un pied à coulisse, la taille de l'agrégat distinct le plus fin (Dmin) a été estimée pour chaque placette sur le terrain. Des précisions d'ordre pratique concernant cette mesure sont disponibles en annexe 2.4.3.5.6.

Afin de faciliter la mesure de Dmin et d'apporter plus de rigueur au protocole, des critères de sélection de l'agrégat le plus petit ont été définis. Ils touchent à la forme de l'agrégat, à sa position à la surface de la placette et à l'état d'avancement de la placette. Dans le même ordre d'idée, une fiche de terrain est proposée pour faciliter les relevés liés à la battance, dont Dmin (annexe 2.4.3.5.7.).

La mesure de Dmin sur le terrain a été difficile. Il a fallu du temps avant d'arriver à des résultats concluants. Cela implique que de nombreux relevés devraient être réalisés à nouveau via photos et cela n'a pas pu être réalisé cette année par manque de temps.

2.4.3.5.7. Réalisation de l'indicateur Dlim (B_dlim)

Enfin un seul indicateur lié à la battance a été utilisé dans ce mémoire pour l'analyse statistique, il s'agit de **B_dlim**. D'abord, la valeur de Dlim (le dernier calibre d'agrégat incorporé à la surface) a été calculée pour chaque placette et chaque relevé en établissant une correspondance entre la surface de plaque et la surface recouverte par les différents calibres d'agrégats (annexe 2.4.3.5.8.). Ensuite, ces valeurs de Dlim ont été exprimées en fonction de la pluie cumulée, ce qui a permis de réaliser une courbe pour chaque placette. Les

Tableau 9 : Classes de surface utilisées dans l'évaluation de la surface de plaque. Source : L. Leveau.

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

points pour lesquels Dlim est plus grand que 40 mm et qui formaient une pente trop faible ont été retirés du jeu de donnée afin de retirer l'effet de plateau (annexe 2.4.3.5.9). Enfin, une régression a été réalisée pour chaque placette sur les quelques points restants et c'est la pente de cette droite de régression qui a été utilisée comme indicateur (B_dlim). Cet indicateur exprime donc la vitesse à laquelle progresse la croûte de battance (de dimension [mm d'agrégat/mm de pluie]).

2.4.3.6. Structure du sol (test VESS)

2.4.3.6.1. But de la mesure

La méthode choisie pour évaluer la compaction du sol est la méthode VESS, qui est une évaluation visuelle de la structure du sol (Ball et al. 2007, Guimaraes et al. et Guimaraes et al. 2011 2011). Elle a été testée par N. Biot en 2020.

2.4.3.6.2. Protocole général


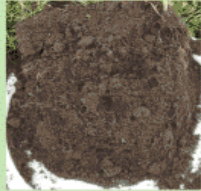
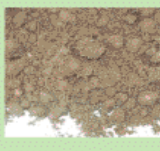

Le protocole initial prévoit une détermination des différentes couches du sol en cinq classes allant de 1 (sol très friable) à 5 (sol très compact). Une application destinée à faciliter la caractérisation a été créée en 2019 (Polla 2016).

Pour ce mémoire, l'application a rapidement été abandonnée car celle-ci est chronophage et rend finalement l'estimation globale plus difficile. De plus, des classes intermédiaires (classes 1,5 ; 2,5 ; 3,5 ; 4,5) ont été créées pour affiner les observations.

Sur chaque parcelle, cinq blocs de sol ont été extraits à la bêche dans des zones représentatives de la surface de production de la parcelle, c'est-à-dire hors traces de passage. En agriculture biologique, lorsque des traces de tracteurs étaient visibles, une partie des blocs ont été extraits de ces zones-là de manière proportionnelle à la surface que les zones de passage des tracteurs représentaient sur le champ. Car cette surface est productive, contrairement aux traces de tracteur en agriculture non biologique.

Un bloc de 10 x 20 cm en surface x 30 cm de profondeur a été extrait puis divisé en plusieurs horizons homogènes en termes de compacité. Une note de 1 à 5 a été attribuée à

Tableau 10 : Extrait du tableau VESS montrant un sol de qualité 1 (= score VESS) avec les caractéristiques y correspondant. L'ensemble du tableau est disponible en annexe 2.4.3.6.1. Source : Ball et al. 2007, Guimaraes et al. 2011.

Qualité de la Structure	Taille et Apparence des Agrégats	Porosité Visible et Racines	Apparence après rupture : divers sols
<p>Sq1 Friable</p> <p>Agrégats friables entre les doigts</p>	<p>La plupart des agrégats < à 6mm après émiettement.</p>	<p>Très poreux. Les racines ont colonisé le sol.</p>	
<p>Apparence après rupture: même sol, différentes modalités de travail du sol</p>	<p>Traits distinctifs</p>	<p>Apparence des fragments (naturels ou obtenus par rupture) de ≈1.5 cm de diamètre</p>	
	 <p>Agrégats Fins</p>	 <p>1 cm</p>	<p>L'action de briser le bloc est suffisante pour les relever. Les gros agrégats sont composés de plus petits, maintenus par les racines.</p>

chaque couche (tableau 10 et annexe 2.4.3.6.1.). Les critères considérés sont la friabilité, la fermeture des mottes, la présence de racines, la forme arrondie ou angulaire des agrégats et d'éventuelles traces d'anoxie. Une moyenne pondérée des scores du profil des cinq blocs a ensuite été calculée par parcelle, ainsi qu'une moyenne globale pour chaque champ (**V [-]**).

2.4.4. SE liés aux ennemis de la culture

2.4.4.1. Infestation par les adventices

2.4.4.1.1. But de la mesure

L'objectif de la mesure est d'avoir un aperçu de l'efficacité des pratiques culturales dans la gestion des adventices.

Les mesures d'adventices ont été réalisées en suivant un protocole issu du projet CASIMIR de l'INRA (Cellier et al. 2017; INRA 2017a; 2017b). Le protocole simplifié a été suivi plutôt que le protocole complexe. Il consiste en l'attribution de classes de densité et de stade phénologique aux différentes espèces observées sur huit placettes carrées de 16 m². Il est aussi proposé d'évaluer des quadrats de 1 m² au sein des placettes. Deux passages ont eu lieu : l'un en sortie d'hiver et un second fin avril. La feuille de terrain utilisée est disponible en annexe 2.4.4.1. .

Ces données ont pu être utilisées pour évaluer indirectement la banque de graines (1^{er} relevé) et la compétition entre la culture et les adventices (1^{er} et 2nd relevé).

2.4.4.1.2. Protocole général

Le tableau 11 montre les différentes catégories de densité et de phénologie d'adventices proposées par le protocole initial. Deux catégories de densité, indiquées en gras dans le tableau, ont été ajoutées : la classe 0 car un grand nombre d'espèces ne sont présentes qu'en un seul exemplaire sur les placettes ; la classe 4 afin de prendre en compte les couverts végétaux des champs en semis direct. Une catégorie de stade phénologique « r » a également été ajoutée pour prendre en compte les repousses et les couverts.

Tableau 11 : Classes de densité et de phénologie utilisées pour les relevés d'adventices avec le protocole CASIMIR (INRA 2017a). Les classes en gras ont été ajoutées par les expérimentateurs. Pour le relevé de mai, les densités inférieures à 10 plantes par 16 m² ont été comptabilisées précisément. Les valeurs attribuées aux classes phénologiques sont aussi indiquées. Feuille de terrain et informations supplémentaires sur les classes en annexe 2.4.4.1.

Classe de densité	Densité [plt/16m ²]	Densité [plt/m ²]	Classe phénologique	Stade phénologique	Coefficient pour générer l'indicateur de compétition
(vide)	Absence	Absence	R	Repousse	0,5
0	1	0,06	A	Plantule	0
1	2-16	0,13-1	B	Plante jeune	0
2	17-48	1,06-3	C	Plante adulte	0,5
3	49-160	3,06-10	D	Floraison	1
4	>160	>10	E	Grenaison	1

2.4.4.1.3. Relevés de flore en sortie d'hiver (1^{er} relevé)

Les relevés des adventices ont été réalisés entre le 19/02 au 02/03/2021. L'identification des espèces s'est basée sur l'expertise de P. Van Thorre, technicien du laboratoire PEPA, et un ouvrage de référence (Mamarot et Rodriguez 2014).

2.4.4.1.4. Relevés de flore au printemps (2nd relevé)

Les relevés ont été réalisés du 01/05 au 26/05/2021 principalement sans l'expertise de P. Van Thorre. Afin de mieux prendre en compte les faibles densités d'adventices, les individus d'une espèce ont été comptés lorsqu'il y avait moins de 10 individus sur les 16 m². Ensuite la classe 1 a été attribuée pour les densités entre 11 et 16 plantes par 16 m², la classe 2 entre 17 et 48 et ainsi de suite (tableau 11).

Dans un premier temps des essais de récolte de biomasse sur des quadrats de 1 m² ont été réalisés afin d'estimer la compétition entre la culture et les adventices, mais ils ont été rapidement abandonnés à cause des volumes concernés et du temps nécessaire à la récolte. Les adventices présentes sur le quadrat ont tout de même été comptabilisées par espèce.

2.4.4.1.5. Indicateurs obtenus

Une évaluation préliminaire des différents indicateurs qu'il est possible d'obtenir avec les données récoltées a été réalisée sous forme d'un schéma (annexe 2.4.4.2.). Ensuite une sélection parmi ces indicateurs a été réalisée sur base des conseils de E. Malice du CRA-W, B. Colling du Support en Méthodologie et Calcul Statistique (SMCS) et C. Descamps du laboratoire ELIA à l'UCLouvain (Malice 2021; Colling 2021; Descamps 2021).

a. Relevés de sortie d'hiver

L'objectif de ces relevés est d'avoir des informations de densité et de diversité spécifique afin d'évaluer grossièrement l'état de la banque de graines et surtout d'évaluer la densité d'infestation (Chauvel et al. 2018).

Les indicateurs liés au relevé de sortie d'hiver ont été générés sans utiliser la catégorie « r » car ces plantes ne sont pas présentes dans la banque de graines ou bien représentent des couverts désirés.

En ce qui concerne les indicateurs de densité, deux types d'indicateurs ont été générés : des indicateurs de type « infestation maximum » et des indicateurs de type « moyenne ». Les indicateurs d' « infestation maximum » ont été générés en utilisant les données d'infestation maximale observées parmi les placettes pour chaque espèce. Pour les indicateurs de type moyenne, c'est la moyenne de l'infestation sur les 8 placettes qui a été utilisée à chaque fois.

Tableau 12 : Correspondance des classes de densité avec les valeurs utilisées pour obtenir les indicateurs de densité. Des informations complémentaires sur les classes sont aussi présentes.

Classes de densité notées sur le terrain	Plage de densité concernée		Correspondance	
			Indicateurs de type "class"	Indicateurs de type "val"
[/]	[plante/16m ²]	[plante/m ²]	[/]	[plante/m ²]
(vide)	Absence	Absence	0	0
0	1	0,06	1	0,06
1	2-16	0,13-1	2	0,565
2	17-48	1,06-3	3	2,03
3	49-160	3,06-10	4	6,53
4	161-320	10,06-20	5	15,03

Ces deux approches ont été testées avec deux façons différentes de traiter les données récoltées sur le terrain (tableau 12). Les indicateurs « infestation maximum » et « moyenne »

de type « class » sont réalisés à partir de classes allant de 0 à 5 tandis que pour le type « val » ils sont réalisés à partir de la valeur médiane de chaque classe (Lonchamp et Barralis 1988).

b. Relevés de printemps

L'objectif de ces relevés est d'avoir des informations de densité, de diversité spécifique et de stade phénologique afin d'évaluer l'état d'infestation des terres après les désherbages ainsi que la compétition entre la céréale cultivée et les adventices (Chauvel et al. 2018).

Les données issues de l'observation des quadrats de 1 m² n'ont finalement pas été utilisées.

Des indicateurs de diversité, de densité et de compétition ont été générés. Les deux premiers indicateurs ont été générés comme précédemment mais en incluant les repousses de betterave et de chicorée appartenant à la classe « r ». L'indicateur de compétition a été généré pour chaque placette en multipliant la densité par un coefficient de compétitivité lié aux stades phénologiques (tableau 11 et équation 1)). De cette façon, on obtient la densité de plantes supposées compétitives par m² dans chaque placette puis dans chaque champ en faisant une moyenne.

$$\text{Compétitivité}_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=8} (\text{Densité}_{ij} * \text{CoefficientPhénologie}_{ij})}{8} \quad [\text{plante compétitive/m}^2]$$

Équation 1: Calcul de la compétitivité d'une espèce i à partir des données récoltées sur les huit placettes (j). CoefficientPhénologie fait référence à la dernière colonne du tableau 11.

Les coefficients de compétitivité ont été choisis à la suite de discussions avec P. Van Thorre, en attribuant un poids plus élevé aux plantes mieux développées et un poids nul aux jeunes plantules. Les plantes plus développées ont aussi plus de risque d'ensemencer la parcelle.

2.4.4.1.6. Résumé des indicateurs pour la mesure

- Score de densité des adventices en sortie d'hiver (**A_denh [plante/m²]**)
- Score de diversité des adventices en sortie d'hiver (**A_divh [plante]**)
- Score de densité des adventices au printemps (**A_denp [plante/m²]**)
- Score de diversité des adventices au printemps (**A_divp [plante]**)
- Score de compétitivité des adventices au printemps (**A_comp [plante/m²]**)

2.4.4.2. Maladies cryptogamiques

a. But de la mesure









La méthode d'évaluation de la présence de maladies cryptogamiques provient de la thèse d'Ariane Chabert (2017). Cependant, contrairement à son étude, l'indicateur calculé dans ce mémoire prend uniquement en compte les dégâts de la septoriose des feuilles, et non toutes les maladies confondues, pour des questions de moyens. Les raisons du choix de la septoriose sont son importance en termes de dégâts en Belgique, et sa caractéristique de rester encore visible quelques temps après traitement. Cela offre plus de flexibilité pour une date commune de passage en champ.

2.4.4.2.1. Protocole général et feuille de terrain

L'expérience a été réalisée par L. Leveau quelques jours après les premiers traitements d'agriculteurs, à la mi-avril 2021. Il s'agissait de faire un compromis pour retarder l'observation afin d'observer un maximum de symptômes sur les parcelles sans pour autant risquer de perdre les symptômes des premières parcelles traitées.

Sur chaque parcelle, 20 maître-brins ont été récoltés sur 2 transects (figure 9). Le stade de développement de chacun d'entre eux a été déterminé selon l'échelle BBCH par dissection de la tige.

Tableau 13 : Score de Koshibayev et Miminjanov (2016) correspondant à la surface de feuille présentant des symptômes de septoriose.

Note	0	1	2	3	4	5	6	7
Pourcentage de surface avec des symptômes (%)	0	1	5	10	25	50	75	100
								

Ensuite, le pourcentage de surface présentant des symptômes de maladie sur les trois dernières feuilles ligulées (F-1, F-2 et F-3) a été examiné à l'aide d'une aide visuelle (Koyshibayev et Muminjanov 2016). La surface qui a été comptabilisée (tableau 13) correspond aux surfaces atteintes de symptômes de maladies (taches blanches allongées, taches brunes ovales ou rectangulaire souvent bordée d'un halo jaune, présence de pycnides (Decarrier 2017)) et non les zones nécrosées ou atteintes de chloroses qui auraient potentiellement pu être liées à des stress abiotiques (gel, dégâts mécaniques ...). Un score global d'infestation a ensuite été déterminé via un système de classes (figure 13) à partir des scores de symptômes de ces trois feuilles (**M [classe]**).

Classe 1 : toutes les feuilles F1 à F3 de tous les talles, saines.

Classe 2 : F1 saine, F2 avec au maximum 1% de sa surface atteinte, F3 et F4 avec quelques taches de maladies (F4 peut ne plus avoir de surface verte mais n'est pas encore desséchée).

Classe 3 : F1 avec au maximum 1% de sa surface atteinte et F2 avec plus de 1% de sa surface atteinte.

Classe 4 : F1 atteinte sur moins d'1/3 de sa surface.

Classe 5 : F1 atteinte sur 1/3 ou plus de sa surface.

	Feuille 1	Feuille 2	Feuille 3	Feuille 4
Classe 1	-	-	-	-
Classe 2	-	< 1 %	taches	taches
Classe 3	< 1%	> 1%	taches	taches
Classe 4	< 33 %	taches	taches	100%
Classe 5	> 33 %	taches	taches	100%

Figure 13 : Classes pour l'évaluation du niveau d'infestation du blé en septoriose (Chabert, 2017)

2.4.5. Récapitulatif des indicateurs obtenus

Le tableau 14 résume les différents indicateurs obtenus à partir des expériences réalisées, ainsi que leur abréviation. Ils ont été utilisés conjointement avec les indicateurs de PC pour réaliser les analyses statistiques.

2.5. Analyses statistiques

2.5.1. Analyses réalisées

Les résultats des toutes les expériences ont été analysés à l'aide des logiciels Excel et R. Dans un premier temps, des analyses descriptives de base ont été effectuées pour chacune des expériences réalisées afin d'observer la distribution des parcelles par rapport à chaque indicateur. Des tests statistiques de normalité, d'homoscédasticité et d'égalité des moyennes ont aussi été réalisés afin d'étudier les résultats fournis par chaque indicateur de SE.

Tableau 14 : Récapitulatif des indicateurs clefs issus des expériences renseignées dans la première colonne. A chaque indicateur correspond une abréviation (utilisée dans les analyses statistiques), le type de données obtenues (cercle noir = variable quantitative, cercle blanc = variable qualitative) et son utilisation dans les ACP (= variable active, = variable supplémentaire). VDT = vers de terre, MO = matière organique.

Expérience	Indicateur	Abréviation	var	ACP1 _SE	ACP2 _SE	ACP3 _PC
Incorporation de la MO par les VDT	Nombre de cabanes apparues en 2 mois [cabane]	T_cab2	●	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Nombre de cabanes apparues en 4 mois [cabane]	T_cab4	●	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Nombre de cabanes apparues sur la saison (jusque fin mars) [cabane]	T_cabF	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Nombre de turricules apparues en 2 mois [turricules]	T_tur2	●	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Nombre de turricules apparues en 4 mois [turricules]	T_tur4	●	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Nombre de turricules apparues sur la saison (jusque fin mars) [turricules]	T_turF	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Surface du panier recouvert par de la paille en fin d'expérience [%]	T_surf	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Poids de la paille en fin d'expérience [g de paille]	T_poids	●	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dégradation de la MO	Fraction du matériel stabilisé [-]	D_S	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Taux de décomposition initial [-]	D_K	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Teneur en MO stable et labile	Teneur en carbone total [%C m.s.]	C_t	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Teneur en carbone stable [%C m.s.]	C_s	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Teneur en carbone labile [%C m.s.]	C_l	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Coefficient stable/labile [-]	C_qfrac	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stabilité des agrégats	Score de stabilité des agrégats (1 = peu stable, 8 = très stable) [-]	U	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Evolution de la croûte de battance	Taux d'augmentation de Dlim [mm d'agrégat/mm de pluie]	B_dlim	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Compaction du sol	Score de compaction du sol (1 = friable, 5 = très compact) [-]	V	○	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Présence d'adventices	Score de densité d'adventices en sortie d'hiver [plante/m ²]	A_denh	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Score de diversité d'adventices en sortie d'hiver [plante]	A_divh	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Score de densité des adventices au printemps [plante/m ²]	A_denp	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Score de diversité des adventices au printemps [plante]	A_divp	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Score de compétitivité des adventices au printemps [plante/m ²]	A_comp	●	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Présence de maladies	Score d'intensité de la septoriose (1 = pas de symptômes, 5 = très fortement infesté) [-]	M	○	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Les analyses multivariées tiennent une grande place dans cette étude. Ce sont des méthodes permettant de résumer des jeux de données, de classer des individus ou des variables, et d'analyser la structure des liens entre différentes variables (SMCS s.d.). Différentes analyses multivariées ont été réalisées en croisant les indicateurs de PC et les résultats des expériences sur les SE de chaque parcelle. Trois étapes ont été réalisées : (1) des analyses multivariées sur les indicateurs de SE afin d'observer les corrélations entre les différents SE, (2) des analyses multivariées sur les indicateurs de PC, en ajoutant les SE en tant que variables supplémentaires, afin d'observer les liens entre les PC et les SE, et (3) une classification des PC. Elles ont été exécutées sous forme de matrices de corrélation et d'analyses en composantes principales (ACP) et de classification hiérarchique sur composantes principales (HCPC). Pour cela, le package FactoMineR développé par Husson a été utilisé (Husson et al. 2008). Une formation en analyse multivariée au SMCS ainsi que des

leçons disponibles en ligne de Husson ont permis de mieux prendre en main ces différents outils d'analyse.

A côté de cela, des démarches particulières ont été entreprises afin d'étudier l'effet de la saison (des mois) sur l'activité des VDT via un modèle mixte. Cependant, celui-ci n'a pas abouti car (1) le type de données ne convenait pas (données de type comptage) et (2) l'implémentation et le retrait des paniers ne se sont pas faites au même moment. Au vu de l'expérience, aucune solution satisfaisante n'a pu être trouvée pour s'affranchir de ces deux obstacles. Quant aux autres expériences, les hypothèses de normalité et homoscedasticité n'étant pas rencontrées non plus, les statistiques se sont limitées à des analyses descriptives uniquement. Aucune statistique inférentielle n'a donc été réalisée.

2.5.2. Diversité de méthodes d'analyses multivariées

Les analyses factorielles, regroupant entre autres les ACP, sont des analyses permettant de « réorganiser l'information d'un jeu de données, de sorte à distinguer l'information principale, secondaire, etc. » (SMCS 2021). En transformant un set de variables d'un jeu de données en un nombre réduit de composantes principales ou de plans factoriels, elles sont capables de résumer la majeure partie de l'information contenue dans ce jeu de données. Cette information, aussi appelée inertie, exprime la variance généralisée à plusieurs dimensions (Husson 2019). Il est en effet possible de représenter un jeu de données dans un hyperplan, avec chaque variable correspondant à une dimension. L'objectif de l'analyse est de trouver une combinaison de quelques nouveaux axes orthogonaux qui maximisent la variabilité entre individus, offrant une nouvelle grille de lecture par laquelle les individus se différencient le mieux entre eux. Les « variables supplémentaires » sont des variables qui ne sont pas utilisées pour la construction des axes, mais dont on évalue leur corrélation avec les « variables actives » qui ont été utilisées dans la construction des axes.

Les différentes méthodes d'analyse factorielles permettent de visualiser énormément d'information de manière concise à l'aide de graphiques. Elles se distinguent entre elles par le type de variables qu'elles traitent. Ainsi, les ACP utilisent uniquement les variables quantitatives, tandis que les analyses des correspondances multiples (ACM) ne manipulent que des variables qualitatives. Les analyses factorielles multiples (AFM) et analyses factorielles de données mixtes (AFDM) sont capables de traiter les deux types de variables, la première ayant en plus de cela la capacité de pondérer l'importance des variables en les regroupant par groupe lors de l'analyse.

Ces analyses multivariées permettent d'étudier les liens entre les variables et d'en calculer leur degré de corrélation. Ces corrélations peuvent aussi être visualisées à l'aide de matrices de corrélation (MC) qui calculent les corrélations entre toutes les variables deux à deux.

Les HCPC permettent de créer une classification des individus – dans le cas de ce mémoire les 20 parcelles – sur base de critères établis au départ de l'information contenue dans le jeu de données, c'est-à-dire, des composantes principales ou plans factoriels. Le nombre de groupes le plus adapté peut être décidé après l'analyse sur base du dendrogramme produit et d'un indicateur d'inertie y correspondant.

3. Résultats

3.1. Généralités sur les résultats

Comme expliqué précédemment, les résultats présentés dans cette partie correspondent à des statistiques descriptives et non inférentielles. La plupart des résultats ne satisfont en effet pas aux hypothèses nécessaires pour pouvoir affirmer des généralités sur les systèmes de culture. Ils ne résument que les observations de l'échantillon étudié dans le cadre de ce mémoire. Par conséquent, il est important de prendre du recul concernant les résultats exposés ici et d'attendre plus de résultats dans les années futures afin de pouvoir établir des conclusions générales.

3.2. Analyses des données des pratiques culturelles

Sous forme d'histogrammes, l'annexe 3.2.1. donne un aperçu de la répartition des données concernant les pratiques culturelles (PC) pour les données quantitatives. Les annexes 3.2.2 et 3.2.3. donnent ces mêmes informations pour les données respectivement de type catégoriel et logique (ou booléen). Aucun test statistique n'a été réalisé sur ces données car elles ne comportent pas de répétition par champ.

La récolte de l'historique de la parcelle n°3 étant incomplète, celle-ci n'a pas été utilisée pour générer les données en lien avec les PC. Les ACP et le corrélogramme reprenant PC et SE ne contiennent donc que 19 parcelles. Les 20 parcelles ont cependant été utilisées dans les analyses statistiques concernant les SE et donc également pour produire le corrélogramme sur les SE.

3.3. Résultats et analyses des indicateurs de SE

3.3.1. Distribution générale des résultats

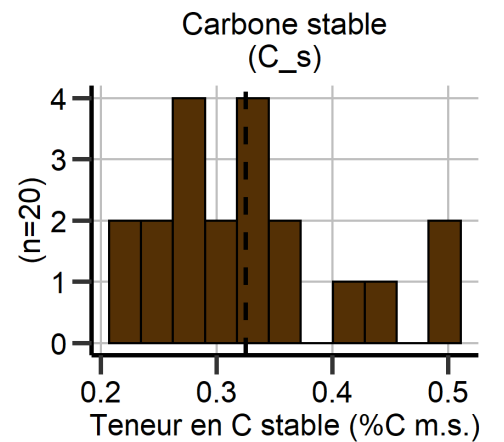
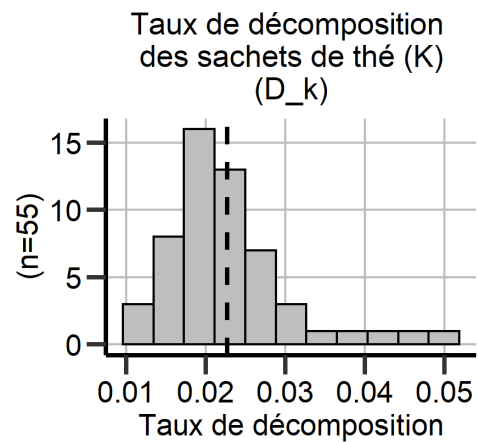
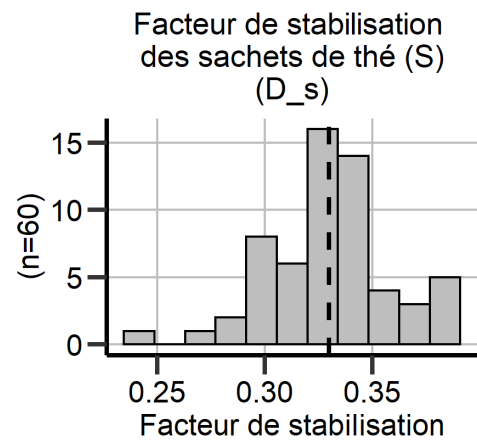
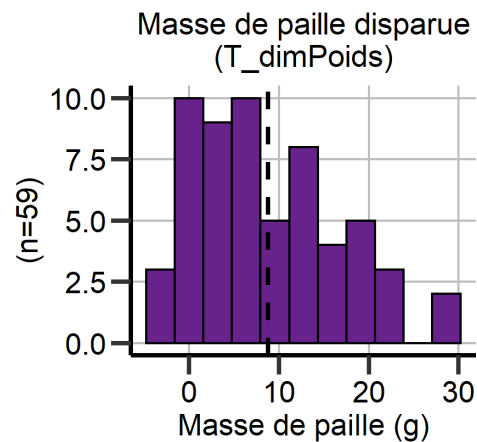
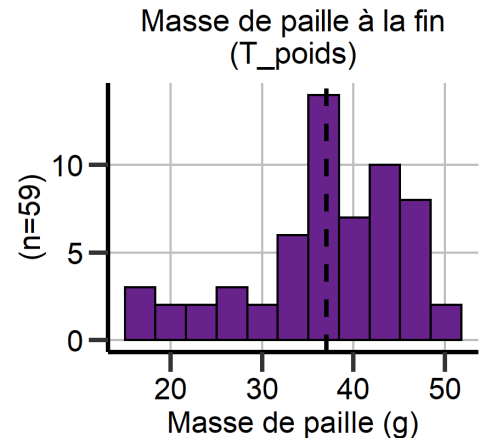
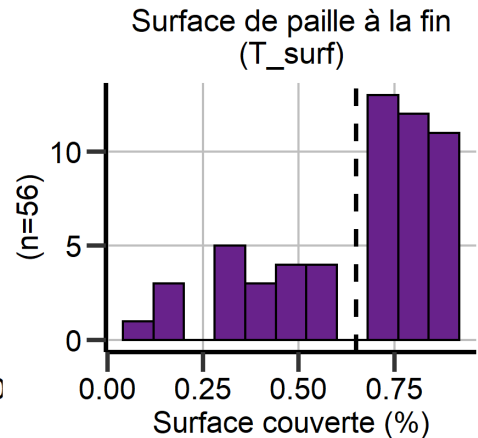
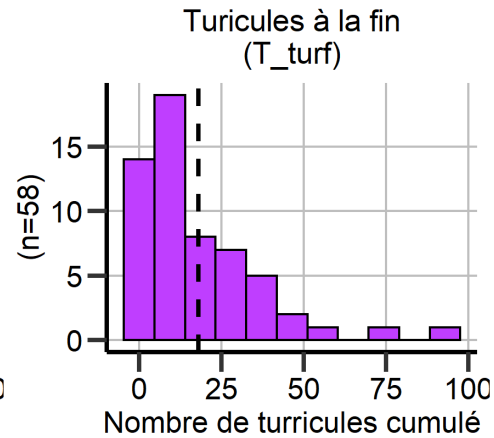
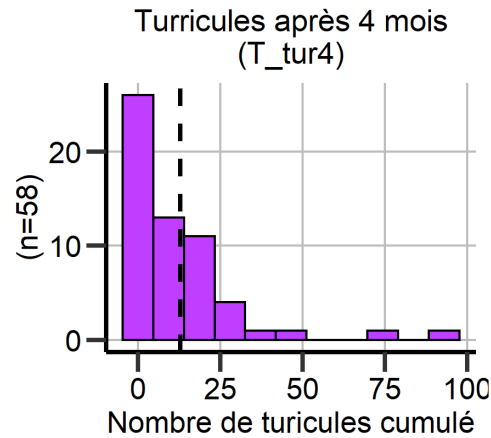
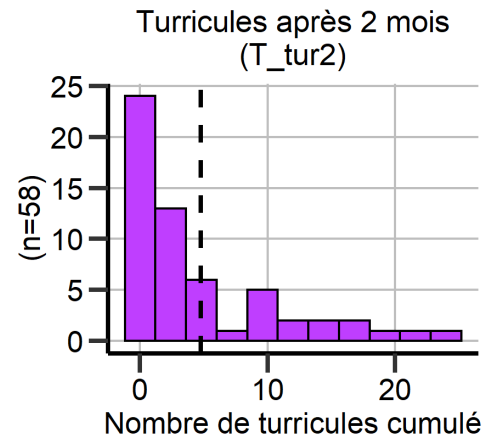
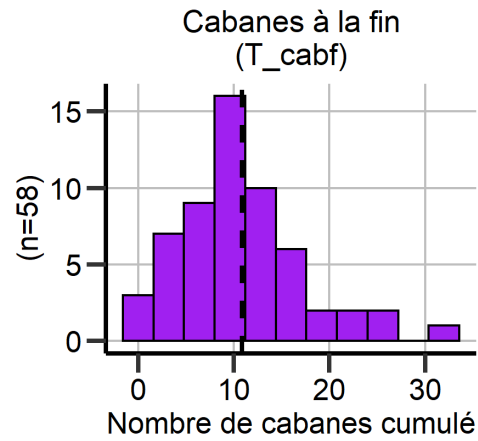
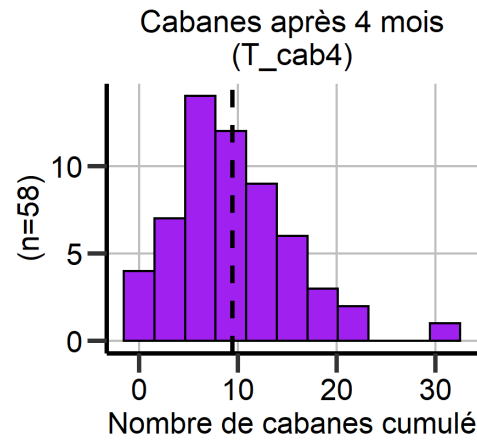
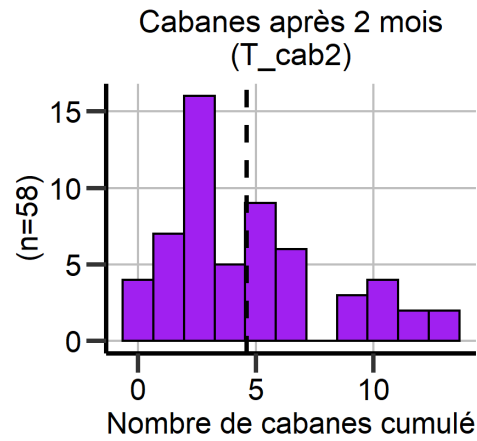
La description générale des résultats à l'aide de paramètres statistiques – nombre de répétitions, minimum, maximum, quartiles, moyenne, écart-type... – montre une grande variété de distributions des données entre les indicateurs de SE (tableau 15). Chaque indicateur sera analysé en détail dans la section 3.3.3.

Le tableau 15 contient la distribution des résultats, entre les champs ($n = 20$) ou les placettes ($n > 20$), pour chaque indicateur. Les indicateurs liés au carbone (C_l , C_{qfrac} et C_{s^9}), les indicateurs de diversité des adventices (A_{divh} et A_{divp}) et l'indicateur de maladie (M) n'ont qu'une seule répétition et ne peuvent donc pas subir certaines analyses statistiques du fait de l'absence de variance et du faible échantillon.

⁹ Par manque de temps, les trois autres échantillons prélevés seront analysés en automne.

Tableau 15 : Résumé chiffré des indicateurs de SE. Les couleurs font références aux indicateurs issus des mêmes expériences. Le total des relevés correspond au nombre de répétitions par champ multiplié par le nombre de champs de l'échantillon (20), desquels sont soustraits les éventuelles répétitions non employables pour cause de dégât en cours d'expérience. Min. = valeur minimum ; Quart. = quartile ; Méd. = médiane ; Max. = valeur maximum ; Moy. = Valeur moyenne.

			relevés	par champ		1	3	5	7	9	11
Incorporation de la MO par les VDT	Nombre de cabanes apparues en 2 mois [cabanes]	T_cab2	58	3	0	2	4	6	13	4,6	3,6
	Nombre de cabanes apparues en 4 mois [cabanes]	T_cab4	58	3	0	6	8	12,8	31	9,5	5,9
	Nombre de cabanes apparues sur la saison (jusque fin mars) [cabane]	T_cabF	58	3	0	6,3	10	14	32	10,9	6,5
	Nombre de turricules apparues en 2 mois [turricules]	T_tur2	58	3	0	1	2	7,5	24	4,78	6,0
	Nombre de turricules apparues en 4 mois [turricules]	T_tur4	58	3	0	2,3	6,5	18,8	93	12,8	17,0
	Nombre de turricules apparues sur la saison [turricules]	T_turF	58	3	0	5	11,5	26,8	93	18	18,5
	Surface du panier recouvert par de la paille en fin d'expérience [%]	T_surf	56	3	0,10	0,50	0,70	0,80	0,90	0,65	0,23
	Poids de la paille en fin d'expérience [g de paille]	T_poids	59	3	0	33,3	37,3	44,1	48,9	36,4	9,8
Poids de la paille disparue en fin d'expérience [g de paille]	T_dimPoids	59	3	-4,26	2,16	7,375	13,9	29,45	9,27	8,77	
Dégradation de la MO	Facteur de stabilisation [-]	D_s	60	3	0,25	0,31	0,33	0,35	0,39	0,33	0,03
	Vitesse de décomposition [-]	D_k	55	3	0,012	0,018	0,021	0,026	0,050	0,023	0,008
Teneur en MO stable et labile	Teneur en carbone [%C m.s.]	C_tot	20	1	0,94	1,09	1,18	1,34	1,75	1,22	0,19
	Teneur en carbone stable [%C m.s.]	C_s	20	1	0,228	0,268	0,31	0,358	0,504	0,325	0,081
	Teneur en carbone labile [%C m.s.]	C_l	20	1	0,622	0,766	0,863	1,05	1,31	0,896	0,189
	Coefficient stable/labile [-]	C_qfrac	20	1	1,23	2,33	2,96	3,48	5,18	2,92	0,92
Stabilité des agrégats	Score de stabilité des agrégats (1 = peu stable, 8 = très stable) [-]	U	240	12	1	2	3	4,3	8	3,5	2,1
Evolution de la croûte de battance	Taux d'augmentation de Dlim [mm d'agrégat/mm de pluie]	B	80	4	0,09	0,37	0,53	0,79	1,93	0,60	0,31
Compaction du sol	Score de compaction du sol (1 = friable, 5 = très compact) [-]	V	100	5	1,2	2,6	3	3,3	4,4	2,9	0,6
Présence d'adventices	Score de densité d'adventices en sortie d'hiver [plante/m ²]	A_denh	160	8	0	0	0,565	1,71	17,9	1,46	2,67
	Score de diversité d'adventices en sortie d'hiver [plante]	A_divh	20	1	0	2	6,5	11	16	6,5	5,2
	Score de densité des adventices au printemps [plante/m ²]	A_densp	160	8	0	0,0625	1,31	6,46	24,6	4,37	6,09
	Score de diversité des adventices au printemps [plante]	A_divp	20	1	0	3,8	8,5	13	22	9,3	7,3
	Score de compétitivité des adventices au printemps [plante/m ²]	A_comp	160	8	0	0	0,063	0,457	15,6	0,945	2,340
Présence de maladies	Score d'intensité de la septoriose (1 = pas de symptômes, 5 = très fortement infesté) [-]	M	20	1	1	1	2	2	2	1,6	0,5



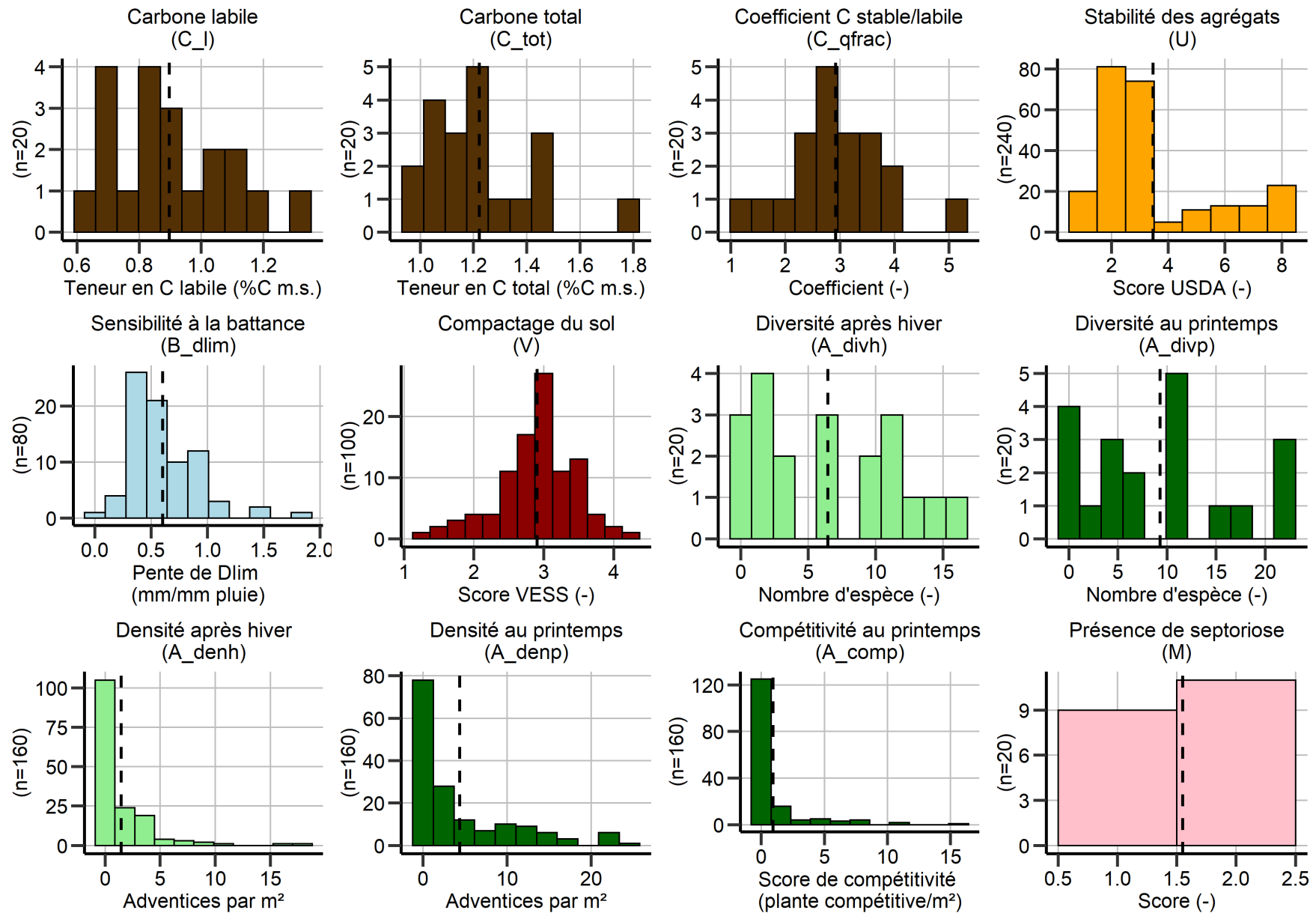


Figure 14: Histogrammes de distribution des données pour chaque indicateur de SE. Le total des relevés (n) correspond au nombre de répétitions par champ multiplié par le nombre de champs de l'échantillon (20), auquel sont soustraits les éventuelles répétitions non employables pour cause de dégât en cours d'expérience. Les histogrammes d'une même couleur correspondent à des indicateurs issus d'une même expérience. La ligne en pointillés indique la moyenne. La largeur d'un intervalle correspond à 10% de l'ensemble des données sauf pour les données catégorielles (USDA et maladies).

La figure 14 reprend les histogrammes de l'ensemble des indicateurs et l'annexe 3.3.1.1. reprend les boîtes de Tukey des indicateurs ayant subi des répétitions. Ces graphes permettent de visualiser les données et d'appuyer les tests statistiques de la section 3.3.2. Ces trois documents vont être utilisés dans la suite de cette partie pour décrire les indicateurs de SE.

3.3.2. Analyses statistiques générales

L'annexe 3.3.2.1. contient les résultats des différents tests statistiques appliqués aux données. Le test de normalité de Shapiro montre que seul D_s suit significativement ($p\text{-val} > 0,05$) une répartition selon la loi normale. Le test a été réalisé sur l'ensemble des observations pour chaque indicateur de SE. Les histogrammes (figure 14) ainsi que les qq-plot (annexe 3.3.2.2.) confirment les résultats du test Shapiro. Les autres indicateurs proches de la loi normale ($0,01 < p\text{-val} < 0,05$) sont : T_cabF, T_dimPoids et V.

Selon le test de Levene, l'hypothèse d'homogénéité des variances est rejetée pour les indicateurs A_comp, A_denh, A_denp ($p\text{-val} < 0,01$) et T_tur4 ($0,01 < p\text{-val} < 0,05$). En plus de cela, le test de Fligner-Killeen, considéré comme plus robuste (DataNovia 2018) par rapport aux écarts à la normalité, a donné des résultats semblables en rejetant l'homogénéité des variances pour les trois mêmes indicateurs liés aux adventices, l'indicateur U ($p\text{-val} < 0,01$) ainsi que pour l'indicateur B_dlim ($0,01 < p\text{-val} < 0,05$). La répartition des données inter-champ peut être visualisées dans l'annexe 3.3.1.1.

Enfin, un test de Kruskal-Wallis a été réalisé car le nombre d'échantillons dans chaque champ est trop faible pour réaliser une ANOVA 1. Le test de Kruskal-Wallis montre que au moins un champ a une moyenne significativement différente ($p\text{-val} < 0,05$) d'un autre champ pour tous les indicateurs de SE sauf pour D_k.

3.3.3. Résultats détaillés par expérience

Les histogrammes mentionnés dans cette section font référence à la figure 14 et les données statistiques proviennent quant à elles du tableau 15.

3.3.3.1. Incorporation de la MO par les VDT ($\tau_{...}$)

Les indicateurs résultants de l'expérience d'enfouissement de la MO sont au nombre de neuf et divisés en quatre types : le nombre de cabanes, le nombre de turricules, la masse de paille et la surface de paille.

Concernant les cabanes, deux placettes ont été endommagées en cours d'expérience et n'ont donc pas pu être utilisées. T_cab2 semble suivre une distribution assez homogène voire aléatoire, sa moyenne est inférieure à celle de T_cab4 et T_cabF.

T_cab4 et T_cabF prennent des valeurs plus élevées. Ils ont une moyenne proche et une distribution semblable. Les données présentent une légère asymétrie vers la gauche.

Concernant les turricules, les deux mêmes placettes n'ont pas pu être évaluées. Les histogrammes de T_tur2, T_tur4 et T_turF ont une forme semblable avec une asymétrie très prononcée sur la gauche, de nombreuses placettes ayant une valeur proche de 0. La moyenne de T_tur2 est inférieure à T_tur4 et T_turF. Ils ont tous un écart-type élevé. Enfin les données

de T_tur4 et T_turF s'étendent sur une gamme de valeur identique et supérieure à celle de T_tur2.

Concernant les indicateurs liés à la masse de paille, une placette n'a pas pu être utilisée pour T_dimPoids et T_poids. T_poids est utilisé pour générer T_dimPoids¹⁰. En observant les histogrammes, on voit que T_dimPoids a une asymétrie sur la gauche. T_dimPoids prend des valeurs négatives, liées à la méthode de calcul et à un protocole peu rigoureux.

Concernant l'indicateur sur les surfaces de paille, 4 placettes n'ont pas pu être évaluées. L'histogramme de T_surf est asymétrique vers la droite avec une répartition ayant une faible continuité.

Les corrélations entre les indicateurs d'incorporation de la MO sont visualisables à l'annexe 3.3.3.1. S'agissant d'indicateurs de cabanes et turricules cumulés, il est peu surprenant que ceux-ci soient corrélés entre eux. Les corrélations entre nouvelles cabanes et turricules apparues entre ces différents moments (0-2 mois, 2-4 mois, 4-fin d'expérience) ont également été calculés, et sont moins corrélés (annexe 3.3.3.1.). Cependant, ces derniers indicateurs sont moins intéressants pour les cabanes, car le nombre de nouvelles cabanes pouvant être observées est dépendant du nombre de cabanes déjà réalisées vu la configuration de la paille au sein de la cage à VDT.

3.3.3.2. Décomposition de la MO (D_k et D_s)

Pour les indicateurs D_k (le taux de décomposition de la MO) et D_s (le facteur de stabilisation de la MO), le nombre de répétitions est de trois mais pour chacune d'elles, huit sachets de thé ont servi à générer les données. Cinq données n'ont pas pu être récupérées pour D_k, ce qui porte à 55 le nombre de relevés utilisés pour l'analyse. Les écarts-types sont relativement faibles pour les deux indicateurs.

3.3.3.3. Teneurs en carbone organique stable et labile (C_...)

Pour des questions d'organisation, seules 20 observations ont pu être utilisées, le reste des données arrivera en novembre. La moyenne du C_{org} labile (C_l) est supérieure au C_{org} stable (C_s). Les écart-types entre champs sont assez faibles et ces deux indicateurs suivent une distribution homogène voire aléatoire. C_tot est plus asymétrique sur la gauche. C_qfrac est distribué sur une large gamme de valeurs centrées autour de la moyenne avec un outlier à droite, peut-être lié à l'absence de répétitions.

3.3.3.4. Stabilité des agrégats, test USDA (U)

Les huit scores de stabilité prévus dans le protocole ont été observés. On voit sur l'histogramme que les scores 2 et 3 sont très fortement représentés, ce qui crée un déséquilibre dans la distribution des données entre placettes. Les boîtes de Tukey (annexe 3.3.1.1.) montrent qu'au sein d'un même champ la variabilité est parfois très grande.

¹⁰ T_dimPoids = poids du panier témoin - poids moyen des paniers actifs en fin d'expérience.

3.3.3.5. Evolution de la croûte de battance (B_dlim)

3.3.3.5.1. Distribution initiale des calibres d'agrégats à la surface des placettes

Les boîtes de Tukey (figure 15) et l'annexe 3.3.3.7. résument les observations de surface couverte par les différentes catégories de surface conservées. On voit que des outliers sont présents dans la plupart des catégories et particulièrement pour la surface sombre et la catégorie]0-0,2]. Les outliers de la catégorie]0-0,2] sont liés à l'attribution de la surface lisse à cette catégorie pour le champ 6. On voit que la surface sombre prend une valeur généralement basse hors quelques outliers.

La surface sombre représente dans la plupart des cas une très faible proportion de la placette bien qu'il existe de nombreux outliers. L'annexe 3.3.3.2. résume de façon chiffrée les données pour chaque catégorie et montre que la variance intra-champs moyenne de la catégorie]5-] est élevée (22%). Les catégories représentant le plus de surface en moyenne sont la catégorie]1-2] ($20 \pm 6,2$ %),]0,5-1] (19 ± 5 %) et]0-0,2] ($17 \pm 4,6$ % sans le champ 6). En moyenne 91,2 % de la surface est couverte par des agrégats de calibre inférieur à 5 cm.

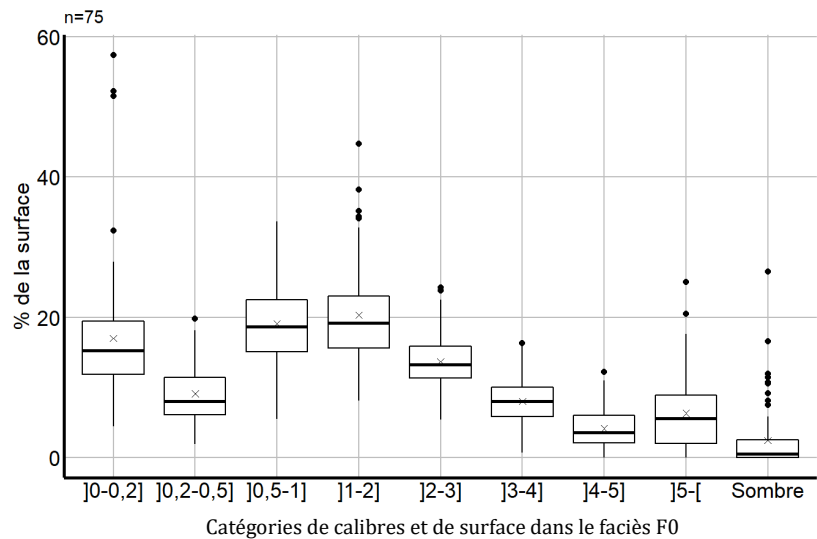


Figure 15 : Distribution de la surface initiale couverte par les catégories de surface conservées (annexe 2.4.3.5.4.). Rectangle central = second et troisième quartile ; barre = médiane ; points = outliers ; croix = moyenne ; minimum = extrémité barre inférieure ; maximum = point supérieur ou extrémité barre supérieure.

]0-0,2[= agrégats entre 0 et 0,2 cm exclus ;]0,2-0,5[= " " entre 0,2 et 0,5 cm ;]0,5-1[= " " entre 0,5 et 1 cm ;]1-2[= " " entre 1 et 2 cm ;]2-3[= " " entre 2 et 3 cm ;]3-4[= " " entre 3 et 4 cm ;]4-5[= " " entre 4 et 5 cm ;]5-] = agrégats supérieurs à 5 cm ; Sombre = surface classée comme «S sombre ».

L'annexe 3.3.3.3. permet de visualiser l'évolution des données au cours de leur manipulation (voir aussi le tableau de l'annexe 2.4.3.5.4) pour voir les données finales utilisées pour générer l'indicateur B_dlim.

3.3.3.5.2. Données pluviométriques

Le tableau de l'annexe 3.3.3.4. résume les données pluviométriques et compare les données récupérées sur le terrain à partir des pluviomètres aux données obtenues avec les stations Pameseb. Les données des pluviomètres sont presque systématiquement inférieures aux données Pameseb (en moyenne de $4,6 \pm 2,1$ [mm] par relevé). La matrice de corrélation de l'annexe 3.3.3.5. montre que la distance entre le champ et la station Pameseb ne joue pas un rôle significatif (p-val = 0,05) dans la différence observée entre les données Pameseb et de terrain.

3.3.3.5.3. Evolution de la surface de plaque

Le graphe de l'annexe 3.3.3.6. représente les données de surface de plaque estimées pour tous les passages. Un plateau se forme plus ou moins rapidement entre 75 et 100 % de la surface et les placettes atteignent ce plateau plus ou moins rapidement.

3.3.3.5.4. Génération de l'indicateur de sensibilité à la battance B_dlim

Les annexes 3.3.3.6 et 3.3.3.7. montrent les données avec lesquelles il a été possible de générer le graphe de dlim en fonction de la pluie cumulée (annexe 3.3.3.8.) et à partir duquel il a ensuite été possible de réaliser des droites de régression dont les pentes ont servi d'indicateur de sensibilité à la battance.

L'annexe 3.3.3.9. contient deux histogrammes du nombre de points utilisés pour réaliser les régressions ainsi que les r carrés ajustés associés. Le nombre de points utilisé s'étend de deux à sept avec une moyenne à quatre et la plupart des placettes (62 sur 74) ont un r carré ajusté supérieur à 0,75 avec un r carré minimum de 0,23.

L'histogramme de B_dlim montre que les données se répartissent autour de la moyenne avec une légère asymétrie à gauche.

Une analyse de l'indépendance de B_dlim par rapport à la répartition initiale des agrégats a aussi été réalisée sous forme de corrélogramme disponible en annexe 3.3.3.10. Ce corrélogramme montre que l'indicateur B_dlim n'est pas significativement ($p = 0,05$) corrélé aux différentes catégories d'agrégats ni à la pente des courbes de l'annexe 3.3.3.8. (S_cali_cum sur le corrélogramme). Cela suggère l'indépendance de l'indicateur par rapport à la répartition initiale des agrégats, confirmant les propos de Boiffin.

3.3.3.6. Structure du sol, test VESS (V)

L'histogramme montre que les données se répartissent autour de la moyenne, proches de la distribution normale ($p\text{-val} > 0,05$), avec peu d'observations des valeurs extrêmes et une légère asymétrie à droite.

3.3.3.7. Infestation par les adventices (A_...)

Les indicateurs de diversité d'hiver et de printemps (A_divh et A_divp) ont une distribution relativement homogène sur les histogrammes. Les données maximales de printemps sont plus élevées que celles d'hiver. Les champs désherbés avant l'hiver n'ont pas été retirés des données pour générer A_divh. Les indicateurs de diversité n'étant pas répétables, le nombre d'observation total est donc de 20.

Les indicateurs de densité d'hiver et de printemps (A_denh et A_denp) ont une répartition très asymétrique sur la gauche, presque 50% des placettes ont une densité proche de 0 plante/m². La moyenne et le maximum de densité sont plus élevés au printemps qu'en hiver.

Concernant l'indicateur de compétitivité au printemps (A_comp), il suit une distribution semblable aux indicateurs de densité mais avec un peu plus de 75 % des données proche de 0 plante compétitive par m².

3.3.3.8. Maladies : présence de septoriose des feuilles (M)

Cet indicateur n'a pas subi de répétition. Seuls deux scores ont été observés : le score 1 contient neuf des vingt champs tandis que le score 2 a été observé sur les onze autres. Cet indicateur ne sépare donc les champs qu'en deux catégories de tailles presque identiques entre les deux valeurs minimums d'infection de la culture par la septoriose des feuilles.

3.4. **Analyses multivariées**

3.4.1. **Analyse en composantes principales et classification à partir des indicateurs de SE**

3.4.1.1. ACP1_SE et ACP2_SE

Une première ACP (ACP1_SE) a été réalisée sur les indicateurs de SE mesurés sur 19 des 20 champs étudiés. Ses composantes principales ont été construites à partir de 18 variables actives provenant de sept expériences différentes (tableau 14). Les six indicateurs de SE restants ont été ajoutés à l'analyse en tant que variables supplémentaires pour différentes raisons :

- L'indicateur unique du SE présence de maladies (M) a été écarté car il distingue insuffisamment les champs entre eux et qu'il s'agit d'une variable qualitative ordinaire avec seulement deux modalités, cela n'étant pas pris correctement en compte dans les ACP ;
- Les indicateurs de nombre de cabanes et turricules après 2 et 4 mois et T_poids ont été retirés afin de limiter le biais de leur dépendance aux variables cabanes finales, turricules finaux et T_dimPoids respectivement. Les variables qui dépendent les unes des autres par leur lien avec un même processus ou par calcul sont donc redondantes et impactent l'analyse en faisant ressortir principalement ces liens de corrélation-là, qui nous intéressent peu car étant évidents. Cela tend à produire des composantes principales très proches de ces variables, et réduit les possibilités d'exposition d'autres liens existants.

En outre, 62 indicateurs de PC (tableau 7) ont également été ajoutés en variables illustratives afin d'observer les corrélations qui peuvent exister entre PC et SE.

Cependant, les premières dimensions de cette ACP se sont construites essentiellement à partir d'indicateurs d'un nombre réduit d'expériences : incorporation de la MO (T_...), teneur en C_{org} (C_...) et présence d'adventices (A_...). Ces expériences ont respectivement neuf, quatre et cinq indicateurs de SE liés, contre un ou deux pour les autres expériences, induisant une sur-représentation de ces expériences-là par rapport aux autres et donc augmentant leur contribution aux dimensions. Les graphiques, l'interprétation des dimensions et les chiffres détaillés associés à cette ACP1_SE sont disponibles à l'annexe 3.4.1.

Afin d'augmenter les possibilités de représentation des autres expériences et dans les premières dimensions, une seconde ACP (ACP2_SE) a donc été réalisée avec seulement 12 indicateurs de SE en variables actives, variant de 1 à 3 pour chacune des sept expériences :

T_cabF, T_turF, T_dimPoids, D_S, D_K, C_tot, C_qfrac, U, B_dlim, V, A_denh et A_comp. Le choix des variables s'est fait selon les critères de représentativité de l'expérience et de réduction de la redondance entre variables (corrélations) au sein d'une même expérience en se référant au corrélogramme des indicateurs de SE (figure 25) afin d'explorer d'autres liens que ceux déjà évidents.

L'indicateur T_dimPoids a été maintenu plutôt que l'indicateur T_surf, qui ne prend pas en compte la dimension 3D de la quantité de paille en surface à la fin de l'expérience. Pour les teneurs en C_{org}, C_{tot} et C_{qfrac} ont été choisis comme indicateurs résumant à la fois la teneur en MO dans les sols – une mesure liée à plusieurs autres SE dans la littérature – et la dynamique d'augmentation du carbone dans le sol via l'évolution du rapport C_{org} labile sur C_{org} stable. En outre, l'indicateur C_{org} labile étant très fortement corrélé positivement au C_{org} total, il paraissait peu pertinent de garder les deux. Par ailleurs, l'indicateur C_{qfrac} étant le rapport entre C_{org} labile et stable, de fortes variations de ceux-ci pourraient être perçues à travers lui. Parmi les indicateurs de présence d'adventices, A_{comp} semble être le plus intéressant d'un point de vue agronomique car il s'approche de l'impact réel des adventices sur la culture. Un indicateur de sortie d'hiver A_{denh} a également été maintenu afin d'observer d'éventuelles différences de dynamiques saisonnières.

La figure 16 et l'annexe 3.4.7. indiquent que la contribution des différentes expériences à la construction des trois premières dimensions dans l'ACP2_SE est plus équilibrée que dans l'ACP1_SE, pour laquelle les contributions fortes concernent essentiellement les indicateurs T_..., C_... et A_.... En outre, la stabilité des résultats d'une ACP est déterminée par le ratio du nombre d'échantillon sur le nombre de variables (Université de Lyon 2012). Certains auteurs

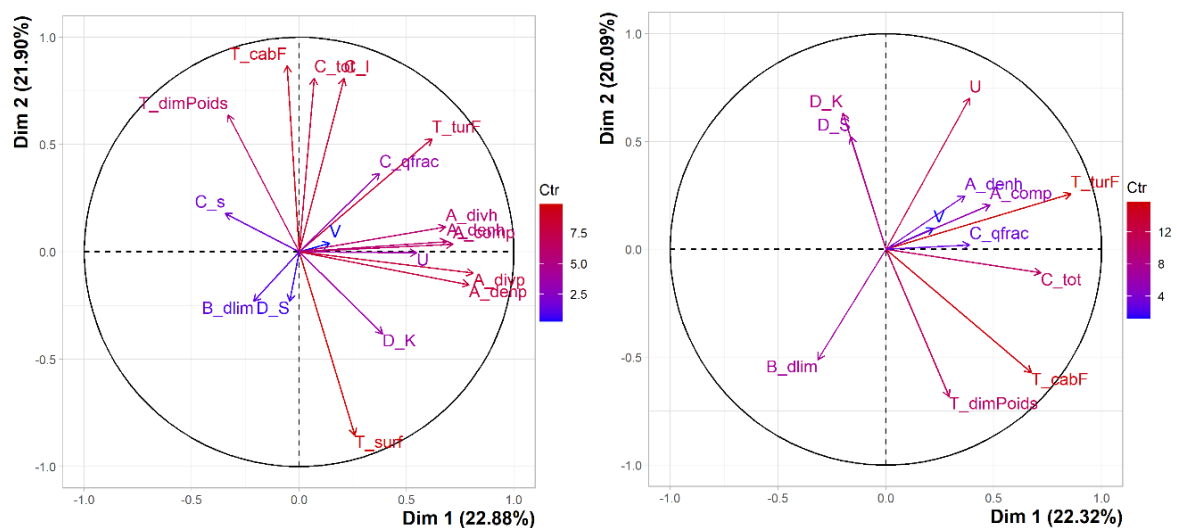


Figure 16 : Analyse en composantes principales des variables « indicateurs de services écosystémiques » ACP1_SE (à gauche) et ACP2_SE (à droite) réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse, en fonction de leur contribution aux composantes 1 et 2. Les axes correspondent aux dimensions 1 et 2.

A_{comp} = compétition d'adventices au printemps ; A_{denh} = densité d'adventices en sortie d'hiver ; A_{densp} = densité d'adventices au printemps ; A_{divh} = diversité d'adventices en sortie d'hiver ; A_{divp} = diversité d'adventices au printemps ; B_{dlim} = vitesse de formation de la croûte de battance ; C_I = ratio teneur en carbone organique labile ; C_{qfrac} = ratio teneur en carbone organique labile / teneur en carbone organique stable ; C_s = teneur en carbone organique stable ; C_{tot} = teneur en carbone organique total ; D_K = vitesse de décomposition de la matière organique ; D_S = facteur de stabilisation de la matière organique ; T_{cab2}, T_{cab4} et T_{cabF} = nombre de cabanes de VDT après 2 et 4 mois et en fin d'expérience respectivement ; T_{dimPoids} = poids de paille disparue en fin d'expérience ; T_{poids} = poids de paille en fin d'expérience ; T_{surf} = surface de paille en fin d'expérience ; T_{tur2}, T_{tur4} et T_{turf} = nombre de turricules de VDT après 2 et 4 mois et en fin d'expérience respectivement ; U = stabilité des agrégats ; V = compaction du sol.

considèrent que les ACP ne sont réellement interprétables que lorsque ce ratio est supérieur à 3. L'échantillon de cette première année de mesure étant relativement petit, il semble pertinent de réduire le nombre de variables actives.

A côté de ces variables actives, l'ACP2_SE contient également des variables supplémentaires : les 12 indicateurs de SE restants, 59 indicateurs de PC quantitatifs et 3 indicateurs de PC qualitatifs (tableaux 7 et 14).

L'interprétation de l'ACP2_SE se concentre principalement sur ses trois premières dimensions, expliquant respectivement 22,32 %, 20,09 % et 17,62 % de la variabilité, ou inertie, et totalisant à elles trois 60,03 % de l'information contenue dans le jeu de données. Selon les deux critères de détermination du nombre de dimensions à retenir, Cattell¹¹ et Kaiser¹², les dimensions 4 (14,12 %) et 5 (10,43 %) pourraient également apporter une information complémentaire utile (SMCS 2021). Cependant, et en particulier pour un jeu de données avec un petit échantillon, il peut être plus intéressant d'utiliser la règle de Karlis¹³, qui est plus restrictive dans le nombre de dimensions retenues.

La valeur propre associée à une composante reflète la proportion de la variance du jeu de données contenue par cette composante comparée à la variabilité moyenne contenue dans les variables d'origine. Les composantes dont la valeur propre sont supérieures à 1 sont donc des composantes qui permettent de mieux résumer la variabilité des données que les variables d'origine. Les valeurs propres des cinq premières dimensions sont respectivement 2,68, 2,41, 2,11, 1,69 et 1,25. La règle de Karlis suggère dans le cas de cette ACP de ne retenir qu'une seule dimension, et les critères de Cattell et de Kaiser cinq. Trois dimensions sont donc interprétées ci-dessous. Les graphes des variables et des individus liés à celles-ci sont illustrés aux figures 18 et 17 respectivement.

Le tableau 16 reprend les principaux indicateurs corrélés positivement et négativement (p-valeur < 0,05) aux trois premières dimensions de l'ACP2_SE. Les valeurs chiffrées de l'ensemble des variables sont disponibles à l'annexe 3.4.3.

Comme l'indiquent la première colonne du tableau 16 et la figure 18, la première dimension est corrélée **positivement** avec le nombre de turricules et de cabanes après 2 et 4 mois et en fin d'expérience, la teneur en C_{org} total et labile et la compétition des adventices au printemps. Elle est également **positivement** corrélée au nombre d'années depuis le dernier labour, au nombre de variétés et espèces récoltées en association, à la fréquence d'apports organiques, à la durée de cultures, couverts et prairies confondus et à la durée de prairies uniquement. La surface et le poids de paille sont quant à eux **négativement** corrélés à cette première dimension. Il en est de même pour la fréquence de labour, la profondeur cumulée de toutes

¹¹ Le critère de Cattell conseille de ne conserver que les dimensions avant le « coude » dans les schémas de décomposition de l'inertie (annexe 3.4.3.), supposant l'apport en information des composantes suivantes négligeable.

¹² Le critère de Kaiser propose de ne prendre en compte que les composantes dont la valeur propre est supérieure à 1.

¹³ La règle de Karlis préconise de prendre les composantes ayant une valeur propre supérieure à la moyenne des valeurs propres + 2 fois leur écart-type ($\lambda > 1 + 2 * \text{sqrt}(p-1/n-1)$ avec p = nombre de variables et n = nombre d'observations)

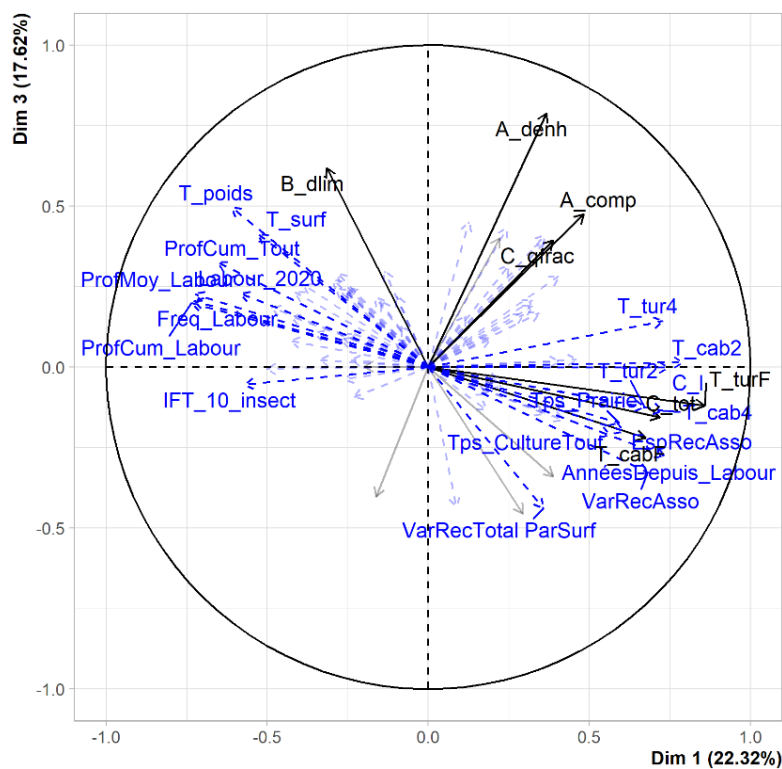
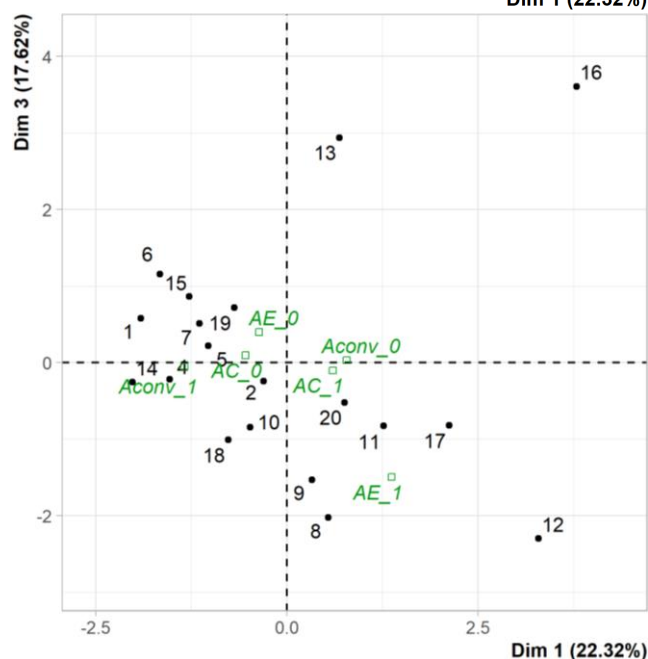
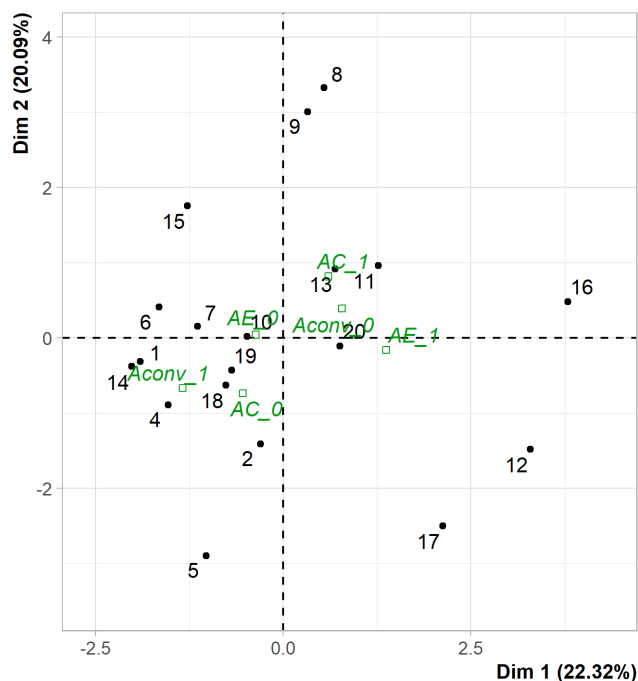
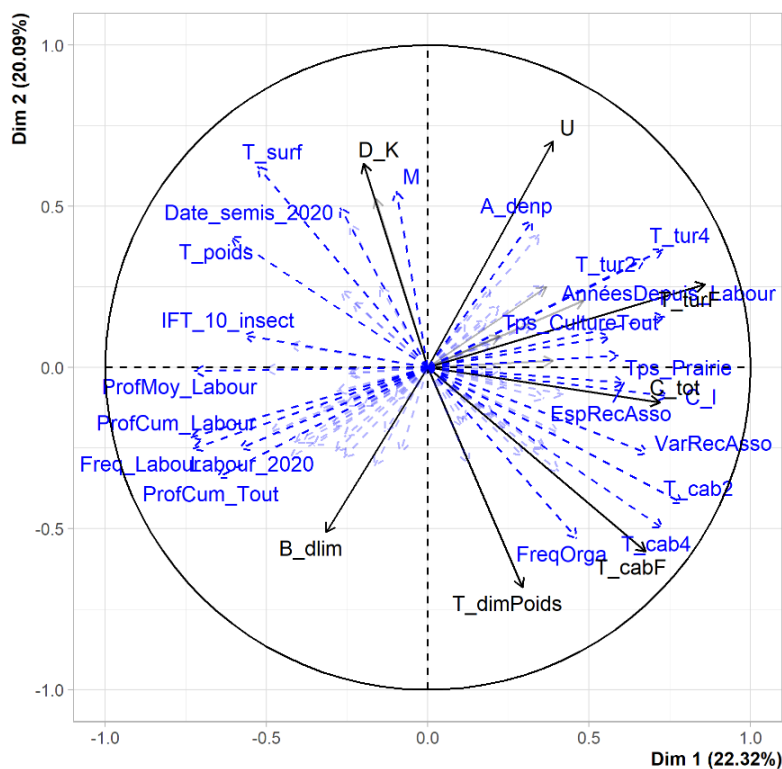


Figure 17: Graphes des individus « champs » de l'analyse en composante principale ACP2_SE réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse sur base d'indicateurs de services écosystémiques. Les carrés verts représentent la moyenne de la modalité de variables qualitatives supplémentaires dont la p-valeur < 0,05. Les termes suivants sont utilisés par l'agriculteur pour décrire son système de culture : AC_1 = agriculture de conservation ; Acony_1 = agriculture conventionnelle ; AE_1 = agroécologie. Les acronymes avec _0 correspondent à la moyenne des champs n'utilisant pas ce terme. Un champ peut être défini par un ou plusieurs termes à la fois, ou aucun. Les axes correspondent aux dimensions 1, 2 et 3.

Figure 18 : Graphes des variables « indicateurs de services écosystémiques » (en noir) de l'analyse en composante principale ACP2_SE réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse, avec les « indicateurs de pratiques culturales » et certains « indicateurs de services écosystémiques » (en bleu) en variables supplémentaires. Les libellés ne sont affichés que pour les variables dont le $\cos^2 < 0,3$. Les axes correspondent aux dimensions 1, 2 et 3.

A_comp = compétition d'adventices au printemps ; A_denh = densité d'adventices en sortie d'hiver ; A_denp = densité d'adventices au printemps ; AnnéesDepuis_Labour = nombre d'années depuis le dernier labour ; B_dlim = vitesse de formation de la croûte de battance ; C_l = ratio teneur en carbone organique labile ; C_afrac = ratio teneur en carbone organique labile / teneur en carbone organique stable ; C_tot = teneur en carbone organique total ; D_K = vitesse de décomposition de la matière organique ; Date_semis = date du semis en 2020 ; EspRecAsso = nombre d'espèces récoltées en association ; Freq_Labour = fréquence de labour ; FreqOrga = fréquence d'apports organiques ; IFT_10_insect = indice de fréquence de traitement en insecticides ; Labour_2020 = réalisation d'un labour en 2020 ; M = présence de septoriose ; ProfCum_Labour = profondeur cumulée des labours ; ProfCum_Tout = profondeur cumulée de toutes les interventions mécaniques confondues ; ProfMoy_Labour = profondeur moyenne de labour ; T_cab2, T_cab4 et T_cabF = nombre de cabanes de VDT après 2 et 4 mois et en fin d'expérience respectivement ; T_dimPoids = poids de paille disparue en fin d'expérience ; T_poids = poids de paille en fin d'expérience ; T_surf = surface de paille en fin d'expérience ; T_tur2, T_tur4 et T_turF = nombre de turricules de VDT après 2 et 4 mois et en fin d'expérience respectivement ; Tps_CultureTout = durée de cultures, couverts et prairies confondues ; Tps_Prairie = durée sous prairies ; U = stabilité des agrégats ; VarRecAsso = nombre de variétés récoltées en association ; VarRecTotal = nombre de variété récoltées au total.

les interventions mécaniques et la profondeur cumulée de labour, la profondeur moyenne de labour, la présence d'un labour en 2020 avant le froment ou l'épeautre, la durée pendant laquelle le sol est à nu (travaillé), les IFT en insecticides sur froment et sur les cultures de manière générale et l'utilisation du terme « agriculture conventionnelle » par l'agriculteur pour décrire son agriculture (figure 17).

La deuxième dimension est associée **positivement** avec la stabilité des agrégats, la vitesse décomposition et le facteur de stabilisation de la MO, le facteur de stabilisation de la MO, la surface de paille en fin d'expérience, la présence de maladies, la densité d'adventices au printemps, un semis tardif de froment ou épeautre en 2020 et l'emploi du terme « agriculture de conservation » (figure 17). Elle est aussi **négativement** liée à la masse de paille disparue en fin d'expérience, au nombre de cabanes après 4 mois et en fin d'expérience, à la vitesse de formation de la croûte de battance et à la fréquence d'apports organiques.

La troisième dimension est liée **positivement** aux indicateurs de densité d'adventices en sortie d'hiver, à la compétition d'adventices au printemps, à la vitesse de formation de la croûte de battance et à la masse de paille présente en fin d'expérience. L'utilisation du terme « agroécologie » par les agriculteurs y est **négativement** corrélée (figure 17).

Tableau 16 : Résumé des variables « indicateurs de services écosystémiques » corrélées aux dimensions 1, 2 et 3 de l'analyse en composante principale (ACP2_SE) réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse. Les indicateurs sont listés par ordre de corrélation décroissant, avec une p-valeur < 0,05. Les abréviations utilisées sont expliquées au tableau 7 et 14. ** = p-valeur < 0,01 ; * = p-valeur < 0,05. En noir = variable quantitative active ; en bleu = variable quantitative supplémentaire ; en vert = variable catégorielle supplémentaire.

Corrélation avec la dimension 1		Corrélation avec la dimension 2		Corrélation avec la dimension 3	
Positive	Négative	Positive	Négative	Positive	Négative
T_turF**	ProfCum_Labour**	U**	T_dimPoids**	A_denh**	AE*
T_cab2**	Freq_Labour**	D_K**	T_cabF*	B_dlim**	
C_l	ProfMoy_Labour**	T_surf**	FreqOrga*	T_poids*	
AnnéesDepuis_Lab	ProfCum_Tout**	M*	B_dlim*	A_comp*	
T_tur4**	T_poids**	D_S*	T_cab4*		
T_cab4**	Labour_2020**	Date_semis_2020*			
C_tot**	IFT_10_insect*	A_denp*			
VarRecAsso**	T_surf*	AC*			
T_cabF**	IFT_froment_insect*				
T_tur2**	Tps_SolTravail*				
EspRecAsso**	Aconv*				
Tps_Prairie**					
Tps_CultureTout*					
A_comp*					
FreqOrga					

Sur la figure 17, l'on observe qu'une grande proportion des champs sont proches d'une valeur légèrement négative pour la dimension 1 et proches de 0 pour les deux autres dimensions. A côté de cela, quelques champs se distinguent par des valeurs particulièrement élevées sur la dimension 1, comme les champs 16, 12 et 17, correspondant – en se référant simultanément à la figure 18 – à un travail du sol très faible, un nombre de cabanes et turricules de VDT élevé... Les parcelles 8 et 9, dont les coordonnées sur la dimension 2 sont très élevées, sont caractérisées par une stabilité des agrégats importante, tandis que le champ 5 possède à l'inverse une stabilité des agrégats faible et est sensible à la formation d'une croûte de battance. Les acronymes Aconv, AC et AE indiqués sur la figure 17, et liés respectivement aux dimensions 1, 2 et 3, sont situés dans les directions des champs utilisant

ces termes. Ainsi, les champs 14, 1, 4 et 6 ont plus tendance à être qualifiés par le terme Aconv, les champs 8, 9, 11, 13 et 16 par AC et les champs 8, 9, 11, 12 et 17 par AE.

3.4.1.2. Classification HCPC2_SE sur ACP2_SE

Une classification hiérarchique (figure 19) basée sur les cinq premières composantes principales de l'ACP2_SE (84,58 % de l'inertie du jeu de données initial) permet de mettre en évidence deux grands groupes de champs se distinguant par les caractéristiques suivantes (p-valeur < 0,05) :

- Une vitesse de formation de la croûte de battance **élevée** pour le **groupe 1** et **faible** pour le **groupe 2** ;
- Une profondeur cumulée de toutes les interventions mécaniques, de labour et de mélange, une profondeur moyenne de labour et de mélange, une fréquence de labour, une fréquence de mélange profond, une fréquence de récolte de cultures souterraines et un IFT en insecticides en culture de froment **élevés** pour le **groupe 1** et **faibles** pour le **groupe 2** ;
- Un nombre de cabanes et turricules de VDT après 2 et 4 mois et en fin d'expérience, une stabilité des agrégats et une teneur en C_{org} total et labile **faibles** pour le **groupe 1** et **élevés** pour le **groupe 2** ;
- Un nombre d'années depuis le dernier labour, un nombre de variétés récoltées en association et une durée de cultures, couverts et prairies confondus **faibles** pour le **groupe 1** et **élevés** pour le **groupe 2** ;
- Une utilisation du terme Aconv **fréquente** pour le **groupe 1** et **rare** pour le **groupe 2** ;
- Une position sur la première dimension **faible** pour le **groupe 1** et **élevée** pour le **groupe 2**.

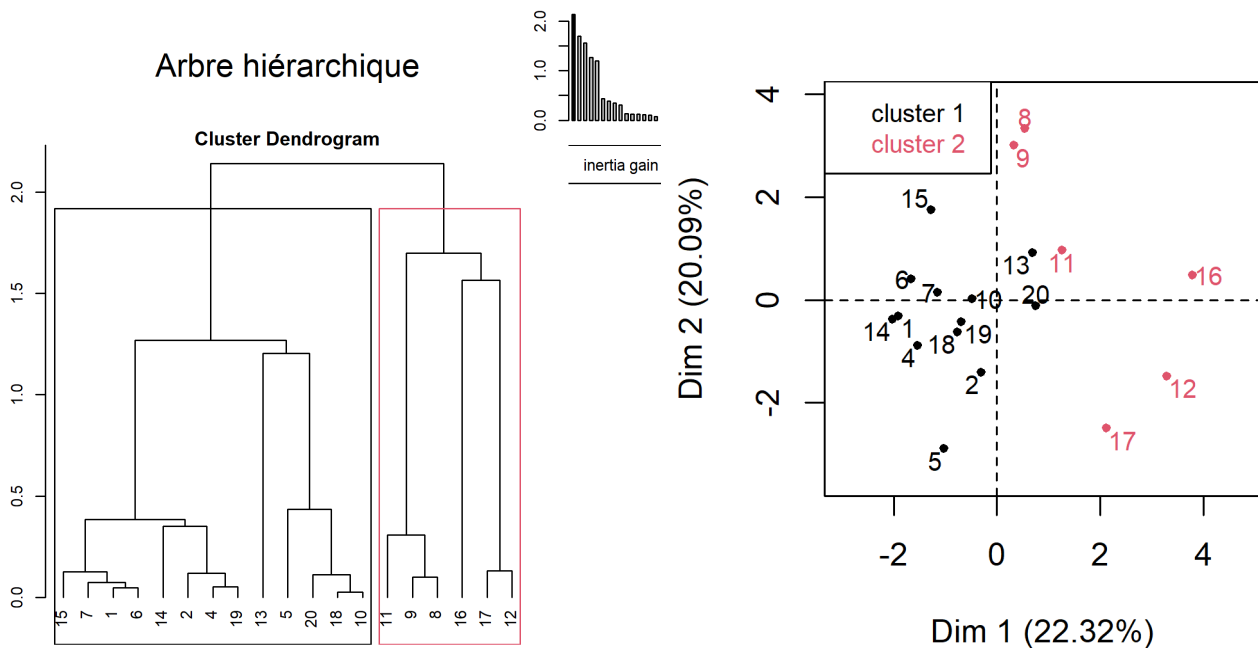


Figure 19: Arbre hiérarchique (à gauche) et graphe du plan factoriel « champs » (à droite) associés à la classification hiérarchique basée sur l'analyse en composante principale (ACP2_SE) construites à partir d'indicateurs de services écosystémiques mesurés en 2020-2021 sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse. Celles-ci peuvent être catégorisées en deux groupes (clusters), représentés par une couleur différente. L'ordonnée du graphe de gauche correspond à l'inertie cumulée de chacune des dimensions. Les axes du graphe de droite correspondent aux dimensions 1 et 2 de l'analyse en

Le graphe des individus de cette HCPC2_SE en deux groupes est illustré à la figure 19 selon les dimensions 1 et 2, et à l'annexe 3.4.4. selon les dimensions 1 et 3. Cette annexe comprend également toutes les valeurs chiffrées des caractéristiques de ces groupes.

Ces deux grands groupes peuvent être subdivisés en trois sous-groupes chacun, formant ainsi six plus petits groupes distincts. Ces groupes, illustrés de gauche à droite sur l'arbre hiérarchique à la figure 20, sont décrits ci-après. Les individus sont également représentés à la figure 20 selon les dimensions 1 et 2 et à l'annexe 3.4.4. selon les dimensions 1 et 3, avec une couleur différente pour chacun des six groupes (correspondance avec les *clusters* entre parenthèses). Les valeurs chiffrées des variables caractérisant ces groupes sont disponibles à cette même annexe.

- Le premier groupe (*cluster 1*) est composé de parcelles (1, 2, 4, 6, 7, 14, 15, 19) avec :
 - Un poids de paille en fin d'expérience et une vitesse de progression de la croûte de battance **élevés** ;
 - Une profondeur cumulée des interventions mécaniques, et en particulier d'interventions de labour, une profondeur moyenne de labour, une fréquence de labour, un labour avant le froment ou épeautre semé en 2020, une fréquence de récolte de culture souterraines et une durée de sol nu (travaillé) **élevés** ;
 - Un nombre de cabanes après 2, 4 mois et en fin d'expérience, un nombre de turricules après 2 mois et en fin d'expérience, et une teneur en C_{org} total et C_{org} labile **faibles** ;
 - Un nombre d'années depuis le dernier labour, une fréquence d'outils fragmentant le sol (surtout superficiellement), et une durée de cultures, couverts et prairies confondus **faibles** ;
 - Une position **faible** sur la dimension 1.
- Le deuxième groupe (*cluster 3*) contient un champ (13) avec :
 - Une densité d'adventices en sortie d'hiver et un ratio qfrac **élevés** ;
 - Une position **élevée** sur la dimension 3.
- Le troisième groupe (*cluster 2*) comprend les champs (5, 10, 18, 20) caractérisés par :
 - Une fréquence de fragmentation, et plus particulièrement de fragmentation superficielle, et un temps sous *mulch* (= débris végétaux en surface) **élevés** ;
 - Une compaction du sol et un facteur de stabilisation de la MO **faibles** ;
- Le quatrième groupe (*cluster 4*) regroupe les champs (8, 9, 11 (= parcelles en semis direct)) avec :
 - Une stabilité des agrégats **élevée** ;
 - Une fréquence de fragmentation superficielle **élevée** ;
 - Une vitesse de formation de la croûte de battance **faible** ;
 - Une profondeur cumulée de tous les outils confondus **faibles** ;
 - Une position **élevée** sur la dimension 2.
- Le cinquième groupe (*cluster 6*) est composé d'une parcelle (16) avec :
 - Une compétition, densité et diversité d'adventices au printemps, une densité d'adventices en sortie d'hiver, un nombre de turricules après 4 mois et en fin d'expérience et un nombre de cabanes après 2 mois **élevés** ;
 - Une diversité en espèces récoltées et totales et des IFT en herbicides et en régulateurs en culture de froment **élevés**.

- Une position **élevée** sur les dimensions 1 et 3.
- Le sixième groupe (*cluster 5*) rassemble les champs (12, 17) avec :
 - Un nombre de cabanes de VDT après 2 et 4 mois et en fin d'expérience, une disparition de paille en fin d'expérience, et une teneur en C_{org} total et labile **élevés** ;
 - Un nombre de variétés et espèces récoltées en association, un nombre de variétés récoltées par unité de surface, une fréquence d'apports organiques, un nombre d'années depuis le dernier labour **élevés** ;
 - Une surface et un poids de paille en fin d'expérience et une vitesse de décomposition de la MO **faibles** ;
 - Une position **élevée** sur la dimension 1.

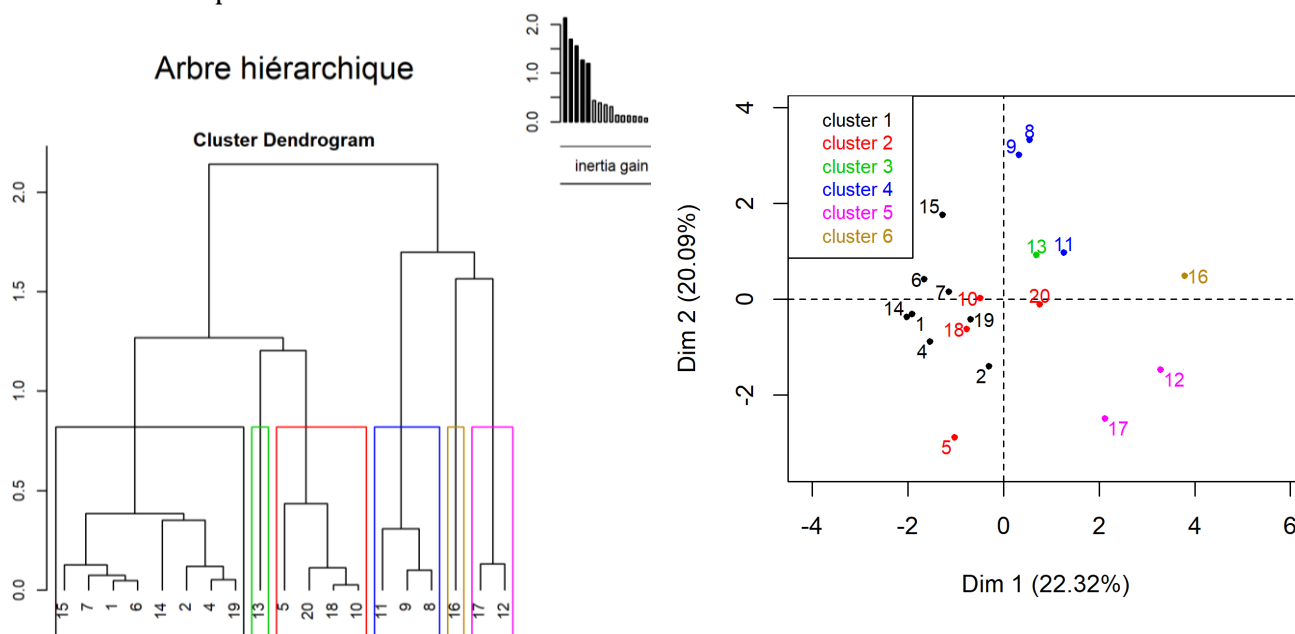


Figure 20 : Arbre hiérarchique (à gauche) et graphe du plan factoriel « champs » (à droite) associés à la classification hiérarchique basée sur l'analyse en composante principale (ACP2_SE) construites à partir d'indicateurs de services écosystémiques mesurés en 2020-2021 sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse. Celles-ci peuvent être catégorisées en six groupes (clusters), représentés par une couleur différente. L'ordonnée du graphe de gauche correspond à l'inertie cumulée de chacune des dimensions. Les axes du graphe de droite correspondent aux dimensions 1 et 2 de l'analyse en composante principale.

Une classification hiérarchique HCPC1_SE réalisée sur les cinq premières composantes principales de l'ACP1_SE produit six groupes très similaires à la HCPC2_SE, au détail près que le champ n°2 est déplacé dans un autre groupe (annexe 3.4.2.).

3.4.2. ACP avec les pratiques culturelles en variables actives

3.4.2.1. ACP₃_PC sur les pratiques culturelles

L'ACP réalisée sur 19 parcelles basée sur 19 variables quantitatives principales de PC actives auxquelles s'ajoutent 66 variables supplémentaires (40 PC quantitatives plus spécifiques, 2 PC qualitatives et 24 SE quantitatives), reprises dans les tableaux 7 et 16, est présentée dans la partie ci-dessous (figure 22).

Les trois premières dimensions retenues expliquent respectivement 34,42 %, 17,16 % et 14,78 % de la variabilité (ou inertie) totalisant à elles trois 66,37 % de l'information contenue dans le jeu de données. Les valeurs propres de ces dimensions, indiquant l'intérêt de ces axes pour représenter les données, sont de 6,54, 3,26 et 2,81 respectivement, respectant la règle de Karlis et le critère de Cattell.

Le tableau 17 reprend les principales variables corrélées positivement et négativement (p-valeur < 0,05) aux trois premières dimensions de l'ACP3_PC (figure 22). Les valeurs chiffrées de l'ensemble des variables sont disponibles à l'annexe 3.4.5.

Tableau 17 : Variables « indicateurs de services écosystémiques » corrélées aux dimensions 1, 2 et 3 de l'analyse en composante principale (ACP3_PC) réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse. Les indicateurs sont listés par ordre de corrélation décroissant, avec une p-valeur < 0,05. Les abréviations utilisées sont expliquées au tableau 7 et 14 de la partie M&M. ** = p-valeur < 0,01 ; * = p-valeur < 0,05. En noir = variable quantitative active ; en bleu = variable quantitative supplémentaire ; en vert = variable catégorielle supplémentaire.

Corrélation avec la dimension 1		Corrélation avec la dimension 2		Corrélation avec la dimension 3	
Positive	Négative	Positive	Négative	Positive	Négative
ProfCum_Tout**	T_turF**	Ktot**	A_divh*	Tps_Culture**	A_denp*
FreqRecolteSol**	T_tur2**	Ptot**	DivEspCV*	NminTot**	DivEspRec*
Tps_SolTravaille**	Tps_cultureTout**	Ntot**	ProfMoy_Mel*	IFT_10**	
IFT_10**	T_tur4**	NorgTot**		AnnéesDepuis_Labour*	
ProfCum_Labour**	AnnesDepuis_Labour**	IFT_froment**		IFT_10_herb*	
ProfMoy_Mel**	EspRecAsso**	IFT_froment_reg**		T_cab4*	
ProfMoy_Labour**	Tps_Prairie**	IFT_froment_fong*		IFT_10_fong*	
Freq_Labour**	VarRecAsso**	EspRecAsso*		EspParCV*	
ProfCum_Mel**	VarRecTotal_ParSurf*	IFT_froment_insect*		DivEspCV*	
IFT_10_insect**	U*	Aconv*		T_cabF*	
IFT_10_fong**	T_cab2*			Ntot*	
Freq_Outils*	AC*				
T_poids*					
Freq_Mel*					
IFT_froment_insect*					
Freq_MelProf*					
Aconv*					

La première dimension est corrélée **positivement** avec la profondeur cumulée des interventions mécaniques, et en particulier d'interventions de labour et de mélange du sol, la profondeur moyenne de labour et profondeur moyenne de mélange, la fréquence de labour et la fréquence de mélange du sol, et en particulier la fréquence de mélange en profondeur, la fréquence de passage d'outils hors éléments semeurs, la fréquence de récolte de culture souterraines, la durée durant laquelle la parcelle est mise à nu (avec le sol travaillé), l'IFT global, et plus particulièrement ceux en fongicides et en insecticides sur la parcelle et l'IFT en insecticides en culture de froment. Le terme « agriculture conventionnelle » utilisé par les agriculteurs pour décrire leur agriculture est également **positivement** corrélé à cette dimension (figure 21). Le seul SE lié **positivement** à cette dimension est la masse de paille en fin d'expérience.

A l'inverse, cette première dimension est **négativement** corrélée à la durée de cultures, couverts et prairies confondus et de prairies uniquement, au nombre d'années depuis le dernier labour, au nombre de variétés et espèces récoltées en association (y compris par unité de surface) et à l'utilisation du terme « agriculture de conservation » (figure 21). Les indicateurs de SE associés **négativement** à cette dimension sont le nombre de turricules après 2 et 4 mois et en fin d'expérience et le nombre de cabanes après 2 mois et la stabilité des agrégats.

La deuxième dimension est liée **positivement** aux apports en azote total, azote organique, phosphore et potassium, aux IFT globaux, en fongicides, en insecticides et en

régulateurs de croissance sur froment, au nombre d'espèces récoltées en association et à l'utilisation du terme « agriculture de conservation » (figure 21). La diversité d'espèces dans les couverts et la profondeur moyenne de mélange du sol y sont **négativement** corrélées. Le seul indicateur de SE associé **négativement** à cette composante est la diversité d'adventices en sortie d'hiver.

La troisième dimension est liée **positivement** aux IFT globaux, en herbicides et en fongicides sur la parcelle, à la durée de la parcelle sous culture, à l'apport en azote minéral et en azote total au nombre d'années depuis le dernier labour, au nombre d'espèces par couvert et à la diversité d'espèces cultivés dans les couverts sur l'ensemble de l'historique. Le nombre de cabanes à VDT après 4 mois et en fin d'expérience y sont également liés **positivement**. Associés **négativement** à cette dimension l'on retrouve la diversité des espèces récoltées et la densité d'adventices au printemps.

Les graphiques des individus, illustrés à la figure 21, indiquent le positionnement des parcelles par rapport aux trois premières dimensions retenues.

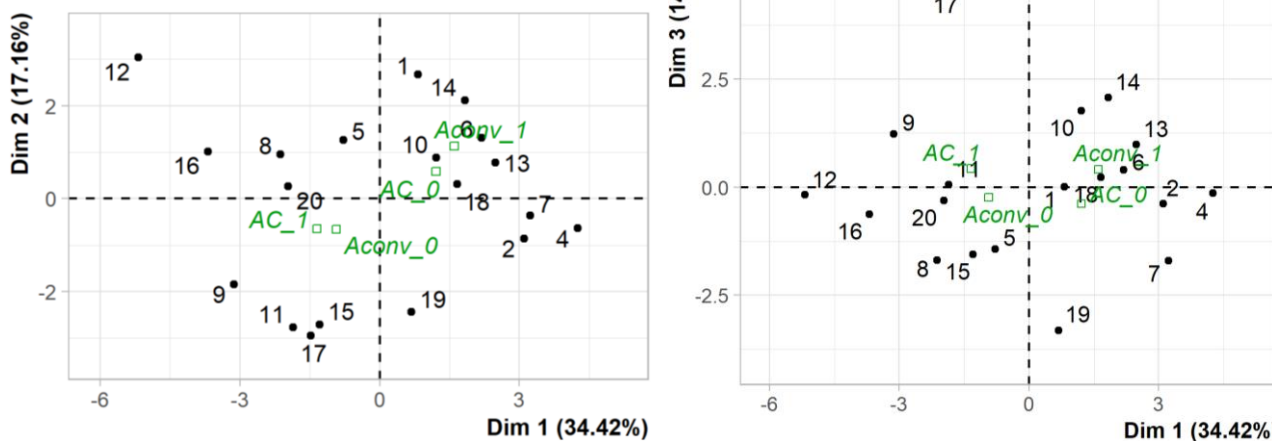


Figure 21 : Graphe des individus « champs » (en noir) de l'analyse en composante principale ACP3_PC réalisée sur 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse sur base d'indicateurs de services écosystémiques. Les carrés verts représentent la moyenne de la modalité de variables qualitatives supplémentaires dont la p-valeur < 0,05. Termes suivants utilisés par l'agriculteur pour décrire son système de culture : AC = agriculture de conservation ; Aconv = agriculture conventionnelle. Les acronymes avec _0 correspondent à la moyenne des champs n'utilisant pas ce terme. Un champ peut être défini par un ou plusieurs termes à la fois, ou aucun. Les axes correspondent aux dimensions 1, 2 et 3.

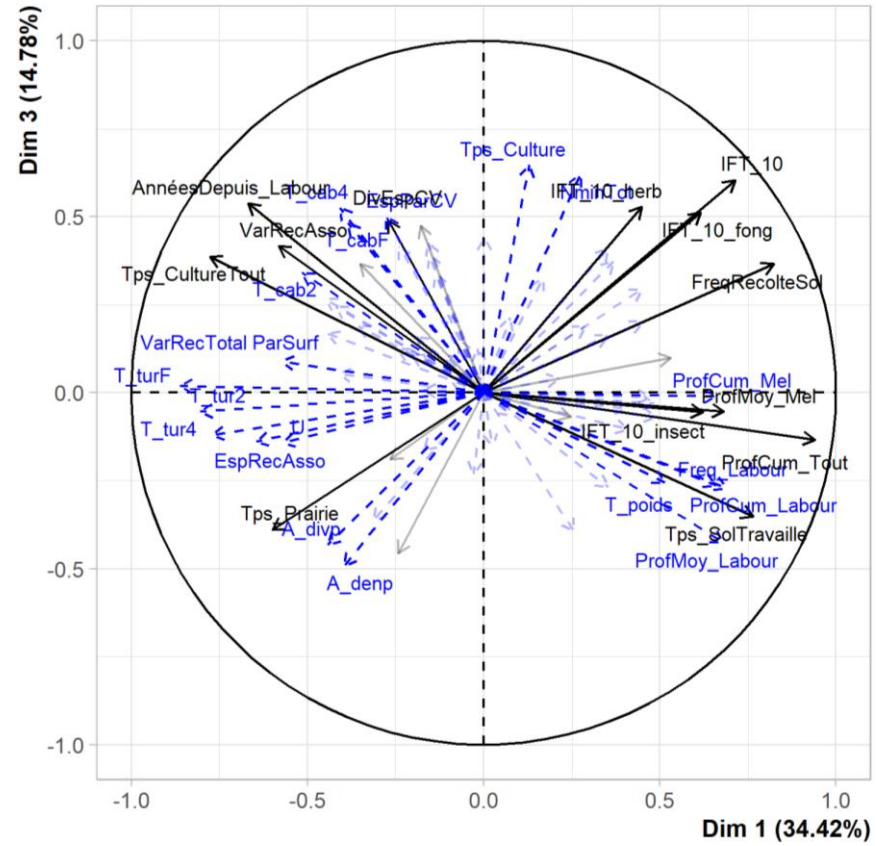
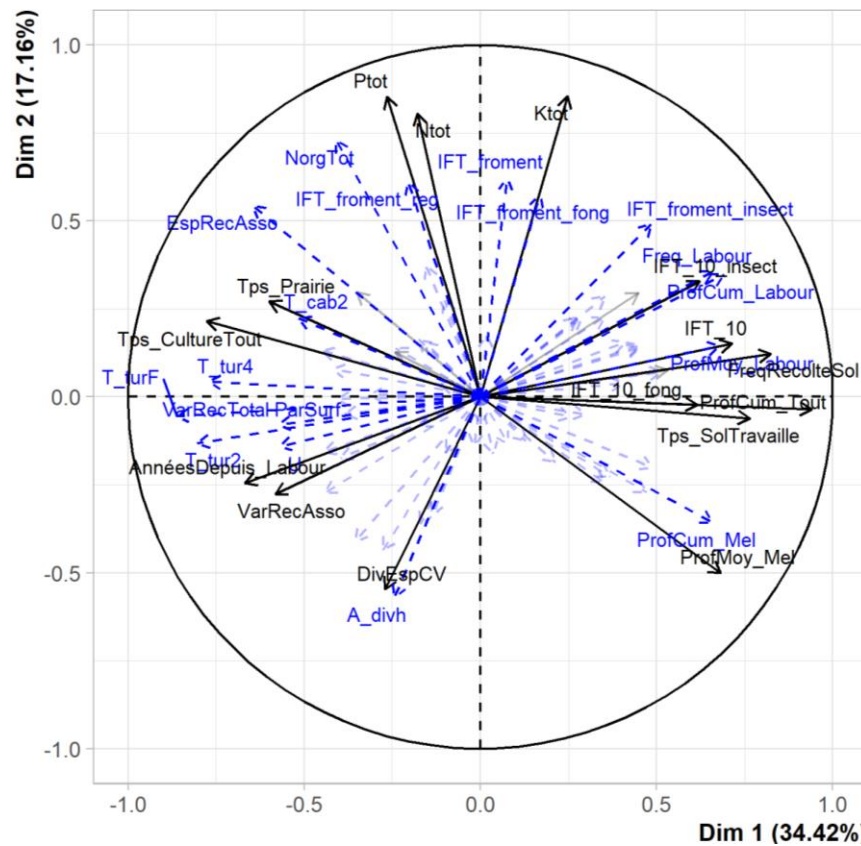


Figure 22 : Variables « indicateurs de pratiques culturales » (en noir) de l'analyse en composante principale ACP3_PC réalisée sur 19 champs en région limoneuse et sablo-limoneuse, avec les « indicateurs de services écosystémiques » et certains « indicateurs de pratiques culturales » (en bleu) en variables supplémentaires. Les libellés ne sont affichés que pour les variables dont le $\cos^2 > 0,3$. Les axes correspondent aux dimensions 1, 2 et 3. A_densp = densité d'adventices au printemps ; A_divh = diversité d'adventices en sortie d'hiver ; A_divp = diversité d'adventices au printemps ; AnnéesDepuis_Labour = nombre d'années depuis le dernier labour ; DivEspCV = diversité totale d'espèces dans les couvert ; EspParCV = nombre d'espèces par couvert ; EspRecAsso = nombre d'espèces récoltées en association ; Freq_Labour = fréquence de labour ; FreqRecolteSol = fréquence de cultures souterraines ; IFT_10 = indice de fréquence de traitement (IFT) global sur tout l'historique cultural ; IFT_10_fong = IFT en fongicides ; IFT_10_herb = IFT en herbicides ; IFT_10_insect = IFT en insecticides ; IFT_from = IFT global en culture de froment ; IFT_from_fong = IFT en fongicides en culture de froment ; IFT_from_insect = IFT en insecticides en culture de froment ; IFT_from_reg = IFT en régulateurs de croissance en culture de froment ; Ktot : apports en potassium total ; NminTot = apports en azote minéral ; NorgTot = apports en azote organique ; Ntot = apports en azote total ; ProfCum_Labour = profondeur cumulée des labours ; ProfCum_Mel = profondeur cumulée des mélanges du sol ; ProfCum_Tout = profondeur cumulée de toutes les interventions mécaniques confondues ; ProfMoy_Labour = profondeur moyenne de labour ; ProfMoy_Mel = profondeur moyenne de mélange du sol ; Ptot = apports en phosphore total ; T_cab2, T_cab4 et T_cabF = nombre de cabanes de VDT après 2 et 4 mois et en fin d'expérience respectivement ; T_poids = poids de paille en fin d'expérience ; T_tur2, T_tur4 et T_turF = nombre de turricules de VDT après 2 et 4 mois et en fin d'expérience respectivement ; Tps_Culture = durée sous cultures ; Tps_CultureTout = durée sous cultures, couverts et prairies confondus ; Tps_Prairie = durée sous prairies ; Tps_SolTravaille = durée sous sol nu (travaillé) ; VarRecAsso = nombre de variétés récoltées en association ; VarRecTotal_ParSurf = nombre de variété récoltées au total par unité de surface. A_densp = densité d'adventices au printemps ; A_divh = diversité d'adventices en sortie d'hiver ; A_divp = diversité d'adventices au printemps ; AnnéesDepuis_Labour = nombre d'années depuis le dernier labour ; DivEspCV = diversité totale d'espèces dans les couvert ; EspParCV = nombre d'espèces par couvert ; EspRecAsso = nombre d'espèces récoltées en association ; Freq_Labour = fréquence de labour ; FreqRecolteSol = fréquence de cultures souterraines ; IFT_10 = indice de fréquence de traitement (IFT) global sur tout l'historique cultural ; IFT_10_fong = IFT en fongicides ; IFT_10_herb = IFT en herbicides ; IFT_10_insect = IFT en insecticides ; IFT_from = IFT global en culture de froment ; IFT_from_fong = IFT en fongicides en culture de froment ; IFT_from_insect = IFT en insecticides en culture de froment ; IFT_from_reg = IFT en régulateurs de croissance en culture de froment ; Ktot : apports en potassium total ; NminTot = apports en azote minéral ; NorgTot = apports en azote organique ; Ntot = apports en azote total ; ProfCum_Labour = profondeur cumulée des labours ; ProfCum_Mel = profondeur cumulée des mélanges du sol ; ProfCum_Tout = profondeur cumulée de toutes les interventions mécaniques confondues ; ProfMoy_Labour = profondeur moyenne de labour ; ProfMoy_Mel = profondeur moyenne de mélange du sol ; Ptot = apports en phosphore total ; T_cab2, T_cab4 et T_cabF = nombre de cabanes de VDT après 2 et 4 mois et en fin d'expérience respectivement ; T_poids = poids de paille en fin d'expérience ; T_tur2, T_tur4 et T_turF = nombre de turricules de VDT après 2 et 4 mois et en fin d'expérience respectivement ; Tps_Culture = durée sous cultures ; Tps_CultureTout = durée sous cultures, couverts et prairies confondus ; Tps_Prairie = durée sous prairies ; Tps_SolTravaille = durée sous sol nu (travaillé) ; VarRecAsso = nombre de variétés récoltées en association ; VarRecTotal_ParSurf = nombre de variété récoltées au total par unité de surface.

3.4.2.2. Classification HCPC₃_PC sur ACP₃_PC

Une classification hiérarchique (figure 23) sur les cinq premières composantes principales de cette ACP sur les PC peut mettre en évidence deux grands groupes (groupe 1 à gauche, groupe 2 à droite), caractérisés par les variables suivantes (p-valeur < 0,05) :

- Une profondeur cumulée de toutes les interventions mécaniques, de labour et de mélange du sol, une profondeur moyenne de labour, une fréquence de labour, une fréquence de passage d'outils hors éléments semeurs, une fréquence de récolte de cultures souterraines, une durée de sol nu (travaillé), des IFT globaux, en herbicides, en fongicides et en insecticides, des IFT en insecticides et en fongicides en culture de froment, un apport en azote minéral et en potassium et un nombre de variété cultivés sur une même parcelle en différents morceaux **élevés** pour le **groupe 1** et **faibles** pour le **groupe 2** ;
- Un poids de paille en fin d'expérience **élevée** pour le **groupe 1** et **faible** pour le **groupe 2** ;
- Un nombre d'années depuis le dernier labour, un nombre de variétés récoltées en association (y compris par unité de surface), une durée de cultures, couverts et prairies confondus et une durée sous prairie uniquement **faibles** pour le **groupe 1** et **élevés** pour le **groupe 2** ;
- Un nombre de turricules de VDT après 2 et 4 mois et en fin d'expérience, une stabilité des agrégats et diversité et densité d'adventices au printemps **faibles** pour le **groupe 1** et **élevés** pour le **groupe 2** ;
- Une utilisation du terme Aconv **fréquente** pour le **groupe 1** et **rare** pour le **groupe 2** ;
- Une position sur la première dimension **faible** pour le **groupe 1** et **élevée** pour le **groupe 2**.

Les graphes des individus de cette HCPC₃_PC en deux groupes sont disponibles à l'annexe 3.4.6. selon les dimensions 1, 2 et 3. Cette annexe comprend également toutes les valeurs chiffrées des caractéristiques de ces groupes.

Tout en maintenant une inertie relativement élevée, le groupe 2 pourrait être subdivisé en deux sous-groupes. Cette classification en trois groupes distincts est présentée à la figure

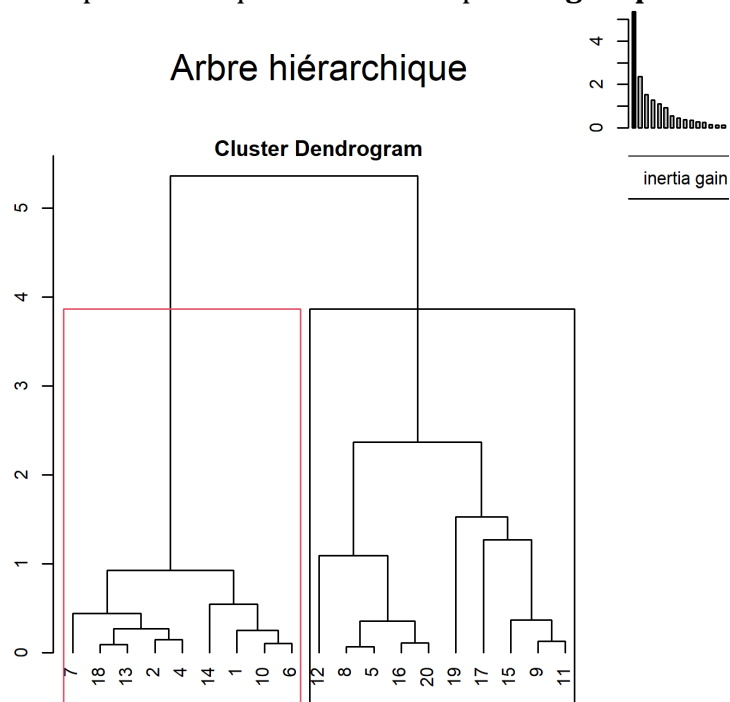


Figure 23 : Arbre hiérarchique associé à la classification hiérarchique basée sur l'analyse en composante principale construite à partir de l'historique culturelle des années 2010 à 2020 de 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse. Celles-ci peuvent être catégorisées en deux groupes (clusters), représentés par une couleur différente, selon des indicateurs de pratiques culturales. L'ordonnée du graphe de gauche correspond à l'inertie cumulée de chacune des dimensions. Les axes du graphe de droite correspondent aux dimensions 1 et 2 de l'analyse en composante principale.

24. Les variables caractérisant les deux nouveaux sous-groupes obtenus sont mentionnées ci-après avec une p-valeur < 0,05 :

- Le deuxième des trois groupes est constitué des parcelles (5, 8, 12, 16, 20) et est caractérisé par :
 - Un nombre d'espèces récoltées en association et une diversité d'espèces récoltées sur l'ensemble de l'historique, une durée sous prairie ainsi qu'un apport en phosphore et azote organique **élevés** ;
 - Un nombre de turricules après 2 et 4 mois et en fin d'expérience et un nombre de cabanes après 2 mois **élevés** ;
 - Une profondeur cumulée d'interventions et en particulier de celles mélangeant le sol, une profondeur moyenne de mélange, une fréquence de mélange profond, une fréquence de récolte de cultures souterraines et des IFT globaux et en fongicides sur la parcelle **faibles** ;
 - Un poids de paille en fin d'expérience **faible** ;
 - Une valeur **faible** sur la première dimension.
- Le dernier groupe est composé de parcelles (9, 11, 15, 17, 19) avec :
 - Une diversité d'espèces par couvert et un nombre de variétés récoltées en association **élevés** ;
 - Une diversité d'adventices en sortie d'hiver **élevée** ;
 - Un apport en potassium, phosphore, azote total et azote organique, des IFT globaux, en fongicides, en insecticides et en régulateurs de croissance sur froment, et des IFT en herbicides et en insecticides sur l'ensemble de l'historique **faibles** ;
 - Une valeur **faible** sur la deuxième dimension.

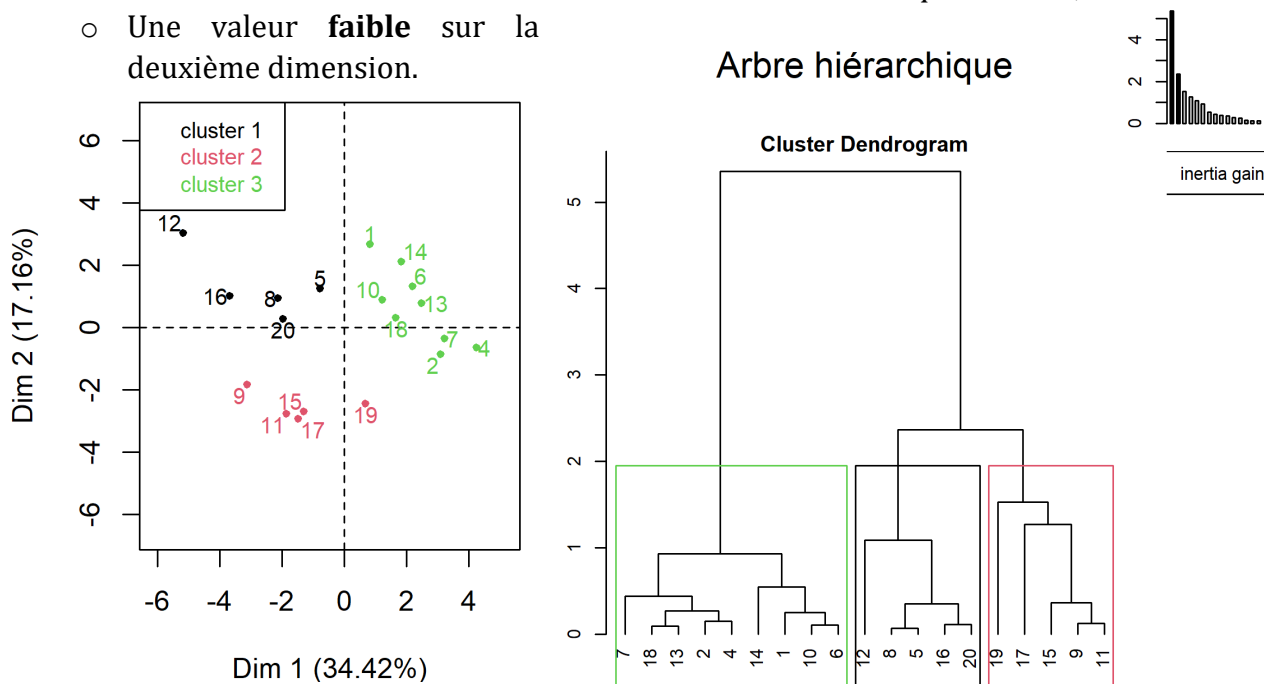


Figure 24 : Arbre hiérarchique (à gauche) et graphe du plan factoriel « champs » (à droite) associés à la classification hiérarchique basée sur l'analyse en composante principale construite à partir de l'historique culturelle des années 2010 à 2020 de 19 parcelles en région limoneuse et sablo-limoneuse. Celles-ci peuvent être catégorisées en trois groupes (clusters), représentés par une couleur différente, selon des indicateurs de pratiques culturales. L'ordonnée du graphe de gauche correspond à l'inertie cumulée de chacune des dimensions. Les axes du graphe de droite correspondent aux dimensions 1 et 2 de l'analyse en composante principale.

Il est également possible d'obtenir un plus grand nombre de groupes. Une autre classification en sept groupes est proposée à l'annexe 3.4.6. Pour cette première année de

résultats sur 19 champs, ce nombre de classe peut paraître élevé, ne comprenant parfois qu'un seul champ. Cependant cela permet d'imaginer des catégories plus fines, et d'observer si ces tendances se confirment lors des prochaines années avec 40, puis 60 champs. Les variables caractérisant les sept classes avec une p-valeur < 0,05 sont disponibles à l'annexe 3.4.6.

3.4.3. Matrice de corrélation

3.4.3.1. Matrice de corrélation des SE

Le corrélogramme à la figure 25 montre les liens de corrélation pour chacun des 24 indicateurs de SE mesurés sur les parcelles, comparés deux à deux. Les corrélations mises en couleurs sont celles qui sont significatives pour une p-valeur seuil de 0,05.

Voici la dénomination utilisée pour les niveaux de corrélation, en valeur absolue : > 80 % = très forte ; > 70 % = forte ; > 60 % = moyenne ; > 50 % = faible ; < 50 % = très faible. La notation (-) signifie que la corrélation est négative et la notation (+) signifie qu'elle est positive (figure 25).

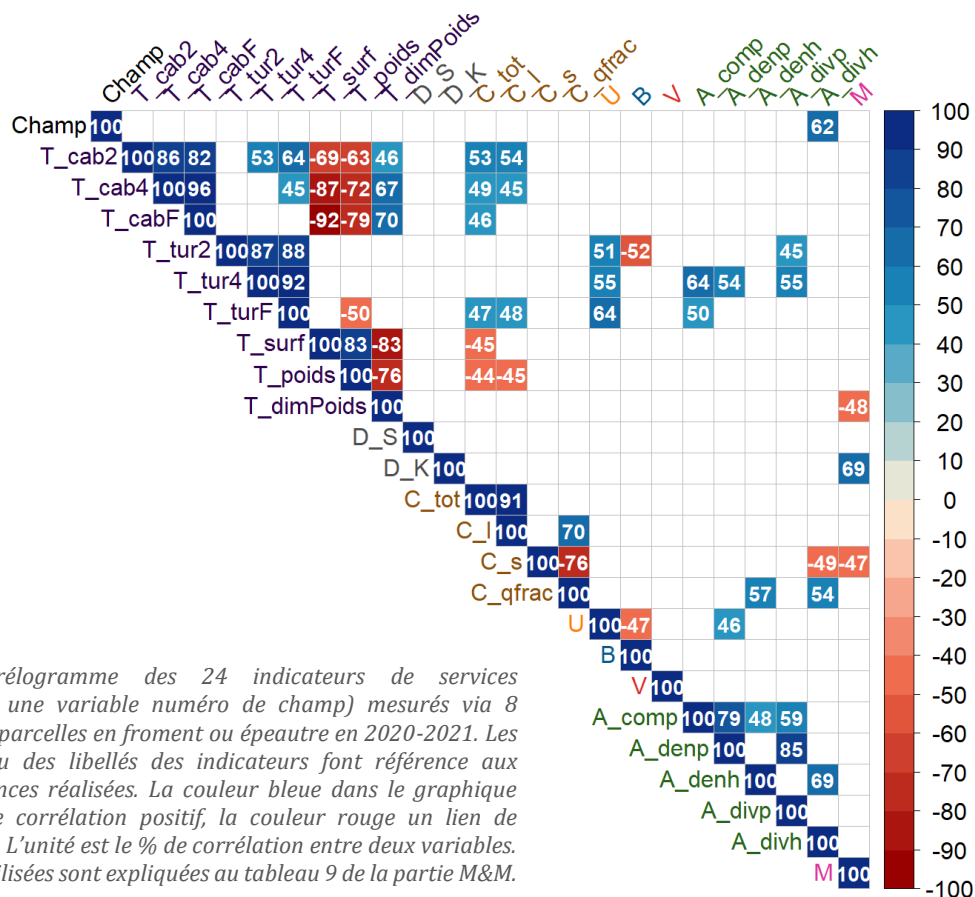


Figure 25: Corrélogramme des 24 indicateurs de services écosystémiques (+ une variable numéro de champ) mesurés via 8 expériences sur 20 parcelles en froment ou épeautre en 2020-2021. Les couleurs au niveau des libellés des indicateurs font référence aux différentes expériences réalisées. La couleur bleue dans le graphique indique un lien de corrélation positif, la couleur rouge un lien de corrélation négatif. L'unité est le % de corrélation entre deux variables. Les abréviations utilisées sont expliquées au tableau 9 de la partie M&M.

L'évolution du nombre de cabanes cumulées après 2 et 4 mois, et en fin d'expérience sur les 20 parcelles sont très fortement (+) corrélés entre eux. Il en est de même pour les turricules. Une faible corrélation (+) existe également entre les cabanes après 2 mois et les turricules après 4 mois et en fin d'expérience.

La surface et le poids de la paille couvrant les paniers à VDT en fin d'expérience sont quant à eux moyennement à très fortement (-) corrélés au nombre de cabanes, et très

fortement (+) corrélés entre eux. La différence de poids de paille en fin d'expérience entre les paniers actifs et le panier témoin de chaque parcelle, qui est supposée correspondre à la masse de paille incorporée au sol, est moyennement (+) corrélée au nombre de cabanes à VDT après 4 mois et en fin d'expérience. La diminution du poids de paille est également fortement à très fortement (+) corrélée à la surface et au poids de la paille en fin d'expérience. Peu de liens sont perceptibles entre les turricules et la surface, le poids et la diminution de poids de paille.

Le teneur en carbone organique total du sol est très fortement (+) corrélée à la teneur en carbone organique labile du sol, et ces deux indicateurs possèdent des corrélations très faibles à faibles avec plusieurs indicateurs d'incorporation de la MO. Le carbone labile et le carbone stable sont respectivement fortement liés (+) et (-) au q_{frac} ¹⁴.

La stabilité des agrégats est faiblement à moyennement (+) corrélée au nombre de turricules. Un lien (-) très faible est également notable avec la vitesse de formation de la croûte de battance. La vitesse de formation de la croûte de battance est aussi faiblement liée (-) avec le nombre de turricules après 2 mois.

Les indicateurs liés aux adventices possèdent globalement quelques liens (+) entre eux, et avec le nombre de turricules. Plus particulièrement, l'on observe un lien (+) très fort entre la densité et la diversité d'adventices au printemps, un lien (+) fort entre la densité et la compétition d'adventices au printemps¹⁵ et un lien (+) moyen entre la densité et la diversité d'adventices en sortie d'hiver. D'autres liens de corrélations (+) et (-) très faibles à faibles entre des indicateurs d'adventices et le carbone stable, le ratio q_{frac} et la stabilité des agrégats sont également perceptibles.

Pour conclure, l'indicateur de présence de maladies, mesurant la sévérité de la septoriose, est très faiblement (-) corrélé à la diminution de la masse de paille en fin d'expérience et à la teneur en carbone organique stable. Il possède également un lien (+) moyen avec le facteur de stabilisation de la MO.

3.4.3.2. Matrice de corrélation entre pratiques culturales et indicateurs de SE

Le corrélogramme à la figure 26 indique les liens entre les indicateurs de PC réalisés sur les 19 parcelles étudiées ces dix dernières années et les indicateurs de SE mesurés par les expériences. Il reprend donc 53 variables numériques et complètes retenues dans le set d'indicateurs de PC récoltés, les 24 variables des SE et la variable « numéro du champ ». Les variables qualitatives, ainsi que celles contenant des données manquantes ou non-applicables pour certaines parcelles (ex : Freq_FragSup), sont traitées dans les ACP.

3.4.3.2.1. Observation des corrélations au sein des PC et avec certains SE

Une attention plus particulière a été portée ci-dessous aux corrélations > 60 %.

¹⁴ Pour rappel, $q_{frac} = C_{labile} / C_{stable}$.

¹⁵ Ces deux indicateurs sont directement liés, car la mesure de A_{comp} est fonction de A_{dens} .

Fertilisation : L'apport total d'azote total est fortement corrélé (+) à l'apport d'azote organique et très faiblement à moyennement (+) aux apports de phosphore et de potassium ainsi qu'aux pulvérisation du froment et particulièrement de fongicides et de régulateurs de croissance. Cet indicateur est aussi fortement corrélé aux cultures en mélange d'espèce (+) et faiblement à la profondeur moyenne de mélange.

L'azote organique total est fortement corrélé (+) à l'azote total et aux espèces récoltées en association et faiblement (+) à la fréquence d'apport de MO au champ. L'apport maximum d'azote en une fois est moyennement corrélé (-) avec le nombre de variétés récoltées par saison culturale et par surface cultivée.

Fréquence de traitement : Les fréquences de traitement sont principalement corrélées entre elles positivement. L'IFT en insecticides est faiblement corrélé négativement à la culture de variétés en mélange. La fréquence des cultures souterraines récoltées sur 10 ans est corrélée très fortement (+) à l'usage des produits phytosanitaires et particulièrement aux fongicides (73) et insecticides (53). Ces corrélations font apparaître une corrélation négative (entre -48 et -63) entre les SE U, T_tur2, T_tur4, T_turF et les PC FreqRecolteSol, IFT_10 et IFT_10_fong.

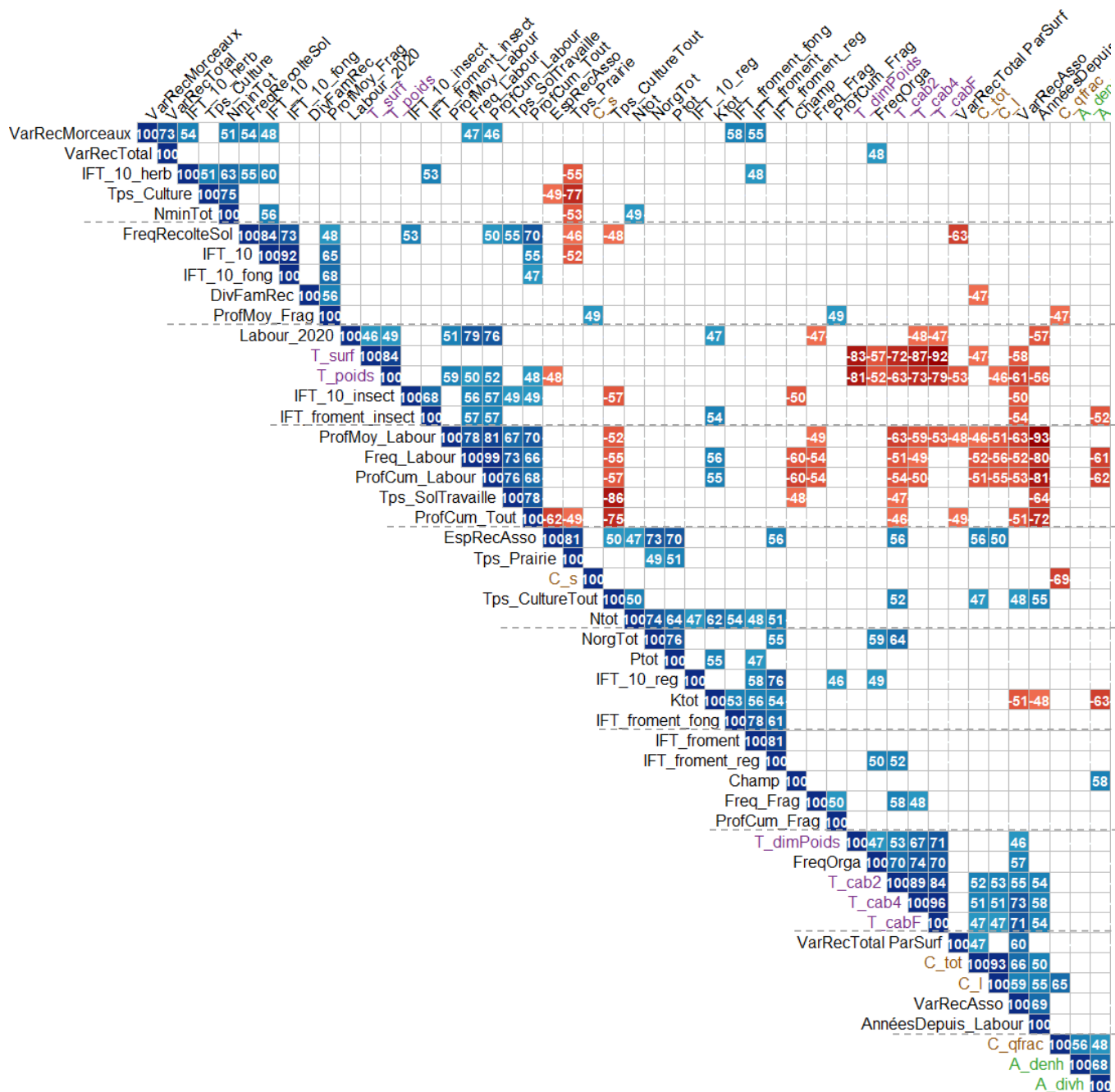
Travail du sol : Les PC liées au labour, à la fréquence de labour, à la profondeur de travail cumulée et au temps de sol travaillé non semé sont quatre PC plus ou moins fortement corrélées entre eux et corrélées aussi aux SE U, B, C_tot, C_l, les T_cab, les T_tur, T_poids, A_divh et divp. Les PC liées au mélange de la terre sont corrélées (+) entre elles et sont faiblement (-) corrélées aux espèces récoltées en association.

Cultures récoltées : La fréquence de cultures souterraines est en corrélation (+) faible à moyenne avec des PC de travail du sol et faible à très forte avec certains IFT. Il est en corrélation négative avec les turricules à VDT. La fréquence des cultures cultivées en mélange d'espèces est corrélée (-) faiblement à moyennement à des indicateurs de travail du sol, moyennement au temps passé sous couvert vivant et (+) fortement à l'apport d'azote organique.

Couverture du sol : Le temps passé sous mulch est fortement corrélé (-) à la durée de sol travaillé non semé et moyennement à la fréquence de labour. Le temps passé sous prairie est très fortement corrélé (-) au temps de couvert vivant ainsi que fortement (-) à la diversité des familles cultivées et au temps sous culture principale. Le temps de sol travaillé non semé est fortement corrélé (+) à la profondeur cumulée de travail du sol et très fortement (-) au temps passé de cultures, couverts et prairies confondus et fortement (-) au temps passé avec un mulch en surface.

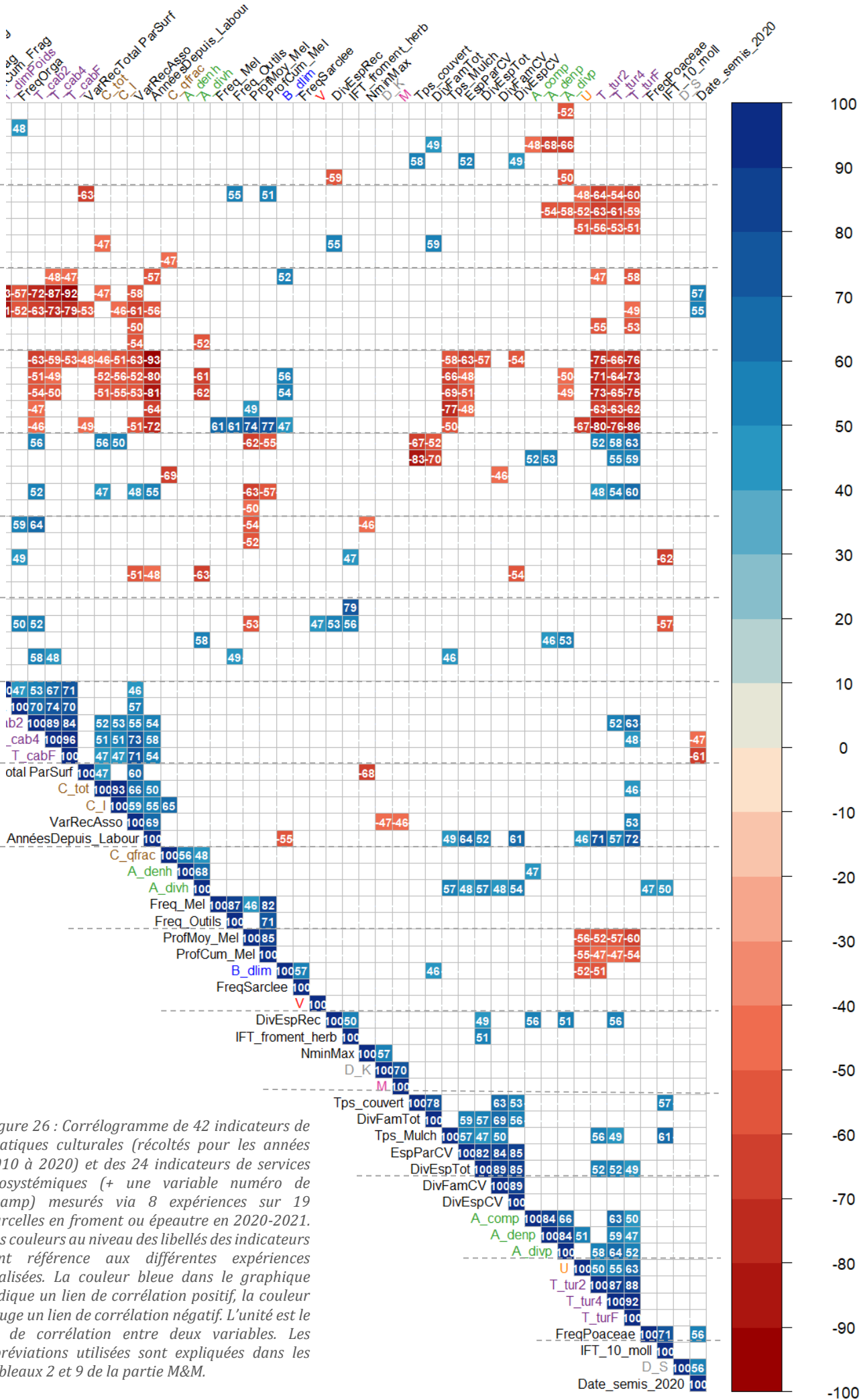
3.4.3.2.1. Observation des corrélations entre SE et PC

En ce qui concerne les T_cab, la fréquence d'apport de MO est fortement corrélée (+) aux trois indicateurs. Ils sont aussi corrélés (+) aux cultures récoltées avec variétés associées (de 55 à 73), faiblement (+) au nombre d'années depuis le dernier labour et faiblement (+) à la fréquence de fragmentation (T_cab2, 58 ; T_cab4, 48). La date de semis cette année présente une corrélation avec les T_cab, T_surf et T_poids.



Les indicateurs liés à la paille (T_surf, T_poids et T_dimPoids) sont faiblement à très faiblement (-) corrélés à l'apport de MO (-57,-52 et 47). La masse de paille disparue (T_dimPoids) est corrélée à deux PC seulement et très faiblement (+) : la fréquence d'apport de MO et la culture de variétés en association. T_surf et T_poids sont moyennement corrélés (-) aux cultures récoltées avec variétés associées et faiblement à la fréquence d'apport de MO. T_poids est corrélé à quelques autres PC : le nombre d'années depuis le dernier labour (-56), le nombre de variétés récoltées par saison culturale et surface (-53), le labour (50) et deux très faiblement (ProfCum_Tout, 48 ; EspRecAsso, -48).

Les indicateurs liés aux turricules sont généralement négativement corrélés aux PC de travail du sol. La profondeur cumulée du travail est fortement à très fortement corrélée à eux (-76 à -86) puis fortement la fréquence de labour (-74 à -73) puis moyennement le temps sol non semé après travail du sol (-62 à -63) et enfin très faiblement à faiblement le travail de mélange du sol, et la fréquence de cultures souterraines (de -48 à -60) sont aussi négativement corrélés.



Les indicateurs de cabanes de VDT, la surface et le poids de paille sont moins corrélés aux PC de travail du sol. En général, les PC de fréquence de traitement n'ont pas ou peu de lien avec les indicateurs de SE liés aux VDT. Le nombre d'années depuis le dernier labour est positivement corrélé à l'activité des vers de terre à la fois pour les cabanes, les turricules et le poids de la paille à la fin.

Les SE de décomposition de la MO (D_...) sont globalement pas voire peu corrélés aux PC. Le facteur de stabilisation de la dégradation de la MO (D_s) n'est corrélé à aucune PC ni aucun SE et le taux de décomposition de la MO (D_k) est faiblement corrélé à deux PC : l'apport d'azote minéral maximum (57) et la récolte de variétés en association (-47).

Le contenu en carbone total et labile (C_tot et C_l) sont très fortement corrélés entre eux (93) et sont globalement liés faiblement à moyennement aux mêmes indicateurs de PC : les variétés récoltées en association, le nombre d'années depuis le dernier labour et les espèces récoltées en association. Le contenu en carbone stable et l'indicateur Qfrac (C_s et C_qfrac) ne sont liés à aucun indicateur de PC. L'apport de MO n'est pas significativement corrélé au contenu en carbone du sol.

L'indicateur USDA (U) est moyennement corrélé à la profondeur cumulée totale du travail du sol (-67), à la profondeur de mélange du sol, et à la fréquence de récolte de culture souterraine (-48). Il est aussi corrélé à l'IFT global sur 10 ans, à l'utilisation de fongicides et d'herbicides (-52, -51) mais ces deux-là sont fortement corrélés entre eux et avec les cultures souterraines, qui sont fortement corrélées au travail du sol.

L'indicateur de SE de compactage du sol (V) n'est lié à aucune PC excepté très faiblement à l'utilisation de régulateurs de croissance sur froment (47).

L'indicateur de la battance (B) est faiblement corrélé à quelques PC de travail du sol : le temps écoulé depuis le dernier labour (-55), la fréquence de labour (56) et la profondeur cumulée des travaux (47). La fréquence de cultures sarclées dans la rotation est aussi faiblement corrélée à la battance (57). Enfin, le fait qu'un labour ait eu lieu en 2020 est faiblement corrélé (52).

Concernant les adventices (A_...), la densité en sortie d'hiver n'est corrélée à aucune PC, et la diversité en sortie d'hiver est moyennement corrélée à la fréquence de labour (-61) et au temps passé sous mulch (57). Les deux indicateurs de sortie d'hiver sont donc généralement peu corrélés aux PC.

Les indicateurs concernant les adventices de printemps sont corrélés à l'IFT en herbicides (de -48 à -68) et moins fortement aux IFT globaux (A_denp, -54 ; A_divp, -58). Ils sont faiblement corrélés au temps passé sous prairie (A_comp, 52 ; A_denp, 53), à la fréquence de labour (A_divp, -50) et à la diversité des espèces récoltées (A_comp, 56 ; A_divp, 51). En général ils sont eux aussi corrélés à la fois faiblement et à peu de PC.

L'indicateur des maladies (M) n'est corrélé à aucune PC excepté très faiblement (-) à la fréquence de plantes cultivées en association de variétés dans la rotation.

4. Discussion

4.1. Introduction de la discussion

Cette partie (1) apporte une réflexion concernant les indicateurs de PC utilisés, (2) commente les résultats de chaque mesure de SE individuellement, les compare aux valeurs trouvées dans la littérature et propose des pistes d'amélioration des protocoles, et finalement (3) commente les liens ressortant des ACP et MC entre PC et SE en mettant en évidence les liens intéressants et en les comparant à la littérature. Ce dernier point traite d'abord seulement des liens des SE entre eux et puis des liens entre PC et SE.

4.2. Pratiques culturales (PC)

Peu d'analyses ont été consacrées aux indicateurs de PC car dans ce mémoire la priorité a été donnée aux expérimentations de terrain. Néanmoins, quelques commentaires peuvent être faits par rapport à ces données.

Afin d'inclure au moins une rotation dans l'analyse, les indicateurs de PC ont été réalisés sur 10 ans. Cependant, certains agriculteurs ont changé radicalement de pratiques (agriculture biologique, agriculture de conservation, semis direct) au cours des 10 dernières années et ont un itinéraire cultural qui n'est donc pas homogène. Les parcelles 8 et 13 n'ont plus été labourées depuis 7 et 8 ans. La parcelle 8 a été convertie au semi direct il y a 5 ans et les parcelles 9 et 11 ont été converties au semis direct cette année. En ce qui concerne le bio, les parcelles 3, 16, 19 et 20 ont été converties en 2016, 2017, 2015 et 2018.

Pour certaines pratiques (fréquence de traitement, apports de MO...), des indicateurs sur une période plus courte pourraient être réalisés afin de mieux prendre en compte les dynamiques à moyen ou court terme.

4.3. Expérimentations (indicateurs de SE)

4.3.1. Commentaires généraux

Les histogrammes (figure 14) ont été réalisés avec les données issues de l'ensemble des placettes (répétitions, $n > 20$), ils représentent donc une distribution des données plus large et plus extrême que la valeur des champs individuellement (annexe 3.3.1.1.). Les comparaisons avec les données de la littérature sont donc réalisées avec la distribution des valeurs des champs ($n = 20$) et non des placettes ($n > 20$). En annexe 4.2.1.1. se trouve le résumé de la distribution des moyennes des champs pour chaque indicateur, qui diffère donc du tableau 15 des résultats.

La plupart des données ne suivant pas de distribution normale, il pourrait être intéressant de réaliser des transformations sur certains indicateurs pour pouvoir réaliser des statistiques inférentielles comme des comparaisons de moyennes plus consistantes que celles réalisées dans ce mémoire ou bien des analyses plus poussées.

Le choix des protocoles étant basé principalement sur des critères de facilité d'implémentation et de rapidité, certains d'entre eux peuvent être plus ou moins sensibles à des biais de l'observateur. Pour répondre à cette problématique, des essais de calibrage de l'œil ont été réalisés pour les expériences d'incorporation de la MO et l'évolution de la battance par trois personnes (A. Fockedey, L. Leveau et X. Belin), afin de se mettre d'accord sur certains critères et de s'assurer de leur transmission à travers la doctorante L. Leveau pour les années futures. Les critères ont par ailleurs été détaillés dans les protocoles annexés à ce document. En outre, les manipulations en laboratoire du protocole de la teneur en MO, dont le biais de l'observateur est estimé assez important, a été pris en charge par L. Leveau. Malgré ces dispositions prises pour limiter ces biais, il convient d'en tenir compte dans les analyses des années futures.

4.3.2. Incorporation de la MO ($\tau_{...}$)

Le protocole de l'OPVT utilisé est initialement destiné aux particuliers et non à être utilisé à grande échelle comme dans ce mémoire. Il date de 2014 et aucune valeur de référence n'est encore disponible et n'a été communiquée (comm. pers. l'OPVT), limitant les possibilités de comparaison des indicateurs de cette expérience.

Néanmoins, les indicateurs qui ont été développés dans ce mémoire à partir des fiches d'observation procurés par l'OPVT paraissent intéressants pour rendre compte de l'activité des VDT, et plus particulièrement des VDT anéciques. Ce groupe, reconnu comme étant le plus important dans la dégradation, mais surtout dans l'incorporation de la MO (indicateurs T_surf, T_poids et T_dimPoids), produit en effet des cabanes à VDT en surface (T_cab2, T_cab4 et T_cabF) et des turricules en surface (T_tur2, T_tur4 et T_turF) et dans le sol. Les turricules en surface peuvent également résulter pour partie de l'activité des VDT épigés.

Si le dénombrement des cabanes indique la formation des sites d'incorporation de la MO, il est cependant incapable de rendre compte de la durée et d'intensité de cette incorporation pour chaque cabane. Certaines cabanes peuvent s'établir rapidement mais vite devenir inactives dans l'incorporation de la MO. Si des différences entre champs existent dans la formation de cabanes, cet indicateur seul ne permet pas d'évaluer correctement la quantité de MO incorporée. En outre, l'identification des cabanes est parfois subjective et donc dépendante de l'observateur. Cette identification a été réalisée principalement par une seule personne dans ce cas-ci. Bien que l'on puisse imaginer que des petits mouvements de paille soient liés à l'activité d'insectes (plus petits qu'un cm) ou au vent, la mesure se base sur une configuration de la paille assez spécifique, limitant ces biais.

A côté de cela, les indicateurs T_cab2 et T_cabF sont complémentaires dans le sens où le premier indique la dynamique rapide qui est mise en place, et le second témoigne de l'incorporation sur la durée. Des parcelles n'étant pas labourées avant l'installation du froment ou épeautre peuvent par exemple présenter une dynamique à court et à long terme différente par rapport aux autres parcelles, où l'établissement des cabanes peut

être freinées en début d'expérience. Sur la figure 18, le labour en 2020 est en effet davantage négativement corrélé au nombre de cabanes après 2 mois qu'en fin d'expérience.

En ce qui concerne les turricules, leur utilité au niveau de l'interprétation semble complémentaire à celle des cabanes. En effet, leur identification témoigne inévitablement de l'activité des VDT, contrairement au mouvement de paille qui aurait pu, à première vue, être attribué à d'autres causes. Lors des observations sur le terrain, la présence de turricules était particulièrement élevée sur les parcelles en semis direct (champs 8, 9 et 11), en agriculture biologique de conservation (16 et 20) et sur la parcelle ayant été pendant de nombreuses années en prairie temporaire (12). Cette impression est confirmée par les boîtes de Tukey par champ (annexe 3.3.1.1.), augmentant l'intérêt pour cet indicateur.

Cependant, lors des visites sur le terrain, la dégradation potentielle des turricules par des pluies récentes a remis en question la pertinence de cet indicateur. Les dates des relevés étant connues, il pourrait être intéressant de tester leur lien avec les données météo de l'IRM afin de voir si des pluies d'une intensité suffisante juste avant l'observation diminuent le nombre de turricules observés.

Par ailleurs, une partie des turricules peuvent être produits dans le sol plutôt qu'en surface, rendant l'observation de ceux-ci potentiellement incomplète. Il est possible qu'en fonction des conditions de microclimats différentes des parcelles (sècheresses), certains VDT restent plus enfouis dans le sol sur certaines parcelles. Toutefois, il semblerait raisonnable d'attribuer alors une moins grande activité des VDT dans l'incorporation de la MO dans le sol dans ces cas-là, rendant le potentiel biais moins important.

En termes de gestion du temps, cette expérience s'est révélée très chronophage, en particulier les observations sur le terrain (2-3 jours/2 semaines durant 5 mois en moyenne, soit un peu moins de 30 jours complets). Du point de vue de l'apparition des cabanes, une fréquence d'une fois par mois pourrait suffire car peu de cabanes disparaissent et réapparaissent rapidement. En ce qui concerne les turricules, leur dynamique est plus rapide et une observation plus régulière que les cabanes pourrait donc être justifiée. Cependant, des observations peu fréquentes devraient déjà pouvoir mettre en valeur des différences entre champs.

Pour la surface de panier recouverte par de la paille, l'évaluation à chaque visite pourrait être abandonnée au profit d'une seule évaluation finale sur base d'une photo prise en fin d'expérience en 10 classes, plus rapide et plus précise, comme effectué dans ce mémoire. En effet, l'incorporation de la paille étant toujours en cours et n'ayant pas encore atteint de plateau ou de limite (= plus aucune paille disponible pour pouvoir être incorporé) au mois de mai, cela ne semble pas indispensable de mesurer son évolution.

Enfin, les indicateurs de poids de paille en fin d'expérience semblent finalement les plus utiles pour évaluer l'incorporation de la MO dans le sol. En effet, en absence de disparition de paille par le vent ou d'autres animaux (plus petits qu'un cm), l'hypothèse

est que la paille disparue en fin d'expérience s'est incorporée au sol. En outre, cet indicateur est beaucoup moins chronophage que les autres, puisqu'il ne nécessite pas de suivi régulier.

Au niveau des résultats, la corrélation négative entre le poids en fin d'expérience et la diminution de poids de paille n'est pas de -100%¹⁶. Cela indique que le poids des témoins n'était pas identique pour tous les champs. Ceci peut s'expliquer par le fait que (1) la pesée en début d'expérience était peu précise et sur une paille non séchée à l'étuve, (2) lors de l'installation des paniers, le vent a dispersé un peu de paille hors de certains paniers, et (3) d'autres contaminants ont pu être récoltés et donc pesés avec la paille (autres pailles sur le champ et apports de fumiers ou lisiers). Si ces indicateurs sont prévus dès le début de l'expérience, ces différents biais devraient pouvoir être limités en y veillant lors de l'installation (humidifier la paille lors de l'installation pour limiter sa prise au vent, noter ou prendre une photo de la présence de MO déjà présente afin de mieux en distinguer la paille qui doit être récupérée en fin d'expérience pour être pesée et limiter la surévaluation du poids de paille restant ...).

L'objectif étant de mesurer des indicateurs reflétant au mieux le SE d'incorporation de la MO, soit la capacité du champ à incorporer la MO (dans ce cas-ci la paille), l'expérience des VDT pourrait éventuellement être réduite à installer les paniers avec de la paille en automne après le semis et les récupérer en mai pour en peser le poids de paille disparue uniquement. Cet indicateur reflète plus directement ce SE comparé au nombre de turricules et cabanes qui représentent, certes une activité des VDT, mais rendent moins bien compte de leur utilité dans l'agroécosystème. Les seules objections à ce choix sont que les passages réguliers en champ permettent de s'assurer que les paniers restent bien en contact avec le sol (arracher les pousses de blé et adventices, rappuyer les agrafes après le soulèvement du gel en hiver) et que les données ne seraient plus exploitables en cas d'une dégradation des paniers en cours d'expérience. En effet, si un panier est détruit par exemple durant certains désherbages mécaniques au printemps, les résultats des indicateurs de nombre de cabanes et de turricules après 2 mois pourraient toujours être utilisés statistiquement.

Une réserve subsiste néanmoins concernant les différents indicateurs d'incorporation de la MO dans les champs avec désherbage mécanique. En effet, les paniers présents sur ces champs-là n'ayant pas été désherbés dans un rayon de quelques mètres autour d'eux, il est possible que l'activité des VDT dans ces systèmes soit un peu surévaluée par rapport à ce qu'elle serait habituellement. Il est à noter que plusieurs paniers à VDT ont été détruits dans ces champs à cause d'un accrochage de tracteur lors du désherbage mécanique, et dans d'autres champs à cause de la présence de sangliers.

Pour conclure, les paniers témoins ont été utiles afin de calibrer son œil sur un degré de sévérité raisonnable pour l'identification des cabanes, mais peu concluants pour la

¹⁶ $T_{\text{poids}} = \text{moyenne du poids des trois paniers actifs}$; $T_{\text{dimPoids}} = \text{panier témoin de la parcelle} - \text{moyenne du poids des trois paniers actifs}$.

soustraction de la surface de paille par rapport aux paniers actifs en fin d'expérience. En effet, avec la levée du froment, de l'épeautre et/ou des adventices, la tulle se déformait, provoquant des glissements de paille dans le panier et diminuant ainsi la surface couverte sans que la quantité de paille ne semble diminuer. Etant donné que la quantité de paille ayant disparu pour d'autres causes que l'activité des VDT semble négligeable et qu'une grande quantité de photos sont à présent disponibles pour calibrer son œil pour l'identification de cabanes, les paniers témoins pourraient être abandonnés au profit d'une répétition supplémentaire par champ.

4.3.3. Décomposition de la MO (D_s et D_k)

Le protocole de ce mémoire se base sur les mises au point du CRA-W. Une cinquantaine de champs à travers toute la Wallonie en 2020 ont subi le même traitement pour différentes pratiques de travail du sol et différentes périodes de relevé. Leur indicateur du taux de décomposition (K) s'étend de 0,018 à 0,041 et celui de stabilisation (S) de 0,23 à 0,49. Les observations en champs pour ce mémoire s'étendent respectivement, pour les champs, de 0,015 à 0,032 (D_k) et de 0,263 à 0,380 (D_s). Les taux de décomposition observés (K) sont du même ordre que ceux observés par le CRA-W quoiqu'un peu moins élevés pour la valeur maximum. La quantité de MO dégradée (S) est en moyenne supérieure à celle observée par le CRA-W. Cette différence est peut-être due au fait que les deux études ne concernent pas le même territoire dans son ensemble.

Les données de ce mémoire sont donc proches d'une étude très semblable du CRA-W. Ces résultats sont donc vraisemblables, bien que les analyses statistiques réalisées mettent en évidence que D_k ne permet pas de dissocier les champs entre eux.

Ces indicateurs de l'activité de dégradation de la MO par les micro-organismes du sol semblent intéressants, bien que potentiellement sujets à des facteurs climatiques comme la température et l'humidité. Cette mesure devrait être maintenue dans les prochaines années afin de travailler sur un plus grand nombre de données, de mieux évaluer l'intérêt de cet indicateur dans ce genre d'étude et surtout de voir si la variation interannuelle ne pose pas de problème (ou peut être maîtrisée).

4.3.4. Teneur en carbone organique stable et labile ($C_{...}$)

Les gammes de valeur observées pour le C_{org} total du sol s'étend de 0,94 à 1,75 %C m. s. Selon les références du rapport Carbiosol, cette gamme de valeur correspond à des teneurs allant de très faibles à très élevées en région sablo-limoneuse (Chartin et al. 2019) (annexe 1.3.1.2.).

Les gammes de valeur observées pour le C_{org} labile (fraction grossière) du sol s'étend de 0,622 à 1,31 %C m.s., ce qui correspond à des teneurs moyennes à très élevées.

Les gammes de valeur observées pour le C_{org} stable (fraction fine) du sol s'étendent de 0,228 à 0,504, ce qui correspond à des teneurs en carbone allant de très faibles à très élevées en fonction de la quantité de particules plus petites que 20 μm dans le sol.

La gamme de valeurs observées pour l'indicateur q_{frac} (figure 4) s'étend de 1,23 à 5,18 [-], ce qui signifie que tous les champs échantillonnés sont dans une dynamique d'augmentation parfois forte du stock de MO dans le sol. Cela dit, cette augmentation concerne notamment des champs avec une teneur en C_{org} total < 1,25 %, correspondant à des champs dont les principales fonctions agronomiques ne sont actuellement pas assurées. Cette dynamique d'augmentation généralisée de la MO est peut-être liée aux préoccupations grandissantes pour la teneur en carbone dans les sols agricoles en Belgique et la mise en place de plus en plus fréquente de cultures de couverture.

Une grande diversité de teneurs en carbone a donc été observée parmi les champs et témoigne de la diversité des parcelles visitées. Il est cependant important de garder à l'esprit qu'une seule des quatre répétitions a été utilisée dans ce mémoire. Les résultats manquent donc de consistance, des analyses ultérieures avec l'ensemble des données apporteront un regard nouveau et plus juste sur ces indicateurs.

D'un point de vue pratique, cette mesure n'a pas posé de problème particulier, si ce n'est qu'il était parfois difficile d'identifier la semelle de labour et donc d'arrêter le prélèvement de terre au bon endroit. Cela peut mener à une sous-estimation de la quantité de carbone dans les relevés de certains champs, du fait de la dilution des horizons riches en MO avec une partie de l'horizon induré de la semelle de labour.

La teneur en MO du sol est connue pour jouer un rôle dans de nombreux processus agronomiques et cette mesure est indispensable à ce genre d'étude, elle devrait donc être maintenue à l'avenir.

4.3.5. **Stabilité des agrégats (U)**

Il est difficile de trouver des données de référence sur cette méthode. Dans son mémoire, N. Biot (2020) a observé dans des terres cultivées des scores principalement concentrés entre environ 3,75 et 4,75. Les observations de ce mémoire-ci représentent beaucoup plus les scores inférieurs ou égaux à 3 (72% des placettes) et peu au-dessus (28%). Il est à noter que l'approche de la méthode USDA a été légèrement différente de celle de N. Biot, expliquant l'observation de scores plus bas.

Concernant les analyses statistiques, l'homoscédasticité est faible voire non significative ($p\text{-val} = 0,05$), tout comme observé par N. Biot. Cela met en doute l'égalité des moyennes du test Kruskal-Wallis. Ce problème peut être lié à un nombre d'échantillons par champ (12) trop faible, particulièrement pour les champs présentant une croûte de battance (6 échantillons au-dessus et 6 en-dessous de la croûte). Le nombre d'échantillons réalisés pourrait être augmenté à au moins 16 pour respecter le nombre d'échantillons minimums prévu par le protocole initial. Cette augmentation est estimée peu chronophage. A l'avenir, cette mesure devrait donc être conservée afin de vérifier si une augmentation du nombre d'échantillons apporte bien une meilleure consistance à cet indicateur.

4.3.6. Evolution de la croûte de battance (B_dlim)

4.3.6.1. Répartition initiale des calibres d'agrégats sur les placettes

La méthode de traitement des catégories « surface lisse », « surface sombre », « surface non couverte par des agrégats » et « erreur » a certainement eu un impact sur l'indicateur final de Dlim (B_dlim) utilisé et cet effet mériterait d'être étudié plus en détail. Il serait aussi intéressant de trouver une façon de gérer la catégorie « surface sombre » observée lors de la caractérisation de l'état initial de la surface.

La gamme de pourcentage de surface couverte par des agrégats inférieurs à 5 cm dans la thèse de Boiffin (entre 85 et 90 % pour le blé) est plus restreinte que celle des observations de cette année 2020-2021 (de 76,4 à 99,4 %). C'est probablement lié à la catégorie « Surface sombre », et à l'échantillon plus large évalué dans ce mémoire, tant en termes de nombre de champs qu'en termes de pratiques.

La forme de la courbe des surfaces cumulées d'agrégats de Boiffin (annexe 4.2.6.1.) est semblable à celle qui a été réalisée avec les observations de ce mémoire (annexe 3.3.3.7.). Dans les observations de cette année, certains champs commencent très haut sur l'axe des ordonnées à cause de la catégorie « surface lisse » qui a été attribuée à la classe de calibre « 0 mm ».

4.3.6.2. Génération de l'indicateur de pente de Dlim

Seul l'indicateur Dlim a pu être généré cette année car il est considéré moins dépendant de l'état initial de la surface que Dmin par Boiffin. Au premier abord, il semblait donc plus pertinent que l'indicateur Dmin. Cependant, dans la pratique cet indicateur est compliqué à générer car il nécessite l'évaluation visuelle de la répartition initiale des calibres d'agrégats et de la surface de plaque, ce qui représente deux mesures chronophages et sujettes au biais de l'observateur. L'évaluation de Dmin, quant à elle, ne nécessite finalement qu'un pied à coulisse ou un logiciel de traitement d'image.

En plus de cela, l'approche utilisée pour obtenir le taux d'augmentation de Dlim (par régression linéaire) est une approche utilisée originellement pour observer le taux de croissance de Dmin (Eimberck 1989) et non de Dlim. Cependant les deux indicateurs étant relativement proches, cette approche est considérée comme acceptable.

La régression permettant d'obtenir Dlim a été réalisée, en fonction des placettes, sur 2 à 7 points et pour un R^2 ajusté généralement supérieur à 0,75. Ce sont des résultats satisfaisants, bien que le nombre de points support des droites de régression soit parfois faible, environ 45% des données ont moins de 4 points supports. Pour améliorer la situation, il faudrait réaliser des passages plus fréquents en début d'expérience, avant d'atteindre des surfaces de plaque trop élevées et des plateaux. D'un autre côté, étant donné l'évolution assez lente de la battance sur certains champs (semis direct), et cette

expérience étant compliquée d'un point de vue organisationnel, la fréquence de passage en champ pourrait éventuellement être modulée en fonction de la réponse des champs.

Dans sa thèse, Boiffin arrête ses observations de Dlim à environ 25 mm pour des pluies cumulées allant de 70 à 190 mm avec 5 modalités plus ou moins érosives sur un même champ. Boiffin n'a pas calculé la pente de Dlim mais il est possible d'estimer celle-ci à partir de graphes présents dans sa thèse (Boiffin 1984) (annexe 4.2.6.2.) : la gamme des pentes observées va de 0,12 à 0,35 mm/mm de pluie. Les données du mémoire s'étendent quant à elles de 0,18 à 1,21 mm/mm de pluie pour la moyenne des champs, avec une moyenne à 0,6.

Le fait d'observer une pente généralement supérieure aux observations de Boiffin peut s'expliquer par : (1) des conditions moins contrôlées que lui au niveau de l'état de la surface du sol, (2) la création de nouvelles catégories de surfaces pour l'évaluation de l'état initial de la placette et la méthode de traitement des données, (3) un plus large échantillon en termes de pratiques et de nombre de champs (20 contre 1 pour Boiffin) menant à une diversité de comportements, (4) la diversité des dates de début d'expérience menant à des conditions climatiques différentes (intensité de pluie, dessèchement de la surface, ...), (5) l'occurrence d'évènements pluvieux intenses plus ou moins tôt en fonction des champs, (6) le travail manuel de certaines placettes en condition humide menant à une évolution de la surface non représentative du reste du champ et (7) une approche différente de la part de l'observateur.

La régression permettant d'obtenir B_dlim a été réalisée ici sur les relevés allant jusque Dlim = 40 mm, or Boiffin arrêta ses observations vers Dlim = 25 mm. Pour diminuer ce seuil il faudrait avoir une résolution de récolte des données plus fine afin de travailler avec un nombre de points supports acceptable.

En comparant avec la thèse de Boiffin, les données sont donc dans une gamme de valeur bien plus large, que ce soit pour Dlim directement ou l'indicateur de pente de Dlim (B_dlim), mais ce n'est pas étonnant au vu du nombre de champs étudiés. Des champs très sensibles à très peu sensibles à la battance ont été observés. La résolution des relevés reste cependant une limite. Il serait aussi intéressant de mesurer le paramètre Dmin à partir des photos réalisées et de le comparer à Dlim.

4.3.6.3. Limites liées au protocole

Certaines placettes sur des parcelles gérées en semis direct ont été dégradées par les sangliers. Sur d'autres champs des lièvres, des chevreuils ou des oiseaux ont légèrement dégradé la surface mais sans perturber la mesure de Dmin sur le terrain.

Pour un meilleur suivi de Dmin et Dlim, il serait intéressant à l'avenir de retirer un maximum de MO présente en surface dès l'installation des placettes. La MO perturbe la plupart des analyses et réduit la surface de terre étudiée (la surface exposée à la pluie).

Une discussion avec C. Biolders a mis en évidence que la méthode de relevé des pluies et le modèle de pluviomètre utilisés avaient tendance à sous-estimer le volume réel de

pluie tombée. Les points problématiques sont : l'ouverture trop petite du pluviomètre, le fait que celui-ci est penché sur le tuteur et l'intervalle de temps assez long (maximum deux semaines) entre la récolte de la pluie et le relevé. La sensibilité des pluviomètres au gel est aussi un problème. Comme la plateforme Agromet n'était pas encore fonctionnelle, les données des stations Pameseb ont été utilisées directement malgré la distance parfois grande avec le champ.

Des données concernant l'intensité des pluies permettraient de travailler avec l'énergie cinétique cumulée plutôt que la pluie cumulée, ce qui est une approche proposée par différentes sources (Boiffin 1984; Boiffin et Marin-laflèche 1990). Elles peuvent être obtenues à partir de données radar de l'IRM et sont plus justes, du fait qu'une pluie intense n'a pas le même effet qu'une pluie de faible intensité sur les agrégats.

Le travail manuel du sol par les expérimentateurs a été satisfaisant sauf lorsqu'il était réalisé en conditions humides. Le travail en conditions humides ne fournit pas des agrégats typiques d'un semis en bonnes conditions, les agrégats formés se dégradent très rapidement et de façon non représentative du reste de la parcelle. Cela a été observé sur les champs 1, 3 et 16. Sur base de cette constatation, les parcelles semées tardivement devraient être découragées dans la suite de l'étude pour générer cet indicateur.

L'estimation de la répartition des calibres d'agrégats est peut-être sensible à l'effet de l'observateur. Des tests devraient être réalisés car la méthode de Boiffin (1984) a été réalisée de façon numérique et non manuelle. De plus, des précisions ont été apportées (annexe 2.4.3.5.4.), dans l'espoir aussi de réduire l'effet de l'observateur.

A ce jour, la catégorie « Surface sombre » (annexe 2.4.3.5.4.) n'a été attribuée à aucune catégorie d'agrégats. Pour certaines placettes, cette catégorie représente plus de 10 % de la surface (figure 27) voire 25 % de la surface dans un cas extrême. La moyenne est à 2,5 % de la surface. Pour une minorité des champs, cette surface a donc un fort impact sur le niveau maximum que peut atteindre Dlim.

L'évaluation de la surface de plaque a été réalisée à partir des photos de façon numérique et sera réalisée chaque année par la même personne, c'est-à-dire L. Leveau. Il n'y a donc pas lieu de s'inquiéter de l'effet de l'observateur au niveau de cette mesure.

Les points de la régression linéaire de B_dlim ont été sélectionnés sur base de différents seuils (annexe 2.4.3.5.9.) qui pourraient être modifiés à l'avenir pour un autre jeu de données plus large.

Les données de faciès n'ont pas été utilisées cette année mais pourraient l'être. La méthode FCR (Le Bissonnais et al. 2005; Evrard 2008) semble plus prometteuse, en

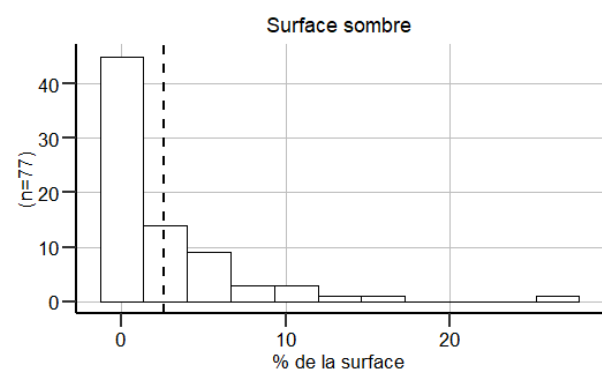


Figure 27: Histogramme de répartition des observations de la surface couverte par la surface sombre.

termes de rigueur et de temps, que la mesure de Dmin ou même de Dlim, pour l'analyse de l'évolution de la croûte de battance.

On voit que de nombreuses limites ont été rencontrées dans l'évaluation de la sensibilité des champs à la battance avec l'indicateur B_dlim. Plusieurs pistes d'amélioration de l'indicateur B_dlim, du protocole en lui-même et de l'évaluation du SE ont été proposées et mériteraient d'être essayées à l'avenir.

4.3.7. Structure du sol (v)

Une méta-analyse (Franco et al. 2019) concernant la méthode VESS met en évidence que le score VESS est généralement compris entre 2 et 3 dans les conditions suivantes : en climat tempéré (2,2), avec des rotations (2,4), sans travail du sol (2,5), avec travail du sol (2,3) et en condition de texture « medium fine » (2,8) (classification des textures de la FAO). Ces facteurs sont ceux qui s'appliquent aux situations de ce mémoire. On voit que le facteur affectant le plus négativement le score est la texture « medium fine » qui correspond aux sols Aba en Wallonie et sur lesquels s'appliquent ce mémoire. Avec une moyenne à 2,9, les scores observés dans ce mémoire semblent en concordance avec la méta-analyse.

Selon Ball et al. (2007), une note supérieure à 3 serait un indicateur suggérant la nécessité d'une intervention de travail du sol approprié et/ou d'un apport de MO. Dans l'échantillon mesuré, 9 des 20 champs seraient dans-ce cas-là, dont 3 ayant un score au-delà de 3,5.

Les données récoltées en champ semblent néanmoins caractérisées par une dispersion des observations, à la fois à l'échelle des placettes et des champs (figure 14 et annexe 3.3.1.1.), plus forte que d'autres études (Askari, Cui, et Holden 2013; Franco et al. 2019). Cela peut s'expliquer par la grande diversité des pratiques observées sur les différents champs ou à un effet de l'observateur. Cette méthode d'évaluation semblant bien refléter l'état du sol, sa corrélation avec certains PC, est attendue au niveau les analyses multivariées.

De façon assez surprenante, cet indicateur de SE est très peu corrélé aux autres indicateurs mais une année supplémentaire de relevé pourrait peut-être faire émerger des relations intéressantes en augmentant le jeu de données. La caractérisation de la structure du sol devrait être une dimension importante pour ce genre d'étude.

De nouveaux indicateurs pourraient être réalisés en utilisant comme indicateur le score de certaines portions du bloc de sol prélevé. Par exemple le score des 10 premiers cm ou bien des derniers cm du bloc de terre plutôt que de réaliser une moyenne sur le total. Les premiers cm pourraient être liés à la battance ou à la stabilité des agrégats.

4.3.8. Infestation par les adventices (A_...)

4.3.8.1. Discussion à propos des données

Le rejet de l'homoscédasticité pour les indicateurs liés à l'expérience « adventices » semble être lié au fait que les champs sur lesquels peu d'adventices ont été observées ont aussi des variances très faibles voire nulles par opposition aux autres champs (annexe 3.3.1.1.). Cela semble lié à l'efficacité du désherbage chimique. Le problème est donc inhérent à ces indicateurs, les tests d'homoscédasticité devraient être réalisés sur les champs ayant une valeur moyenne supérieure à un seuil donné.

Une étude suisse (Streit et al. 2003) a réalisé des relevés de flore adventice sous différents types de travail du sol, traitements herbicides et différentes rotations. La gamme de variation de la densité d'adventices observée dans cette étude est semblable à ce que l'on peut observer dans ce mémoire (de 0 à 20 plantes par m²). Cependant des densités allant jusqu'à 150 plantes par m² ont été observées dans certains champs, ce qui n'a jamais été le cas pour ce mémoire. L'absence d'infestation très élevée dans l'échantillon laisse supposer soit que les systèmes étudiés (particulièrement ceux ne reposant pas sur les herbicides) sont à l'équilibre par rapport à la dynamique des adventices, soit que l'explosion des populations va apparaître bientôt pour les agriculteurs ayant récemment changé de système, soit que l'année a été exceptionnelle. Enfin, comme pour les champs de ce mémoire, les parcelles désherbées chimiquement dans cette étude présentaient des densités plus faibles.

L'indicateur de compétition étant un indicateur « maison » encore susceptible d'amélioration ou de remplacement par un autre indicateur, aucune documentation scientifique n'a été trouvée pour réaliser une comparaison avec les résultats. La récolte de la biomasse a été envisagée mais s'est révélée trop chronophage.

En ce qui concerne la diversité, une publication française (Derrouch et al. 2021) sur le passage d'une agriculture conventionnelle à une agriculture de conservation indique une gamme de variation du nombre d'espèces sur blé d'hiver, toutes pratiques de conservation et types sols confondus en Côte d'Or, allant de 6 à 69 espèces observées avec une moyenne de 23,9. Ces chiffres sont supérieurs aux valeurs observées pour les champs de ce mémoire (de 0 à 22 espèces avec moyenne à 9,3). Cela peut s'expliquer par l'échantillon plus petit (20 contre 100), le fait que l'étude française se centre sur l'agriculture de conservation, les types de sols différents ou encore la méthode de relevé qui est différente. En effet, seule une surface de 128 m² (contre 2000 m²) a été explorée dans ce mémoire. Il est probable que le nombre d'espèces observées aurait augmenté si la surface étudiée avait été plus élevée (Chauvel et al. 2018). D'autres études, sur des surfaces plus faibles (certaines de 10 à 30 m²) ont observé des diversités allant de 2 à 15 espèces par m² en agriculture de conservation sur céréales (Derrouch et al. 2021), ce qui se rapproche des observations de ce mémoire.

Pour conclure, excepté l'indicateur de compétition, les observations sont globalement en accord avec la littérature scientifique. Les indicateurs d'hiver sont biaisés par les désherbages automnaux, donc moins utilisés dans la suite de ce document pour l'analyse et à décourager pour les prochaines années. Les indicateurs des adventices sont globalement sujets à des améliorations et pourraient être plus précis et les informations récoltées pourraient servir à faire de nouveaux indicateurs.

4.3.8.2. Limites et pistes d'amélioration du protocole

Si, à l'avenir, l'écologie des plantules n'est pas utilisée pour générer des indicateurs, alors il n'est pas nécessaire de les identifier avec précision jusqu'à l'espèce. Néanmoins il est important, au sein d'un même champ de séparer les individus appartenant à la même espèce pour évaluer la densité et la diversité. Les espèces poussant sur un champ sont le témoin de l'ensemble des pratiques mises en place par l'agriculteur durant les dernières années. Chaque espèce étant caractérisée par un rôle écologique ou des conditions de germination particulières, il serait possible d'utiliser les informations sur les espèces pour générer des indicateurs intéressants (Derrouch et al. 2021).

En ce qui concerne les indicateurs liés aux relevés de sortie d'hiver, les champs désherbés avant l'hiver n'ont pas été retirés des données car la réalisation ou non de cette opération était inconnue au moment de la réalisation des indicateurs.

Certaines espèces n'ont pas pu être identifiées avec précision, ou bien il y a peut-être eu des confusions entre certaines espèces. Il y a probablement un effet de l'observateur qui joue dans le repérage des adventices (ex : les graminées sont difficiles à différencier entre elles) et l'estimation de la densité d'infestation. L'indicateur de diversité spécifique aurait tendance à être sous-évalué plutôt que surestimé. Cette année, P. Van Thorre a réalisé de nombreux relevés dans les champs les plus infestés avec l'aide d'un autre observateur, il serait intéressant de reproduire ce schéma de fonctionnement l'année prochaine afin de limiter l'effet de l'observateur.

Les nouvelles classes de densité ont été proposées dans le point 2.4.4.1.4. dans le but d'augmenter la précision des relevés pour les faibles densités, qui sont plus fréquemment rencontrées.

Pour le relevé de printemps, un indicateur de compétitivité a été généré en attribuant un coefficient de compétitivité aux plantules en fonction de leur stade phénologique. Les valeurs attribuées (tableau 11) pourraient être modifiées à l'avenir par exemple en utilisant les seuils de nuisibilité de certaines espèces (Chambre d'agriculture Pays de Loire et Chambre d'agriculture Pays de Loire 2006). Les mesures dans les quadrats n'ont pas été utilisées et c'est bien la densité sur les carrés de 16 m² qui ont été utilisées, ce qui s'éloigne des recommandations du protocole CASIMIR. Il a été considéré comme plus consistant de travailler sur des surfaces de 8*16 m² plutôt que 8*1 m².

4.3.9. **Maladies : présence de septoriose des feuilles (M)**

Les résultats l'évaluation de la présence de septoriose des feuilles ne permettent de séparer les champs qu'en deux catégories de faible infestation : la classe 1 (45 %) et la classe 2 (55%). Cette très faible discrimination des champs laisse des doutes sur la pertinence de cet indicateur dans des analyses multivariées. L'observation d'une diversité de maladies plutôt qu'uniquement la septoriose des feuilles aurait peut-être permis d'augmenter la gamme de variation de l'indicateur et donc la dissociation des champs.

L'accumulation des observations lors des prochaines années améliorera peut-être l'utilité de l'indicateur, mais il faudra peut-être aussi retirer l'effet du climat sur le développement de la septoriose

Les données récoltées sont en accord avec les données du CePiCOP (Legrève et Wera 2021) qui annonçait en juin que les niveaux d'infestation observés dans son réseau étaient faible.

Les observations ont été réalisées aux alentours des premières pulvérisations (vers mi-avril) dans tous les champs, ce qui est une limite car les premières pulvérisations sont précoces, ce qui limite l'observation d'infestations élevées sur l'ensemble des champs, même ceux pulvérisant plus tard voire pas du tout. L'observation des symptômes à une seule période est donc une limite. Une évaluation de l'infestation quelques semaines après la pulvérisation voire à la récolte aurait peut-être permis d'observer des valeurs différentes qui seraient alors une infestation « finale » et pourraient compléter les données récoltées aux alentours de la pulvérisation. Dans ce cas-ci la quantité de produit phytosanitaire utilisée pourrait impacter les résultats.

Cet indicateur catégoriel est donc problématique par sa faible capacité à distinguer les champs les uns des autres et le fait que, à priori, seules des infestations faibles devraient être rencontrées si les relevés sont réalisés à chaque fois aux alentours de la première pulvérisation dans l'échantillon de parcelles. Si la conservation de cet indicateur peut être remise en question pour ces raisons-là, la répétition de la mesure dans des conditions climatiques différentes l'année prochaine pourrait être plus intéressantes.

4.4. **Analyses multivariées**

4.4.1. **Discussion à propos des liens entre services écosystémiques**

L'ACP2_SE (figure 18) et la MC (figure 25) des SE ont été utilisés pour observer les liens entre les indicateurs dans cette partie.

Sur base de la MC, l'on voit que les indicateurs de type cabanes, turricules et paille sont chacun fortement corrélés entre eux. Cela suggère que chaque fois les trois indicateurs sont redondants et que seul un indicateur pourrait être conservé, par exemple celui qui est le plus corrélé aux deux autres (T_turF, T_cabF et T_surf).

La formation des cabanes et la disparition de la paille sont en général fortement corrélées entre elles. Quand les VDT forment de nombreuses cabanes, on observe donc que plus de paille a disparu à la fin de l'expérience. Par ailleurs, moins de liens existent entre les turricules et les indicateurs de la quantité de paille et des cabanes. L'ACP indique les mêmes liens.

Ces trois constatations suggèrent que la disparition de la paille décrirait un phénomène assez semblable au suivi des cabanes tandis que le suivi des turricules décrirait une dimension différente de l'activité des VDT. Les turricules apporteraient donc une indication complémentaire sur l'activité des VDT, mais ils sont peut-être finalement moins indicateurs pour le réel service rendu d'incorporation de la paille.

Les indicateurs liés au poids de la paille n'étant pas prévus dès le départ, une certaine imprécision existe sur le poids de la paille en début d'expérience. Cela diminue la confiance que l'on peut accorder à la mesure du poids de la paille et à la véracité des corrélations avec les autres indicateurs. Ainsi, peut-être que la corrélation avec les turricules n'est pas visible cette année-ci, mais qu'elle pourrait l'être à l'avenir si l'indicateur est mieux anticipé selon les conseils d'adaptation proposés au point 4.3.2.

Les trois indicateurs des turricules sont corrélés faiblement à moyennement à la stabilité des agrégats. Cela peut s'expliquer sur base de la littérature, par le fait que les VDT participent à la création d'agrégats stables en surface par la formation de turricules. Au cours des années, cette activité améliorerait la stabilité des agrégats en surface. Cette hypothèse est appuyée par le fait que le travail intensif du sol est généralement négativement corrélé à la fois à l'activité des VDT et la stabilité des agrégats en surface, bien qu'un facteur de confusion lié aux pratiques pourrait exister.

Concernant les cabanes, leur corrélation positive avec le C_{org} total et labile suggère que les VDT sont liés aux dynamiques de dégradation de la MO, ce qui semble logique. Un sol où l'on retrouve beaucoup de carbone labile (20 à 200 μm) a une activité d'incorporation de la MO par les VDT plus grande. Dans cette optique, il est intéressant de voir que le lien existe avec les cabanes mais pas avec les turricules, qui semblent moins témoigner du phénomène d'incorporation de la MO de surface. Le carbone labile reflète la dynamique de la MO sur les 10 dernières années (point 1.3.1.2.2.2.).

Concernant les indicateurs de dégradation de la MO, l'absence de corrélation entre l'indicateur du taux de dégradation de la MO (K) et de la quantité de MO dégradée (S) entre eux et avec les autres indicateurs suggère qu'ils décrivent tous les deux des phénomènes qu'aucun autre indicateur ne décrit. De plus grands échantillons permettraient peut-être de faire émerger des liens. Le lien positif entre K et la présence de septoriose, qui est aussi visible sur l'ACP, est difficile à expliquer. Comme les spores de la septoriose survivent dans le sol, on s'attend à ce qu'un taux de dégradation élevé de la MO soit lié à une moindre infection par la septoriose. Les ACP montrent peu de corrélations franches entre les indicateurs S et K avec les autres indicateurs.

Concernant le contenu en carbone du sol, la corrélation entre le ratio C_{labile}/C_{stable} (q_{frac}) et la teneur en carbone stable et labile est liée au calcul de l'indicateur. Le carbone labile représente en moyenne $73 \pm 7\%$ du carbone total, ce qui peut expliquer la corrélation forte avec le carbone labile et l'absence de corrélation avec le carbone stable.

Les indicateurs U et B sont corrélés négativement entre eux, ce qui est attendu sur base de la littérature. En effet, l'indicateur USDA est une variante simplifiée du test de Le Bissonais qui évalue la stabilité des agrégats sous l'action de l'eau et qui est un test reconnu pour évaluer la sensibilité du sol à la battance. Les champs ayant les agrégats les moins stables semblent donc aussi être plus sensibles à la battance selon l'indicateur Dlim. Ce lien entre deux indicateurs de terrain confère à ces mesures une plus grande crédibilité qu'un indicateur d'une expérience isolée qui n'est pas vérifiée par une autre mesure. En outre, ces deux expériences communiquent ici un aspect légèrement différent : l'une rend compte d'une propriété structurale du sol, l'autre informe sur la conséquence réelle de cette propriété structurale. Cette association d'indicateurs offre un schéma assez complet du SE. Cette corrélation perçue cette année permet en outre d'imaginer de remplacer l'expérience de la battance par le test USDA, bien que des analyses supplémentaires soient nécessaires pour étayer cette hypothèse. Quelques réserves peuvent cependant être émises sur la qualité du test USDA comme indicateur (point 4.3.5.).

Le test bêche (VESS) de structure macroscopique du sol n'étant corrélé à aucun autre indicateur (ni dans la MC, ni dans l'ACP), l'on peut considérer qu'il décrit une dimension des SE qu'aucun autre indicateur ne décrit.

Les indicateurs des adventices en hiver ne sont pas discutés car l'utilisation d'herbicides avant l'hiver ne permet pas d'avoir une image du potentiel d'infestation. Les indicateurs de printemps montrent que la densité est corrélée faiblement positivement à la stabilité des agrégats dans l'eau et aux indicateurs des turricules (T_{tur2} et T_{turF}). Ces liens sont difficiles à soutenir sur base de la littérature et sont peut-être liés à des facteurs de confusion liés aux systèmes agricoles. Les agriculteurs ayant une forte densité d'adventices au printemps auraient des pratiques permettant d'avoir une meilleure stabilité des agrégats et une plus grande activité des VDT. Concernant les indicateurs adventices entre eux, la densité au printemps est très corrélée aux deux autres indicateurs, créant de la redondance. Un seul indicateur pourrait peut-être synthétiser les trois indicateurs de printemps.

Enfin, en ce qui concerne la présence de septoriose (M), des corrélations à nouveau difficiles à expliquer apparaissent. Les corrélations avec cet indicateur sont à mettre en doute car seules les deux premières catégories (sur 5) d'infestation par la septoriose ont été rencontrées et chacune contient environ 50 % des champs. A partir du faible échantillon de données disponibles, l'on peut considérer que ces corrélations ne sont pas interprétables.

4.4.2. Discussion des liens entre pratiques culturales et services écosystémiques

4.4.2.1. Première dimension similaire pour les trois analyses en composante principales

Le premier axe des trois ACP réalisées montre systématiquement une opposition forte entre des indicateurs de PC liés à un travail du sol, et en particulier de labour, profond et fréquent d'une part et des indicateurs du SE d'incorporation de la MO (T_tur, T_cab, T_poids¹⁷) d'autre part. Le lien est systématiquement plus fort avec l'indicateur concernant les turricules que celui des cabanes, ce qui est confirmé par la MC. Les parcelles dont le labour remonte plus longtemps semble en effet favoriser ce SE. En particulier, l'ACP1_SE construite à partir des indicateurs de SE indique qu'un labour en 2020, c'est-à-dire juste avant la mise en place de l'expérience, impacte négativement les VDT. La littérature révèle effectivement que l'abondance des VDT est négativement affectée par le travail du sol (Edwards 2004b; Chan 2001; Ernst et Emmerling 2009). Une diminution globale de leur activité d'incorporation est donc peu surprenante. L'on observe que la fréquence de récolte de cultures souterraines, dont la récolte implique un travail du sol très intense, y est également, et assez logiquement, associé.

A côté de cela, ce SE d'incorporation de la MO semble également coïncider avec une longue durée de mise en prairie sur l'ACP. La MC quant à elle ne montre un lien entre fréquence de prairie et activité des VDT qu'avec les indicateurs de turricules. L'activité des VDT reflétée à travers les turricules semble correspondre aux études de Cluzeau *et al.* (2012), dans lesquelles l'on retrouve une plus grande densité de VDT sous prairie. La durée de cultures, couverts et prairies confondues y est également positivement corrélée. Selon Edwards (2004), les intercultures permettent d'augmenter la fourniture en MO, qui est généralement l'élément limitant pour le développement des communautés de VDT. Ceux-ci ayant une durée de vie de plusieurs années, en particulier les VDT anéciques, leur dynamique de reproduction est lente et peut dépendre de la gestion du sol plusieurs années en arrière. En outre, une durée de cultures, couverts et prairies confondus plus élevée peut, dans certains cas, s'accompagner d'une perturbation du sol plus faible. Notamment, les systèmes avec des rotations incluant des prairies temporaires de plusieurs années, comme c'est le cas des parcelles 12 (4 ans) et 8 (3 ans), ne subissent pas de perturbations du sol durant cette période. Par ailleurs, les systèmes en techniques culturales simplifiées (TCS), en agriculture de conservation (AC) et avec semis direct sont réputés pour accorder beaucoup d'importance à garder un sol couvert, et à travailler très peu le sol. Les choix des agriculteurs peuvent être considérés comme des facteurs de confusion, qui influencent en même temps des PC différentes, résultant en des corrélations entre des PC qui n'ont pas forcément des liens de causalité agronomiques

¹⁷ T_cab et T_poids non significatifs à p-valeur < 0,05 pour l'ACP1_SE.

directs. Dans ce cas-ci, peu de raisons mènent à penser qu'un travail du sol intense entraîne forcément une durée de cultures, couverts et prairies confondus plus courte ou inversement que celle-ci ait un effet sur l'intensité de travail du sol. L'on suggère donc plutôt que la cause de la corrélation entre ces deux variables est la décision de l'agriculteur – influencé par son entourage, ses expériences personnelles, ses connaissances sur différents sujets... – qui agit à la fois sur les deux variables. Cette corrélation pourrait donc être expliquée par un facteur de confusion plutôt que par un lien de causalité.

Le nombre de variétés et d'espèces récoltées en association est également corrélé positivement aux indicateurs d'incorporation de la MO. Une hypothèse qui peut être avancée est que les agriculteurs gérant des systèmes dans lesquels le travail du sol est plus faible sont généralement plus enclins à installer des mélanges de variétés dans leurs cultures. Il peut donc à nouveau s'agir d'un facteur de confusion plutôt que d'un lien de cause à effet. Cependant, il est également possible d'imaginer que les associations de variétés et espèces offrent une diversité de substrats pour les VDT, avec un taux de C:N différent, et que cela favorise l'incorporation de MO et donc l'abondance de VDT. Cependant, cela ne semble pas avoir été mis en évidence dans la littérature.

Les IFT, quant à eux, sont corrélés négativement aux SE d'incorporation de MO et principalement aux turricules dans la MC. Si des effets néfastes de certains traitements sur les VDT ont été rapportés, il s'agit surtout d'anciens produits qui ne sont plus autorisés (Edwards 2004b). L'on remarque toutefois que le lien est plus élevé entre les turricules et l'intensité d'usage des insecticides. Selon la littérature, ceux-ci pourraient affecter la physiologie des VDT, contrairement aux herbicides qui ne les affectent qu'indirectement en réduisant la disponibilité en substrat. La première dimension des ACP indique que les IFT vont de pair avec une forte perturbation du sol, ce qui peut rejoindre la définition de systèmes dits intensifs (en intrants et travail du sol). Cette corrélation positive est confirmée par la MC.

De manière qualitative, l'utilisation des termes AC et agriculture conventionnelle (Aconv) par certains agriculteurs s'oppose sur cette première dimension. Globalement, l'on observe que les champs dits en AC ont un travail du sol plus faible et des indicateurs d'incorporation de la MO plus élevés que la moyenne, et inversement pour ceux en Aconv.

Il est intéressant de noter que l'utilisation du terme « agriculture biologique » (répondant à un cahier de charges), qui dans certains discours peut être associé à un travail du sol très élevé, n'a pas été significativement mis en évidence dans cette opposition PC travail du sol et SE incorporation de la MO au niveau de la première dimension des ACP. Cependant, il est important de noter que l'échantillon de cette année ne contient qu'une seule parcelle en agriculture biologique avec un travail du sol classique dont les données soient exploitables (parcelle 19). En effet, un autre champ en agriculture biologique n'a pu être pris en compte dans les analyses à cause d'un historique incomplet, et deux autres champs en agriculture biologique étaient également en agriculture de

conservation, biaisant des conclusions qui seraient attribuées aux systèmes en agriculture biologique uniquement. Toutefois, l'on peut observer que même dans la classification hiérarchique en sept catégories dans laquelle le champ 19 est dans une catégorie à part (HCPC3_PC), celle-ci n'est pas caractérisée par un travail du sol particulièrement intense (annexe 3.4.6.). L'intégration d'une plus grande quantité de champs en agriculture biologique uniquement dans les années futures permettrait d'évaluer avec plus de certitudes ces premières observations.

Les autres termes qualifiant les pratiques des agriculteurs (AE, TCS...) ne se positionnent pas de manière significative sur cette première composante principale. Il s'agit de termes potentiellement plus flous (AE) ou moins extrêmes (TCS).

A côté de ces liens présents dans la première dimension des trois ACP, d'autres liens peuvent être mis en avant pour l'une ou l'autre ACP en particulier. L'ACP1_SE et l'ACP3_PC mettent en avant le fait que la stabilité des agrégats est négativement corrélée au labour et au travail fréquent et profond du sol. Si ce lien n'est pas significatif avec une p-valeur < 0,05 sur la dimension 1 de l'ACP2_SE, il est néanmoins raisonnablement mis en évidence graphiquement sur la figure 18. Ce lien est étayé par la MC et peut s'expliquer sur base de la littérature par le rôle indirect de la MO. Dans un système labouré et travaillé, la MO est moins concentrée dans la partie supérieure du sol, ce qui mène à une moins grande stabilité des agrégats (section 1.3.1.3.1.a.). Aucune corrélation entre U et les indicateurs de la MO (C_...) n'est visible, mais cela peut s'expliquer par le fait qu'il manque des répétitions.

Si le lien n'est pas visible sur une dimension en particulier, la figure 18 indique que la vitesse de formation de la surface de battance est négativement corrélée au travail du sol intense, ce qui est en accord avec la MC. Cette corrélation peut s'expliquer sur base de la même logique que le paragraphe précédent.

L'ACP1_SE montre également une opposition assez nette entre les IFT (entre autres IFT en herbicides) et les indicateurs de présence d'adventices sur cette première dimension. La MC confirme ce lien pour les IFT globaux et en herbicides. Un lien entre l'IFT (en herbicides) et la densité (et diversité graphiquement) d'adventices au printemps et un lien entre les IFT (en herbicides) sur froment et la densité d'adventices en hiver sont également visibles sur la troisième et deuxième dimension de l'ACP3_PC respectivement. Ces liens semblent logiques. L'on sait en effet que la gestion des adventices se fait sur plusieurs années. Les agriculteurs suivent d'ailleurs de très près les adventices, ou le « salissement de la parcelle », sachant que cela influencera les années futures. Si l'utilisation d'herbicides a un effet direct sur la présence d'adventices, la réflexion autour de la maîtrise des adventices se fait, elle, à plus long terme. L'effet indirect pourrait donc être évalué par les corrélations que possèdent les indicateurs de SE présence d'adventices et les IFT sur l'ensemble de l'historique, car reflétant l'état de propreté de la parcelle. L'effet direct pourrait quant à lui être mesuré par les corrélations entre les indicateurs d'adventices et les IFT sur froment, car proportionnellement ceux-ci prennent mieux en

compte les pulvérisations réalisées cette année en froment. Dans cette continuité, il pourrait être pertinent de calculer les corrélations des IFT des pulvérisations de cette année uniquement avec les indicateurs de SE adventices afin d'évaluer l'utilité des PP en fonction du reste du système de culture.

Les teneurs en C_{org} total et C_{org} labile sont associées aux indicateurs d'incorporation de la MO et opposées au labour du sol dans l'ACP2_SE, et cela se confirme avec les corrélations individuelles renseignées dans la MC. Cela peut s'expliquer par le fait que le labour augmente la minéralisation de la MO via l'augmentation de sa surface spécifique et donc de sites d'oxydation par les microorganismes (Shaxson 2006). Selon Shaxson (2006), et comme mentionné dans l'état de l'art, cette diminution de MO peut causer une compaction du sol en profondeur. Pourtant, aucun lien entre le labour et la compaction du sol n'a été mis en lumière dans les ACP et dans la MC. Une nuance peut toutefois être apportée à ceci. Si le labour répété, et particulièrement dans de mauvaises conditions, a tendance à compacter le sol, il a un effet de décompaction sur le court terme. Ayant des systèmes à différents niveaux de maturité (certains champs sont en non-labour occasionnel, ou en non-labour depuis peu de temps, etc.) dans l'échantillon étudié, il est possible que cela brouille certaines corrélations qui pourraient exister avec des systèmes à l'équilibre depuis longtemps. Néanmoins, il est à noter que le score VESS moyen des champs en agriculture biologique est de 3,27, ce qui est jugé trop élevé pour une bonne croissance des racines (Ball et al. 2007, Guimaraes et al. et Guimaraes et al. 2011 2011).

4.4.2.2. Autres dimensions des trois analyses en composantes principales

La date de semis du froment 2020-2021 est négativement corrélée au nombre de cabanes à VDT et positivement corrélée à la disparition de la paille en fin d'expérience (figures 18 et 26). L'hypothèse avancée est que l'activité des VDT serait freinée par les conditions hivernales lors d'un semis tardif. La littérature indique en effet qu'en région tempérée un frein majeur à l'activité des VDT est une température suboptimale en hiver (Edwards 2004b). Les cabanes comptabilisées après 2 et 4 mois pour les champs en semis tardifs correspondent effectivement à une période avec des températures plus basses que pour les champs en semis précoces. De manière similaire, les cabanes comptabilisées sur toute l'expérience et la disparition de paille en fin d'expérience sont des mesures écourtées de la période d'automne où les températures sont encore suffisantes pour l'activité des VDT pour les champs en semis tardifs.

La fréquence en apports organiques est liée positivement aux VDT (figures 18 et 26). Ces apports en MO constituant le substrat pour les VDT, cela semble en accord avec la littérature (Edwards 2004b).

Un lien positif (figures 22 - dim 1 et 2 - et 26) est mis en évidence entre les doses de fertilisation (azote, azote organique, phosphore et potassium) et les indices de fréquence de traitement en froment. Ce lien peut être expliqué par une agriculture plutôt intensive

en intrants et est peut-être lié à l'itinéraire phytotechnique spécifique du blé. Aussi, comme le froment n'est pas cultivé tous les ans, les indicateurs d'IFT liés au froment se basent sur moins de données que les indicateurs d'IFT liés à l'ensemble des cultures, une corrélation avec l'IFT froment est donc moins consistante, ce qui peut expliquer l'absence des autres IFT de la corrélation. Il existe aussi une corrélation négative entre ces variables et la diversité des espèces dans les couverts mais elle n'est pas appuyée significativement par la MC sauf pour la fertilisation potassique, ce qui est à nouveau difficilement interprétable.

Une corrélation positive a été mise en évidence (figure 22 – dim 1 et 3) entre la diversité et la densité d'adventices au printemps avec le temps passé sous prairie dans l'itinéraire cultural. Ce lien est appuyé significativement par la MC pour la densité d'infestation. Si la littérature (annexe 1.3.2.2.) indique que les prairies temporaires ont un effet suppressif sur certaines adventices, il est possible qu'elles facilitent l'infestation par d'autres adventices, une étude plus approfondie des espèces présentes permettrait d'apporter plus d'informations sur cette observation.

Les parcelles gérées de manière « agroécologique », selon le vocabulaire utilisé par l'agriculteur, semblent avoir un potentiel intéressant en termes de SE (figures 17 et 18). La formation de la croûte de battance y est généralement lente et l'incorporation de la MO ainsi que la teneur en C_{org} sont élevées. Ils ont par ailleurs un nombre de variétés récoltées, entre autres sous forme d'associations, élevé. Malgré que l'indicateur de présence de maladies discrimine peu les champs, l'on peut néanmoins souligner qu'il existe une corrélation négative avec le nombre de variétés récoltées en association. Ceci est en adéquation avec la littérature, indiquant que les mélanges de variétés sur une parcelle est un levier permettant de retarder le développement d'épidémies au cours de l'année d'une part, et de ralentir le contournement des résistances par les pathogènes d'autre part (Gasselin et Clément 2006; Vidal et al. 2014; De Vallavieille-Pope et al. 2007). Cultivées seules, les variétés dotées d'un gène de résistance spécifique sont généralement surpassées par les parasites après deux à cinq ans (Gasselin et Clément 2006). Une étude menée sur une association de quatre variétés de blé panifiable en France a montré des performances supérieures à la moyenne des cultures monovariétales et presque équivalentes à la meilleure de celles-ci, entre autres en termes de dégâts de septoriose (De Vallavieille-Pope et al. 2007). Les mélanges de variétés associées permettent donc de stabiliser la quantité et la qualité des récoltes.

L'absence de liens de corrélation entre la présence de septoriose et l'IFT en fongicides sur froment pourrait suggérer que certains traitements fongiques sont inutiles, ou que des doses très élevées ne seraient pas justifiées, car des IFT plus faibles n'induisent pas spécialement une sévérité de septoriose plus élevée. Cependant, d'une part, cette affirmation lie un IFT établi sur l'historique des cultures de froment, et non celle de cette saison uniquement. D'autre part, même en cas d'IFT calculé sur cette année de culture uniquement, cette affirmation semblerait précoce dans ce mémoire, sachant que les maladies cryptogamiques se développent à partir de petits foyers et que ceux-ci peuvent

survenir à des moments différents entre champs, justifiant l'utilisation d'un traitement fongique sur certaines parcelles et pas sur d'autres. L'échantillon de 19 parcelles semble en effet faible pour pouvoir en tirer une conclusion générale. Enfin, peut-être que l'indicateur utilisé n'est pas suffisamment discriminant par rapport à l'infestation réelle en champ, et ne permet donc pas d'observer de corrélations. Cette hypothèse semble peu convaincante, étant donné l'avis du CePiCOP sur l'infestation des parcelles cette année.

Enfin, les précédents culturels, avec plusieurs niveaux de description¹⁸ testés dans les trois ACP, n'ont pas été corrélés significativement aux dimensions. Toutefois, la représentation des modalités de précédents culturels sur les graphiques des individus (non présenté dans ce mémoire) suggère une moyenne pour les précédents culturels souterrains (et en particulier la culture de pommes de terre) liée au travail intense du sol (proches des directions de travail intense du sol sur les ACP).

Les indicateurs VESS et qfrac ne ressortent pas des ACP et ne sont donc pas des variables permettant de séparer les champs entre eux. Cela peut être lié au faible nombre d'échantillons ou bien au faible nombre de répétitions par champ pour le ratio qfrac. Dans la MC, l'indicateur VESS n'est corrélé à aucun PC ni SE tandis que qfrac l'est avec quelques PC, ce qui appuie l'absence de corrélation avec l'ACP. Les indicateurs de décomposition de la MO, même s'ils sont visibles sur l'ACP2_SE, ne sont corrélés à presque aucun SE et PC non plus.

4.4.2.3. Conclusion

En conclusion de cette partie, les trois ACP réalisées ont mis en évidence que le SE lié à l'activité d'incorporation de la MO par les VDT constitue une part élevée de la variabilité des résultats. Il est corrélé à de nombreux PC dont les liens sont aussi visibles dans la MC et confirmés par la littérature. Des hypothèses ont aussi été formulées pour certains liens plus difficiles à expliquer sur base de la littérature.

D'autres SE ont aussi participé à construire les dimensions des ACP. Les indicateurs de stabilité des agrégats et de vitesse de formation de la battance sont corrélés entre eux comme attendu dans la littérature ainsi qu'à des PC cohérents. Le C_{org} total et le C_{org} labile sont liés à l'activité des VDT. Des liens ont pu être dégagés entre les adventices et certains PC, particulièrement certains indices de fréquences de traitement des cultures.

Deux SE sont très peu liés aux autres données de SE et PC récoltées et peu présents voire pas du tout dans les premières dimensions des ACP : la dégradation de la MO et la compaction du sol.

L'utilisation des termes définissant de grands systèmes agricoles a su mettre en évidence quelques liens entre des pratiques agricoles – l'Aconv, l'AC et dans une moindre mesure l'AE – et des SE. Les précédents culturels quant à eux n'ont pas permis de dégager

¹⁸ Quatre niveaux de précédents culturels de plus en plus fins ont été testés. PrecCult1 : Culture souterraine – culture aérienne légumineuse – culture aérienne non-légumineuse. PrecCult2 : Culture pommes de terre – culture souterraine autre – culture aérienne légumineuse – culture aérienne non-légumineuse. Etc.

cette année des liens avec les résultats, sauf peut-être très légèrement la culture de légumes racines.

Les limites rencontrées sont principalement (1) la faible taille de l'échantillon, (2) le fait que les systèmes agricoles peuvent agir comme facteurs de confusion et ainsi faire apparaître des corrélations sans liens de causalité, (3) dans certains cas le faible nombre de répétitions des expériences sur le terrain. Ces limites peuvent potentiellement expliquer pourquoi certains indicateurs se comportent de façon inattendue, comme le taux de décomposition de la MO ou bien la compaction du sol qui sont peu corrélé aux autres indicateurs.

4.4.3. Discussion autour des classifications des champs étudiés

Les classifications hiérarchiques basées sur les indicateurs de SE et sur les indicateurs de PC produisent des groupes homogènes différents. S'il n'y a pas de concordance parfaite entre les classifications selon les SE et PC au point de créer les mêmes groupes, les variables caractérisant la division en deux groupes sont néanmoins semblables (figures 19 et 23). D'un côté, il y a les champs avec un travail du sol et, dans une moindre mesure, un IFT importants, une durée de cultures, couverts et prairies confondus faible, et une utilisation du terme Aconv fréquente. Ils sont accompagnés d'une incorporation de la MO et d'une stabilité structurale faibles. De l'autre côté, il y a les champs possédant les caractéristiques inverses.

Si l'on progresse dans la subdivision sur base des SE, d'autres aspects intéressants peuvent être observés. Les trois champs sur lesquels ont été pratiqué le semis direct (champs 8, 9 et 11), se situent dans le même groupe de fourniture en SE (figure 20), caractérisés essentiellement par rapport à leur stabilité du sol élevée et leur formation de croûte de battance particulièrement lente. Si le protocole de la battance a été légèrement adapté pour ces parcelles-là, l'expérience USDA semble être en concordance avec ces résultats.

Il est également intéressant de noter que les parcelles 16 et 20, gérées par les mêmes propriétaires et dont les indicateurs de PC sont similaires, ont obtenu des résultats en termes de SE remarquablement différents.

Enfin, les champs 12 et 17 sont des individus très particuliers, ayant un historique cultural différent à certains niveaux (parcelle 12 avec 50 % du temps en prairie) mais avec une incorporation de la MO très élevée. La parcelle 12 est en effet très isolée des autres champs en termes d'historique cultural, et le premier groupe avec lequel il fusionne est celui comprenant le champ 8, comptant également plusieurs années de prairie temporaire.

D'un point de vue de la classification sur base des PC, un troisième groupe peut être distingué des deux premiers groupes (figure 24). Ce dernier, intermédiaire au niveau du travail du sol et des SE liés mentionnés ci-dessus, est principalement caractérisé par des faibles intrants en engrais et en PP.

Conclusion

Ce mémoire a permis de mettre au point et d'évaluer une première fois la qualité des protocoles de mesure des indicateurs de services écosystémiques (SE) de la thèse de L. Niveau ainsi que la qualité des données récoltées et des indicateurs en découlant. Elle a aussi mené à la mise en évidence de liens de corrélation entre ces données et les pratiques culturales (PC) des dix dernières années sur 19 champs en région limoneuse et sablo-limoneuse en Brabant-Wallon.

Dans une optique de limitation de l'effet de l'observateur pour les prochaines années, les protocoles de mesure des SE ont été expliqués en détail dans la partie matériel et méthode et en annexe. En particulier, un gros travail a été réalisé pour adapter certains protocoles – parfois peu utilisés dans la recherche scientifique – à cette recherche de terrain : (1) l'activité d'incorporation de la MO par les VDT, (2) le suivi de la battance et (3) la présence d'adventices. Pour ces trois expériences, de nouveaux indicateurs ont été proposés et évalués.

Il en est ressorti : (1a) que l'indicateur de poids de paille en fin d'expérience est intéressant et pourrait éventuellement remplacer les autres indicateurs beaucoup plus chronophage (1b) que le témoin peut être remplacé par une cage classique supplémentaire ; (2) que l'indicateur de la battance souffre de certaines limites mais plusieurs pistes d'améliorations ont été proposées ; (2a) qu'il serait intéressant d'évaluer l'indicateur D_{min} par photo et de le comparer à D_{lim} , permettant de savoir si D_{lim} peut être remplacé par D_{min} et si celui-ci est plus sensible (comme attendu) à l'état initial de la surface que D_{lim} ; (2b) que les données pluviométriques pourront être obtenues via le site internet Agromet ou à partir des données radars de l'IRM, permettant, en plus, de travailler avec l'énergie cinétique de la pluie ; (2c) que la stabilité des agrégats étant corrélée à la battance, il pourrait être envisageable de remplacer le suivi de la battance par l'évaluation de la stabilité des agrégats, bien que plus de recul soit nécessaire pour en être certain ; (3) que les relevés de sortie d'hiver des adventices peuvent être abandonnés pour les prochaines années à cause des désherbages d'automne réalisés sur certaines parcelles et un indicateur de compétitivité des adventices sur la culture de blé a été proposé et peut être amélioré.

Concernant les autres indicateurs (de décomposition de la MO, de teneur en carbone du sol, de stabilité des agrégats, de structure du sol et de présence de septoriose), il a été conseillé de les conserver pour l'année prochaine, malgré que certains soient très peu voire pas du tout corrélés aux pratiques agricoles (structure du sol et décomposition de la MO). Les raisons de cette recommandation sont l'intérêt des SE qu'ils évaluent dans le fonctionnement de l'AEC révélé par la littérature, la continuité des données pour la thèse, la potentielle variation interannuelle et enfin la relative rapidité des expériences.

Les indicateurs liés aux teneurs en carbone devraient être réévalués courant novembre car les dernières répétitions seront ajoutées au jeu de données. Le nombre d'échantillons pour la mesure de la stabilité des agrégats devrait être augmenté au moins à 16 par champ afin de suivre le protocole initial et d'obtenir des résultats plus consistants.

Les analyses statistiques ont montré que presque aucun des indicateurs de SE ne suivent une distribution normale. Dès lors, des transformations devront être faites dans le cas où des analyses inférentielles venaient à être réalisées. Quant à l'homoscédasticité, elle est respectée pour la plupart des indicateurs sauf pour les indicateurs de compétition et de densité des adventices, ce qui est probablement lié au fait qu'une partie des champs a subi un désherbage très efficace (très peu de variance et densité proche de 0) tandis qu'une autre partie des champs semble lutter moins efficacement, avec des densités et des variances associées plus élevées. Ce problème est donc lié aux pratiques de désherbage et non au protocole en lui-même. Le test USDA et, dans une moindre mesure, le suivi de la battance présentent aussi des limites du point de vue de l'homoscédasticité. Ces déviations devraient être précisées au cours de l'année prochaine avec des jeux de données plus grands.

En termes d'organisation, il est aussi apparu que les champs semés tardivement pouvaient poser problème à cause des conditions d'humidité hivernales qui entraînent parfois des modifications d'assolement par les agriculteurs et donc des changements de parcelle en dernière minute. L'installation des premières expériences peut alors se faire plus ou moins longtemps après le semis, ce qui peut mener à des biais pour les mesures liées à l'incorporation de la MO par les VDT et le suivi de la battance. De plus, la mesure de la battance pose des problèmes de représentativité de la parcelle lorsque le travail manuel du sol est réalisé en conditions trop humides. Pour ces raisons, les semis tardifs devraient être évités à l'avenir.

La seconde partie de ce travail a été consacrée à l'analyse des liens apparaissant entre l'ensemble des indicateurs observés sur chaque champ via des MC, des ACP et des HCPC des individus.

Les principales corrélations entre SE sont :

- Un lien positif entre l'incorporation de la MO dans le sol et la teneur en MO dans le sol, suggérant qu'une plus grande capacité d'un champ à incorporer de la MO mène à des contenus en MO plus importants, ou qu'une accumulation de MO témoigne d'une activité biologique (entre autres, de VDT), permettant l'incorporation de nouveaux résidus sur la parcelle ;
- Une relation négative entre la stabilité des agrégats et la sensibilité à la formation d'une croûte de battance, la désagrégation des agrégats étant renseignée dans la littérature comme la cause du phénomène de la battance ;
- Un faible lien positif entre la présence d'adventices et la stabilité des agrégats ainsi que la présence de turricules de VDT, plus difficilement explicables.

Les grandes tendances qui ressortent des analyses multivariées entre PC et SE sont les suivantes :

- Un travail fréquent et profond du sol s'accompagne généralement d'une utilisation élevée de produits phytosanitaires, mais pas systématiquement d'apports en engrais plus élevés que la moyenne. Ces derniers sont cependant régulièrement liés aux IFT ;
- Les systèmes intenses en travail du sol cultivent un moins grand nombre de variétés et espèces récoltées en association, et leurs rotations comprennent plus rarement des prairies temporaires ;
- Un travail du sol plus intense, et en particulier de labour, correspond à des indicateurs d'incorporation de la matière organique par les VDT et de teneur en MO généralement plus faibles, et concorde également avec une faible stabilité structurale des agrégats induisant une vitesse de formation de la croûte de battance plus élevée ;
- Les apports de N, P et K vont généralement de pair et ne semblent pas influencer la fourniture en SE ;
- Les indicateurs de PC ne semblent pas affecter la compaction du sol et la décomposition de la MO.

Les HCPC réalisées dans ce mémoire tendant à opposer deux grands groupes de champs. Les premiers sont généralement caractérisés comme étant cultivés en Acony, subissent un travail du sol intense et possèdent IFT élevé. L'incorporation de la MO dans le sol, la teneur en MO et la stabilité structurale du sol y est relativement faible et une croûte de battance s'y forme rapidement sous l'action de la pluie. Les autres champs sont plutôt définis par les termes AC et AE, et la fourniture en SE cités ci-dessus y est plus abondante. Le labour y est plus rare ou absent et les adventices parfois plus abondantes. Les apports en engrais constituent en outre un deuxième critère utilisable pour distinguer les champs.

Il semble néanmoins important de rappeler que ces conclusions ne concernent que l'échantillon de champs étudié et ne peuvent être généralisées à l'ensemble des champs de la Wallonie.

Enfin, pour clôturer, il est certain que les prochaines années de recherche de L. Leveau et ses mémorants vont apporter un meilleur éclairage à certaines tendances déjà observées dans ce mémoire. Des liens encore invisibles à ce jour seront aussi mis en évidence, avec un nombre d'échantillons plus élevé ainsi qu'avec l'utilisation des mesures de rendement et de prédation des semences. Il faudra néanmoins faire face au problème de la variation interannuelle des résultats des expériences et au biais de l'observateur.

Bibliographie

- Agrios, G. 2004. *Plant Pathology - 5th Edition*. Academic Press.
- Amézketa, E. 1999. « Soil Aggregate Stability: A Review ». *Journal of Sustainable Agriculture* 14 (2-3): 83-151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08.
- Askari, M. S., J. Cui, et N. M. Holden. 2013. « The Visual Evaluation of Soil Structure under Arable Management ». *Soil and Tillage Research* 134 (novembre): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.06.004>.
- Baize, D. 2013. « Des volumes emboîtés à toutes échelles d'espace ». In *Les sols et leurs structures*, Quae. Versailles.
- . 2018. *Guide des analyses en pédologie : 3e édition revue et augmentée*. Vol. 3e édition revue et augmentée. Savoir-faire. Versailles: Éditions Quae. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1919279&lang=fr&site=ehost-live&scope=site&authtype=ip,shib&custid=s3118160>.
- Baize, D., O. Duval, et G. Richard. 2013. *Les sols et leurs structures: observations à différentes échelles*. Quae. Quae.
- Ball et al. 2007, Guimaraes et al., et Guimaraes et al. 2011. 2011. « Evaluation Visuelle de la structure d'un sol ». A2C le site de l'agriculture de conservation. 2011. <https://agriculture-de-conservation.com/Evaluation-Visuelle-de-la-structure-d-un-sol.html>.
- Balloy, B., A. Bouthier, D. Cluzeau, F. Degan, et L. Metzger. 2017. « Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols ».
- Biot, N. 2020. « Comparaison de méthodes d'évaluation de la fourniture du service écosystémique de la stabilité structurale sur des sols limoneux et limono-sableux en Belgique ». <https://bib-uclouvain-be.proxy.bib.ucl.ac.be:2443/opac/ucl/fr/visualizer/DIAL.mem%3A0ai%3Adial.uclouvain.be%3Athesis%3A25112?i=0>.
- Blouin, M. 2013. « A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services ». *European Journal of Soil Science - Wiley Online Library*. 2013. <https://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ejss.12025>.
- Boeraeve, F. 2018. « How Can Integrated Ecosystem Service Valuation Help Understand Agroecological Transition? » Université de Liège, Liège, Belgique. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/229855>.
- Boiffin, J. 1984. « La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies ». Institut national agronomique Paris-Grignon. [https://uclouvain-my.sharepoint.com/personal/aline_fockedey_student_uclouvain_be/Documents/M%C3%A9moire%20-%20B.%20Xavier%20&%20F.%20Aline%20\(Th%C3%A8se%20Lola%20Leveau\)/Protocole/Protocoles/Protocoles%20tous%20faits%20\(vdt,%20adventices...\)/D-min_0.pdf](https://uclouvain-my.sharepoint.com/personal/aline_fockedey_student_uclouvain_be/Documents/M%C3%A9moire%20-%20B.%20Xavier%20&%20F.%20Aline%20(Th%C3%A8se%20Lola%20Leveau)/Protocole/Protocoles/Protocoles%20tous%20faits%20(vdt,%20adventices...)/D-min_0.pdf).
- Boiffin, J., et L. M. Bresson. 1990. « Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field ». *Geoderma* 47 (3/4): 301.
- Boiffin, J., J. Guerif, et P. Stengel. 1990. « Les processus d'évolution de l'état structural du sol: quelques exemples d'études expérimentales récentes ». In *La structure du sol: conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur*, édité par J. Boiffin et A. Marin-lafèche. Colloques de l'INRA 53. Laon Cedex.

- Boiffin, J., et A. Marin-lafleche. 1990. *La structure du sol et son évolution: conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur*. Laon.
- Burkhard, B., et J. Maes. 2017. *Mapping Ecosystem Services*.
- Campbell, B. M., D. J. Beare, E. M. Bennett, J. M. Hall-Spencer, J. S. I. Ingram, F. Jaramillo, R. Ortiz, N. Ramankutty, J. A. Sayer, et D. Shindell. 2017. « Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries ». *Ecology and Society* 22 (4). <https://www.jstor.org/stable/26798991>.
- Castro, A. C., et M. R. Simón. 2016. « Effect of Tolerance to Septoria Tritici Blotch on Grain Yield, Yield Components and Grain Quality in Argentinean Wheat Cultivars ». *Crop Protection* 90 (décembre): 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.08.015>.
- Cellier, V., J.N. Aubertot, S. Cordeau, L. Fontaine, M. Froger, A. Gardarin, J.P. Guillemain, et al. 2017. « Développements méthodologiques pour une Caractérisation SIMplifiée des pressIons biotiques et des Régulations biologiques – CASIMIR ». <https://doi.org/10.15454/1.5137850846009827E12>.
- Chabert, A. 2017. « Expression combinée des services écosystémiques en systèmes de production agricole conventionnels et innovants : étude des déterminants agroécologiques de gestion du sol, des intrants et du paysage ». Phd. <https://oatao.univ-toulouse.fr/17569/>.
- Chambre d'agriculture Pays de Loire, et Chambre d'agriculture Pays de Loire. 2006. « Le désherbage mécanique des céréales à paille d'hiver ». Coordination AgroBiologique des Pays de la Loire. 2006. https://www.bassin-sarthe.org/assets/documents/pdf/Fiche_desherbage_mecanique_ble.pdf.
- Chan, K. Y. 2001. « An Overview of Some Tillage Impacts on Earthworm Population Abundance and Diversity — Implications for Functioning in Soils ». *Soil and Tillage Research* 57 (4): 179-91. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00173-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00173-2).
- Chartin, C., Q. Vincent, B. Van Wesemael, et M. Carnol. 2019. « CARBIOSOL-5_Rapport-final_mars2019.pdf ». 2019.
- Chauvel, B., H. Darmency, N. Munier-Jolain, et A. Rodriguez. 2018. *Gestion durable de la flore adventice des cultures*. Editions Quae. Versailles.
- CICES. 2021. « Structure of CICES ». 2021. <https://cices.eu/cices-structure/>.
- Cluzeau, D., M. Guernion, R. Chaussod, F. Martin-Laurent, C. Villenave, J. Cortet, N. Ruiz-Camacho, et al. 2012. « Integration of Biodiversity in Soil Quality Monitoring: Baselines for Microbial and Soil Fauna Parameters for Different Land-Use Types ». *European Journal of Soil Biology* 49 (SI): 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.003>.
- Colling, B. 2021. Conseils pour les analyses statistiques du mémoire.
- Cordeau, S., B. Chauvel, et J.-P. Guillemain. 2018. « Nuisibilité des plantes adventices: compétition pour les ressources; quantification des pertes de rendement et de qualité des récoltes ». In *Gestion durable de la flore adventice des cultures*, Editions Quae, 354. Versailles.
- Costanza, R. 2008. « Ecosystem Services: Multiple Classification Systems Are Needed ». *Biological Conservation* 141 (2): 350-52. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.12.020>.
- CRA-W. 2021. « Agromet ». Agromet. 2021. <https://agromet.be/fr/>.
- Crémer, S., A. Bernes, et E. Escarnot. 2020. « Recherches et vulgarisation », 87.
- Dale, V. H., et S. Polasky. 2007. « Measures of the Effects of Agricultural Practices on Ecosystem Services ». *Ecological Economics*, Special Section - Ecosystem Services and Agriculture, 64 (2): 286-96. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.05.009>.

- DataNovia. 2018. « Test d'Homogénéité des Variances dans R: Excellente Référence ». *Datanovia* (blog). 2018. <https://www.datanovia.com/en/fr/lessons/test-dhomogeneite-des-variances-dans-r/>.
- De Vallavieille-Pope, C., M. Belhaj Fraj, B. Mille, et J.-M. Meynard. 2007. « Association des variétés de blé pour stabiliser le rendement et la qualité de la récolte ». *Conference_item*. L'intensification écologique : du concept au terrain, quelles démarches de recherche mettre en oeuvre ? CIRAD. 2007. <https://agritrop.cirad.fr/553517/>.
- Decarrier, A. 2017. *Blé tendre : Guide de culture*. Arvalis - Institut du végétal.
- Derrouch, D., F. Dessaint, G. Fried, et B. Chauvel. 2021. « Weed Community Diversity in Conservation Agriculture: Post-Adoption Changes ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 312 (juin): 107351. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107351>.
- Derzelle, V. 1958. *Monographie de fin d'études - Ferme mixte de 40 ha appartenant à madame Derzelle de Lompret (Chimay)*. Carlsbourg.
- Descamps, C. 2021. Conseils pour la réalisation d'indicateurs de flore.
- Dessaint, F. 2018. « Nuisibilité des plantes adventices - encadré 4.4 ». In *Gestion durable de la flore adventice des cultures*, Editions Quae. Versailles.
- Dessaint, F., R. Chadoeuf, et G. Barralis. 1997. « Nine Years' Soil Seed Bank and Weed Vegetation Relationships in an Arable Field Without Weed Control ». *The Journal of Applied Ecology* 34 (1): 123. <https://doi.org/10.2307/2404853>.
- EcoBioSoil. 2021. « Protocole participatif - Paniers à Vers de Terre - EcoBioSoil ». 2021. <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/protocole-participatif-paniers-a-vers-de-terre>.
- Edwards, C. A. 2004a. *Earthworm Ecology, PART II : How Earthworms Affect Plant Growth : Burrowing into the Mechanisms*. CRC Press.
- . 2004b. *Earthworm Ecology, PART III : Earthworm Biology, Ecology, Behavior and Physiology*. CRC Press.
- . 2004c. *Earthworm Ecology, PART V : Effects of Earthworms on Soil Physical Properties and Function*. CRC Press.
- Eimberck, M. 1989. « Facteurs d'érodibilité des sols limoneux : réflexions à partir du cas du Pays de Caux », 14.
- Ernst, G., et C. Emmerling. 2009. « Impact of Five Different Tillage Systems on Soil Organic Carbon Content and the Density, Biomass, and Community Composition of Earthworms after a Ten Year Period ». *European Journal of Soil Biology* 45 (3): 247-51. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.02.002>.
- ESA. 2017. « Fiche capacité de dégradation des résidus : LEVAbag ». 2017. <https://www.groupe-esa.com/wp-content/uploads/2017/09/fiche-indicateur-levabag.pdf>.
- Evrard, O. 2008. « Muddy oods in the Belgian loess belt : Problems and solutions ». Université catholique de Louvain.
- FAO, éd. 2017. *The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Florez, J. A., A. J. Fischer, H. Ramirez, et M. C. Duque. 1999. « Predicting Rice Yield Losses Caused by Multispecies Weed Competition ». *Agronomy Journal* 91 (1): 87-92. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100010014x>.
- Fones, H., et S. Gurr. 2015. « The Impact of Septoria Tritici Blotch Disease on Wheat: An EU Perspective ». *Fungal Genetics and Biology*, Septoria tritici blotch disease of wheat:

- Tools and techniques to study the pathogen *Zymoseptoria tritici*, 79 (juin): 3-7. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2015.04.004>.
- Franco, H. H. S., R. M. L. Guimarães, C. A. Tormena, M. R. Cherubin, et H. S. Favilla. 2019. « Global Applications of the Visual Evaluation of Soil Structure Method: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Soil and Tillage Research* 190 (juillet): 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.002>.
- Gasquez, J. 2018. « Historique de la gestion de la flore adventice ». In *Gestion durable de la flore adventice des cultures*, Editions Quae. Versailles.
- Gasselin, P., et O. Clément. 2006. « Quelles variétés et semences pour des agricultures paysannes durables? Dossier de l'environnement de l'INRA n°30 ». 2006. https://www.researchgate.net/profile/Pierre-Gasselin/publication/266564866_Quelles_varietes_et_semences_pour_des_agriculture_s_paysannes_durables_Dossier_de_l'environnement_de_l'INRA_n30/links/5434ee310cf2bf1f1f27ddf4/Quelles-varietes-et-semences-pour-des-agricultures-paysannes-durables-Dossier-de-lenvironnement-de-lINRA-n30.pdf#page=101.
- Goidts, E., et B. Van Wesemael. 2007. « Regional Assessment of Soil Organic Carbon Changes under Agriculture in Southern Belgium (1955–2005) ». *Geoderma* 141 (3): 341-54. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.06.013>.
- Goidts, E., B. Van Wesemael, et K. Van Oost. 2009. « Driving Forces of Soil Organic Carbon Evolution at the Landscape and Regional Scale Using Data from a Stratified Soil Monitoring ». *Global Change Biology* 15 (12): 2981-3000. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01940.x>.
- Gouvernement wallon. 2014. « Décret relatif au Code wallon de l'Agriculture ». 2014. <https://wallex.wallonie.be/contents/acts/20/20161/24.html>.
- Gras, R. 1989. *Fait technique en agronomie*. Quae.
- Griffon, M. 2013. *Qu'est ce que l'agriculture écologiquement intensive?* Editions Quae. https://books.google.be/books?hl=fr&lr=&id=jauLbor5aTIC&oi=fnd&pg=PA3&dq=agriculture+%C3%A9cologiquement+intensive&ots=Ey2Q7zyajf&sig=Xn_o-m5rYeIVo7EK-3S-IAsLcGM#v=onepage&q=agriculture%20%C3%A9cologiquement%20intensive&f=false.
- Guillocheau, S., M. Wulschleger, K. Hoeffner, M. Gauter, Daniel Cylly, H. Hotte, E. Uranga, et D. Cluzeau. 2020. « 3_Compartment_Sol.pdf ». Université de Rennes I. 2020. https://drive.google.com/file/d/1nsY2FVnJGp4rSV1pqE7Pcu5jbR3P9J4E/view?usp=embed_facebook.
- Guimarães, R. M. L., B. C. Ball, et C. A. Tormena. 2011. « Improvements in the Visual Evaluation of Soil Structure: Visual Evaluation of Soil Structure ». *Soil Use and Management*, juin, no-no. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x>.
- Guimarães, R. M. L., T. Keller, L. J. Munkholm, et M. Lamandé. 2017. « Visual Soil Evaluation and Soil Compaction Research ». *Soil and Tillage Research*, Visual soil evaluation and soil compaction research, 173 (novembre): 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.03.011>.
- Hamza, M. A., et W. K. Anderson. 2005. « Soil Compaction in Cropping Systems: A Review of the Nature, Causes and Possible Solutions ». *Soil and Tillage Research* 82 (2): 121-45. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>.

- Hazell, P., et S. Wood. 2008. « Drivers of change in global agriculture ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363 (1491): 495-515. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2166>.
- Husson, F. 2019. *Cours d'ACP (partie 2/3 - version 2019) : interpréter les graphes d'ACP*. <https://www.youtube.com/watch?v=twuP1Na0COE>.
- Husson, F., J. Josse, S. Lê, et J. Mazet. 2008. « FactoMineR: Exploratory Multivariate Data Analysis with R ». 2008. <http://factominer.free.fr/>.
- INRA. 2017a. « Méthodes simplifiées de suivi de la flore adventice en grandes cultures ». ———. 2017b. « Suivi des adventices en grandes cultures (Réseau DEPHY EXPE) ».
- Interreg IV. 2012. « Kit sol du projet Interreg “Prosensols” ». 2012. http://www.paysdescollines.be/IMG/pdf/testkit_sols_-_prosensols.pdf.
- IUPAC. 2021. « IUPAC - dissolution (D01806) ». 2021. <https://doi.org/10.1351/goldbook.D01806>.
- Kazakou, E., F. Jacquemin, M.-L. Navas, et C. Violle. 2018. « Fonctions et services des plantes adventices dans les agroécosystèmes ». In *Gestion durable de la flore adventice des cultures*, Editions Quae, 354. Versailles.
- Koyshibayev, M., et H. Muminjanov. 2016. « Guidelines for Monitoring Diseases, Pests and Weeds in Cereal Crops », 42.
- Kozłowski, T. T. 2012. *Plant Responses and Control of Water Balance*. Elsevier.
- Laboratoire de Géopodologie – FUSAGx. 2007. « Légende de la Carte Numérique des Sols de Wallonie - version 2 ». 2007. http://metawal.wallonie.be/geonetwork/srv/api/records/38c2a87e-d38a-4359-9899-9d4a6b9f0c2a/attachments/LCNSW_V2.pdf.
- Lavorel, S., S. Plantureux, J.(coord.) Roger-Estrade, B. Schmid, S. Simon, C. Steinberg, M. Tichit, et Cécile Villenave. 2008. *Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies*. Édité par X. Le Roux, R. Barbault, J. Baudry, F. Burel, I. Doussan, E. Garnier, F. Herzog, et al. Expertises scientifique collectives. France: INRA. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010047855>.
- Le Bayon, R.-C., G. Bullinger, A. Schomburg, P. Turberg, P. Brunner, R. Schlaepfer, et C. Guenat. 2021. « Earthworms, Plants, and Soils ». In *Hydrogeology, Chemical Weathering, and Soil Formation*, 81-103. American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1002/9781119563952.ch4>.
- Le Bissonais, Y., O. Cerdan, V. Lecomte, H. Benkhadra, V. Souchère, et P. Martin. 2005. « Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion ». *CATENA* 62 (2/3): 111-24.
- Le Guédard, M., C. Villenave, O. Faure, J.-F. Nau, B. Pauget, et G. Péres. 2017. « APPOLINE : Applicabilité à l'étude des sites pollués du biomarqueur lipidique des végétaux et du bio-indicateur nématofaune. Les bio-indicateurs de l'état des sols ». ADEME. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/bio-indicateurs_010216.pdf.
- Lebacqz, T., P. V. Baret, et D. Stilmant. 2013. « Sustainability Indicators for Livestock Farming. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 33 (2): 311-27. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0121-x>.
- Legrève, A., et H. Wera. 2021. « CePiCOP Céréales 08.06.2021 ». 2021. <https://centrespilotes.be/cp/cepiscop/cereales/avertissements/218>.
- Leveau, Lola, Hugues Falys, et Pierre Bertin. 2019a. « Collaborative design of a sustainability diagnosis based on simple in-field measurements for Walloon field crop systems ». In . <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:231304>.

- . 2019b. « How to value the ecosystem services provided by a field? Parallel between the indicators used by scientists and the empirical observations of Belgian farmers ». In *Proceedings*, 80:82. <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:231293>.
- Lichtfouse, E., M. Navarrete, P. Debaeke, V. Souchère, C. Alberola, et J. Ménassieu. 2009. « Agronomy for Sustainable Agriculture: A Review ». In *Sustainable Agriculture*, édité par E. Lichtfouse, M. Navarrete, P. Debaeke, S. Véronique, et C. Alberola, 1-7. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_1.
- Livre Blanc Céréales. 2017. « Septoriose – Livre Blanc Céréales ». 2017. <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/septoriose/>.
- Lonchamp, J.-P., et G. Barralis. 1988. « Caractéristiques et dynamique des mauvaises herbes en région de grande culture : le Noyonnais (Oise) ». *Agronomie* 8 (9): 757-66.
- Malice, E. 2021. « Evaluation des adventices avec le protocole Casimir. », 2021.
- Mamarot, J., et A. Rodriguez. 2014. *Mauvaises herbes des cultures*. Acta.
- Masson, E. 2012. *Diagnostic des accidents du blé tendre*. Arvalis - Institut du végétal.
- Mathieu, C., et J. Lozet. 2011. *Dictionnaire encyclopédique de sciences du sol*. Lavoisier.
- Matschullat, J., C. Reimann, M. Birke, D. dos Santos Carvalho, S. Albanese, M. Anderson, R. Baritz, et al. 2018. « GEMAS: CNS Concentrations and C/N Ratios in European Agricultural Soil ». *Science of The Total Environment* 627 (juin): 975-84. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.214>.
- Monnier, G., J. Boiffin, et F. Papy. 1986. « Réflexions sur l'érosion hysrique en condition climatique et topographique modérées: cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest ». *Spécial Erosion* 22 (2): 123-31.
- Nuutinen, V., et K. R. Butt. 2003. « Interaction of Lumbricus Terrestris L. Burrows with Field Subdrains: The 7th International Symposium on Earthworm Ecology · Cardiff · Wales · 2002 ». *Pedobiologia* 47 (5): 578-81. <https://doi.org/10.1078/0031-4056-00232>.
- OPVT. 2021. « Participer - Collaborer - EcoBioSoil ». 2021. <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/participer-collaborer>.
- Patzel, N., H. Sticher, et D. Karlen. 2000. « Soil Fertility — Phenomenon and Concept ». *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163 (avril): 129-42. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-2624\(200004\)163:2<129::AID-JPLN129>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-2624(200004)163:2<129::AID-JPLN129>3.0.CO;2-D).
- Polla, Michaël. 2016. *VESS*. TypeScript. <https://github.com/MichaelPolla/VESS>.
- Pribyl, D. W. 2010. « A Critical Review of the Conventional SOC to SOM Conversion Factor ». *Geoderma* 156 (3): 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>.
- Ranjard, L. 2016. « AgrInnov Tester les Indicateurs de l'état biologique des sols en lien avec les pratiques agricoles ». https://www.ofsv.org/images/documentations/rapport_agrinov_final_8_juin_2016.pdf.
- Razzaghi, F., E. Arthur, et A. A. Moosavi. 2021. « Evaluating Models to Estimate Cation Exchange Capacity of Calcareous Soils ». *Geoderma* 400 (octobre): 115221. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115221>.
- Richard, G., et J. Boiffin. 1990. « Effet de l'état structural du lit de semences sur la germination et la levée des cultures ». In *La structure du sol et son évolution: conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur*, édité par J. Boiffin et A. Marin-laflèche, INRA, 216. Les colloques de l'INRA 53. Laon Cedex.

- Roger-Estrade, J., H. Boizard, et G. Richard. 2013. « Maîtrise de la structure des sols cultivés: tassement et travail du sol, avec et sans labour ». In *Les sols et leurs structures: observations à différentes échelles*, Quae. Versailles: Quae.
- Rosillon, D. 2020. « Réseau Pameseb et Agromet », 2020.
- Shaxson, T. F. 2006. « Re-Thinking the Conservation of Carbon, Water and Soil: A Different Perspective ». *Agronomy for Sustainable Development* 26 (1): 9-19. <https://doi.org/10.1051/agro:2005054>.
- Shipitalo, M. J., et K. R. Butt. 1999. « Occupancy and geometrical properties of *Lumbricus terrestris* L. burrows affecting infiltration », *Pedobiologia*, . https://www.researchgate.net/profile/Kevin-Butt-2/publication/279938035_Occupancy_and_geometrical_properties_of_Lumbricus_terrestris_L_burrows_affecting_infiltration/links/5a5cd8dcaca272d4a3dd81e6/Occupancy-and-geometrical-properties-of-Lumbricus-terrestris-L-burrows-affecting-infiltration.pdf.
- Simon, G.-A. 2012. « History of Food Security ». *FAO*, University of Roma Tre, , 28.
- Singh, B., et Z. Rengel. 2007. « The Role of Crop Residues in Improving Soil Fertility ». In *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems*, édité par P. Marschner et Z. Rengel, 183-214. Soil Biology. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68027-7_7.
- SMCS. 2021. « Analyse multivariées exploratoires en R ».
- . s. d. « SMCS - Plateforme technologique de Support en Méthodologie et Calcul Statistique ». Consulté le 13 juin 2021. <https://sites.uclouvain.be/training/smcs/view-catalogue.php?id=22&l=fr>.
- Smith, P., et P. J. Gregory. 2013. « Climate Change and Sustainable Food Production ». *Proceedings of the Nutrition Society* 72 (1): 21-28. <https://doi.org/10.1017/S0029665112002832>.
- Streit, B., S. B. Rieger, P. Stamp, et W. Richner. 2003. « Weed Populations in Winter Wheat as Affected by Crop Sequence, Intensity of Tillage and Time of Herbicide Application in a Cool and Humid Climate: Weed Populations in Different Tillage Systems ». *Weed Research* 43 (1): 20-32. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00310.x>.
- Syngenta. 2021. « Comprendre et calculer l'Indicateur de Fréquence de Traitement ». Syngenta France. 10 mars 2021. <https://www.syngenta.fr/agriculture-durable/protéger-eau-et-air/article/comprendre-et-calculer-ift>.
- Taugourdeau, S., S. Messad, F. Louault, A. Michelot-Antalik, M. Vigneron, L. Poisse, L. Yentur, et al. 2020. « Pasture ecosystem services indicators: an expert based set of indicators of ecosystem services ». In .
- Teatime4Science. 2016a. « Background & Relevance – Teatime4Science ». 2016. <http://www.teatime4science.org/about/background-relevance/>.
- . 2016b. « The Project – Teatime4Science ». Teatime4Science. 2016. <http://www.teatime4science.org/about/the-project/>.
- Tibi, A., et O. Therond. 2018. « Services écosystémiques fournis par les espaces agricoles - Évaluer et caractériser - Anaïs Tibi, Olivier Therond (EAN13 : 9782759229178) | Quae-Open: Des livres scientifiques en libre accès ». Quae Open Access. 2018. <https://www.quae-open.com/produit/105/9782759229178/services-ecosystemiques-fournis-par-les-espaces-agricoles>.
- Tilman, D. 1998. « The Greening of the Green Revolution ». *Nature* 396 (6708): 211-12. <https://doi.org/10.1038/24254>.

- Tow, P., I. Cooper, I. Partridge, et C. Birch, éd. 2011. *Rainfed Farming Systems*. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9132-2>.
- TRANSAE. 2021. « Webinar d'expérimentations de sol transfrontalier (INTERREG Flandre - Wallonie - France) ».
- Turkelboom, F., P. Raquez, M. Dufrière, L. Raes, I. Simoens, S. Jacobs, M. Stevens, et al. 2013. « Chapter 18 - CICES Going Local: Ecosystem Services Classification Adapted for a Highly Populated Country ». In *Ecosystem Services*, édité par S. Jacobs, N. Dendoncker, et H. Keune, 223-47. Boston: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-419964-4.00018-4>.
- UCDavis. s. d. « Exchangeable Cations and Anions ». Consulté le 16 juin 2021. <https://lawr.ucdavis.edu/classes/ssc219/biogeo/exchca.htm>.
- Université de Lyon. 2012. « Didacticiel - Etudes de cas - PCA ». 2012. http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/tanagra/fichiers/fr_Tanagra_Nb_Components_PCA.pdf.
- Valentin, C., et L. M. Bresson. 1997. « Soil crusting ».
- . 1998. « Soil Crusting ». In *Methods for Assessment of Soil Degradation*, édité par R. Lal. Advances in Soil Science. Boca Raton, Fla: CRC Press.
- Van Wesemael, B., C. R. Suzanna Lettens, et J. Van Orshoven. 2011. « Modelling the Evolution of Regional Carbon Stocks in Belgian Cropland Soils ». *Canadian Journal of Soil Science*, mars. <https://doi.org/10.4141/S04-085>.
- Vidal, T., C. Gigot, M. B. Fraj, M. Leconte, L. Huber, S. Saint-Jean, et C. Vallavieille-Pope. 2014. « Associer des variétés pour maîtriser les maladies et stabiliser la production ». *Agronomie, Environnement & Sociétés* 4 (2): 103.
- White, R. E. 2006. *Principles and Practice of Soil Science: The Soil as a Natural Resource*. Fourth edition. Blackwell Publishing.

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

Présenté par Aline Fockeday et Xavier Belin

Ce mémoire explore les liens existants entre les pratiques culturales (PC) et les services écosystémiques (SE) sur un échantillon de 20 parcelles dans la région limoneuse et sablo-limoneuse de Wallonie. Il a été réalisé dans le cadre de la première année de relevés de la thèse de L. Leveau. Cette recherche offre une nouvelle perspective d'évaluation de la durabilité des systèmes de production. En effet, la plupart des études sur ce sujet mesurent l'impact d'une PC spécifique (ex. : le labour) sur l'agroécosystème, toutes choses restant égales par ailleurs. L'approche utilisée dans ce mémoire vise à analyser simultanément l'effet, sur les SE intrants, d'une grande diversité de PC issues de différents systèmes de culture. Pour cela, l'historique cultural de chaque parcelle a été récolté sur dix ans et mis en lien avec les SE mesurés sur froment ou épeautre en 2020-2021. Cette méthodologie possède le potentiel de formuler des relations de corrélations pouvant être constatées dans des systèmes très différents et dans des conditions réelles.

Les SE étudiés concernent le sol et les ennemis de la culture. Les principaux résultats ressortant des analyses multivariées réalisées sur cet échantillon sont les suivants : un travail fréquent et profond du sol s'accompagne généralement d'une utilisation élevée de produits phytosanitaires, mais pas systématiquement d'apports en engrais élevés. L'on constate que ces systèmes intenses en travail du sol cultivent un moins grand nombre de variétés et d'espèces récoltées en association, et leurs rotations comprennent plus rarement des prairies temporaires. Un travail du sol plus intense, en particulier de labour, correspond à une plus faible teneur en matière organique et activité des vers de terre. Cela concorde également avec une faible stabilité des agrégats, induisant une vitesse de formation de la croûte de battance plus élevée. Si les champs peuvent être distingués selon leurs apports en azote, phosphore et potassium, qui sont généralement liés, cela ne semble pas influencer la fourniture en SE. Enfin, un résultat surprenant à noter est que, sur cet échantillon, les PC ne semblent pas affecter la compaction du sol. Par ailleurs, ce phénomène entretient très peu de liens avec les autres SE mesurés.

Certains termes utilisés par les agriculteurs du réseau pour décrire leurs pratiques sont également liés à certains PC mis en places sur le terrain. L'on retrouve principalement une opposition entre les agriculteurs dits « conventionnels », avec un travail du sol important, et ceux pratiquant l'agriculture « de conservation », avec un travail du sol réduit.

Finalement, une grande part de ce travail a consisté à mettre au point des protocoles intéressants pour les agriculteurs et nécessitant peu de matériel et de temps. Des pistes d'amélioration de ceux-ci sont donc proposées pour les prochaines années.