

**Faculté des Sciences**

Ecole de Géographie

**Variabilité spatiale et systémique de l'implantation  
de cultures intermédiaires et du retour de carbone  
y étant associé dans des sols cultivés en Wallonie**

Auteur : **Robin Bodart**

Promoteur : **Bas van Wesemael**

Lecteur : **Eric Lambin**

**Kristof Van Oost**

Année académique 2021-2022

**Master [120] en sciences géographiques, orientation générale**

## I. REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'aimerais exprimer mes remerciements à mon promoteur Bas van Wesemael, qui a su me proposer un sujet de mémoire passionnant. Ce sujet, qui m'était alors inconnu, a été exploré avec grand intérêt au regard des problématiques climatiques actuelles touchant à son expertise. Son esprit critique et sa soif de connaissances ont permis d'explorer le sujet en détail et d'en faire un travail approfondi.

J'aimerais également remercier la doctorante Klara Dvorakova pour sa grande implication dans ce mémoire. Son aide a été précieuse dans la partie méthodologique et lors de l'utilisation de certains logiciels complexes. Son regard extérieur a été bénéfique lors de la concrétisation et la mise en texte de l'ensemble du travail.

Enfin, je voudrais remercier ma famille et mes amis qui m'ont soutenu tout au long du processus. Un merci particulier à mes parents qui ont passé du temps à la relecture orthographique. Merci également à Antoine Duchesne pour son soutien psychologique et ses conseils précieux.

## II. ABSTRACT

Les terres arables apparaissent comme des alliées majeures dans la lutte contre les changements climatiques. Le transfert du CO<sub>2</sub> atmosphérique vers le réservoir que constitue le sol peut se faire via la mise en place de pratiques agricoles *stockantes*. Les cultures intermédiaires peuvent contribuer à près de 35% du stockage de carbone induit par l'ensemble de ces pratiques. Ce mémoire a pour but de mettre en évidence les différentes pratiques concernant les cultures intermédiaires, ainsi que leurs restitutions potentielles de carbone dans le sol. Deux systèmes (conventionnel et conservation des sols) et deux régions agricoles (Plateau Limoneux et Condroz) sont comparés. Une base de données de 40 parcelles agricoles wallonnes est constituée à cet effet.

Pour mener à bien cette étude, réalisée sur une période de 5 ans, 6 indicateurs ont été créés: le nombre de cultures intermédiaires implantées, la durée moyenne de l'implantation des cultures intermédiaires, le nombre de cultures principales différentes implantées, le nombre d'hivers couverts par de la végétation, la restitution potentielle du carbone dans le sol et l'estimation moyenne du SOC. Pour déterminer les valeurs des indicateurs, l'étude s'appuie sur l'imagerie satellitaire de Sentinel-2, Landsat7 et Landsat8 pour une période s'étalant entre novembre 2015 et novembre 2021. Les différences sont ensuite analysées statistiquement via ANOVA de 1<sup>er</sup> ordre.

Les résultats montrent que les indicateurs les plus significatifs sont l'estimation du SOC moyen, le nombre de cultures principales différentes implantées ainsi que la durée moyenne d'implantation des cultures intermédiaires. Le SOC moyen apparaît comme largement supérieur dans la région du Condroz par rapport au Plateau Limoneux (14.4 gC.kg<sup>-1</sup>, sd : 2.3 et 12.1 gC.kg<sup>-1</sup>, sd: 2.4,  $P \leq 0.01$ ). Le nombre d'implantation de cultures principales fait apparaître une différence ( $P \leq 0.05$ ) en faveur de l'agriculture de conservation des sols (4 cultures, sd: 0.6) par rapport à l'agriculture conventionnelle (3.3 cultures, sd: 1.0). La différence va également dans le même sens lors de l'étude de la durée moyenne d'implantation des cultures intermédiaires avec une implantation supérieure ( $P \leq 0.05$ ) dans le système de conservation (5.5 mois, sd: 1.4) par rapport au système conventionnel (4.4 mois, sd: 1.5). L'indicateur sur la restitution potentielle de carbone dans le sol s'avère nettement moins significatif. Les résultats montrent l'importance du passé cultural par rapport aux méthodes de gestions agricoles mises en place en faveur de la séquestration du carbone dans les sols.

### III. TABLE DES MATIERES

I. REMERCIEMENTS .....	2
II. ABSTRACT .....	3
III. TABLE DES MATIERES .....	4
1. INTRODUCTION.....	7
2. REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	9
2.1. Les changements climatiques et la problématique du carbone.....	9
2.2. Le sol comme réservoir de carbone.....	9
2.3. Séquestration de carbone : La végétation comme interface entre le sol et l’atmosphère .....	11
2.4. Les pratiques agricoles classiques en regard du réservoir de carbone du sol.....	13
2.5. Carbon Farming : Un souhait européen pour augmenter le stockage de carbone dans le sol	14
2.6. Les pratiques favorisant le stockage de carbone dans le sol.....	16
2.6.1. Types de pratiques <i>stockantes</i> .....	16
2.6.1.1. Travail du sol.....	16
2.6.1.2. Enfouissement des résidus de culture .....	17
2.6.1.3. Diversité des rotations de cultures : espèce végétale et production racinaire.....	17
2.6.1.4. Apports externes de carbone .....	18
2.6.1.5. Autres (fertilisants minéraux, chaux, etc).....	18
2.6.1.6. Cultures intermédiaires.....	18
2.6.2. Agriculture de conservation .....	18
2.7. Les cultures intermédiaires, une des solutions étudiées .....	19
2.8. Les études existantes sur la gestion des cultures intermédiaires (modélisation, imagerie satellite,...).....	21
2.9. Objectifs et apport du mémoire sur les cultures intermédiaires .....	22
2.10. Définition : Système agricole .....	23
2.10.1. Agriculture de Conservation.....	23
2.10.2. Agriculture Biologique.....	24
2.10.3. Agriculture Conventionnelle .....	24
2.11. Définition : Région agricole .....	24
2.11.1. Région du Condroz.....	25
2.11.2. Région/Plateau Limoneux .....	25
2.11.2.1. La Hesbaye et le Plateau Limoneux Brabançon .....	26
2.11.2.2. Le Plateau Limoneux Hennuyer .....	26
3. MATERIELS ET METHODES .....	27
3.1. Base de données .....	27
3.2. Données de télédétection.....	29

3.2.1.	Missions satellitaires .....	29
3.2.2.	Indice de végétation : NDVI.....	30
3.2.3.	Balises culturelles .....	30
3.2.4.	Balises chronologiques.....	31
3.3.	Indicateurs .....	32
3.3.1.	Sur base des graphiques NDVI uniquement.....	32
3.3.1.1.	Nombre de cultures intermédiaires implantées.....	32
3.3.1.2.	Durée moyenne de l'implantation de la culture intermédiaire .....	33
3.3.1.3.	Nombre de cultures principales implantées.....	33
3.3.1.4.	Nombre d'hivers couverts par une culture (tous types).....	33
3.3.2.	Sur base des graphiques NDVI et des données annexes .....	33
3.3.2.1.	Restitution potentielle du carbone dans le sol .....	33
3.3.3.	Indépendamment des graphiques NDVI.....	34
3.3.3.1.	Estimation de la teneur moyenne en carbone du sol.....	34
3.4.	Analyses statistiques.....	34
4.	RESULTATS .....	36
4.1.	Statistique descriptive et analyse des graphiques NDVI.....	36
4.1.1.	Parcelle agricole en monoculture .....	36
4.1.2.	Parcelle agricole sans culture intermédiaire .....	37
4.1.3.	Parcelle agricole avec implantation de cultures intermédiaires.....	38
4.2.	Analyse statistique ANOVA I.....	39
4.2.1.	Nombre de cultures intermédiaires implantées .....	40
4.2.2.	Durée moyenne de l'implantation de la culture intermédiaire .....	40
4.2.3.	Nombre de culture principales implantées .....	40
4.2.4.	Nombre d'hivers couverts par une culture (tous types).....	41
4.2.5.	Restitution potentielle du carbone dans le sol .....	41
4.2.6.	Estimation de la teneur moyenne en carbone du sol .....	41
5.	DISCUSSION .....	43
5.1.	Premier pilier de l'agriculture de conservation : réduction massive du travail du sol.....	43
5.2.	Les indicateurs caractéristiques du stockage de carbone du sol .....	44
5.3.	Nombre d'hivers couverts par une culture (tous types).....	45
5.4.	Complexité des rotations agricoles.....	48
5.5.	Nombre de cultures intermédiaires implantées .....	49
5.6.	Durée d'implantation de la culture intermédiaire.....	50
5.7.	Restitution potentielle du carbone dans le sol .....	52
5.8.	Estimation de la teneur moyenne en carbone du sol .....	53

6. CONCLUSION .....	54
IV. BIBLIOGRAPHIE .....	56

## 1. INTRODUCTION

La problématique des changements climatiques et des émissions de gaz à effet de serre nécessite une approche globale et interdisciplinaire. Les objectifs communément fixés lors de la Conférence de Paris sur le climat (COP-21), pour un maintien du réchauffement sous le seuil de 2°C, nécessitent d'atteindre un équilibre au niveau des gaz à effet de serre aux alentours de 450 parts par million de CO<sub>2</sub> équivalent (Paustian et al., 2016). Déjà en 1992, dans le protocole de Kyoto, les émissions négatives semblaient apparaître comme des solutions efficaces de lutte contre ces changements (UNFCCC, 1997). Les émissions négatives représentent un transfert du carbone atmosphérique vers les grands réservoirs de carbone terrestres. Parmi ceux-ci, le sol, constitué de 2344 Gt de carbone, semble pouvoir répondre à cette demande (Stockmann et al., 2013).

Un des premiers secteurs influant sur la qualité des sols, et donc des stocks de carbone, est l'agriculture (Tal, 2018). Après la COP-21, des initiatives comme l'initiative européenne « 4 pour 1000 » (Initiative « 4 pour 1000 », 2018) ont vu le jour. Cette dernière vise à compenser les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> en augmentant le stockage des sols mondiaux de l'ordre de 4 millièmes par an. Elle se penche principalement sur les modes de pratiques agricoles et sylvicoles, avec dans certains cas, des modifications profondes dans leur gestion respective (Chenu et al., 2019). Le secteur agricole joue un double rôle dans la lutte contre les changements climatiques. Il est garant de l'équilibre climatique et il assure la sécurité alimentaire dans un contexte où toutes les pénuries engendrées par ces changements sont possibles (Chenu et al., 2019 ; COWI, 2021).

Les différentes pratiques de gestion des sols nécessitent des études importantes pour comprendre leurs mécanismes, tant à large échelle qu'à l'échelle de la ferme ou de la parcelle (Paustian et al., 2016). Les techniques agricoles permettant de favoriser les stocks de carbone dans les sols sont diverses et variées. La limitation du travail du sol, l'enfouissement des résidus de cultures, la diversité des rotations agricoles, les apports externes tels que le fumier ou le biochar, sont des techniques reconnues comme favorables au transfert du carbone atmosphérique vers le réservoir terrestre (Arrouays et al., 2002 ; Bolinder et al., 2020 ; Chenu et al., 2019 ; Pellerin et al., 2019). L'implantation de cultures intermédiaires fait partie de ces techniques. Ces cultures permettent une couverture plus importante du sol durant les périodes de moindre activité agricole. Elles rendent une multitude d'autres services comme la limitation de l'érosion, la fixation de l'azote du sol, le développement de la biodiversité et de la vie du sol (Destain et al., 2010 ; Poeplau et Don, 2015 ; Seitz et al., 2022). Dans ce mémoire, la mise en place de cultures intermédiaires est étudiée afin d'en évaluer les effets sur les restitutions potentielles de carbone dans deux systèmes agricoles wallons.

Les pratiques « stockantes » sont mises en avant au travers d'un système de production agricole, à savoir, l'agriculture de conservation des sols (Chenu et al., 2019). Ce système sera comparé avec le système conventionnel, plus fréquent en Wallonie (Tal, 2018). Les stocks de carbone du sol sont fortement influencés par les conditions environnementales dans lesquelles ils se trouvent. La pédologie et le climat sont des facteurs influençant l'évolution des stocks (Chenu et al., 2019 ; Pellerin et al., 2020). C'est pourquoi, en regard des systèmes de production, une distinction géographique régionale est également réalisée. La région du Condroz sera comparée à la région du Plateau Limoneux.

Une combinaison de plusieurs techniques d'analyse sera effectuée afin d'étudier les cultures intermédiaires sur des parcelles cultivées en Wallonie. Parmi ces techniques, l'imagerie satellitaire et des équations allométriques de restitution de carbone seront exploitées. La suite de ce mémoire présentera une revue de la littérature détaillée afin de permettre une bonne compréhension du rôle des cultures intermédiaires dans la mitigation des changements climatiques. C'est dans ce contexte que les résultats de l'étude seront discutés et mis en perspective.

## 2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

### 2.1. Les changements climatiques et la problématique du carbone

Les effets des changements climatiques, qui ne sont plus à discuter, sont liés à la présence de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Arrouays et al., 2002). L'ensemble des émissions anthropiques de ces gaz correspond à un apport annuel de 8.7 Gt de carbone dans l'atmosphère. Pourtant, l'augmentation mesurée varie aux alentours de 3.8 Gt par an, ce qui montre qu'une partie de ce carbone est séquestré ailleurs que dans l'atmosphère (Stockmann et al., 2013). Suite à la Convention sur le Climat de 1992, le protocole de Kyoto (UNFCCC, 1997) a été établi afin de surveiller l'état de l'atmosphère mais également trouver des solutions durables pour la réduction des émissions de gaz contribuant aux dérèglements climatiques (Bolinder et al., 2020). Parmi les solutions de lutte, les émissions négatives ont été mises en avant. Il est recommandé de favoriser le stockage de carbone dans des réservoirs terrestres tels que les forêts ou les sols, par exemple (Arrouays et al., 2002).

L'agriculture ainsi que les changements d'utilisation des sols (directement lié à l'agriculture ou non) sont souvent pointés du doigt comme étant les causes principales d'émissions. Ils y contribuent à hauteur de 12% (Agriculture) et 25% (changements d'utilisation des sols)(Paustian et al., 2016). Les autres causes sont principalement les changements de couverture du sol, provenant de la déforestation (entre 12 et 17%), par exemple (Paustian et al., 2016). En plus de contribuer aux changements climatiques, le secteur agricole est directement impacté, car il dépend des conditions météorologiques pour son fonctionnement. Les rendements de production sont influencés positivement, ou négativement, par les sécheresses, les pluies intenses ou encore les vents violents émanant des changements climatiques (Arrouays et al., 2002 ; Singh et Singh, 2017).

### 2.2. Le sol comme réservoir de carbone

Dans le protocole de Kyoto de 1992, les réservoirs de carbone sont mis en avant comme étant une des solutions à la réduction des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et surtout du CO<sub>2</sub> (UNFCCC, 1997). Les réservoirs, ou puits, de carbone sont modelés par l'homme et concernent les différentes utilisations des terres, les changements d'occupations du sol ainsi que les espaces forestiers. Dans ce cas, les *LULUCF* (Land Use, Land Use Change and Forestry) sont définis lorsque ces espaces de stockages sont abordés (Arrouays et al., 2002).

Parmi ces puits de carbone, les sols peuvent jouer un rôle important dans la gestion des flux de gaz à effet de serre. Le réservoir que constitue le sol est de l'ordre de 2344 Gt de carbone (GtC)(Stockmann et al., 2013). Seul le réservoir océanique le surpasse avec un stockage aux alentours de 38 400 GtC (Stockmann et al., 2013). Par ailleurs, le sol surpasse de 3x le réservoir atmosphérique (830 GtC) et de plus de 4x la biomasse terrestre (560 GtC)(Paustian et al., 2016). Le sol en tant que réservoir n'est pas homogène. En effet, celui-ci est stratifié et les valeurs de carbone du sol sont décroissantes avec la profondeur. 1500 GtC, ou 54% de l'ensemble du carbone terrestre, se trouvent dans le premier mètre de sol, dont 615 GtC (22%) dans les 20 premiers centimètres (Stockmann et al., 2013). La grande différence entre les réservoirs atmosphérique et terrestre permet de conclure qu'une modification de l'ordre de quelques

pourcents du stockage terrestre permettrait une compensation de certains effets des émissions de gaz à effet de serre atmosphérique (Paustian et al., 2016 ; Stockmann et al., 2013).

Le sol joue ainsi un rôle clé pour l'ensemble de la planète. Mais un réservoir planétaire présente des entrées et des sorties modélisées par des flux dynamiques. C'est pourquoi la distinction entre *séquestration* et *stockage* de carbone est définie.

La *séquestration de carbone* est le processus de transfert du CO<sub>2</sub> atmosphérique vers le réservoir que constitue le sol. Ce transfert se fait via les plantes, les résidus carbonés ou toutes autres formes de matériaux constitués de carbone (Chenu et al., 2019). Il est question de séquestration lorsque les temps de résidence de carbone dépassent plusieurs décennies (20 ans dans le rapport IPCC (IPCC, 2014))(Pellerin et al, 2020).

Le *stockage de carbone* est l'augmentation de carbone organique d'une surface de sol durant une période donnée. Le stockage n'est pas directement lié à une diminution nette du CO<sub>2</sub> atmosphérique en faveur du sol (Chenu et al., 2019). Le déstockage ou le stockage négatif, est l'effet inverse, c'est-à-dire, la diminution de ce stock (Pellerin et al, 2020).

Le carbone stocké dans le sol est le plus souvent de nature organique. C'est-à-dire qu'il provient directement de matériaux organiques vivants, largement constitués de carbone (Stockmann et al., 2013). Ces éléments sont à différencier du carbone inorganique présent dans le sol. Ce dernier provient principalement des roches sous-jacentes au sol. En temps normal, il n'influence pas les dynamiques des stocks de carbone organique. Mais, en agriculture, le composé inorganique est souvent utilisé sous forme de chaux (oxyde de calcium, CaO) pour réguler le pH des sols (Pellerin et al, 2020). Dans ce cas précis, les dynamiques des matières organiques peuvent être modifiées mais à une échelle trop faible que pour influencer l'ensemble du cycle du CO<sub>2</sub> atmosphérique (Pellerin et al, 2020).

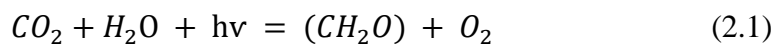
Lorsque les stocks de carbone sont évalués dans un contexte d'atténuation des changements climatiques, seul le carbone organique est considéré. La concentration de carbone organique ou *SOC* (Soil Organic Content) désigne la teneur massique en carbone contenue dans le sol. Elle s'exprime en gramme de carbone par kilo de sol sec étudié (gC.kg<sup>-1</sup>)(Pellerin et al, 2020). Grâce au SOC, il est possible de déterminer le stock de carbone pour une unité de surface étudiée. Ce stock est exprimé en tonne de carbone par hectare (tC.ha<sup>-1</sup>)(Pellerin et al, 2020).

Parmi les initiatives de lutte contre les changements climatiques et la sécurité alimentaire, l'initiative 4 pour 1000 (Initiative « 4 pour 1000 », 2018) a vu le jour après la Conférence de Paris sur le climat (COP-21). Afin de compenser les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>, cette initiative propose d'augmenter le stockage des sols mondiaux de l'ordre de 4 millièmes par an. Elle se penche principalement sur les modes de pratiques agricoles et sylvicoles, avec dans certains cas, des modifications profondes dans leurs gestions respectives (Chenu et al., 2019). L'optimisation de la séquestration dans le sol est relativement peu coûteuse et peut être mise en place à grande échelle, ce qui représente des avantages certains (Paustian et al., 2016). Elle pourrait compenser les émissions anthropiques de l'ordre de 5 à 15% (0.4 à 1.2 GtC.an<sup>-1</sup>)(Stockmann et al., 2013). Par ailleurs, il n'est pas toujours possible d'augmenter les stocks de carbone dans tous les sols. Certains types de sols sont plus propices que d'autres pour remplir ces fonctions. Dans l'initiative 4 pour 1000, il est précisé que les sols où le potentiel de stockage est grand, doivent être préférés (Initiative « 4 pour 1000 », 2018). Grand signifie que le stock actuel du sol est bien en dessous des estimations qu'il pourrait atteindre. Ces mêmes

sols ont des capacités de stockage plus rapides que les autres. Les différentes compositions du sol et la pédologie influencent également les capacités de stockage (Chenu et al., 2019).

### 2.3. Séquestration de carbone : La végétation comme interface entre le sol et l'atmosphère

Dans ce travail, l'attention est portée sur le réservoir de carbone du sol. Il est donc important d'en comprendre les mécanismes afin de l'utiliser à bon escient dans la lutte contre les changements climatiques. L'enrichissement en carbone du réservoir terrestre se fait notamment à l'interface entre l'atmosphère et le sol via le rôle prépondérant de la végétation. Le processus clé de ces échanges gazeux est la *photosynthèse* ou *GPP* (Gross Primary Production)(Fig. 2.1)(Moureaux, 2008). Tous les organismes autotrophes (végétaux) transforment ainsi la matière inorganique en matériaux organiques via un flux de  $CO_2$  atmosphérique en direction du sol sur lequel ils sont implantés. Les végétaux utilisent le  $CO_2$ , l'eau et l'énergie lumineuse afin de créer des glucides, nécessaires à leur développement et leur croissance (Moureaux, 2008). La photosynthèse peut être modélisée via l'équation suivante (Eq. 2.1) :



Où  $CO_2$  est le dioxyde de carbone,  $H_2O$  est l'eau,  $hv$  représente l'apport d'énergie lumineuse,  $(CH_2O)$  est le glucide créé pour le développement végétal et  $O_2$  est l'oxygène produit durant le processus.

La production de biomasse végétale est permise grâce à la fixation du carbone atmosphérique. Mais une partie de ce dernier est perdu et retourne directement dans l'atmosphère. Ce processus est provoqué par la *respiration*. Elle représente un flux inverse de  $CO_2$ , allant des tissus végétaux vers l'atmosphère. Elle est utile pour le maintien et la création de nouveaux tissus végétaux (Amthor, 2000). La respiration végétale a lieu dans la partie aérienne de la plante (*Raa*) mais également sous-terrainne (*Rab*), dans les racines (Fig. 2.1). La production primaire ou *NPP* (Net Primary Production) est la quantification du carbone fixé par la plante afin de produire de la biomasse (Moureaux, 2008). Elle se calcule via la différence entre les gains (photosynthèse) et les pertes (respiration) de carbone (Eq. 2.2) :

$$NPP = GPP - Ra \quad (2.2)$$

Où *NPP* est la production primaire, *GPP* est le gain photosynthétique et *Ra* est la perte par respiration végétale.

Un dernier phénomène est également à prendre en compte car il implique un transfert de  $CO_2$  supplémentaire vers l'atmosphère. Il s'agit de la *respiration hétérotrophe* ayant lieu à la surface et dans le sol lors de la décomposition de la matière organique (Fig. 2.1) (Moureaux, 2008). Les facteurs limitants de cette décomposition sont l'eau, la disponibilité de matériaux facilement décomposables ainsi que la température (Moureaux, 2008). Grâce à la prise en compte de ces trois phénomènes influençant les flux de  $CO_2$  à l'interface atmosphère/sol, il est possible d'estimer le flux net de  $CO_2$  ou *NEE* (Net Ecosystem Exchange). Celui-ci étant une addition

des différents phénomènes apportant des composantes positives (photosynthèse) et négatives (respirations végétale et hétérotrophe) (Eq. 2.3) :

$$NEE = GPP - Ra - Rh \quad (2.3)$$

Où  $NEE$  est le flux net de  $CO_2$ ,  $GPP$  est le gain photosynthétique,  $Rv$  est la perte par respiration végétale et  $Rh$  est la perte par respiration hétérotrophe au niveau du sol.

L'équation synthétique du flux de  $CO_2$  regroupe les deux processus de respiration pour former une composante négative au système,  $TER$  (Total Ecosystem Respiration)(Eq. 2.4) :

$$NEE = GPP - TER \quad (2.4)$$

Où  $NEE$  est le flux net de  $CO_2$ ,  $GPP$  est le gain photosynthétique,  $TER$  est la perte par respiration totale (Moureaux, 2008).

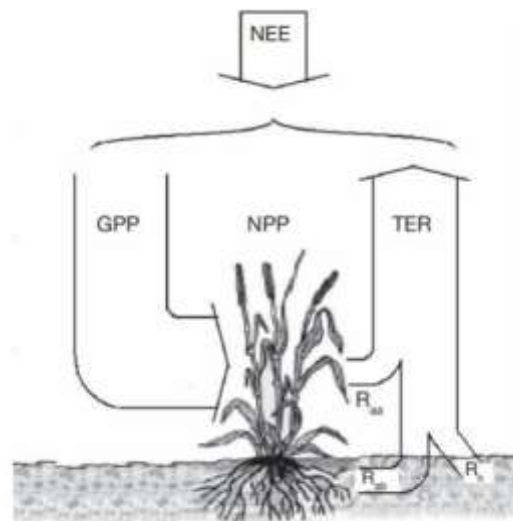


Fig. 2.1. Illustration du flux de  $CO_2$  entre le sol et l'atmosphère.  $NEE$  = Net Ecosystem Exchange,  $GPP$  = Gross Primary Production,  $NPP$  = Net Primary Production,  $TER$  = Total Ecosystem Respiration,  $R_{aa}$  = Respiration aérienne autotrophe,  $R_{ab}$  = Respiration autotrophe racinaire,  $R_h$  = Respiration hétérotrophe du sol (Moureaux, 2008).

Deux pratiques peuvent mener à une diminution nette du  $CO_2$  atmosphérique. Premièrement, l'augmentation de la matière organique contenue dans les sols (humification) et, deuxièmement, la réduction du taux de décomposition de cette dernière, via la diminution de la perturbation de la vie du sol (Paustian et al., 2016). Les sols forestiers et de prairies contiennent plus de SOC que les terres arables de cultures. En effet, la biomasse souterraine y est plus riche et moins perturbée, ce qui permet un apport plus conséquent de carbone au sol. Les changements d'occupations du sol, allant de terres cultivées vers des sols de prairies, ou encore vers des forêts, permettent une augmentation directe du stock de SOC (Stockmann et al., 2013). Par ailleurs, il n'est pas possible de remplacer toutes les terres de cultures par des prairies ou des forêts. Le stockage de carbone ne suit pas une tendance linéaire au cours du temps (Fig. 2.2). Les changements de pratiques permettent une séquestration rapide au début de la mise en place mais celle-ci diminue au cours du temps afin d'atteindre un nouvel état d'équilibre (Chenu et

al., 2019). Ceci implique que la diminution nette du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère n'est pas régulière et diminue également après 2 ou 3 décennies (Paustian et al., 2016).

La matière organique est biodégradée via des bactéries hétérotrophes, des champignons et la faune micro et macroscopique du sol. Ces décomposeurs sont source directe de matières organiques mais également, indirectement, utile à la minéralisation de ces matières par la respiration. La minéralisation consiste à transformer les molécules organiques en molécules minérales utilisables pour la croissance des végétaux (Amthor, 2000). Ce processus impacte négativement le stockage de carbone du sol dès lors qu'il crée du CO<sub>2</sub> ou du méthane réémis dans l'atmosphère par la respiration (Pellerin et al, 2020).

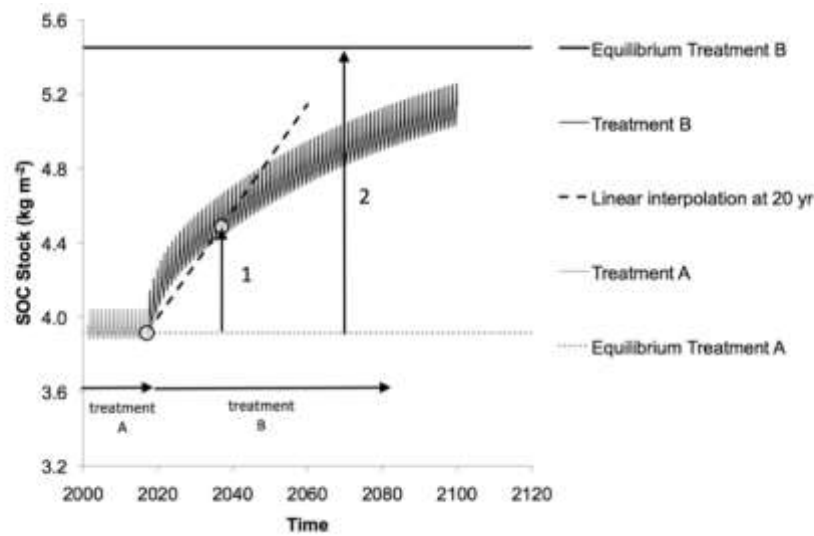


Fig 2.2. Représentation schématique de l'augmentation du stock de SOC après un changement de gestion du sol favorisant les entrées par rapport aux sorties de carbone organique (Gestion A vers Gestion B). 1 = Stockage de carbone après 20 ans, 2 = Stockage maximum de carbone (Chenu et al., 2019).

## 2.4. Les pratiques agricoles classiques en regard du réservoir de carbone du sol

Dans les systèmes agricoles conventionnels, la végétation naturelle (pérenne) est remplacée par une culture annuelle (non pérenne), ce qui modifie l'équilibre à la surface du sol (Tal, 2018). La biodiversité globale y est impactée négativement à cause de l'intensification des cultures et de la mise en place de monocultures (Singh et Singh, 2017). L'agriculture conventionnelle est la plus répandue dans le monde et permet les plus grands rendements par rapport à d'autres formes de production (Tal, 2018). La perte de biodiversité est avérée, mais celle-ci est compensée par l'apport de fertilisants, l'utilisation de variétés de plantes résistantes aux traitements phytosanitaires et un travail du sol conséquent afin de maximiser le terrain de production (Tal, 2018). En Belgique et en Europe, la majorité des cultures mises en place sont des céréales, des tubercules (betteraves et pommes de terre), du maïs et du colza (Pellerin et al., 2019 ; Singh et Singh, 2017). La production de ces cultures varie. Les céréales et le colza sont produits et moissonnés afin d'en valoriser les grains. La paille que forment les tiges séchées de la plante après récolte subit des traitements différents. 80% des pailles sont pressées et exportées afin d'être utilisées comme litière pour les animaux (Pellerin et al., 2019). Marginalement, elles peuvent également être brûlées sur le champ afin d'apporter des cendres utiles à la fertilisation du sol (Palmieri et al., 2017) ou enfouies après broyage, surtout pour les pailles de colza (Kavian et al., 2020). Les tubercules sont récoltés en laissant sur place les parties aériennes de la plante

qui sont enfouies dans le sol. Ces cultures créent des dommages importants pour la qualité du sol, dès lors qu'elles nécessitent un retournement de ce dernier et qu'une partie de la terre est exportée lors de la récolte (Poesen et al., 2001 ; Ruyschaert et al., 2006). Le maïs est soit récolté pour le grain, soit ensilé, pour l'alimentation du bétail. Dans le premier cas, les tiges sont laissées sur la parcelle et enfouies après la récolte. Dans le second cas, la totalité de la plante est exportée (tiges et grains) et seuls, les chaumes restent sur le champ (Cox, 1997).

Les phénomènes les plus importants liés aux modes de pratiques agricoles actuelles sont l'érosion et le lessivage des sols (Chenu et al., 2019). Le ruissellement des eaux à la surface emporte les nutriments et les matériaux constituant le sol impactant ainsi les différents stocks, en ce compris les stocks de SOC (Chenu et al., 2019). Ce phénomène est fortement influencé par l'utilisation des sols (surface nue ou couverte), la topographie et le climat (Pellerin et al, 2020). Il a été estimé qu'entre 42 et 78 GtC ont été perdus durant le dernier siècle à cause d'une mauvaise gestion anthropique du sol et de l'érosion (Stockmann et al., 2013). Ce phénomène est également présent dans les systèmes naturels non-perturbés mais les pertes y sont compensées par la pédogenèse (création de nouveau sol) (Montgomery, 2007). Il en résulte que les vitesses d'érosion des terres mises à profit pour l'agriculture conventionnelle peuvent être jusqu'à 100x plus élevées que pour un sol non perturbé (Montgomery, 2007).

Le carbone du sol a un effet bénéfique pour le climat lorsque le CO<sub>2</sub> atmosphérique est séquestré via les végétaux (Pellerin et al, 2020). Mais, cette séquestration est également bénéfique pour les végétaux. Le carbone du sol influence la vie biologique, chimique et physique du sol. Les effets peuvent être directs comme l'apport d'eau et de nutriments ou indirects en améliorant majoritairement la physique et la texture du sol, favorisant ainsi un meilleur développement racinaire, par exemple (Pellerin et al, 2020). Des cercles vertueux peuvent ainsi être créés. Lorsque le sol est faiblement composé de carbone organique, l'augmentation de SOC va augmenter la fertilité et donc améliorer la *NPP* de la plante, profitant à un plus grand captage de carbone atmosphérique via la photosynthèse. Les sols pauvres en carbone sont plus souvent sensibles à l'érosion. L'augmentation du SOC permet ainsi de diminuer les risques de lessivage et d'érosion (Chenu et al., 2019).

## 2.5. Carbon Farming : Un souhait européen pour augmenter le stockage de carbone dans le sol

Dans les agrosystèmes, des pratiques peuvent être développées afin de permettre une maximisation des capacités de stockage de carbone dans le sol. Ces pratiques peuvent être regroupées sous le terme d'agriculture du carbone ou *Carbon Farming*. Celui-ci est défini comme la gestion des réservoirs et des flux de carbone ainsi que des flux de gaz à effet de serre, à l'échelle de la ferme (COWI, 2021). *Carbon Farming* implique la gestion des terres agricoles mais également du bétail, des réservoirs de carbone dans le sol, de la végétation aérienne et des flux de CO<sub>2</sub>, de méthane et de N<sub>2</sub>O. Ceux-ci font partie des principaux gaz à effet de serre émis par l'homme (COWI, 2021).

L'Union Européenne décide d'agir via la fixation d'objectifs communs à l'ensemble du territoire comme l'instauration du Green Deal en 2019 (European Green Deal, 2019). L'agriculture et la sylviculture sont mis en avant, tout comme dans l'initiative 4 pour 1000 (Initiative « 4 pour 1000 », 2018), pour atteindre les objectifs de neutralité carbone d'ici 2050.

Malgré cela, il n'existe aucun système national ou international mis en place pour atténuer les effets des changements climatiques en ce qui concerne l'utilisation des terres et l'affectation des sols et des forêts. Le facteur le plus favorable pour le climat est l'amélioration de la compréhension des enjeux ainsi que la mise en place du Carbon Farming à plus grande échelle (COWI, 2021). Ceci va de pair avec un système de gouvernance solide et transparent permettant l'établissement de règles communes claires pour le suivi et les vérifications de l'utilisation des terres en agriculture. C'est pourquoi la Commission Européenne a mis au goût du jour un guide technique (*Technical Guidance Handbook : Setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU*, 2021) pour contribuer financièrement aux efforts des agriculteurs pratiquant le Carbon Farming (COWI, 2021).

Les agriculteurs européens sont ancrés dans un système de production global au sein de la PAC (Politique Agricole Commune) (PAC, 2022). Plusieurs mesures sont mises en avant, offrant la possibilité aux exploitants d'obtenir des garanties financières plus importantes lors de l'instauration de nouvelles pratiques allant dans le sens de la préservation de l'environnement. C'est le cas par exemple des MAE (mesures agro-environnementales), incluses dans le deuxième pilier de la réforme de la PAC (PAC, 2022). De nouveaux projets sont actuellement étudiés à l'échelle de la ferme et de la parcelle afin de fournir des crédits proportionnels aux résultats des pratiques mises en place. Un paiement serait par exemple instauré lorsque les pratiques de stockage permettent un réel apport de carbone dans le sol. La mise en place de tels remboursements peut être confrontée à la difficulté de mesurer l'impact climatique réel, sachant que ceux-ci se mesurent sur du long terme et que certains agriculteurs pourraient ne jamais en voir les effets (COWI, 2021).

Dans le guide technique (COWI, 2021), la Commission Européenne vise à favoriser l'instauration de prairies par rapport aux terres de cultures, à mettre en place l'agroforesterie, à conserver et restaurer les terres de tourbières, à planter des forêts. La Commission veut éviter la déforestation au profit de l'agriculture et permettre une meilleure gestion des espaces boisés et des haies, etc. Ces mesures sont regroupées en 5 leviers d'actions propres au Carbon Farming (COWI, 2021).

Les terres de *tourbières* constituent le premier levier. Elles sont les plus grandes réserves de carbone au monde jouant un rôle important dans le cycle du carbone, l'atténuation des changements climatiques et la fourniture de services écosystémiques. La mauvaise gestion des tourbières contribue à 5% des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (2 Gt CO<sub>2</sub>.an<sup>-1</sup> en 2020)(COWI, 2021). Les leviers d'actions sur les tourbières sont par ailleurs assez faibles à l'heure actuelle.

Le second levier touche *l'agroforesterie* qui consiste à apporter des matières ligneuses (arbres, arbustes, haies, etc.) dans les systèmes de cultures agricoles classiques. L'agroforesterie régule les écosystèmes, rend des services écosystémiques et améliore la biodiversité, elle est encore très peu exploitée en Europe. L'instauration de telles pratiques pourrait permettre la séquestration de 2.1-63.9 tC.an<sup>-1</sup> (COWI, 2021). Les bénéfices sont visibles à long terme mais le carbone séquestré peut être réémis si la gestion de ces espaces n'est pas assurée correctement.

Le secteur de *l'élevage* est le troisième levier. Il est le plus responsable des émissions agricoles en Europe (81%). Lorsque l'élevage prend en compte tous les secteurs concernés lié à son développement (énergie, industrie, affectation des sols, importations d'aliments, etc.) il représente près de 20% des émissions de gaz à effet de serre de l'Union Européenne. Il est

nécessaire d'agir sur chaque secteur en commençant par les actions au sein de la ferme. Des recherches suggèrent qu'il serait possible de réduire ces impacts de 12 à 30% d'ici 2030 (COWI, 2021).

Le quatrième levier vise à étudier la mise en place et la bonne gestion des prairies permanentes. En Europe il existe très peu d'initiatives favorisant la valorisation de la séquestration de carbone dans les sols de prairies. Pourtant, après les tourbières et les forêts, c'est une des utilisations de la terre les plus efficaces pour lutter contre les changements climatiques (COWI, 2021).

Le dernier levier est celui dans lequel s'insère ce travail. Il s'agit de l'amélioration et du maintien des stocks de SOC dans les terres arables de grandes cultures. Le maintien des stocks actuels est crucial dès lors que certaines pratiques agricoles favorisent la perte directe de SOC ( $27 \text{ tCO}_2\text{eq.an}^{-1}$ ) (COWI, 2021). De nombreuses pratiques rentables pour l'agriculteur favorisent la séquestration de SOC dans le sol : les cultures intermédiaires, l'amélioration des rotations, l'agroforesterie, la prévention de la conversion en terres arables, la conversion en prairies, etc. Le guide technique de la Commission Européenne cite plusieurs projets actifs ou futurs auxquels il est nécessaire de se rapprocher. CARBON AGRI, Indigo AG Carbon Pilot, Gold Standard SOC Framework Methodology, Ebenrain Humusprojekt et Solothurn Project, LIFE Carbon Farming Project, CarboCert, Kaindorf Humuszertifikate sont des projets à portée nationale dont il est important de souligner et défendre l'initiative. La surveillance et les mesures de SOC par le protocole de la FAO doivent également être suivies et appliquées avec attention. Sur base de ces projets, l'Europe vise à évaluer les niveaux de SOC ainsi que les potentiels futurs à l'échelle régionale et nationale. Elle vise aussi à une compréhension plus détaillée des pratiques menant à une meilleure séquestration du SOC ainsi que des effets y étant liés. Ceci permet d'orienter les recherches et les mises en place de bonnes gestions des terres et d'une compensation financière adaptée (COWI, 2021).

## 2.6. Les pratiques favorisant le stockage de carbone dans le sol

Dans le Guide Technique européen, certaines pratiques agricoles sont vaguement citées afin de favoriser la séquestration et le stockage de carbone dans les terres arables de cultures (COWI, 2021). Il est alors possible de faire la distinction entre les pratiques *stockantes* (Pellerin et al, 2020) et les pratiques qui influencent peu ou pas le stock de carbone du sol. Les pratiques *stockantes* permettent une augmentation du stock de SOC, c'est-à-dire, un *stockage additionnel* lié à une pratique. Ce dernier est la différence entre le stock d'un sol influencé par une pratique de gestion et le stock de ce même sol influencé par une autre pratique de gestion (Pellerin et al, 2020). La séquestration du carbone dans les sols agricoles est inférieure à celle qui est possible dans les terres de prairies et de forêts. Elle est de l'ordre de  $0.1$  à  $1 \text{ MgC.ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  mais dépend fortement de l'historique du traitement de sol, du sol en lui-même ainsi que des conditions climatiques et des pratiques culturales (Paustian et al., 2016).

### 2.6.1. Types de pratiques *stockantes*

#### 2.6.1.1. Travail du sol

Beaucoup de sols peuvent séquestrer du carbone et la séquestration peut être amplifiée via la limitation du labour et du travail du sol en général. Cette pratique semble avoir un effet global

positif mais ne fait pas encore l'unanimité scientifique (Paustian et al., 2016). Le rôle principal du travail du sol et du labour est d'apporter de l'oxygène ( $O_2$ ) au sol. Ceci a comme effet d'accélérer la minéralisation, ce qui libère des minéraux utiles à la croissance des végétaux (Arrouays et al., 2002). Le labour a donc un effet direct sur la fertilité minérale du sol. La minéralisation combinée à l'effet de la pluie sur les sols nus a pour conséquence de libérer du  $CO_2$  dans l'atmosphère (Paustian et al., 2016). Il apparaît donc que la limitation du labour et l'usage du semi-direct permettraient de ralentir la minéralisation et d'augmenter le stock de SOC (Chenu et al., 2019). L'augmentation du stock de SOC à hauteur de  $0.2 \text{ tC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  concerne les premiers centimètres de sol (0-20cm) (Arrouays et al., 2002). Par ailleurs, les effets sur les horizons de sol plus profonds sont non significatifs. Il en va de même pour les techniques alternatives au labour profond (chisel, disque, etc) (Chenu et al., 2019).

#### 2.6.1.2. Enfouissement des résidus de culture

Plus l'export de végétaux est grand, plus l'effet sur le carbone du sol est négatif. C'est le cas lorsque les résidus et pailles des cultures sont pressées et exportées (Bolinder et al., 2020 ; Chenu et al., 2019). De plus, le manque de résidus de cultures peut augmenter l'érosion (Pellerin et al., 2019). Le gain de SOC dans le sol est proportionnel à la taille des résidus. Le calcul de ces apports se fait via des données allométriques permettant une estimation des teneurs en carbone de la biomasse végétale (Bodemkundige Dienst van België en UGent, 2006). Par exemple, l'apport direct de carbone du sol du maïs grain ( $3.2 \text{ tC} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) est plus important que celui des céréales de petites tailles ( $2.08 \text{ tC} \cdot \text{ha}^{-1}$  pour le froment d'hiver) (Bodemkundige Dienst van België en UGent, 2006). Il est d'ailleurs fréquent de constater que l'apport de carbone dans le sol est fortement influencé positivement par la présence de maïs dans la rotation (Bolinder et al., 2020).

Les résidus de cultures sont incorporés au sol via un travail mécanique du sol. Si le labour est profond (30cm), les résidus sont enfouis sans être broyés. Il est possible que ceux-ci soient broyés avant enfouissement, le travail du sol est alors superficiel (15cm) (Pellerin et al., 2019). Le broyat de résidus permet un apport de carbone plus important (13%) (Bolinder et al., 2020). Les effets de la restitution des résidus et des pailles ne sont pas uniquement bénéfiques pour le stock de SOC. Les rendements des cultures suivantes sont également impactés positivement de 6 à 13% (Bolinder et al., 2020). Il y a donc un contraste entre la réduction du travail du sol et les bénéfices de l'enfouissement des résidus (Bolinder et al., 2020).

#### 2.6.1.3. Diversité des rotations de cultures : espèce végétale et production racinaire

Augmenter la diversité des plantes permet d'augmenter la diversité racinaire et ainsi de séquestrer plus de carbone dans le sol (Arrouays et al., 2002). Certaines espèces comme les légumineuses ont la capacité d'héberger des bactéries fixatrices d'azote ou ont un système racinaire avec des associations mycorhiziennes qui améliorent l'absorption des nutriments (Stockmann et al., 2013). Les racines des plantes jouent un rôle certain dans la séquestration du carbone, mais les études sur le sujet sont encore trop limitées. Par ailleurs, il ressort que les racines des plantes pérennes, plus profondes, sont les plus efficaces pour séquestrer du carbone (Chenu et al., 2019). Elles sont donc à promouvoir dans les rotations de cultures. C'est par exemple le cas des prairies dont la durée et la fréquence peuvent être favorisées (Paustian et al., 2016). La diversité des espèces de plantes peut induire une augmentation nette du stock de SOC. Les plantes munies d'un réseau racinaire complexe augmentent également le stock de SOC (Chenu et al., 2019). La prise de conscience de ces éléments engendre une complexité dans la

mise en place des rotations de cultures mais apporte une biodiversité supplémentaire, utile pour le développement des microorganismes (Chenu et al., 2019).

#### 2.6.1.4. Apports externes de carbone

Des apports externes de matériaux carbonés peuvent également provoquer une diminution nette du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Ces matériaux sont les composts, le fumier et le lisier, ainsi que le biochar (Paustian et al., 2016). Les variations sont assez importantes quant à l'apport réel de carbone dans le sol de ces composés. Elles se situent entre 203 et 1310 kgC. ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (Bolinder et al., 2020). Plus les matériaux sont compostés, plus le temps de minéralisation est grand par rapport à des matériaux frais comme le broyat de culture intermédiaire (Bolinder et al., 2020). Par ailleurs, il est difficile d'évaluer exactement la somme des effets que ces apports engendrent sur le sol à long terme car le système global est complexe à étudier (Arrouays et al., 2002 ; Pellerin et al., 2019).

#### 2.6.1.5. Autres (fertilisants minéraux, chaux, etc)

Les effets de la fertilisation, du chaulage et de l'irrigation sont des processus complexes à étudier car ils influencent directement la *NPP* ainsi que la respiration hétérotrophe (Chenu et al., 2019). Globalement, la synergie entre le cycle de l'azote et celui du carbone peut augmenter la productivité et la fertilité des terres agricoles, augmenter la biodiversité, réduire l'érosion et le lessivage ainsi que les pollutions des eaux souterraines. Cette synergie peut aider les différentes cultures principales à mieux résister aux effets du changement climatique (Paustian et al., 2016). Des études montrent que l'apport de 1kg de fertilisant azoté permet un gain de 2kg de carbone par hectare dans le sol (Bolinder et al., 2020). Par ailleurs, la fertilisation, surtout azotée, accélère la minéralisation des stocks d'azote et de carbone. Il paraît donc important de ne pas se retrouver dans une situation où l'azote est en excès. (Chenu et al., 2019).

#### 2.6.1.6. Cultures intermédiaires

Contrairement à l'absence de couverts végétaux, les cultures intermédiaires peuvent augmenter le potentiel de stockage de carbone et réduire la perte de nutriments (Bolinder et al., 2020). Ceci provient du simple fait que l'implantation d'une couverture végétale sur une parcelle augmente la production photosynthétique et donc la *NPP*. Il en résulte une plus forte production de biomasse et un retour de carbone plus important dans les stocks terrestres (Poeplau et Don, 2015 ; Seitz et al., 2022). L'abandon du travail du sol procure des résultats discutables mais lorsqu'il est couplé aux cultures intermédiaires, il permet d'augmenter la diversité d'apport de carbone et ainsi avoir un effet positif sur le SOC (Chenu et al., 2019). Les légumineuses, fixatrices d'azote, sont des cultures intermédiaires plus efficaces à hauteur de 5% dans le stockage de SOC (Bolinder et al., 2020). Les cultures intermédiaires sont broyées et enfouies dans le sol ce qui permet une bonne assimilation par la microfaune de la partie aérienne mais également souterraine (racines, etc) de la plante (Chenu et al., 2019). L'apport direct de SOC via les cultures intermédiaires varie entre 270 et 430 kg C ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (Bolinder et al., 2020).

#### 2.6.2. Agriculture de conservation

Lorsque la terre n'est pas cultivée et laissée à nu, seule la respiration hétérotrophe est considérée dans le bilan du SOC terrestre. Il en résulte une perte sèche car aucun apport ne permet de compenser les pertes, sauf si des matériaux organiques sont apportés durant cette période (Paustian et al., 2016). La combinaison des différentes pratiques influence positivement le stock

de SOC. Les pratiques les bénéfiques à cet apport sont celles qui favorisent l'augmentation de la *NPP* (Bolinder et al., 2020). Étant donné que la minéralisation du carbone est essentiellement modelée par des caractéristiques propres au site, tels que le climat et l'état naturel, il est préférable d'augmenter les apports directs de carbone (cultures intermédiaires et amendements organiques) plutôt que de limiter les effets de la minéralisation (non labour et semis directs)(Chenu et al., 2019).

L'agriculture de Conservation des Sols est un type de pratique qui favorise l'usage des pratiques *stockantes*. Ce système d'agriculture alternatif vise à maintenir et/ou à améliorer la production agricole tout en restituant au sol de la matière organique (Arrouays et al., 2002). Elle se base sur 3 piliers principaux : la forte diminution du travail mécanique du sol, une couverture végétale permanente du sol (via des cultures intermédiaires) et la diversification de cultures principales (Chenu et al., 2019). Ce type d'agriculture est souvent réduit au premier pilier mais, comme mentionné précédemment, il est important de ne pas oublier les deux seconds ainsi que toutes les autres pratiques *stockantes* pouvant être mises en place. Ce système a donc le potentiel de capter une quantité de carbone beaucoup plus importante qu'un système traditionnel (Arrouays et al., 2002). Il présente une grande variabilité de mise en action suivant les contextes (Chenu et al., 2019).

## 2.7. Les cultures intermédiaires, une des solutions étudiées

Dans le contexte de l'initiative 4 pour 1000, il a été reconnu que le levier d'action le plus important pour stocker du carbone dans le sol est une meilleure exploitation des terres agricoles (Pellerin et al., 2019). Parmi toutes les pratiques *stockantes* et au sein des trois piliers de l'agriculture de conservation des sols, les cultures intermédiaires jouent un rôle important. Elles peuvent représenter jusqu'à 35% du stockage (Pique, 2021). C'est pourquoi, dans ce travail, cette pratique *stockante* a été approfondie.

Suivant le dictionnaire de l'agroécologie (Dictionnaire d'agroécologie, 2016), les cultures intermédiaires sont définies comme ceci :

« Il s'agit d'une culture implantée entre la récolte d'une culture principale et le semis de la culture suivante pendant une période plus ou moins longue appelée interculture. Les cultures intermédiaires sont destinées à être restituées au sol. Elles n'ont pas vocation à être exportées de la parcelle. Elles sont implantées dans le but d'éviter de laisser le sol sans couverture végétale pendant l'interculture afin de rendre de multiples services. »

Les cultures intermédiaires présentent de nombreux avantages. Parmi ceux-ci, la diminution de l'érosion et la perte de nutriments du sol, le captage des nitrates et l'augmentation des stocks de SOC (Poeplau et Don, 2015). L'implantation de cultures intermédiaires n'affecte pas la production agricole, contrairement au remplacement des terres arables par des prairies ou des forêts (Seitz et al., 2022). Elles ont commencé à être mise en place dans les années 1990 avec deux buts premiers : enrichir le sol en azote pour les cultures suivantes et/ou produire de l'humus via l'enrichissement du sol en matière organique (Arrouays et al., 2002 ; Destain et al., 2010). En Belgique, suite à la directive Nitrates visant à limiter les pertes de nitrates par lixiviation, les CIPAN (Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates) ont été rendues obligatoires dans les zones vulnérables (Destain et al., 2010).

La fréquence d'implantation est directement corrélée avec le gain de stockage de carbone dans le sol. Plus la fréquence est grande, plus la biomasse produite est grande et plus le retour de carbone est important (Arrouays et al., 2002). Il en va de même pour la durée d'implantation. L'augmentation de stock de SOC est jusqu'à 35% plus importante lorsque les cultures intermédiaires sont implantées tôt dans l'année. Les conditions de croissance sont maximisées grâce aux températures plus clémentes (Seitz et al., 2022). Les dates de semis ont donc une importance capitale dans la production de biomasse et le stockage de carbone associé (Pellerin et al., 2019). Destain et al. (2010) a montré que le captage d'azote de la moutarde d'hiver diminue de  $2\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  par jour de retard de semis. Le parallélisme avec le stockage de carbone peut ainsi être effectué dès lors que les deux paramètres dépendent de la biomasse produite (Destain et al., 2010). Si on compare légumineuses et non-légumineuses, on ne constate pas de différence dans le gain de SOC. Le gain dépend donc uniquement de la biomasse produite (Poeplau et Don, 2015). La production de biomasse des cultures intermédiaires dépend de nombreux paramètres comme les conditions météorologiques, les types de sols, les périodes de semis, etc (Seitz et al., 2022). C'est pourquoi les valeurs de stockage du SOC varient beaucoup dans la littérature. Entre 203 et  $1310\text{ kgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  pour Bolinder et al. (2020),  $320 \pm 80\text{ kgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  pour Poeplau et Don (2015) ou encore entre 280 et  $330\text{ kgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  pour Seitz et al. (2022). Certains auteurs constatent un état d'équilibre dans les stocks de SOC après 50 ans d'implantation (Fig. 2.3)(Arrouays et al., 2002 ; Pellerin et al., 2019) tandis que d'autres n'observent pas de saturation (Poeplau et Don, 2015).

En Wallonie, le Centre de Recherche Agronomique (CRA-W) catégorise les cultures intermédiaires en deux classes. La première est dite *Basique*. Elle est le plus souvent constituée par des espèces végétales telles que la moutarde ou la phacélie. Elle est implantée pour une durée courte, entre 2.5 mois et 3 mois (CRA-W, 2022). La deuxième classe de culture intermédiaire est dite de *Biomasse*. Comme son nom l'indique, elle vise un haut rendement de production végétale. Elle est constituée d'un mélange d'espèces important comme la vesce, l'avoine brésilienne ou le seigle ainsi que certaines espèces de légumineuses. La durée d'implantation est nettement plus importante que l'interculture *Basique* et peut dépasser 5 mois (CRA-W, 2022).

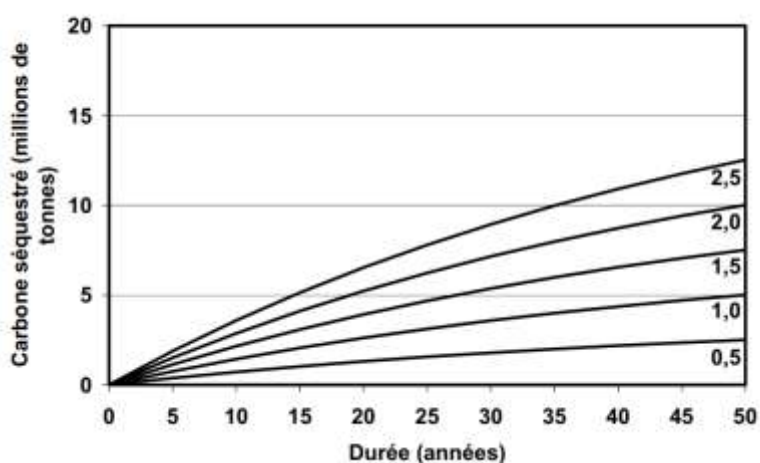


Fig. 2.3. Estimation de la séquestration de carbone (en million de t) suivant des surfaces de sols différentes (entre 0.5 et 2.5 millions d'hectares) pour une durée de 50 ans (Arrouays et al., 2002).

## 2.8. Les études existantes sur la gestion des cultures intermédiaires (modélisation, imagerie satellite,...)

Les stocks de carbone et les cultures intermédiaires sont étudiés de façon précises et approfondies via des méthodes différentes. La modélisation des apports de carbone dans les sols présente des incertitudes assez importantes, surtout si le travail est réalisé à petite échelle (Paustian et al., 2016). Les premiers modèles concernant les sols et les teneurs de SOC ont été développés par Coleman et Jenkinson (1996) ou encore Taghizadeh-Toosi et al. (2014). Le modèle RothC (Coleman et Jenkinson, 1996) permet de définir le renouvellement des stocks de SOC sur base de paramètres tels que le type de sol, l'humidité, la température et la couverture du sol. Il est applicable à des échelles allant de la parcelle aux régions dans leur entièreté et est paramétré via des mesures de terrains (Coleman et Jenkinson, 1996). Le modèle C-TOOL (Taghizadeh-Toosi et al., 2014) est utilisé à l'échelle de la parcelle pour des profondeurs de sols différents. Il permet d'évaluer les effets des pratiques culturales d'une parcelle avec une paramétrisation proche de celle de RothC (Taghizadeh-Toosi et al., 2014).

Les cultures intermédiaires sont assez peu étudiées et modélisées. Les principaux modèles développés visent à estimer l'effet de ces cultures sur la séquestration et le piégeage des nitrates dans les sols (Destain et al., 2010 ; Hively et al., 2020). Ils concernent principalement les légumineuses. L'utilisation de la télédétection comme outil de surveillance des agroécosystèmes se développe de plus en plus ces dernières années (Pique, 2021). Mais les outils sont encore assez faibles en ce qui concerne la détection de type de cultures, les fertilisants, les résidus de cultures ou la gestion des eaux du sol. La meilleure façon d'obtenir ces différentes informations est via l'agriculteur lui-même (Paustian et al., 2016).

Afin de détecter la présence de cultures intermédiaires et de contrôler leur mise en place, l'imagerie satellite peut être utilisée. Gao et al. (2020) utilisent l'imagerie de Sentinel-2 afin de détecter les périodes de récoltes et de fin de cultures principales. Ceci permet d'identifier les périodes d'implantation potentielles de cultures intermédiaires. Ils se basent également sur l'imagerie VENUS qui apparaît plus précise que Sentinel-2. L'algorithme WIST a été développé sur base des valeurs de NDVI fournies par les imageries satellitaires. Hively et al. (2015) se basent également sur les valeurs NDVI pour détecter les cultures mises en place dans les monocultures de maïs aux USA. Ce sont les images de Landsat et de SPOT qui sont utilisées (Hively et al., 2015).

L'imagerie satellitaire peut également être utile dans l'estimation de la biomasse et des rendements de productions des cultures intermédiaires. Goffart et al. (2021) utilisent les images Sentinel-2 en Belgique tandis que Thieme et al. (2020) y ajoutent les images de Landsat 5, 7 et 8 afin d'utiliser les valeurs NDVI pour estimer la production de biomasse. Ces résultats sont comparés avec des mesures de biomasses effectuées sur le terrain afin de déterminer les espèces végétales ayant le meilleur rendement de production (Thieme et al., 2020).

Seitz et al. (2022) combinent RothC et C-TOOL avec des données allométriques concernant les cultures intermédiaires afin d'estimer les valeurs de stockage de SOC. Trois scénarios sont imaginés en faisant varier le gain de biomasse des cultures intermédiaires sur des terres en Allemagne. Le premier scénario apporte un gain de 10%, le second de 23% et le dernier de 30%. Deux types d'implantations sont considérés. L'implantation courte correspond à une période commençant après une culture estivale tardive (récolté en septembre-octobre). L'implantation longue correspond à une culture estivale récoltée en juillet-août. Dans ce

modèle, 65% de la restitution de carbone provient de la biomasse aérienne tandis que 35% provient des racines. Ces chiffres sont par ailleurs discutés et contrebalancés dans d'autres études mettant plus d'intérêt sur la biomasse souterraine (Poeplau et Don, 2015). Cette modélisation fournit des résultats variés suivant les scénarios (Fig. 2.4).

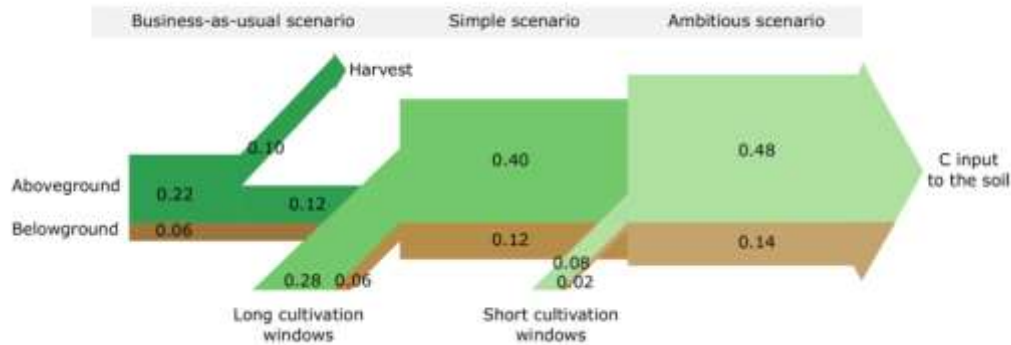


Fig. 2.4. Apport de carbone par les cultures intermédiaires en  $\text{MgC. ha}^{-1}. \text{an}^{-1}$  suivant 3 scénarios performés sur 1267 sites allemands (Seitz et al., 2022).

## 2.9. Objectifs et apport du mémoire sur les cultures intermédiaires

A l'heure actuelle, les études utilisant la télédétection dans la recherche concernant les cultures intermédiaires consistent à détecter leur présence ou absence dans une parcelle agricole ainsi que, dans certains cas précis, estimer leur production de biomasse. Par ailleurs, l'étude de l'imagerie satellitaire n'est pas directement mise en lien avec les restitutions de carbone dans le sol. Cette fonction est pourtant essentielle lorsque les cultures intermédiaires sont mises en place dans les parcelles agricoles (Bolinder et al., 2020 ; Chenu et al., 2019 ; Poeplau et Don, 2015 ; Seitz et al., 2022).

Lorsque la restitution de carbone est étudiée, que ce soit au niveau des cultures intermédiaires ou des cultures principales, les équations allométriques sont majoritairement utilisées (Seitz et al., 2022). Celles-ci se basent sur des mesures de terrains qui peuvent être ensuite modélisées via des modèles développés spécifiquement (Roth-C, C-TOOL) (Coleman et Jenkinson, 1996 ; Taghizadeh-Toosi et al., 2014).

Ce travail vise à combiner ces deux façons d'étudier les cultures intermédiaires, en couplant les données de télédétections via les images satellites ainsi que l'utilisation d'équations allométriques permettant d'estimer le potentiel de restitution de carbone vers le sol. Cette combinaison de méthode a pour objectif de répondre à une première question de recherche : *Quelles différences de SOC est-il possible d'observer dans les schémas agricoles favorisant l'implantation de cultures intermédiaires et selon la complexité des rotations de cultures agricoles ?*

La question principale établit la distinction entre les pratiques pouvant favoriser les gains de SOC et d'autres pratiques classiques. C'est pourquoi deux systèmes agricoles distincts ont été comparés. L'agriculture conventionnelle sert de point de repère dans cette comparaison, dès lors qu'il s'agit du système le plus pratiqué au monde et en Wallonie (Tal, 2018 ; Etat Environnement, 2021). L'agriculture de conservation des sols, mentionnée précédemment, est

le système qui, théoriquement, offre le panel la plus large de pratiques visant à enrichir les puits de carbone terrestres. En plus du système de gestion agricole, les apports de SOC dépendent de conditions multiples pouvant varier suivant le climat et la pédologie (Pellerin et al, 2020). Pour ne pas tirer des conclusions trop hâtives répondant à la première question, deux régions agro-géographiques de la Wallonie ont été comparées. Le Condroz et le Plateau Limoneux ont été étudiés car ils présentent des conditions agro-géographiques permettant de les distinguer. La question de recherche découlant de ces ajouts spécifiques est la suivante : *A quel degré l'implantation de cultures intermédiaires et la restitution de carbone y étant associée sont influencées par le type de système agricole (conventionnel-conservation) et la région d'implantation (Région Limoneuse - Condroz) ?*

## 2.10. Définition : Système agricole

La mise en perspective des deux systèmes agricoles proposant des pratiques et des techniques culturales différentes nécessite d'être définie. Afin de comprendre les différences entre ces modes de production, une définition propre aux systèmes étudiés et basée sur la littérature est proposée pour chaque type de gestions des sols.

### 2.10.1. Agriculture de Conservation

En Wallonie, une expertise est apportée par l'ASBL Greenotec (GREENOTEC, 2022) en ce qui concerne les modes de productions agricoles de conservation des sols. C'est sur base de cette expertise que les informations principales sont extraites.

L'agriculture de conservation vise à promouvoir des pratiques respectueuses du sol, qui favorisent un développement de la biodiversité, utilisent de façon plus efficace les ressources du sol et apportent de la valeur ajoutée à l'agriculteur en se passant au maximum des intrants externes (fertilisants, pesticides, etc.). Il est important de signaler que cette forme d'agriculture n'est pas reconnue sous un label strict (GREENOTEC, 2022).

Greenotec rappelle également les trois piliers de l'agriculture de conservation, déjà mentionnés précédemment :

- La réduction drastique du travail du sol par la réduction du labour mais également par d'autres techniques de préparation du sol. Le semis-direct y est favorisé.
- Une rotation diversifiée dans les cultures principales. Les associations de cultures, à tout moment de l'année, y sont favorisées afin de maximiser la biodiversité.
- L'implantation de couverts végétaux entre deux cultures principales : les cultures intermédiaires. Elles permettent au sol une couverture permanente et lui évitent les effets d'érosion et de perte nette d'éléments minéraux.

Souvent, l'agriculture de conservation est réduite au premier pilier. Pourtant, c'est la combinaison des trois qui permet d'augmenter le potentiel de stockage de carbone comparé à l'agriculture traditionnelle. Malgré cela, les mises en place des trois piliers et les contextes étant toujours différents, la variabilité dans l'augmentation du SOC peut être importante (Chenu et al., 2019).

### 2.10.2. Agriculture Biologique

Cette forme d'agriculture est règlementée au niveau européen. Elle s'insère donc dans une structure claire de production au sein de l'UE. La surveillance et la gestion de cette agriculture permettent la labélisation des produits certifiés d'origine biologique. Ce mode de production agricole est donc défini dans le cadre législatif européen (Agriculture Biologique, 2022).

L'agriculture biologique vise à une production agricole au moyen de procédés et de substances naturels. Elle a pour objectif un impact limité sur l'environnement. Ceci est permis via une exploitation responsable d'énergies et de ressources naturelles. Cette agriculture vise la préservation de la biodiversité et les équilibres écologiques régionaux, ainsi que l'amélioration de la fertilité des sols et la qualité de l'eau.

Dans l'étude réalisée, l'agriculture biologique est intégrée à l'agriculture de conservation. Les deux types d'agriculture poursuivent un but commun : la préservation de l'environnement et la biodiversité. Cette intégration permet de disposer de plus de données.

### 2.10.3. Agriculture Conventionnelle

L'agriculture conventionnelle est la forme d'agriculture la plus répandue dans le monde. Elle favorise la mise en place de variétés de cultures à haut rendement afin d'optimiser les coûts de productions. Les hauts rendements sont permis via une sélection variétale importante, dépendante, dans la plupart des cas, d'intrants externes tels que les engrais et pesticides (Etat Environnement, 2021). Elle s'oppose à l'agriculture de conservation en termes de pratiques culturales favorisant la biodiversité.

## 2.11. Définition : Région agricole

La Wallonie est composée de plusieurs régions agro-géographiques. Ces régions sont déterminées sur base des occupations du sol et de l'aménagement des territoires reflétant ainsi les conditions biophysiques du milieu naturel (WalOnMap, 2022). La comparaison des deux systèmes (conventionnel – conservation) est effectuée dans deux régions agro-géographiques wallonnes (Fig. 2.5). Ces deux régions sont le Condroz et le Plateau Limoneux.



Fig. 2.5. Localisation des régions agro-géographiques étudiées au sein des provinces de la région wallonne.

### 2.11.1. Région du Condroz

Cette région touche principalement la province de Namur, au cœur de la région wallonne (Fig. 2.5). Le relief est assez important, présentant des dépressions, des vallées ainsi que des plateaux. L'altitude varie entre 200m dans la partie septentrionale et 300m au sud de cette dernière (Castiau et al., 2010). En géographie du paysage, le relief du Condroz est souvent qualifié de « tôle ondulée » formant une succession de crêtes (« tiges ») et de dépressions (« chavées ») entrecoupées par des rivières. Ces plissements sont formés par un sous-sol de calcaires et de grès orientés d'Ouest en Est (Hallet, 2019). Les principales rivières s'y écoulant sont la Meuse, l'Ourthe, la Lesse et le Houyoux (Castiau et al., 2010). Les terres y sont globalement fertiles, surtout sur les dépôts limoneux datant de l'ancienne glaciation, et permettent la culture de céréales, de tubercules et autres oléagineux (Ledent et al., 1988). Les sommets des crêtes sont secs et pauvres. C'est sur les versants peu pentus que les grandes cultures prennent place tandis que les prairies sont implantées dans les fonds de vallées plus humides. Un peu moins de la moitié de sa superficie (40%) est recouverte par des prairies (Fig. 2.6) (Defrise. D., 1995). L'agriculture majoritairement pratiquée est de type mixte, alliant une agriculture générale de culture et un élevage bovin (Ledent et al., 1988).

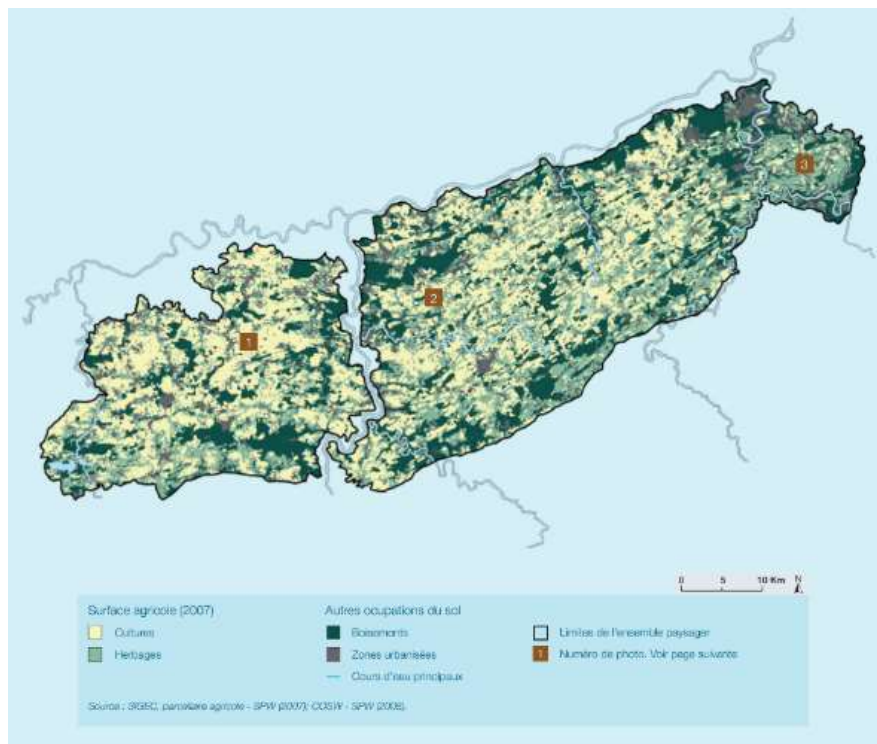


Fig. 2.6. Occupation du sol agricole, grandes cultures et prairies, dans la région du Condroz (Castiau et al., 2010).

### 2.11.2. Région/Plateau Limoneux

Cette région regroupe trois sous-régions agro-géographiques formant ainsi le plus grand territoire étudié (4058km<sup>2</sup>). Il représente près d'un quart du territoire wallon. Les trois sous-régions sont le Plateau Limoneux Hennuyer, le Plateau Limoneux Brabançon ainsi que la Hesbaye s'étendant dans toutes les provinces wallonnes à l'exception du Luxembourg (Fig.

2.5). Ces trois sous-régions ont été groupées en une seule de par leurs similitudes pédologiques et agronomiques. Les rotations classiques tels que Betterave-Froment-Orge d'hiver s'y retrouvent (Ledent et al., 1988). Elles évoluent avec l'implantation importante de la pomme de terre. L'élevage est marginal et essentiellement orienté vers la spéculation bovine (Defrise. D., 1995).

#### 2.11.2.1. La Hesbaye et le Plateau Limoneux Brabançon

Cette région est caractérisée par un sol très fertile et propice à l'agriculture intensive avec de grandes plaines dégagées et un relief assez faible variant entre 100 et 150m sauf dans la partie la plus occidentale de Plateau Brabançon où 200m sont atteints (Defrise. D., 1995). Le centre de la région se caractérise par un milieu de champs ouverts ou « Openfield » composé de vastes étendues cultivées où se noient quelques petits villages. Certaines rivières importantes comme l'Orneau, la Burdinale, le Geer ou la Dyle ajoutent du relief au plateau (De Witte et al., 2009). La fertilité du sol est liée aux dépôts de « Loess » ou limon éolien datant de la dernière glaciation. Les pratiques culturales dépendent principalement du socle rocheux sous-jacents au limon. Le drainage est déterminé par un socle plus ou moins poreux. C'est sur les socles de craies et de sables que l'eau est la mieux drainée et que les grandes cultures sont majoritairement implantées (De Witte et al., 2009).

#### 2.11.2.2. Le Plateau Limoneux Hennuyer

Les sols, principalement limoneux, sont couverts par des grandes cultures à hauteur de 70% du territoire agricole (Bruggeman et al., 2021). Les milieux habités se regroupent en gros villages dans une plaine présentant un très faible relief (entre 130 et 200m d'altitude). Le Plateau Limoneux Hennuyer est composé en partie d'une grande plaine aux altitudes les plus basses entourées par des rivières importantes : l'Escaut, la Haine et la Dendre. Les cultures dominent majoritairement par rapport à l'élevage (Fig. 2.7). Ces cultures sont principalement dédiées au commerce (Bruggeman et al., 2021).

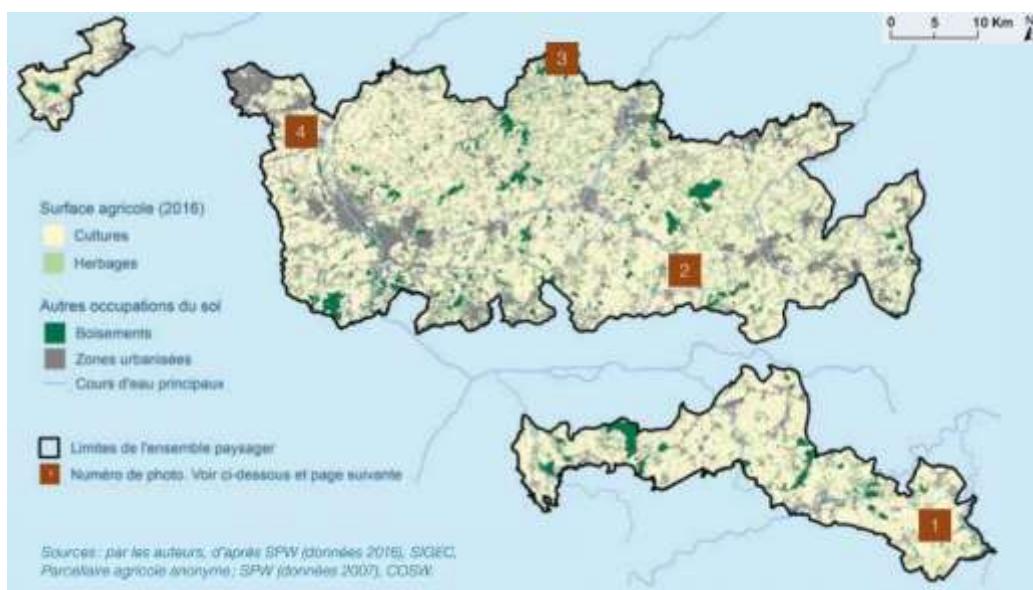


Fig.2.7. Occupation du sol agricole (grandes cultures et prairies) dans la région du Plateau Limoneux Hennuyer (Bruggeman et al., 2021).

### 3. MATERIELS ET METHODES

#### 3.1. Base de données

La comparaison des deux systèmes agricoles a nécessité la création de deux bases de données distinctes. Dans un premier temps, les bases de données sont traitées indépendamment l'une de l'autre puis sont regroupées et comparées en fin d'analyse.

La création de la première base de données concerne l'agriculture sous système de conservation. Deux sources majeures ont été utilisées afin de la mettre à jour.

La première source de données est le Groupement de Recherche sur l'Environnement et d'Etude de Nouvelles Techniques Culturelles (GREENOTEC). Cette unité de recherche a été créée pour apporter des solutions concrètes aux demandes d'agriculteurs travaillant dans la conservation des sols. Plusieurs agriculteurs sont membres du groupement. Leurs terres mises en culture sont répertoriées au sein de l'ASBL et analysées pour une meilleure compréhension de l'agriculture de conservation (GREENOTEC, 2022).

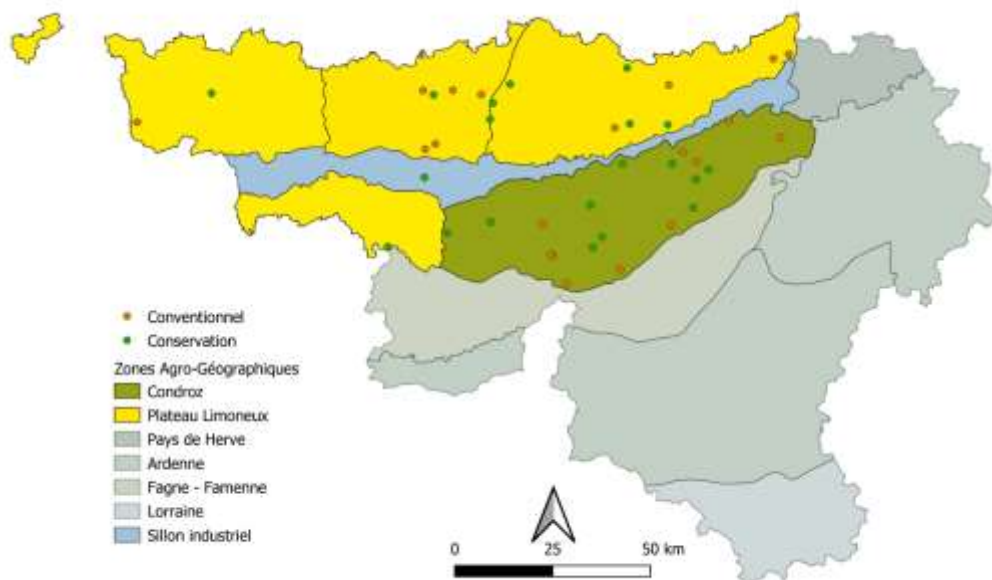
La coopération entre GREENOTEC et l'UCLouvain a permis de mettre à disposition une base de données de 10 échantillons de sols. Ces échantillons avaient été initialement prélevés pour évaluer le taux de carbone du sol de certains champs. Ils ont été réalisés entre le 24 et le 25 janvier 2018. Lors de la prise d'échantillons, les coordonnées GPS de ceux-ci ont été enregistrées pour les géo-référencer. L'utilisation des valeurs GPS permet la localisation de champs sous agriculture de conservation.

La seconde source de données utilisée provient d'un recensement plus important réalisé pour CARBIOSOL (Carbone Organique, Biomasse et activité microbienne des Sols), projet mené par l'UCLouvain et l'ULiège depuis 2013 afin de détecter des indicateurs biologiques de la qualité des sols et d'évaluer les teneurs en carbone du sol (CARBIOSOL, 2013). L'analyse en laboratoire des échantillons prélevés a permis d'obtenir différents indicateurs (Carbone, Azote, Rapport C/N, densité apparente, etc.). In fine, une cartographie détaillée de l'estimation du carbone du sol en Wallonie a été élaborée. Pour chaque parcelle, le type d'agriculture, conventionnelle, biologique ou de conservation, est connu. Des informations concernant les pratiques agricoles sont également répertoriées, comme les types de travail du sol ou de labours. Les relevés ont été effectués sur plusieurs saisons culturales. Pour disposer d'informations sur l'agriculture de conservation, il faut commencer à la quatrième campagne d'échantillonnage, CARBIOSOL 4. Cette campagne, réalisée entre 2016 et 2017, répertorie 19 échantillons, toutes pratiques confondues. Comme expliqué dans la définition de l'agriculture de conservation, le choix a été fait de regrouper les échantillons d'agriculture de conservation, d'agriculture biologique ainsi que ceux en conversion vers cette agriculture. Ce regroupement, labélisé comme étant sous agriculture de conservation, comprend 10 échantillons pour cette étude. Les coordonnées GPS sont également enregistrées pour le géoréférencement et la localisation des champs sous conservation.

Pour faciliter l'analyse statistique ultérieure, le nombre d'échantillons en agriculture conventionnelle égale celui de l'agriculture de conservation. Les échantillons en agriculture conventionnelle proviennent des campagnes de prélèvements de CARBIOSOL 1 et 2, réalisées en mai 2016. Il y avait 97 échantillons. Parmi ceux-ci, 20 échantillons ont été sélectionnés au hasard via la fonction *sample* dans le logiciel R. Malgré la sélection au hasard, chaque point

d'agriculture conventionnelle peut être pairé manuellement avec un point d'agriculture de conservation via sa proximité géographique. Une pré-sélection, avant la sélection au hasard, avait quand-même été effectuée. Seuls les points situés dans des champs cultivés chaque année (pas de prairies temporaires ou permanentes) et maximisant une bonne détection du signal satellite ont été choisis. Les points situés dans des parcelles de moins de 60m de large ont été systématiquement supprimés afin d'éviter un possible effet bordure. Ces échantillons sont géoréférencés via les coordonnées GPS (FIG. 3.1).

Chacun des points des deux bases de données (conservation et conventionnelle) a été déplacé géographiquement au centre géométrique de sa parcelle agricole respective. Cette manipulation, réalisée manuellement, point par point, dans le logiciel QGis, a modifié le géoréférencement de chacun des points. La localisation centrale permet d'éviter les possibles effets bordures qui pourraient survenir lors de l'exploitation des images satellites (cfr Chapitre télédétection).



*Fig. 3.1. Localisation des zones Agro-Géographiques de la région Wallonne ainsi que la localisation des points de mesures en agriculture Conventionnelle (Orange) et de Conservation (Vert).*

Chaque point représente une parcelle agricole, caractérisée par un mode cultural. Pour chaque champ, un relevé des cultures principales implantées par l'agriculteur est effectué. Ce relevé s'étale de 2016 à 2021. Le croisement entre les points et les cultures principales est effectué dans le logiciel QGis après téléchargement préalable du parcellaire agricole anonyme disponible sur WalOnMap (WalOnMap, 2022). Cette couche d'informations regroupe, au travers d'entités polygonales, toutes les parcelles agricoles auxquelles est attribuée une culture principale. Chaque année, l'agriculteur déclare les cultures principales mises en place sur ses parcelles. La version publique du parcellaire agricole ne permet pas d'identifier l'agriculteur. La culture principale se développe majoritairement en pleine saison (WalOnMap, 2022). La mise en place d'autres cultures telles que des cultures intermédiaires n'est pas disponible via ce parcellaire agricole anonyme.

### 3.2. Données de télédétection

Pour atteindre l'objectif principal de l'étude, la détection et la distinction des cultures intermédiaires par rapport aux cultures principales sont primordiales. Pour ce faire, l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a été utilisé. Afin d'optimiser l'acquisition de données de télédétection, 3 missions satellitaires différentes ont été regroupées. L'étude de la végétation terrestre est un des objectifs communs des trois missions. C'est ce qui a motivé leurs sélections. Cet objectif est très fortement marqué sur le premier satellite, où le choix des capteurs a directement été influencé par les courbes de réflectance de la végétation, principalement dans l'infrarouge (Xie et al., 2019).

#### 3.2.1. Missions satellitaires

Table 3.1 : Résumé des informations de bases des missions Sentinel-2, Landsat7 et Landsat8.

	<b>Sentinel-2</b>	<b>Landsat7</b>	<b>Landsat8</b>
Date de mise en orbite	Juin 2015 et Mars 2017	Avril 1999	February 2013
Taille de la scène	290km	185km/172km	185km/170km
Type de capteurs	MSI	ETM+	OLI et TIRS
Nombre de bandes	13	8	11
Résolution temporelle	2-5 jours	16 jours	16 jours
Résolution spatiale	10-60m	15-60	15-100

Les premières images proviennent de la mission Copernicus Sentinel-2. Cette mission comprend deux satellites (Sentinel 2A et 2B) voyageant sur la même orbite à 180° d'intervalle, ce qui permet une collection d'images plus fréquente (entre 2 et 5 jours) et dont la taille de scène est de 290km. Sentinel 2A et 2B ont été mis en orbite en juin 2015 et en mars 2017 respectivement (Table 3.1). Ils sont tous deux munis d'un capteur multispectral MSI (MultiSpectral Instrument) permettant la détection terrestre à l'aide de 13 bandes spectrales, allant du visible et proche infrarouge (VNIR) à l'infrarouge court (SWIR). La résolution spatiale de ces images varie entre 10 et 60m suivant la bande utilisée (Table 3.2)(ESA Sentinel-2, 2015).

La deuxième mission utilisée pour le prélèvement de données est Landsat7. C'est le plus vieux des satellites exploités étant donné qu'il a été mis en orbite en avril 1999. Contrairement à Sentinel-2, le satellite est unique, offrant une résolution temporelle de l'ordre de 16 jours (Table 3.1). Le capteur embarqué est un capteur ETM+ (Enhance Thematic Mapper) composé de 8 bandes spectrales variant du visible à l'infrarouge court et possédant une détection panchromatique (Pan)( USGS Landsat7, 1999). La taille de la scène n'est pas symétrique et possède les dimensions suivantes : 185km x 172km (Godard, 2022)(Table 3.1). La résolution spatiale des images obtenues est de 30m, sauf pour les bandes 6 (60m) et la bande panchromatique (15m)(Table 3.2)(USGS Landsat7, 1999).

La troisième et dernière mission utilisée pour le prélèvement d'images est Landsat8. Ce satellite a été lancé en février 2013 et possède une résolution temporelle identique à son prédécesseur Landsat7. La particularité de Landsat8 est l'embarcation de 2 capteurs à son bord (Table 3.1). Le premier, OLI (Operational Land Imager) donne une indication de valeurs de réflectance dans le visible et le proche infrarouge (VNIR), dans l'infrarouge court (SWIR) et dans le panchromatique (Pan) à l'aide de 9 bandes spectrales. La résolution spatiale de ce capteur est

de 30m et de 15m pour le panchromatique. Le deuxième capteur embarqué, TIRS (Thermal Infrared Sensor), est composé de 2 bandes spectrales dans l'infrarouge court (SWIR) avec une résolution spatiale de 100m (Table 3.2)(USGS Landsat8, 2013).

Les données multispectrales des 3 missions satellitaires ont été recueillies via Google Earth Engine (GEE) qui permet une centralisation et une simplicité d'acquisition des données. La période d'acquisition s'étale du 1<sup>er</sup> janvier 2016 au 20 mars 2022. Un masque pour les nuages a été performé afin d'obtenir des données provenant d'images avec au moins 85% de dégagement nuageux. Pour les données de Landsat7 et Landsat8, l'algorithme CFMask a été utilisé afin de masquer les nuages ainsi que les ombres de ces derniers via BQA (Quality Assessment Band) à une résolution de 30m. Il apparaît que cette méthode est la plus robuste pour traiter les images Landsat (Nguyen et al, 2020). Pour les données Sentinel-2, le masque pour nuages QA60 a été performé à une résolution de 60m. Celui-ci est basé sur la bande bleue (B2) et les bandes infrarouges courts (B10 et B11) pour les nuages et les cirrus (Table 3.2). La qualité de ce masque est inférieure à la qualité du masque performé pour les données Landsat (Nguyen et al, 2020).

### 3.2.2. Indice de végétation : NDVI

Etant donné que les valeurs des bandes spectrales du rouge et de l'infra-rouge, utilisées pour calculer l'indice NDVI, de Sentinel-2, Landsat7 et Landsat8 sont légèrement différentes (Table 3.2), une correction des bandes a été effectuée. Cette correction est appliquée sur les bandes de bleu, de rouge, de vert, NIR et SWIR 1-2 de Landsat7 et Landsat8 en fonction des valeurs de bandes de Sentinel2. Pour rendre compatible ces bandes un coefficient de transformation inter-capteurs a été utilisé (Nguyen et al, 2020).

Après ces corrections et cette compatibilité des bandes provenant des 3 missions satellitaires, l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a été calculé pour chaque point, durant l'entièreté de la période, via GEE (Eq. 3.1) :

$$NDVI = \frac{a_{NIR} - a_{Red}}{a_{NIR} + a_{Red}} \quad (3.1)$$

Où  $a_{NIR}$  et  $a_{Red}$  représentent respectivement les valeurs de réflectance de surfaces moyennes dans les régions spectrales de l'infrarouge et du visible (rouge). NIR correspond à la bande infrarouge et R à la bande rouge après le regroupement des bandes Landsat et Sentinel-2. L'indice NDVI permet d'étudier les propriétés photosynthétiques des plantes et des cultures via les valeurs de réflectance des feuilles et des tiges. Les valeurs de réflectance de la végétation présentant des pics notamment autour de 0.6 $\mu$ m et de 0.8 $\mu$ m, l'indice NDVI maximise cette utilisation (Gao et al., 2020). Pour que les valeurs NDVI correspondent aux cultures implantées uniquement et ne soient pas influencées par la végétation en bordure de champ et aux alentours, les points de prélèvement ont été déplacés au centre géographique des parcelles. Ceci permet d'éviter l'effet bordure, provoqué par le regroupement des valeurs de NDVI au sein d'un pixel (Hardy et al., 1999). Les séries temporelles de NDVI sont exportées de GEE sous format CSV pour l'entièreté de la période d'étude.

### 3.2.3. Balises culturelles

Afin de maximiser les résultats et la détection des cultures, chaque point de détection est pris en compte et aucun lissage des courbes n'est effectué. La détection des cultures principales et

intermédiaires se fait via le calendrier de cultures (Partie Balises chronologiques) et des valeurs seuils de NDVI. La végétation est prise en compte lorsque la courbe de NDVI dépasse le plancher de 0.3, qui est une valeur admise dans la littérature (Nowak et al., 2021 ; Prabhakara et al., 2015). Le seuil supérieur est moins facilement tranché et dépend de la culture en place. La majorité des cultures intermédiaires semble avoir des pics de NDVI entre 0.7 et 0.8 lorsque la production de biomasse est maximale (Prabhakara et al., 2015). Les courbes de NDVI sont considérées comme étant des courbes de cultures (principales ou intermédiaires) si elles présentent un accroissement des valeurs allant de 0.3 vers un pic ou un plateau au-delà du plafond de 0.7. Les variations inférieures à ces valeurs sont considérées comme nulles et ne sont pas prises en compte.

#### 3.2.4. Balises chronologiques

Le manque de résolution temporelle des premières images, datant de l'hiver 2015, rend la détection de la végétation difficile. Les probables cultures (principales ou intermédiaires) de cette période ne sont pas considérées. Le début de l'analyse graphique commence avec la culture principale implantée pour récolte en été 2016. Cette culture peut montrer un accroissement de valeur NDVI durant l'été 2015 s'il s'agit d'une culture d'hiver (ex : froment d'hiver) ou bien dans le courant du printemps 2016 (ex : maïs). Dans le premier cas, la croissance de la courbe est ininterprétable mais, dans les deux cas, le pic de NDVI marquant la maturité de la culture est visible en 2016. Il est donc possible de détecter les cultures principales de 2016, même hivernales.

Etant donné que les satellites permettent une extraction de données NDVI en permanence, la fin de l'analyse graphique a été dictée par la disponibilité du parcellaire agricole. Celui-ci s'arrête à l'année 2020, l'extraction des valeurs NDVI a été arrêtée en mars 2022. Cet arrêt tardif du prélèvement, par rapport au parcellaire agricole anonyme, est motivé par le fait qu'il est souhaité d'obtenir un nombre équivalent de périodes de cultures principales et de périodes de cultures intermédiaires. Malgré la non-connaissance de la culture principale de 2021 via le PAA, il est possible de déterminer s'il s'agit d'une culture principale ou d'une culture intermédiaire grâce à la forme de la courbe NDVI et au calendrier de cultures (German Weather Service, 2022). Cette manipulation permet une analyse de 5 cultures principales et de 5 périodes d'implantation potentielle de cultures intermédiaires.

Table 3.2: Spécifications de MSI à bord de Sentinel-2, ETM+ à bord de Landsat7 et OLI et TIRS à bord de Landsat8. Vg R-edge = bord rouge de la végétation, NIR = proche infrarouge, SWIR = infrarouge à ondes courtes.

<b>Bands</b>	<b>Sentinel-2 bands</b>	<b>Central wavelength (µm)</b>	<b>Resolution (m)</b>
Band 1	Aerosol	0.443	60
Band 2	Blue	0.490	10
Band 3	Green	0.560	10
Band 4	Red	0.665	10
Band 5	Vg R-edge	0.705	20
Band 6	Vg R-edge	0.740	20
Band 7	Vg R-edge	0.783	20
Band 8	NIR	0.842	10
Band 8A	Vg R-edge	0.865	20
Band 9	Water vapour	0.945	60
Band 10	SWIR – Cirrius	1.375	60
Band 11	SWIR	1.610	20
Band 12	SWIR	2.190	20

<b>Bands</b>	<b>Landsat 7 bands</b>	<b>Central wavelength (µm)</b>	<b>Resolution (m)</b>
Band 1	Blue	0.477	30
Band 2	Green	0.560	30
Band 3	Red	0.661	30
Band 4	NIR	0.835	30
Band 5	SWIR-1	1.648	30
Band 6	TIR	1.133	60
Band 7	SWIR-2	2.204	30
Band 8	Pan	0.705	15

<b>Bands</b>	<b>Landsat 7 bands</b>	<b>Central wavelength (µm)</b>	<b>Resolution (m)</b>
Band 1	Aerosol	0.443	30
Band 2	Blue	0.482	30
Band 3	Green	0.561	30
Band 4	Red	0.654	30
Band 5	NIR	0.865	30
Band 6	SWIR-1	1.608	30
Band 7	SWIR-2	2.200	30
Band 8	Pan	0.589	15
Band 9	Cirrius	1.373	30
Band 10	TIRS-1	1.089	100
Band 11	TIRS-2	1.200	100

### 3.3. Indicateurs

#### 3.3.1. Sur base des graphiques NDVI uniquement

##### 3.3.1.1. Nombre de cultures intermédiaires implantées

Chaque courbe de NDVI qui présente des valeurs entre 0.3 et 0.7 et qui n'est pas une culture principale est considérée comme une culture intermédiaire. La première période de détection est l'hiver 2016-2017, suivant la culture principale de 2016. La dernière période de détection

est l'hiver 2020-2021. Elle suit la culture principale implantée en 2020 et précède la culture inconnue de l'été 2021. Cinq périodes sont ainsi définies. La somme du nombre de cultures intermédiaires détectées dans ces périodes est reprise sous cet indicateur. Il varie de 0 à 5.

#### 3.3.1.2. Durée moyenne de l'implantation de la culture intermédiaire

Les courbes NDVI formant un pic au-delà de 0.7 et indiquant une culture intermédiaire sont uniquement considérées. Le début de la période d'implantation commence lorsque la courbe dépasse la valeur de 0.25, pour autant que la valeur de 0.7 soit atteinte durant la période. La fin de la détection s'arrête lorsque les valeurs de la courbe de NDVI chutent brusquement sous 0.25. La période s'étalant entre les deux valeurs seuils de 0.25, est calculée visuellement sur le graphique et est exprimée en mois.

#### 3.3.1.3. Nombre de cultures principales implantées

De la même façon que pour l'indicateur du nombre de cultures intermédiaires implantées, les pics de cultures principales sont identifiés. La différence réside dans le fait que les cultures principales sont toujours au nombre de 5. Seule l'espèce de la culture principale varie, suivant le choix de chaque agriculteur. Le recensement du nombre d'espèces différentes permet de donner une indication sur la complexité de la rotation agricole. Plus l'indicateur est grand et plus la rotation est complexe. Celui-ci varie de 1 (monoculture) à 5.

#### 3.3.1.4. Nombre d'hivers couverts par une culture (tous types)

La période « hivernale » de cet indicateur a été élargie, sur base du calendrier agricole, à une période plus large que du 21 décembre au 20 mars. Elle s'étale ainsi du 1<sup>e</sup> octobre au 30 mars et représente 6 mois complets. Le premier hiver étudié commence en octobre 2016 et se termine en mars 2017. Tandis que le dernier hiver s'étale entre octobre 2020 et mars 2021. La parcelle est considérée comme couverte en hiver si plus de 3 mois sont occupés par de la végétation. Celle-ci est détectée lorsque les valeurs de NDVI dépassent 0.25. L'indicateur varie de 0 à 5, respectivement, d'aucun hiver couvert à tous les hivers couverts par de la végétation.

### 3.3.2. Sur base des graphiques NDVI et des données annexes

#### 3.3.2.1. Restitution potentielle du carbone dans le sol

Le dernier indicateur couple les informations recueillies sur les graphiques NDVI ainsi que des données allométriques propres aux types de cultures.

Dans un premier temps, le croisement entre la détection des valeurs NDVI et le parcellaire agricole anonyme permet de déterminer les types de cultures implantées au cours des 5 dernières années. Ces graphiques permettent également de détecter la présence de cultures intermédiaires mais sans indication des espèces étant donné qu'aucun recensement n'est effectué à cet égard.

Dans un second temps, les données allométriques d'une étude du gouvernement flamand (Bodemkundige Dienst van België en UGent, 2006) sont utilisées pour obtenir une indication sur la restitution brute de carbone organique dans le sol. Ces données regroupent les différentes cultures principales en Belgique ainsi que les différentes cultures intermédiaires. Les données allométriques sont calculées via des équations déterminées par des prélèvements de terrain sur les différents résidus de cultures. Ces résidus peuvent être de nature aérienne (ce qui reste sur

le champ après récolte) ou souterraine (les racines). Les quantités brutes de matière organique incorporée au sol sont multipliées par un coefficient d'humification. Il représente la fraction de carbone qui sera réellement incorporé au sol après un an de décomposition. Souvent, la restitution de carbone provenant des racines est plus importante que celle issue des résidus aériens (Bodemkundige Dienst van België en UGent, 2006). Ces différentes données sont reprises dans la Table 3.3 et peuvent varier plus ou moins fortement d'une culture à l'autre.

Les données allométriques relatives aux différentes cultures détectées dans chaque parcelle sont sommées afin d'obtenir la restitution potentielle de carbone dans le sol. Il en va de même lorsque des cultures intermédiaires sont détectées. Dans l'étude, comme il n'y a aucune information sur le type de culture intermédiaire, une moyenne globale est utilisée. Cette moyenne est calculée sur base des relevés de l'étude flamande Bodemkundige Dienst van België en UGent (2006).

### 3.3.3. Indépendamment des graphiques NDVI

#### 3.3.3.1. Estimation de la teneur moyenne en carbone du sol

Cet indicateur est uniquement basé sur les travaux de Dvorakova et al. (2021) qui visent à produire une prédiction des teneurs en carbone du sol en Wallonie via télédétection. Celle-ci est permise grâce à l'imagerie satellitaire Sentinel-2. Une image composite, basée sur les détections printanières des sols nus, permet une prédiction de la teneur en carbone organique du sol. Cet indicateur est exprimé en  $\text{gC.Kg}^{-1}$  de sol à l'échelle de la parcelle (Dvorakova et al., 2021).

## 3.4. Analyses statistiques

Les moyennes des indicateurs ont été réalisées à différents niveaux. Dans un premier temps, les systèmes d'agriculture ont été comparés. Les données provenant des parcelles en agriculture conventionnelle sont mises en regard avec celles des parcelles en agriculture de conservation, et ce, peu importe la région. Par contre, lorsque les régions sont comparées, il n'y a pas de distinctions concernant le système agricole. Les données propres au Condroz sont comparées aux données du Plateau Limoneux, peu importe le système agricole. La base de données retenues pour ce travail étant constituée de 40 points, il en ressort que, chaque groupe (système ou région) est composé de 20 points.

Dans un deuxième temps, une étude plus fine permet de réaliser une comparaison croisée entre systèmes et régions. Ces variations entre indicateurs sont regroupées sous forme de diagramme boîte à moustache performé via le logiciel R (version 3.5.1). Les groupes formés sont : l'agriculture de Conservation dans le Plateau Limoneux, l'agriculture Conventionnelle dans le Plateau Limoneux, l'agriculture de Conservation dans le Condroz et l'agriculture Conventionnelle dans le Condroz. La base de données étant scindée en 4 groupes, leur taille est restreinte à 10 parcelles d'observation. L'évaluation des différences entre les moyennes de chaque groupe est réalisée via un test d'analyse des variances de premier ordre, ANOVA I (Koga et al., 2009). Tous les tests ANOVA sont réalisés à l'aide du logiciel Microsoft Excel.

Table 3.3. Approvisionnements directs en carbone organique, coefficients d'humification moyen et apports effectifs en carbone organique du sol selon la culture (Bodemkundige Dienst van België en UGent, 2006).

Type de cultures	Apport direct C (t OC)	Humification	Apport effectif C (t OC)
<b>Céréales</b>			
Avoine	2,24	0,31	<b>0,69</b>
Maïs grain	3,2	0,31	<b>0,99</b>
Maïs ensilage	1,25	0,34	<b>0,43</b>
Seigle	2,14	0,31	<b>0,66</b>
Epeautre	2,19	0,31	<b>0,68</b>
Triticale	2,24	0,31	<b>0,69</b>
Orge d'hiver	2,24	0,31	<b>0,69</b>
Froment d'hiver	2,08	0,31	<b>0,64</b>
Orge de printemps	1,88	0,31	<b>0,58</b>
Froment de printemps	2,08	0,31	<b>0,64</b>
<b>Racines et Tubercules</b>			
Pomme de terre	1,76	0,23	<b>0,40</b>
Betterave sucrière avec feuilles et têtes	2,3	0,22	<b>0,51</b>
Chicorée	1,4	0,3	<b>0,42</b>
<b>Grandes cultures</b>			
Haricots	0,91	0,24	<b>0,22</b>
Lin textile	0,14	0,33	<b>0,05</b>
Lin	0,13	0,35	<b>0,05</b>
Colza de printemps	1,55	0,25	<b>0,39</b>
<b>Cultures horticoles</b>			
Moyenne de 11 cultures			<b>0,39</b>
<b>Autres</b>			
Prairies temporaires	1,78	0,26	<b>0,46</b>
Luzerne	2,16	0,34	<b>0,73</b>
<b>Engrais vert / Culture intermédiaires</b>			
Ray-grass italien	2,03	0,3	<b>0,61</b>
Trèfle blanc	1,36	0,3	<b>0,41</b>
Radis fourrager	1,36	0,3	<b>0,41</b>
Ray-grass anglais	1,85	0,3	<b>0,56</b>
Phacélie	1,12	0,3	<b>0,34</b>
Moutarde jaune	1,36	0,3	<b>0,41</b>
Trèfle rouge	1,86	0,3	<b>0,56</b>
Vesce	1,1	0,3	<b>0,33</b>

## 4. RESULTATS

### 4.1. Statistique descriptive et analyse des graphiques NDVI

#### 4.1.1. Parcelle agricole en monoculture

Afin d'exploiter les graphiques obtenus et permettre la mise en place des indicateurs, une première analyse visuelle est réalisée suite à la compilation des séries temporelles de NDVI. Le cas le plus simple repéré est une parcelle présentant une même espèce cultivée année après année, il s'agit d'une monoculture. Un point d'échantillonnage présente toutes les caractéristiques d'une monoculture : 5 implantations de *maïs ensilage* sur 5 ans d'analyse et aucune culture intermédiaire (Fig. 4.1). Aux alentours du mois de juin (2016, 2017, 2018, 2019, 2020) les valeurs de NDVI connaissent une croissance importante allant de 0.3 à 0.7 et plus. Il s'agit de la germination de la plante ainsi que son développement. Entre juillet et mi-septembre, les valeurs de NDVI atteignent un plateau aux alentours de 0.8 et stagnent. Le *maïs* a atteint sa maturité et la biomasse n'augmente plus. C'est également durant cette période que les grains mûrissent. Vers la mi-septembre, les valeurs de NDVI chutent brusquement pour retomber sous le seuil de 0.3. Cette diminution brusque correspond à la récolte du *maïs*, l'ensilage. Dans le cas de l'ensilage, la totalité de la plante est récoltée, pas uniquement les grains. Seuls les chaumes de maïs restent en place, laissant une bonne partie du sol nu visible. Pour la culture de maïs, un autre mode d'exploitation existe : le *maïs grain* où seul le grain est récolté. Dans ce cas, les résidus sur le champ sont plus nombreux et les valeurs de NDVI chutent moins violemment. Il en est de même pour la restitution potentielle de carbone qui est plus importante (Table 3.3). Entre les mois de septembre et de juin, les valeurs de NDVI ne sont pas stables et oscillent entre 0.2 et 0.5. Certaines années, il est possible d'observer une augmentation plus importante de ces valeurs. Toutefois, elles restent nettement inférieures au pic des cultures principales, fixé à 0.7. Ces détections de NDVI sont liées à la reconquête du sol par une végétation « indésirable » comme de l'herbe post-*maïs*. Fin avril, les valeurs de NDVI ayant augmenté durant l'hiver chutent brusquement sous 0.2. Cette chute nette correspond au travail du sol effectué avant le nouveau semis : le labour, l'émottage et la préparation au semis. Après ce travail, la terre nue est exposée totalement, sans aucun résidu à la surface (Bertin, 2021).

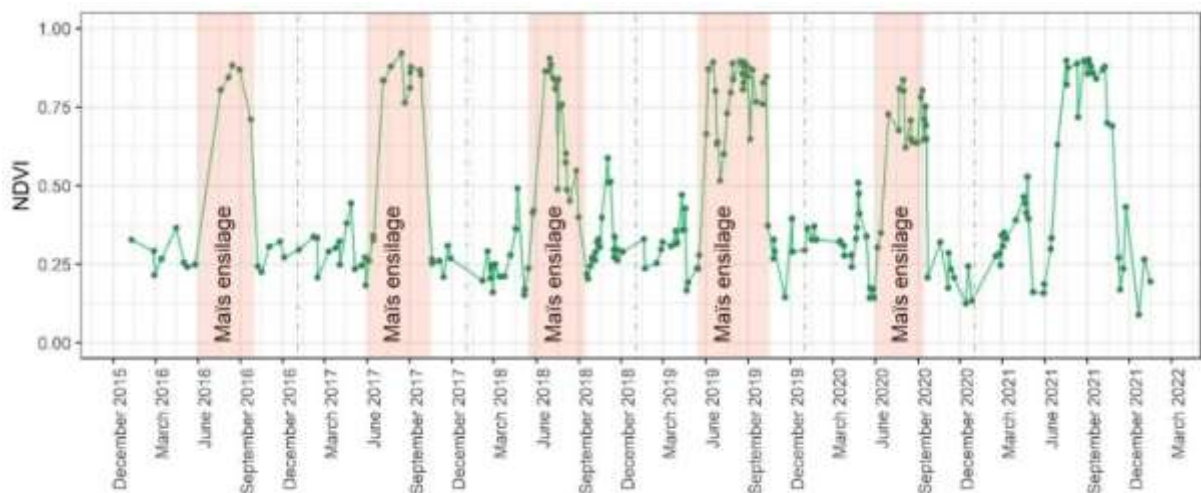


Fig. 4.1. Série temporelle de NDVI d'une parcelle en monoculture de maïs ne présentant aucune implantation de cultures intermédiaires.

#### 4.1.2. Parcelle agricole sans culture intermédiaire

Le cas de la monoculture est peu fréquent dans la région étudiée. Dans la majorité des cas, des rotations de cultures plus ou moins complexes sont mises en place. Les cas les plus simples à étudier sont les parcelles en agriculture conventionnelle sans implantation de cultures intermédiaires (Fig. 4.2). Dans le cas modélisé par la figure 4.2, la rotation de culture est assez importante. 4 cultures différentes sont implantées sur la durée de 5 ans. Le *froment d'hiver* se retrouve deux fois dans la rotation. La culture implantée en 2016 est très peu lisible sur le graphique de par le manque important de données satellitaires. Grâce à l'information obtenue via le parcellaire agricole, il est tout de même possible de d'identifier le *froment d'hiver*. Par ailleurs, il est difficile de marquer la période de récolte car seulement 3 observations ont été effectuées entre mai et août 2016. Ce manque d'observation est fréquent pour l'année 2016 car Sentinel-2B n'avait pas encore été placé en orbite. La fin de la période de culture est donc définie arbitrairement grâce au calendrier agricole, et non via la visualisation graphique des valeurs de NDVI (German Weather Service, 2022). Les cultures hivernales (*froment d'hiver*) présentent des courbes différentes. Les valeurs de NDVI croissent au-delà de 0.3 à partir du mois de novembre 2017 pour atteindre un pic aux alentours de mai 2018. La diminution des valeurs de NDVI est plus précoce (juin-juillet 2018) que pour les cultures estivales.

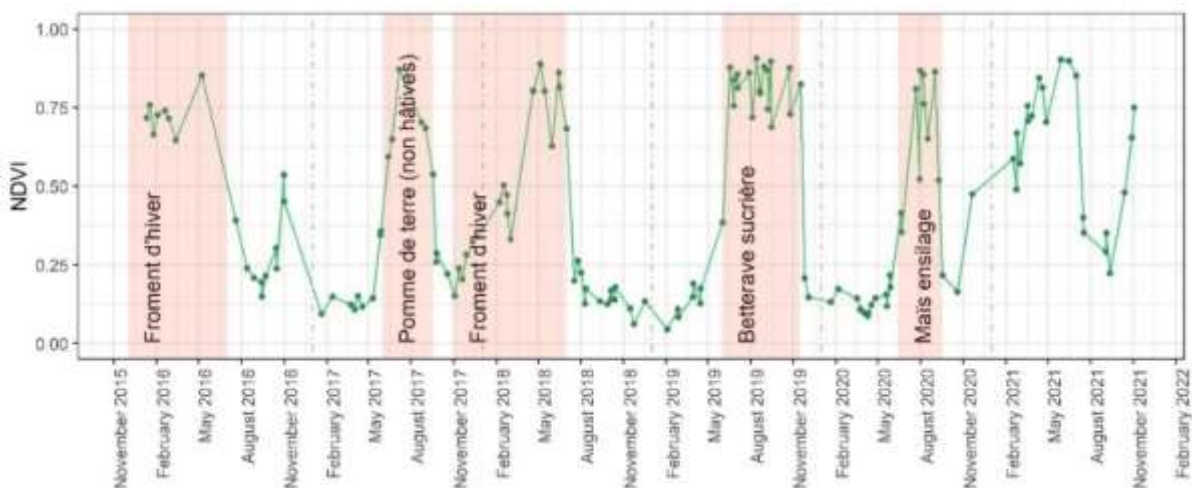


Fig. 4.2. Série temporelle de NDVI d'une parcelle en agriculture conventionnelle, présentant une rotation de plusieurs cultures sans implantation de cultures intermédiaires.

Le travail du sol n'est pas marqué par une diminution nette des valeurs NDVI juste avant l'accroissement des valeurs induit par les cultures principales. L'absence de diminution abrupte se justifie par l'absence de végétation indésirable entre les cultures principales. Les valeurs fluctuent en dessous du seuil plancher de 0.3. Un pic de NDVI est visible aux alentours de novembre 2016 (Fig. 4.2). Ce dernier n'est pas considéré comme étant provoqué par une culture intermédiaire car, malgré des valeurs de NDVI dépassant le seuil plancher de 0.3, elles n'atteignent pas plus de 0.55 et restent bien en dessous du seuil fixé à 0.7. Dans ce cas précis, la végétation est considérée comme une repousse de végétation « indésirable ».

Trois cultures estivales sont intégrées dans la rotation. Des *pommes de terre (non hâtives)* en 2017, des *betteraves sucrières* en 2019 et du *maïs ensilage* en 2020 (Fig. 4.2). Les courbes

NDVI pour ces cultures sont similaires, avec une croissance des valeurs de 0.3 à 0.7 entre les mois de mai et de juillet. La longueur d'implantation et le temps de maturation de la plante varient suivant la culture. Ils sont plus courts pour les *pommes de terre (non hâtives)* et le *maïs ensilage* (3-4 mois) et plus longs pour les *betteraves sucrières* (5-6 mois).

Sur ce graphe, il est possible de réaliser une prévision de la culture implantée en 2021 dont le PAA n'est pas encore disponible. La similitude de la courbe NDVI et la correspondance avec les dates de semis et de récolte (German Weather Service, 2022) permettent d'estimer que la culture implantée est une céréale d'hiver (Fig. 4.2). Cette prévision referme la possibilité d'implantation d'une culture intermédiaire durant l'hiver 2020/2021. En effet, lorsqu'une culture estivale est suivie par une culture d'hiver, la fenêtre culturale est trop courte pour planter une culture intermédiaire. Cette même situation est visible entre les cultures de 2017 et 2018. Lorsque des cultures hivernales sont suivies de cultures estivales, ou que deux cultures estivales se suivent, la fenêtre d'implantation est plus grande. Cette situation se retrouve à trois reprises sur le graphe (Fig. 4.2). Entre les cultures de 2016 et 2017, entre celles de 2018 et 2019 et entre celles de 2019 et 2020. Aucune fenêtre n'a été exploitée par la mise en place d'une culture intermédiaire.

#### 4.1.3. Parcelle agricole avec implantation de cultures intermédiaires

La dernière série temporelle de NDVI détaillée est un cas plus complexe présentant une multitude de pics et de variations dans les valeurs de NDVI (Fig. 4.3). La rotation est moins complexe et présente trois cultures principales différentes. Le *froment d'hiver* est implanté une année sur deux. Il se retrouve à trois reprises sur le graphe (2016, 2018, 2020). Les deux autres cultures sont des cultures estivales. La *pomme de terre (non hâtive)* en 2017 et la *chicorée à inuline* en 2019. Lorsqu'une culture estivale est suivie par une culture d'hiver, aucune fenêtre d'implantation de culture intermédiaire n'est disponible. C'est visible entre les cultures de 2017 et 2018 et celles de 2019 et 2020. La prévision de la culture implantée en 2021, via la courbe NDVI et les dates de semis et de récolte (German Weather Service, 2022), permet de déceler la présence d'une fenêtre pour planter une culture intermédiaire, car il s'agit très probablement d'une culture estivale. En plus de cette dernière, deux autres fenêtres sont créées, lors des hivers 2016 et 2018. Durant les 3 hivers, une augmentation des valeurs de NDVI dépassant les seuils de 0.3 et de 0.7 sont visibles. Ces pics de NDVI induisent la présence de cultures intermédiaires. La fin des différents pics (décembre 2016, décembre 2018 et janvier 2021) est abrupte et marque la destruction de des cultures intermédiaires. Ces cultures à forte production de biomasse sont fauchées ou broyées puis enfouies lors du labour du sol (Bertin, 2021). Le labour implique une mise à nu du sol, provoquant la chute brutale des valeurs NDVI. Il est plus complexe d'analyser l'implantation de cultures intermédiaires par rapport aux cultures principales vu le manque de données satellitaires disponibles en hiver. Pour des durées d'implantation similaires, les cultures principales de *pomme de terres (non hâtives)* en 2017 et de *chivorée à inuline* en 2019 présentent des pics de NDVI composés respectivement de 16 et 22 observations. A contrario, les cultures intermédiaires de l'hiver 2016 et 2020 sont composées respectivement de 6 et 10 observations (Fig. 4.3).

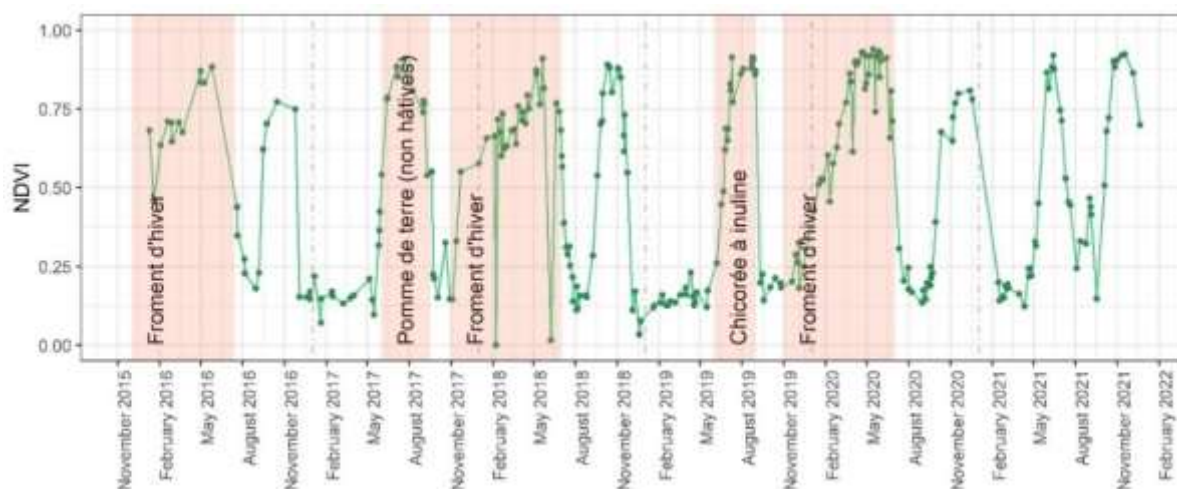


Fig. 4.3. Série temporelle de NDVI d'une parcelle en agriculture de conservation, présentant une rotation de plusieurs cultures avec implantation de cultures intermédiaires ( $n=3$ ).

## 4.2. Analyse statistique ANOVA I

Les tests ANOVA performés pour étudier chaque indicateur ont été réalisés avec des seuils de significativité très larges (70%,  $P \leq 0.3$ ) afin de mettre en avant les différences, même faibles, pouvant exister entre les groupes (Table 4.1.1 et Table 4.1.2). L'abaissement des seuils de significativité est justifié par le peu d'observations constituant les différents groupes. Les différents indicateurs calculés pour chacun des groupes sont présentés sous forme de boîtes à moustache. (Fig. 4.4).

Table 4.1.1. Résultats des tests ANOVA au niveau régional et systémique des différents indicateurs.  $R$  = Région,  $S$  = Système. Seuil de significativité :  $P \leq 0.3 = \circ$ ;  $P \leq 0.2 = \circ\circ$ ;  $P \leq 0.1 = \circ\circ\circ$ ;  $P \leq 0.05 = *$ ;  $P \leq 0.01 = **$ ;  $P \leq 0.001 = ***$ ;  $ns$  = non significatif.

	<b>R</b>	<b>S</b>
Nombre de cultures intermédiaires implantées	$\circ\circ\circ$	ns
Durée moyenne de l'implantation de la culture intermédiaire	$\circ$	*
Nombre de cultures principales implantées	$\circ\circ\circ$	*
Nombre d'hivers couverts par une culture	ns	ns
Restitution potentielle du carbone dans le sol	$\circ\circ\circ$	ns
Estimation de la teneur moyenne en carbone du sol	**	ns

Table 4.1.2. Résultats des tests ANOVA sur les différents indicateurs. R = Région, S = Système, Cv = Système conventionnel, Cs = Système de conservation, Rl = Région Limoneuse et Rc = Région du Condroz. Seuil de significativité :  $P \leq 0.3 = \circ$ ;  $P \leq 0.2 = \circ\circ$ ;  $P \leq 0.1 = \circ\circ\circ$ ;  $P \leq 0.05 = *$ ;  $P \leq 0.01 = **$ ;  $P \leq 0.001 = ***$ ; ns = non significatif.

	R x Cv	R x Cs	S x Rl	S x Rc
Nombre de cultures intermédiaires implantées	°°°	ns	ns	°
Durée moyenne de l'implantation de la culture intermédiaire	ns	°	*	°
Nombre de cultures principales implantées	°°	°	°°	*
Nombre d'hivers couverts par une culture	ns	°°	ns	ns
Restitution potentielle du carbone dans le sol	ns	°°°	ns	°
Estimation de la teneur moyenne en carbone du sol	***	ns	°°°	ns

#### 4.2.1. Nombre de cultures intermédiaires implantées

Le nombre d'implantations de cultures intermédiaires varie entre 0 et 4. Le nombre de fenêtres maximum étant de 5, aucun échantillon ne montre une implantation maximale. Des différences régionales sont marquées par les résultats de l'ANOVA. Le nombre en région Limoneuse (2.3 implantations, sd: 0.9) est supérieur à celui du Condroz (1.8 implantations, sd: 0.8), peu importe le système d'agriculture étudié ( $P \leq 0.1$ ).

Il en va de même lorsque la région Limoneuse (2.3 implantations, sd: 0.7) est comparée au Condroz (1.6 implantations, sd: 0.8) au sein de l'agriculture conventionnelle ( $P \leq 0.1$ ). Une très faible différence ( $P \leq 0.3$ ) est observée entre le système conventionnel (1.6 implantations, sd: 0.84) et le système de conservation (2 implantations, sd: 0.67) dans la région du Condroz.

#### 4.2.2. Durée moyenne de l'implantation de la culture intermédiaire

Les résultats d'ANOVA montrent des différences importantes au niveau des durées moyennes d'implantation de cultures intermédiaires. Au niveau systémique, une différence significative ( $P \leq 0.05$ ) est constatée entre le système conventionnel (4.4 mois, sd: 1.5) et de conservation (5.5 mois, sd: 1.4) peu importe la région étudiée. Au niveau régional, le Plateau Limoneux (5.2 mois, sd: 1.4) est supérieur ( $P \leq 0.3$ ) au Condroz (4.7 mois, sd: 1.6), peu importe le système.

Une différence significative ( $P \leq 0.05$ ) est marquée entre les deux systèmes (Conventionnel : 4.4 mois, sd: 1.15 et Conservation : 5.5 mois, sd: 1.45) dans la région Limoneuse. Cette différence est moins marquée ( $P \leq 0.25$ ) dans la région du Condroz (Conventionnel : 4.2 mois, sd: 1.8 et Conservation : 5.1 mois, sd: 1.3). Une différence ( $P \leq 0.3$ ) est constatée entre les deux régions (Limoneux : 5.9 mois, sd: 1.45 et Condroz : 5.1 mois, sd: 1.3) dans le système d'agriculture de conservation.

#### 4.2.3. Nombre de culture principales implantées

De nombreuses différences sont observées grâce aux résultats d'ANOVA concernant les rotations des cultures principales. Des différences systémiques significatives ( $P \leq 0.05$ ) sont visibles entre le système conventionnel (3.3 cultures, sd: 1.0) et le système de conservation (4 cultures, sd: 0.6), peu importe la région. Des différences régionales sont marquées ( $P \leq 0.1$ )

entre la région Limoneuse (3.9 cultures, sd: 0.8) et la région du Condroz (3.4 cultures, sd: 0.9), peu importe le système.

Une différence ( $P \leq 0.05$ ) est remarquée au sein de la région du Condroz (Conventionnel : 3 cultures, sd: 1.1 et Conservation : 3.9 cultures, sd: 0.6). La différence est plus faiblement marquée ( $P \leq 0.2$ ) pour le Plateau Limoneux (Conventionnel : 3.7 cultures, sd: 0.8 et Conservation : 4.2 cultures, sd: 0.6). Au sein du système conventionnel, des différences ( $P \leq 0.2$ ) sont observées (Limoneux : 3.7 cultures, sd: 0.8 et Condroz : 3 cultures, sd: 1.0). Il en va de même pour le système de conservation ( $P \leq 0.3$ ) (Limoneux : 4.2 cultures, sd: 0.6 et Condroz : 3.9 cultures, sd: 0.6).

#### 4.2.4. Nombre d'hivers couverts par une culture (tous types)

Les tests ANOVA sortent un seul résultat pour la couverture hivernale. Dans le système de Conservation, la région Limoneuse (4.4 hivers couverts, sd: 0.7) est inférieure ( $P \leq 0.3$ ) à la région du Condroz (4.8 hivers sd: 0.4).

#### 4.2.5. Restitution potentielle du carbone dans le sol

Concernant la restitution potentielle de carbone dans le sol, les résultats d'ANOVA montrent une différence significative ( $P \leq 0.1$ ) entre le Plateau Limoneux (3.76 tC.ha<sup>-1</sup>, sd: 0.4) et le Condroz (3.54 tC.ha<sup>-1</sup>, sd: 0.4), peu importe le système. Une faible différence ( $P \leq 0.3$ ) entre le système conventionnel (3.63 tC.ha<sup>-1</sup>, sd: 0.5) et le système de conservation (3.44 tC.ha<sup>-1</sup>, sd: 0.5) est observée.

Une différence significative est observée ( $P \leq 0.1$ ) au sein du système de conservation (Limoneux : 3.81 tC.ha<sup>-1</sup>, sd: 0.5 et Condroz : 3.44 tC.ha<sup>-1</sup>, sd: 0.5).

#### 4.2.6. Estimation de la teneur moyenne en carbone du sol

Les différences les plus significatives ont été démontrées pour cet indicateur par les résultats d'ANOVA.

Les résultats statistiques montrent également une différence significative ( $P \leq 0.01$ ) entre la région Limoneuse (12.1 gC.kg<sup>-1</sup>, sd: 2.4) qui est plus faible que la région du Condroz (14.4 gC.kg<sup>-1</sup>, sd : 2.3) peu importe le système.

Au sein de la région Limoneuse, le système conventionnel, (11.2 gC.kg<sup>-1</sup>, sd: 0.9) est plus faible ( $P \leq 0.1$ ) que celui de conservation (13 gC.kg<sup>-1</sup>, sd: 2.9). Une différence très significative ( $P \leq 0.001$ ) entre la région Limoneuse (11.2 gC.kg<sup>-1</sup>, sd: 0.9) et le Condroz (14.6 gC.kg<sup>-1</sup>, sd: 2.4) dans le système d'agriculture conventionnelle est mise en avant.

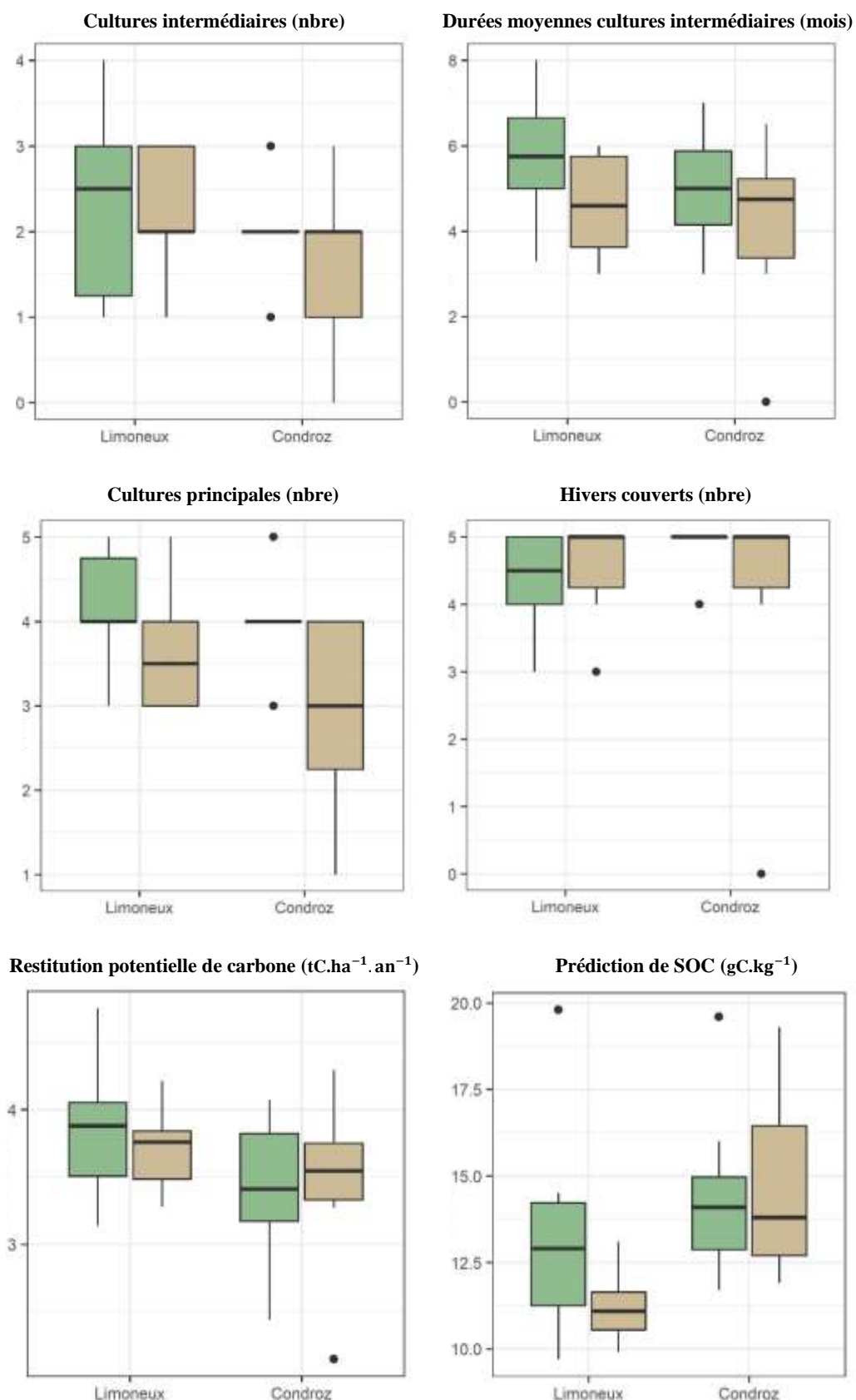


Fig. 4.4. Tableau des différents indicateurs. De droite à gauche et de haut en bas, Nombre de cultures intermédiaires implantées, Durée moyenne de l'implantation de la culture intermédiaire (mois), Nombre de cultures principales implantées, Nombre d'hivers couverts par une culture (tous types), Restitution potentielle du carbone dans le sol (tC.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>), Estimation de la teneur moyenne en carbone du sol (gC.kg<sup>-1</sup>). Chaque groupe est constitué de 10 échantillons. L'agriculture de conservation est représentée en vert et l'agriculture conventionnelle en brun pour les deux régions (Plateau Limoneux et Condroz). La barre horizontale représente la médiane de chaque groupe, les points isolés sont considérés comme outlier et les barres verticales représentent l'écart-type (sd).

## 5. DISCUSSION

### 5.1. Premier pilier de l'agriculture de conservation : réduction massive du travail du sol

Souvent l'agriculture de conservation est résumée au premier pilier la caractérisant, c'est-à-dire, à la réduction massive du travail mécanique du sol. Ce mémoire traite peu cet élément pourtant perçu comme essentiel par beaucoup (Chenu et al., 2019). Afin d'étudier la détection des cultures intermédiaires dans les parcelles agricoles, l'indice NDVI a été utilisé. Lorsque le sol est cultivé ou laissé en jachère et que la végétation domine, l'effet d'un labour complet peut être détecté via l'étude du NDVI (Voormansik et al., 2020). Si le sol est couvert de végétation « indésirable » ou qui pousse entre les périodes de cultures principales, le seuil de 0.3 sera atteint. S'il est couvert d'une culture (principale ou intermédiaire) implantée par l'agriculteur, le seuil de 0.7 sera atteint. Dans tous les cas, lors du labour de ces parcelles végétalisées, l'indice NDVI chute brusquement sous la valeur seuil de 0.3. Sur la Fig. 5.1 l'effet du labour est détecté très nettement. Les valeurs NDVI de la végétation « indésirable » dépassent 0.5 et chutent brusquement sous le seuil de 0.3 juste avant l'implantation de la culture principale, en place entre juin et novembre 2021. La chute correspond au labour et à la mise à nu du sol. Un effet similaire est observé lors de l'enfouissement des cultures intermédiaires (Décembre 2019, Fig. 5.2) avant l'implantation d'une culture principale.

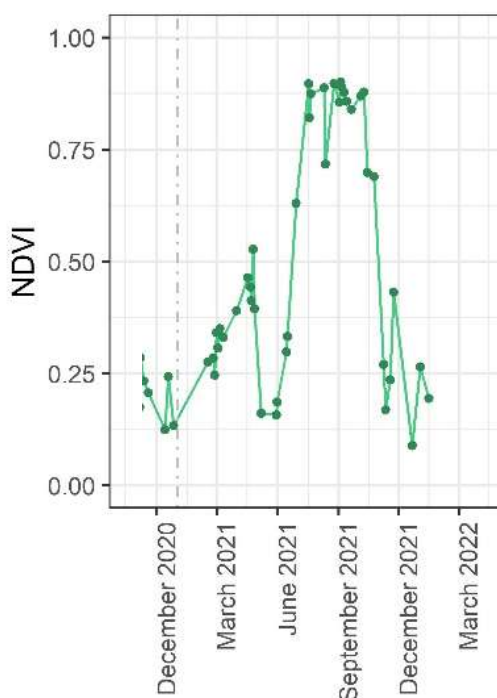


Fig. 5.1. Série temporelle de NDVI montrant l'effet du labour sur une parcelle avec une culture principale en 2021 précédée par de la végétation « indésirable ».

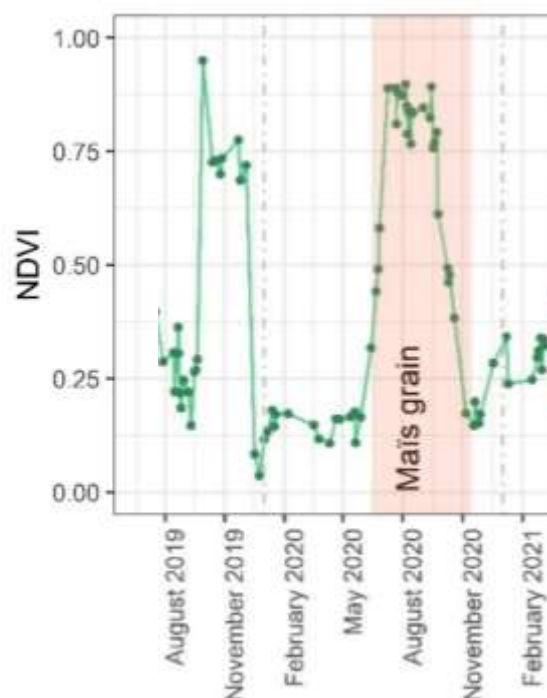


Fig. 5.2. Série temporelle de NDVI montrant l'effet du labour sur une parcelle avec une culture principale en 2020 précédée d'une culture intermédiaire

Les effets du travail du sol ne sont pas toujours visibles lorsque la végétation est très faible avant le semis de la culture principale. En effet, l'indice NDVI est très adapté à la végétation dès lors qu'il est basé sur les valeurs de réflectance des végétaux dans les longueurs d'ondes du visible et de l'infrarouge (Xie et al., 2019). Il apparaît que le sol possède des caractéristiques intrinsèques différentes ne permettant pas d'être catégorisé via le même indice. D'autres indices plus adaptés pourraient être utilisés mais s'insèrent mal dans ce travail. C'est le cas du BSI (Bare Soil Index), NDBaI (Normalized Difference Bare Soil Index), DBSI (Dry Bare Soil Index) ou encore MBI (Modified Bare Soil Index)(Nguyen et al., 2021). Le manque de disponibilité d'images durant les périodes hivernales rend l'analyse plus complexe. Certains travaux mécaniques alternatifs sont moins contraignants, c'est le cas notamment de l'usage du chisel. Ces pratiques limitent l'érosion mais le bénéfice pour le SOC est non significatif (Chenu et al., 2019). Il est difficile de détecter ce genre de pratiques et ainsi créer un indicateur concernant le stock de SOC.

## 5.2. Les indicateurs caractéristiques du stockage de carbone du sol

Avant de discuter des résultats obtenus pour chaque indicateur, il est important de garder à l'esprit qu'un nombre relativement restreint d'observations a été utilisé pour cette étude. Plusieurs analyses statistiques ont été effectuées sur un ensemble de 40 parcelles agricoles. Les premières analyses distinguent deux fois les 40 échantillons en 2 groupes de 20 parcelles, pour la comparaison sectorielle et la comparaison régionale (Tables 4.1.1). Les 4 analyses suivantes sont réalisées au sein d'un groupe de 20 parcelles. C'est le cas de l'analyse sectorielle au sein d'une région spécifique et de l'analyse régionale au sein des secteurs conventionnels et de conservation des sols (Table 4.1.2). Dans ces 4 analyses, deux groupes de 10 parcelles sont formés. La fiabilité des résultats obtenus est réduite car les moyennes seront très sensibles aux valeurs extrêmes. Certains auteurs soulignent l'importance de ne pas se limiter à la seule significativité statistique qui est dégagée par les tests ANOVA, mais de prendre en compte la significativité « scientifique » qui se cache derrière les valeurs (Champely et Verdot, 2007). Dans ce travail, la significativité scientifique des résultats d'analyses au sein d'un secteur ou au sein d'une région peut servir de base à discussion. Le nombre d'échantillons a été fortement limité par la contrainte des comparaisons entre système et entre région. Elles ont nécessité une sélection détaillée des différents échantillons afin de respecter les hypothèses initialement posées.

Le facteur limitant était le repérage de points représentant le système agricole de conservation des sols au sein du panel des techniques agricoles présentes en Wallonie. Ce système, non labélisé est difficile à estimer en termes de pourcentage d'occupation des sols. Il n'y a pas de cahier des charges strict à remplir afin de s'inscrire officiellement dans ce système (GREENOTEC, 2022). L'agriculture de conservation des sols met en avant des principes de gestion et fait appel au bon sens des agriculteurs soucieux de séquestrer du carbone dans leurs sols. Il est nécessaire que des guides comme proposé pour le Carbon Farming au niveau Européen soient mis en place et respectés afin de labéliser et monétiser les effets de ce genre de pratiques agricoles (COWI, 2021). Le secteur est toujours marginal en Wallonie (GREENOTEC, 2022). Il est donc difficile de produire une base de données étoffée et géographiquement aléatoire. Les parcelles se trouvant à proximité l'une de l'autre risquent d'être gérées par un même agriculteur. Au sein de la même exploitation, il est attendu que le

traitement réservé aux différentes parcelles soit similaire. Ceci peut induire un biais dans les résultats en réduisant les variabilités d'exploitation. C'est pourquoi, la diversité géographique a été favorisée dans ce mémoire.

Le manque de disponibilité des parcelles en agriculture de conservation des sols a été comblé par l'ajout de quelques parcelles en agriculture biologique. Malgré des caractéristiques similaires, des différences de traitement peuvent apparaître. La destruction des cultures intermédiaires est un exemple. L'agriculture biologique ne peut utiliser de produits phytosanitaires, alors que certaines exploitations en agriculture de conservation détruisent ces cultures chimiquement, via le glyphosate, pour éviter le travail du sol (Arrouays et al., 2002). Ces deux pratiques semblent s'opposer mais leurs effets sur les stocks de SOC sont inconnus (Arrouays et al., 2002). A cause de cela, le regroupement sous un même label de ces deux modes de productions peut engendrer une variabilité supplémentaire dans les résultats et biaiser les conclusions qui en découlent.

Les indicateurs définis et étudiés dans ce travail ne jouent pas tous un rôle dans le calcul final de restitution potentielle de carbone dans le sol. Mais ces indicateurs permettent d'expliquer de possibles effets cachés et de distinguer des différences régionales ou sectorielles. Tous les indicateurs s'influencent les uns les autres et une discussion globale pourrait être envisagée. Mais pour plus de clarté, une analyse séparée des 6 indicateurs est privilégiée.

### 5.3. Nombre d'hivers couverts par une culture (tous types)

L'indicateur concernant la couverture végétale en hiver permet une classification des parcelles selon les pratiques favorables à la lutte contre l'érosion durant les périodes de moindre activité agricole. Aucune distinction n'a été réalisée concernant le type de cultures mises en place. En effet, que ce soit l'implantation d'une culture principale hivernale ou d'une culture intermédiaire, l'intérêt est placé uniquement sur la couverture ou non du sol. Il aurait pu être intéressant de faire une distinction culturelle car les types de cultures mises en place ont toutes des croissances différentes. Il peut en résulter une production de biomasse plus importante qui permet une protection contre l'érosion du sol plus efficace (Poeplau et Don, 2015). La figure 5.3. montre la différence entre l'accroissement de biomasse végétale modélisé par l'indice NDVI d'une céréale d'hiver et d'une culture intermédiaire. Il faut près de 4 mois au froment d'hiver pour passer du seuil de 0.3 au seuil de 0.7, tandis qu'il n'en faut qu'un seul mois pour la plupart des cultures intermédiaires. Par ailleurs, l'étude de l'indice NDVI au-delà du seuil de 0.7 est compliquée dès lors qu'il apparaît comme très sensible à la saturation lorsque les croissances végétales sont importantes dans un laps de temps court (Gu et al., 2013).

L'indicateur, variant de 0 (aucun hiver couvert) à 5 (tous les hivers couverts) a montré des résultats très peu satisfaisants. Seul une très faible différence de 0.4 hivers couverts ( $P \leq 0.3$ ) en faveur de la région du Condroz apparaît lorsque la comparaison est réalisée au sein du système de conservation des sols. Les autres comparaisons ne montrent rien de significatif. Il est dès lors difficile de tirer des conclusions concernant cet indicateur.

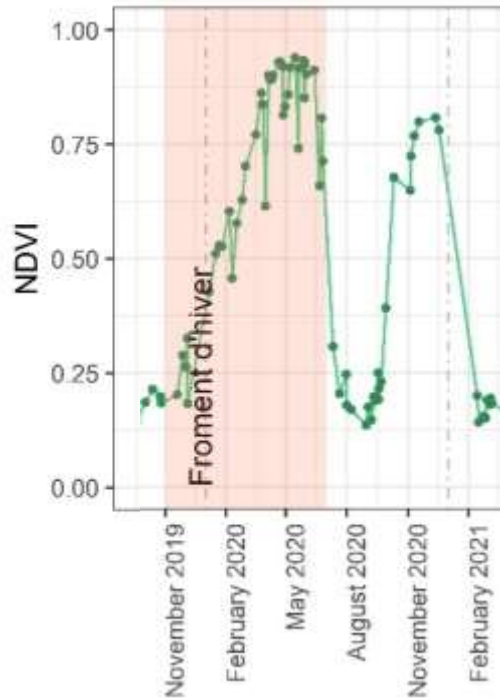


Fig. 5.3. Série temporelle de NDVI d'une parcelle montrant la différence de croissance végétale entre une culture principale hivernale (Froment d'hiver) et une culture intermédiaire.

En plus de la vitesse de croissance des végétaux, les types de cultures principales implantées jouent un rôle très important dans la limitation de l'érosion des terres. Par exemple, si une céréale d'hiver, récoltée au mois de juillet, est suivie d'une betterave sucrière, plantée entre mi-mars et mi-avril, il s'écoule presque qu'un an sans protection contre l'érosion car la betterave aura une bonne couverture à partir du mois de juin. Cela signifie qu'entre la récolte de l'année 1 et la protection du sol contre l'érosion de l'année 2, il s'est écoulé presque un an (10-11 mois)(Fig. 5.4). Si la troisième année est cultivée avec du maïs, celui-ci sera implanté en avril et ne couvrira le sol qu'à partir de juin-juillet. Entre les années 2 et 3, la terre reste nue durant 6 mois étant donné que la betterave est récoltée en novembre (Fig. 5.4). Ceci représente une différence de près de 50% d'exposition en plus pour la première période d'interculture comparée à la seconde. L'indicateur calculé ne distingue pas ces deux cas d'étude et reste égal à zéro car les mois hivernaux ne sont pas couverts. Pourtant, il est attendu que la perte de SOC soit plus importante lors de la première année d'interculture vu que la période en sol nu est plus longue (Poeplau et Don, 2015).

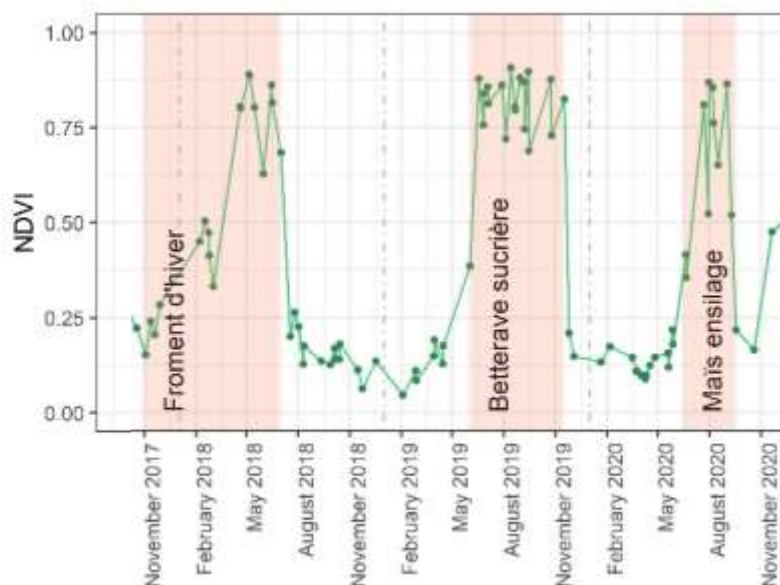


Fig. 5.4. Série temporelle de NDVI d'une parcelle montrant la différence de longueur d'interculture entre différentes cultures principales dans une rotation agricole.

Afin de mieux étudier l'effet négatif de l'érosion et donc la perte de carbone du sol y étant liée, il serait possible de remplacer cet indicateur non significatif par un indicateur égal à la somme des mois où le sol est laissé à nu sur l'ensemble des 5 ans. Aucune distinction ne serait faite par rapport aux mois de l'année. Plus la valeur de cet indicateur serait faible, plus le système irait en faveur d'une bonne conservation des sols et en défaveur de l'érosion favorisant la perte des nutriments et du carbone. La période hivernale est importante à prendre en compte quant à la protection du sol dès lors qu'il s'agit d'une période de moindre activité agricole (Bertin, 2021). Mais en été, les orages violents peuvent produire des dégâts ponctuels. Lorsque les sols sont laissés à nu, les pluies violentes peuvent former des coulées boueuses où l'érosion est démultipliée (Van Wesemaele, 2021). Il en va de même avec l'érosion éolienne, plus active dans les mois d'été. Le travail du sol rend la terre plus fine, celle-ci est desséchée par la chaleur et peut être exportée plus facilement par le vent (Bertin, 2021). Les résultats de cet indicateur pourraient se montrer intéressants pour la protection des sols au niveau régional. Des différences d'érosion entre les deux régions d'études sont marquées en défaveur du plateau Limoneux qui nécessite une attention particulière sur le sujet (Fig. 5.5). Les parcelles dont l'indicateur du nombre d'hivers couverts est actuellement faible obtiendraient également de faibles valeurs pour ce nouvel indicateur. Mais, les variations seraient induites par le type de cultures et la des cultures intermédiaires.

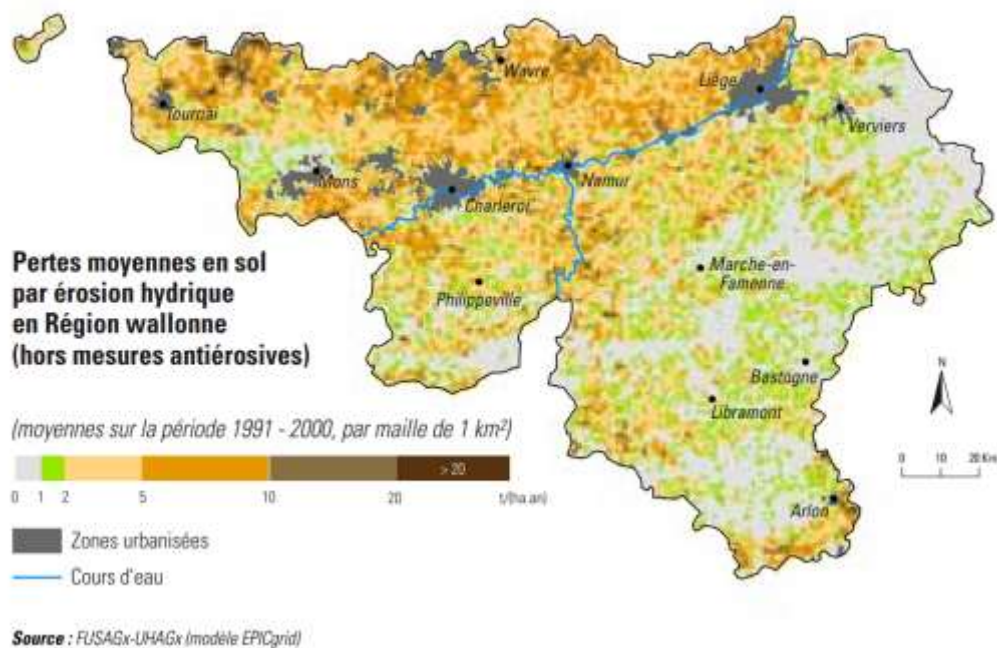


Fig. 5.5. Perte moyenne en sol par érosion hydrique en Wallonie exprimée en t de sol .ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (Environnement Wallonie, 2006).

#### 5.4. Complexité des rotations agricoles

Le nombre de cultures principales implantées est un indicateur servant de proxy pour évaluer la complexité des rotations des cultures agricoles. Les monocultures présentent la particularité d’être en dehors de toute forme de rotation puisqu’une culture unique est implantée année après année. Dans ce cas, la valeur de l’indicateur est de 1, la plus faible possible. Un seul échantillon a été reconnu comme étant en monoculture. Cette pratique reste assez rare en région wallonne (Etat Environnement, 2021). Les rotations les plus classiques sont souvent constituées de trois cultures principales (Betterave-Froment-Orge d’hiver) (Ledent et al., 1988) où l’indicateur prend une valeur égale à 3. La rotation la plus complexe dans ce cas d’étude serait de 5 cultures différentes en 5 ans d’exploitation. Sur les 40 observations, 6 ont atteint la valeur maximale.

Au niveau régional, le plateau limoneux semble plus favorable à l’implantation de rotations complexes. Les seuils de significativité statistique sont assez faibles lorsque le secteur n’est pas pris en compte ( $P \leq 0.1$ ), mais également au sein du secteur conventionnel ( $P \leq 0.2$ ) et de celui de conservation des sols ( $P \leq 0.3$ ). Il est difficile de tirer des conclusions par rapport à ces résultats, surtout que ces derniers vont à l’encontre des hypothèses émises précédemment. En effet, il était attendu que la région Limoneuse ait des valeurs de rotations assez faibles par rapport au Condroz. Dans les systèmes agricoles propices à l’élevage, les agriculteurs mettent en place des cultures pour le bétail, parfois en monoculture, ce qui peut aller à l’encontre de la mixité des cultures (Ledent et al., 1988).

Par ailleurs, les hypothèses semblent se confirmer au niveau systémique, avec des seuils de significativité nettement supérieurs à la comparaison régionale. Même si c’est moins marqué dans la région Limoneuse, l’indicateur évaluant les rotations de l’agriculture de conservation

des sols est systématiquement supérieur à celui de l'agriculture conventionnelle. Ces rotations atteignent près de 4 cultures différentes en conservation des sols pour seulement 3 dans le système conventionnel. La complexité des rotations semble théoriquement aller en faveur de la séquestration du carbone dans les sols. Elle offre également d'autres services écosystémiques liés à la biodiversité par exemple. La diversité d'espèces cultivées offre des gains au niveau de la biomasse souterraine, des racines et des microorganismes décomposeurs (Chenu et al., 2019). Par ailleurs, ces gains ne sont pas directement liés aux équations allométriques utilisées dans les calculs de restitution de carbone. Le constat va même dans le sens inverse. En effet, une rotation de 5 cultures différentes produisant une faible quantité de biomasse pourrait être mal noté en comparaison d'une monoculture de maïs grain (Bolinder et al., 2020). Parmi les 6 échantillons présentant une rotation maximale, il y en a un avec une rotation de type Betterave-Froment-Pomme de terre-Lin-Pois. Ce dernier fournit une valeur de restitution de carbone de  $2.13 \text{ tC.ha}^{-1}$ . En comparaison, une monoculture de maïs grain permet un apport plus de deux fois supérieur à la rotation complexe et atteint des valeurs de  $4.95 \text{ tC.ha}^{-1}$ . Ce déséquilibre est lié à l'unique prise en compte des données allométriques. La complexité des rotations favorisant la diversité aérienne et racinaire permettant une plus grande intégration des matières carbonées au sol est démontrée lorsque les études ne se limitent pas à l'apport annuel (Chenu et al., 2019).

### 5.5. Nombre de cultures intermédiaires implantées

La régularité d'implantation des cultures intermédiaires ne joue pas un rôle crucial dans le stockage de SOC, mais il a été constaté que la fréquence suit une corrélation linéaire avec le gain de SOC (Stockmann et al., 2013). Plus il y a d'implantations, plus la biomasse est conséquente et plus le stockage potentiel est grand. Sur les 5 fenêtres d'implantations possibles, aucune parcelle étudiée ne présente la valeur maximale de 5. Ceci est lié à la complexité de la rotation des cultures principales dans laquelle s'insère les cultures intermédiaires. Il est possible de les mettre en place lorsqu'elles suivent des cultures estivales courtes (céréales de printemps ou d'hiver) majoritairement récoltées en juillet et août, et ce peu importe la culture principale de l'année suivante (Arrouays et al., 2002). Il est plus difficile d'implanter une culture intermédiaire après des cultures estivales de longue durée, comme les tubercules (pommes de terre ou betteraves) et les maïs, récoltés tardivement entre septembre et novembre. Si ces cultures sont suivies par une culture d'hiver (céréale d'hiver, colza, etc.) la fenêtre de mise en place est nulle dès lors que la date de récolte correspond à la date de semis de l'année suivante (Arrouays et al., 2002). Par contre, si la culture qui suit est une culture de printemps (céréales de printemps, maïs, etc.) une fenêtre est ainsi créée.

Malgré des significativités statistiques mitigées ( $P \leq 0.1$ ), il apparaît que le plateau Limoneux est la région avec le plus grand nombre d'implantations. Le plateau Limoneux surpasse le Condroz de 10% (2.3 implantations pour 1.8). La tendance est plus marquée dans le système conventionnel où le Plateau Limoneux surpasse le Condroz de 14% (2.3 implantations pour 1.6). La région limoneuse est principalement une région céréalière qui produit pour l'export (Bruggeman et al., 2021). La majorité des céréales produites sont récoltées pendant les mois estivaux ce qui bénéficie à la création de fenêtres d'implantation de cultures intermédiaires. Depuis la création du plan Nitrates, les agriculteurs exploitants des terres en zones vulnérables aux Nitrates sont dans l'obligation d'implanter des CIPAN afin de limiter le lessivage (Destain et al., 2010). Mais, cette obligation n'influence pas la différence régionale car le Plateau Limoneux et le Condroz sont entièrement compris dans la zone de vulnérabilité aux nitrates (Fig. 5.6).

Le Condroz présente une agriculture plus diversifiée et tournée vers la mixité culture-élevage (Ledent et al., 1988). Le maïs est une culture prisée pour l'élevage bovin (Cox, 1997). Il est très présent dans les paysages Condrusiens. Il est récolté tard dans l'année (septembre-octobre) et ne permet pas la création de fenêtres d'implantation de cultures intermédiaires s'il est suivi d'une culture hivernale. Malgré cela, les différences entre régions restent assez faibles avec des seuils de significativité bas. Le Plateau Limoneux est réputé pour la production de betteraves et de pommes de terre qui se récoltent tardivement (De Witte et al., 2009). Ces cultures contrebalancent peut-être l'effet positif des cultures céréalières sur la création de fenêtres d'implantation de cultures intermédiaires.

Au niveau systémique, une différence de moins de 10% est observée en faveur de l'agriculture de conservation dans la région du Condroz. La très faible significativité statistique ( $P \leq 0.3$ ) permet difficilement de discuter de la pertinence de ces résultats. Malgré cela, elle va dans le sens de l'hypothèse initiale qui prévoit une implantation plus importante dans le système de conservation des sols. Pour autant, elle ne permet pas de valider cette hypothèse.

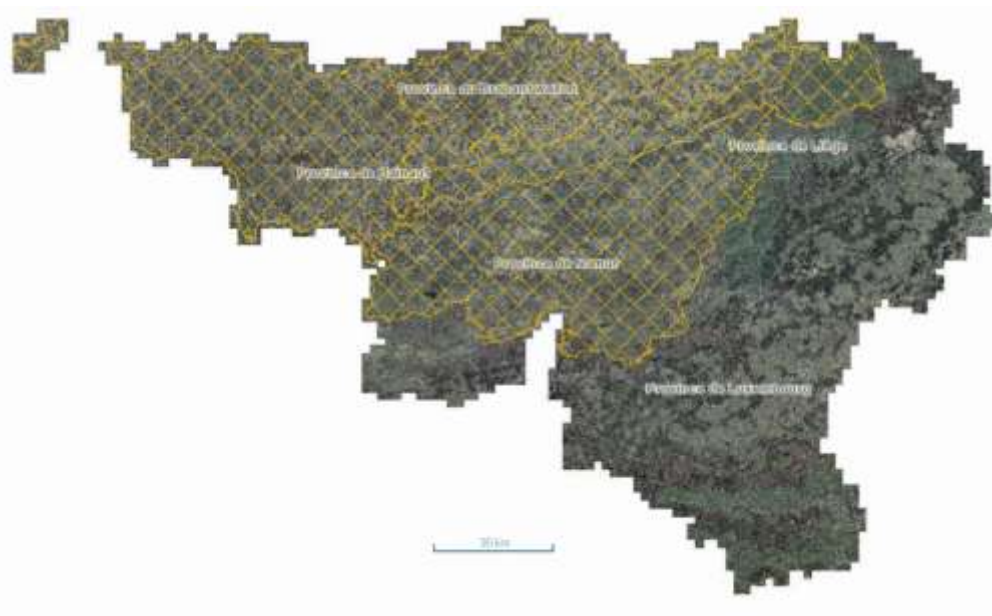


Fig. 5.6. Etendue de la zone vulnérable aux nitrates en Wallonie (WalOnMap, 2022).

## 5.6. Durée d'implantation de la culture intermédiaire

L'étude de cet indicateur montre des faibles différences entre les régions. Si on ne prend pas en compte l'effet systémique, il penche en faveur du Plateau Limoneux. C'est la même tendance dans le système de conservation des sols. Compte tenu du faible nombre d'échantillons par groupe et de la faible significativité statistique ( $P \leq 0.3$ ), il est difficile d'en discuter la pertinence.

Par ailleurs au niveau systémique, des différences significatives sont observables ( $P \leq 0.05$ ). En faisant abstraction de la région étudiée, les cultures intermédiaires restent en place 1.1 mois en plus dans le système de conservation (5.5 mois) par rapport au système conventionnel (4.4 mois). Avec un même seuil de significativité ( $P \leq 0.05$ ), la même différence est observée entre les systèmes dans la région Limoneuse. Elle est moins significative ( $P \leq 0.25$ ) dans la région

du Condroz. La différence est systématiquement marquée en faveur du système de conservation avec plus d'un mois d'implantation en plus. Il est difficile de chiffrer le gain réel de biomasse et donc de la restitution de carbone dans le sol y étant liée mais des différences doivent probablement être marquées. Or, ces différences n'ont pas été mises en évidence par les données allométriques.

La durée d'implantation des cultures intermédiaires n'a pas été prise en compte dans le calcul de restitution du carbone dans le sol. Pourtant, il s'agit probablement d'un indicateur clé. Le stockage de carbone dans le sol est surtout lié à la production de biomasse des cultures intermédiaires (Seitz et al., 2022). Dans le calcul des données allométriques, l'étude flamande Bodemkundige Dienst van België en UGent (2006) ne tient pas compte des durées d'implantation. Pourtant, la littérature est assez unanime pour dire que la biomasse produite, et donc le temps d'implantation est le facteur le plus influent de la restitution de carbone dans le sol (Bolinder et al., 2020 ; Poepflau et Don, 2015 ; Seitz et al., 2022 ; Stockmann et al., 2013). Dans le relevé des durées d'implantations, il aurait été possible de classer les cultures dans les deux classes établies par le CRA-W (CRA-W, 2022). Il distingue les cultures intermédiaires basiques installées seulement quelques mois (3 mois le plus souvent) des cultures de biomasse dépassant les 5 mois. Dans les parcelles étudiées, certaines cultures intermédiaires sont restées en place jusque 7 mois. Mais, aucune référence ne permet de donner des valeurs de restitutions différentes pour ces deux classes. Peu importe la durée d'implantation, une valeur unique de restitution de carbone a été utilisée, ce qui engendre probablement un biais important dans le calcul de la restitution globale. L'imagerie satellitaire utilisée ne permet pas de donner des informations sur l'espèce implantée sur une parcelle. Certaines espèces sont utilisées uniquement dans des cultures intermédiaires basiques (phacélie et moutarde majoritairement) alors que d'autres sont mises en place pour des cultures intermédiaires maximisant la production de biomasse. Cette production nécessite une durée de croissance plus longue (CRA-W, 2022). Sur base de la durée d'implantation détectée par imagerie satellite, il pourrait être possible d'estimer la classe des cultures mises en place. Sur base de cette estimation, les données allométriques concernant ces classes seraient utilisées pour le calcul de la restitution (Table 5.1). Ceci est réalisable s'il y a une distinction nette entre les cultures basiques et de biomasse. La mise en place d'une telle détection est à envisager.

*Table 5.1. Approvisionnements directs en carbone organique, coefficients d'humification moyen et apports effectifs en carbone organique du sol selon les types de cultures intermédiaires (Bodemkundige Dienst van België en UGent, 2006)*

<b>Type de cultures</b>	<b>Apport direct C (t OC)</b>	<b>Humification</b>	<b>Apport effectif C (t OC)</b>
<b>Engrais vert/ Culture intermédiaire</b>			
Ray-grass italien	2,03	0,3	<b>0,61</b>
Trèfle blanc	1,36	0,3	<b>0,41</b>
Radis fourrager	1,36	0,3	<b>0,41</b>
Ray-grass anglais	1,85	0,3	<b>0,56</b>
Phacélie	1,12	0,3	<b>0,34</b>
Moutarde jaune	1,36	0,3	<b>0,41</b>
Trèfle rouge	1,86	0,3	<b>0,56</b>
Vesce	1,1	0,3	<b>0,33</b>

## 5.7. Restitution potentielle du carbone dans le sol

Les restitutions potentielles de carbone sont estimées via les données allométriques allouées aux cultures principales et aux cultures intermédiaires implantées. Outre les espèces implantées, le nombre d'implantations de cultures intermédiaires peut créer des variations dans la restitution potentielle.

Lors de la comparaison des deux régions, des différences marquées apparaissent lorsque les systèmes ne sont pas distingués et au sein du système de conservation ( $P \leq 0.1$ ). Dans ces cas, la Région Limoneuse ( $3.76 \text{ tC.ha}^{-1}$ ) surpasse la région du Condroz ( $3.54 \text{ tC.ha}^{-1}$ ) en termes de restitution de carbone. Alors que les pratiques culturales sont théoriquement plus destructrices sur le Plateau Limoneux, l'hypothèse n'est pas confirmée lors de l'étude de cet indicateur. Ce chiffre est expliqué par la présence plus importante de cultures intermédiaires dans cette région.

L'hypothèse principale de confrontation entre le système conventionnel et de conservation voudrait que ce dernier soit le plus efficace en termes de protection des sols et donc de stockage de carbone. Les résultats sont très faiblement significatifs et vont à l'encontre de l'hypothèse théoriquement formulée ( $P \leq 0.3$ ). En faisant abstraction de l'effet régional, le système conventionnel surpasse de  $0.21 \text{ tC.ha}^{-1}$  l'agriculture de conservation des sols au niveau de la restitution potentielle de carbone. Lors de l'étude de l'indicateur du nombre d'implantations de cultures intermédiaires, les résultats étaient en défaveur de l'agriculture conventionnelle dans le Condroz. Cet indicateur n'influence donc pas le résultat de la restitution potentielle de carbone. La différence mesurée provient du type de cultures principales implantées.

Comme mentionné précédemment, la longueur d'implantation des cultures intermédiaires n'a pas été prise en compte dans la restitution potentielle de carbone, or cette dernière doit fortement influencer le calcul, dès lors que la biomasse produite y est liée. Il en va de même pour les matériaux organiques et l'enfouissement des résidus de cultures. Dans le calcul de la restitution de carbone, le traitement des pailles est le même peu importe la région et le type de système étudié. Il n'y a pas de différence dans les données allométriques. La majorité des pailles sont exportées afin d'être valorisées et cette pratique a été admise comme étant la norme (Pellerin et al., 2019). Par ailleurs, le retour de cette paille peut avoir lieu lors de l'épandage du fumier. Celui-ci est constitué de la paille formant la litière pour les animaux (bovins principalement) et des déjections de ces derniers. L'épandage du fumier est une façon de valoriser les pailles et les déjections animales en apportant une source de matière organique au sol (Paustian et al., 2016). Cette pratique est répandue dans les exploitations mixtes avec présence d'élevage. Les deux régions étudiées sont différentes à ce niveau. Le Condroz étant une région agricole mixte, l'élevage y est plus pratiqué (Defrise, D., 1995). Il est probable que les pailles produites dans cette région retournent in fine sur les parcelles de cultures. Or, ce retour n'est pas pris en compte lors des calculs. Le bilan devrait être encore plus positif en faveur du Condroz dès lors que le plateau Limoneux exporte ses pailles de céréales (Bruggeman et al., 2021) vers le Condroz. Dans ce cas, le retour de carbone dans les sols de cultures serait plus important. Il n'est pas possible de connaître ce chiffre en dehors d'une enquête de terrain auprès des agriculteurs. Il en va de même pour tous les apports externes tels que la fertilisation minérale, surtout azotée, qui joue un rôle important dans le cycle du carbone du sol (Paustian et al., 2016).

## 5.8. Estimation de la teneur moyenne en carbone du sol

La teneur en carbone du sol résulte de toutes les pratiques mises en place au niveau agricole. Dans l'initiative 4 pour 1000, il est prôné que les réservoirs à hautes capacités sont à privilégier. Ceux-ci sont les réservoirs qui contiennent des quantités faibles de carbone (Pellerin et al., 2019). Le stockage ne se fait pas de façon linéaire. La croissance du stockage est plus importante au début de la mise en place de pratiques stockantes dans les exploitations agricoles (Chenu et al., 2019). Dans cette logique que les réservoirs vides à haut potentiel sont à favoriser. Parmi tous les indicateurs étudiés, les résultats statistiques de l'ANOVA sont les plus significatifs lorsqu'il s'agit d'estimer la teneur moyenne en carbone du sol. La région Limoneuse est la région la moins fournie en carbone du sol ( $2.3 \text{ gC.kg}^{-1}$  de sol). Que ce soit en dehors de l'étude systémique ( $P \leq 0.01$ ) ou au sein du système conventionnel ( $P \leq 0.001$ ), les différences apparaissent comme hautement significatives en faveur de la région du Condroz avec  $3.4 \text{ gC.kg}^{-1}$  de sol. Paustian et al. (2016) soulignent l'importance du passé cultural pour expliquer certaines différences régionales. Il en va de même pour les régions agro-géographiques wallonnes. Le Condroz est plus propice à l'élevage (Ledent et al., 1988). Il est possible que les terres mises en cultures aujourd'hui aient été anciennement des prairies valorisées pour le pâturage ou la production de fourrages pour les animaux. Les prairies sont reconnues comme étant, après la forêt, le mode le plus stockant au niveau du carbone du sol (Stockmann et al., 2013). Le plateau Limoneux, plus fertile à été plus rapidement alloué à la production céréalière et aux grandes cultures (De Witte et al., 2009). Le passé cultural pénalise cette région et explique les différences marquées statistiquement avec une grande confiance.

Les résultats concernant les autres indicateurs sont régulièrement en faveur de la région Limoneuse : plus grand nombre et durée plus longue d'implantation de cultures intermédiaires, rotations des cultures principales plus importantes, plus grande restitution de carbone dans le sol. Les pratiques actuelles peuvent s'inscrire dans l'initiative 4 pour 1000 qui vise à promouvoir les réservoirs les plus faibles. Malgré cela, les pratiques mises en place peuvent être améliorées afin de maximiser le stockage SOC. La différence majeure entre les systèmes réside dans la longueur d'implantation des cultures intermédiaires. Cette longueur de couverture plus importante limite l'érosion et donc, la perte de SOC. La majorité des agriculteurs du Plateau Limoneux pourraient adopter certaines pratiques liées à l'agriculture de conservation favorisant l'implantation de couverture végétale permanente qui limite les phénomènes d'érosion.

## 6. CONCLUSION

La réduction du travail du sol, la diversification des rotations de cultures et la mise en place d'un couvert végétal permanent via l'implantation de cultures intermédiaires, représentent les trois piliers de l'agriculture de conservation des sols. Alors qu'elle est souvent réduite à son premier pilier, c'est son dernier qui a été approfondi dans ce mémoire. Les avantages des cultures intermédiaires (production de biomasse, séquestration de carbone, diminution de l'érosion, fixation de l'azote, etc.) font de ce pilier un excellent allié environnemental. Il s'intègre parfaitement à l'initiative 4 pour 1000, qui vise à augmenter les stocks mondiaux de SOC de l'ordre de 4‰ par an.

Les principaux résultats montrant une forte variabilité statistique, la comparaison des systèmes agricoles, conventionnel et de conservation des sols, ainsi que la comparaison régionale entre le Condroz et la Plateau Limoneux, permettent difficilement d'apporter une réponse claire aux questions de recherche initialement posées. Cependant, les éléments dégagés dans l'étude permettent d'apporter des réponses appropriées aux deux questions posées :

*Quelles différences de SOC est-il possible d'observer dans les schémas agricoles favorisant l'implantation de cultures intermédiaires et selon la complexité des rotations de cultures agricoles ?*

Les variations des estimations de SOC dans les sols sont bien marquées au niveau régional, elles sont statistiquement non significatives lorsque l'on compare les systèmes. Pourtant, des différences significatives sont observées entre les deux systèmes. Les chiffres confirment que l'agriculture de conservation des sols met en place plus de pratiques favorables au stockage du carbone : diversité des cultures principales et durée de l'implantation des cultures intermédiaires. Malgré ces pratiques favorables à la restitution de carbone du sol, les différences de stocks de SOC s'avèrent non significatives. Ceci va à l'encontre des hypothèses initialement posées. Ces résultats mettent donc en lumière la probable dépendance du SOC au passé cultural lointain, plutôt qu'aux récents changements de pratiques allant en faveur du stockage de carbone.

*A quel degré l'implantation de cultures intermédiaires et la restitution de carbone y étant associée sont influencées par le type de système agricole (conventionnel-conservation) et la région d'implantation (Région Limoneuse - Condroz) ?* Les différences de résultats dans les calculs de restitution potentielle de carbone sont faibles régionalement et ne présentent aucune significativité statistique à l'échelle systémique. Toutefois, l'indicateur étudiant la longueur d'implantation des cultures intermédiaires apparaît comme le facteur le plus déterminant dans la comparaison des systèmes agricoles. Les données allométriques utilisées n'intègrent pas cette notion de durée. Or, les cultures intermédiaires implantées pour une courte durée (3 mois) produisent moins de biomasse que celles qui restent en place 5 à 7 mois. Plus la production de biomasse est élevée, plus la restitution de carbone dans le sol est grande. Grâce aux données satellitaires, les durées pourraient être aisément déterminées. Sachant quelles espèces sont implantées selon la durée, des données allométriques plus spécifiques permettraient une évaluation plus précise de la restitution du carbone dans le sol.

Les différences de teneur en carbone dans les sols étudiés confirment qu'il y a moyen d'agir au niveau de chaque parcelle et que les exploitations agricoles peuvent s'inscrire dans l'initiative 4 pour 1000. Le défi est intéressant pour le Plateau Limoneux. Pour ce faire, il serait intéressant d'inclure dans l'agriculture conventionnelle certaines pratiques de l'agriculture de

conservation : la diversité des cultures principales et la durée de l'implantation des cultures intermédiaires. Afin de motiver les agriculteurs, il serait intéressant d'estimer la restitution de carbone dans le sol en évaluant la biomasse produite à l'aide des données satellitaires et de données allométriques spécifiques. La durée d'implantation de l'ensemble des cultures joue certainement un rôle dans les stocks de SOCS. Dès lors, il serait opportun de créer un indicateur lié à la durée de mise à nu des sols, sans distinction de saisons.

Une collaboration des mondes agricoles et scientifiques permettra de relever les futurs défis avec efficacité.

#### IV. BIBLIOGRAPHIE

Agriculture Biologique [WWW Document]. (2021). [https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/farming/organic-farming/organics-glance\\_fr](https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/farming/organic-farming/organics-glance_fr). Dernière consultation le 10/05/22.

Amthor, J.S. (2000) 'The McCree–de Wit–Penning de Vries–Thornley Respiration Paradigms: 30 Years Later', *Annals of Botany*, 86(1), pp. 1–20. doi:[10.1006/anbo.2000.1175](https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1175).

Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J.C., Jayet, P-A., Soussana, J-A., et al. (2002). Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Rapport. [Autre] INRA. 334 p. hal-02832401.

Bertin. P. (2021). Systèmes agraires (BIRA2109). Syllabus destiné aux étudiants de bachelier en bioingénieur et aux étudiants de master en sciences géographique de l'Université catholique de Louvain.

Bodemkundige Dienst van België en UGent. (2006). Rapport : Ontwikkelen van een expertsysteem voor het adviseren van het koolstofbeheer in de landbouwbodems. [Departement Omgeving. Afdeling Gebiedsontwikkeling, Omgevingsplannen en -projecten. Land en Bodembescherming.](#)

Bolinder, M.A., Crotty, F., Elsen, A., Frac, M., Kismányoky, T., Lipiec, J., Tits, M., Tóth, Z., Kätterer, T. (2020). The effect of crop residues, cover crops, manures and nitrogen fertilization on soil organic carbon changes in agroecosystems: a synthesis of reviews. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 25, 929–952. <https://doi.org/10.1007/s11027-020-09916-3>.

Bruggeman. D., Castiau. E., Quériat. S., Tauvel. C., Godart. M-F., Quériat. S. (2021). Atlas des paysages de Wallonie. Vol. 7. La plaine et le bas-plateau hennuyers.

CARBIOSOL [WWW Document]. (2013). <http://www.carbiosol.uliege.be/>. Dernière consultation le 10/05/22.

Castiau. E., Neuray. C., Nielsen. M., Pons. T., Vanderheyden. V., Van der Kaa. C., De Witte. C., Godart. M-F., Feltz. C. (2010). Atlas des paysages de Wallonie. Vol. 3. Le plateau condrusien.

Champely, S., Verdot, C. (2007). Que signifie la significativité statistique ? L'apport de la taille d'effet et de la puissance statistique. *Staps* 77, 49–61. <https://doi.org/10.3917/sta.077.0049>.

Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., Balesdent, J. (2019). Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research, Soil Carbon and Climate Change: the 4 per Mille Initiative* 188, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>.

Coleman, K., Jenkinson, D.S. (1996). RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil, in: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, NATO ASI Series. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 237–246. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_17).

COWI, Ecologic Institute and IEEP. (2021). Technical Guidance Handbook - setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU Report to the European Commission, DG Climate Action, under Contract No. CLIMA/C.3/ETU/2018/007. COWI, Kongens Lyngby.

Cox, W.J. (1997). Corn Silage and Grain Yield Responses to Plant Densities. *Journal of Production Agriculture* 10, 405–410. <https://doi.org/10.2134/jpa1997.0405>.

CRA-W [WWW Document]. (2022). <https://www.cra.wallonie.be/fr>. Dernière consultation le 21/06/22.

Defrise. D. (1995). Région agricoles en Région wallonne – 2 – Agriculture. D’après EEW (1995). Environnement Wallonie. <http://environnement.wallonie.be/eew2000/agri/4agr.htm>. Dernière consultation le 23/06/2022.

Destain, J., Reuter, V., Goffart, J.P. (2010). Les cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN) et engrais verts : protection de l’environnement et intérêt agronomique. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 14.

De Witte. C., Neuray. C., Nielsen. M., Pons. T., Van der Kaa. C., Godart. M-F., Feltz. C. (2009). Atlas des paysages de Wallonie. Vol. 2. Les plateaux brabançon et hesbignon.

Dictionnaire d’agroécologie [WWW Document]. (2016). <https://dicoagroecologie.fr>. Dernière consultation le 25/04/22.

Dvorakova. K., Heiden. U., Pepers. K., Staats. G., van Os. G., van Wesemael. B. (2021). Improving soil organic carbon predictions from Sentinel-2 soil composites by assessing surface conditions and uncertainties.

Environnement Wallonie [WWW Document]. (2006). <https://sol.environnement.wallonie.be/home/sols/autres-menaces/erosion.html>. Dernière consultation le 19/07/22.

ESA, Sentinel [WWW Document]. (2015). <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Dernière consultation le 08/04/22.

Etat Environnement [WWW Document]. (2021). <http://etat.environnement.wallonie.be/home/Infographies/agriculture.html> Dernière consultation le 14/07/22.

European Green Deal [WWW Document]. (2019). [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_fr](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr). Dernière consultation le 17/05/2022.

Gao, F., Anderson, M.C., Hively, W.D. (2020). Detecting Cover Crop End-Of-Season Using VEN $\mu$ S and Sentinel-2 Satellite Imagery. *Remote Sensing* 12, 3524. <https://doi.org/10.3390/rs12213524>.

German Weather Service [WWW Document]. (2022). [www.dwd.de](http://www.dwd.de). Dernière consultation le 02/05/22.

Godard, V. (2022). Fiche Mémo n°3.3 du cours de Télédétection niveau 2 : Questions missions de télédétection satellitale. Département de Géographie. Université de Paris 8.

<http://margaux.ipt.univ-paris8.fr/vgodard/enseigne/teled2/memotele/mem33tel.htm> Dernière consultation le 15/04/2022.

Goffart, D., Curnel, Y., Planchon, V., Goffart, J.-P., Defourny, P. (2021). Field-scale assessment of Belgian winter cover crops biomass based on Sentinel-2 data. *European Journal of Agronomy* 126, 126278. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126278>.

GREENOTEC, asbl [WWW Document]. (2022). <https://www.greenotec.be>. Dernière consultation le 19/07/22.

Gu, Y., Wylie, B.K., Howard, D.M., Phuyal, K.P., Ji, L. (2013). NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA. *Ecological Indicators* 30, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.041>.

Hallet, V. (2019). Géographie physique et Géomorphologie (SGOLB202). Syllabus destiné aux étudiants de bachelier en sciences géographiques et géologiques de l'Université de Namur.

Hardy, C. C., & Burgan, R. E. (1999). Evaluation of NDVI for monitoring live moisture in three vegetation types of the western US. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65, 603-610

Hively, W.D., Duiker, S., McCarty, G., Prabhakara, K. (2015). Remote sensing to monitor cover crop adoption in southeastern Pennsylvania. *Journal of Soil and Water Conservation* 70, 340–352. <https://doi.org/10.2489/jswc.70.6.340>.

Hively, W.D., Lee, S., Sadeghi, A.M., McCarty, G.W., Lamb, B.T., Soroka, A., Keppler, J., Yeo, I.-Y., Moglen, G.E. (2020). Estimating the effect of winter cover crops on nitrogen leaching using cost-share enrollment data, satellite remote sensing, and Soil and Water Assessment Tool (SWAT) modeling. *Journal of Soil and Water Conservation* 75, 362–375. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.3.362>.

Initiative “4 pour 1000” [WWW Document]. (2018). <http://4p1000.org>. Dernière consultation le 17/05/2022.

IPCC, (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Kavian, A., Kolehrouei, M., Gholami, L., Jafarian, Z., Mohammadi, M., Rodrigo-Comino, J. (2020). The Use of Straw Mulches to Mitigate Soil Erosion under Different Antecedent Soil Moistures. *Water* 12, 2518. <https://doi.org/10.3390/w12092518>.

Koga, N., Tsuji, H., (2009). Effects of reduced tillage, crop residue management and manure application practices on crop yields and soil carbon sequestration on an Andisol in northern Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* 55, 546–557. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00385.x>.

Ledent, A., Burny, Ph. (1988). *L'agriculture dans la province de Namur. Chaire d'économie rurale. Faculté des Sciences agronomiques de l'Etat, 5800 Gembloux (Belgique)*.

Montgomery, D.R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104 (33): 13268-13272. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0611508104>.

Moureaux, C. (2008). Mesure des flux de CO<sub>2</sub> et bilan carboné d'une rotation de quatre cultures.

Nguyen, C.T., Chidthaisong, A., Kieu Diem, P., Huo, L.-Z. (2021). A Modified Bare Soil Index to Identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8. Land 10, 231. <https://doi.org/10.3390/land10030231>.

Nguyen, M.D., Baez-Villanueva, O.M., Bui, D.D., Nguyen, P.T., Ribbe, L. (2020). Harmonization of Landsat and Sentinel 2 for Crop Monitoring in Drought Prone Areas: Case Studies of Ninh Thuan (Vietnam) and Bekaa (Lebanon). Remote Sensing 12, 281. <https://doi.org/10.3390/rs12020281>.

Nowak, B., Marliac, G., Michaud, A. (2021). Estimation of winter soil cover by vegetation before spring-sown crops for mainland France using multispectral satellite imagery. Environ. Res. Lett. 16, 064024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac007c>.

Palmieri, N., Forleo, M.B., Giannoccaro, G., Suardi, A. (2017). Environmental impact of cereal straw management: An on-farm assessment. Journal of Cleaner Production 142, 2950–2964. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.173>.

Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P., Smith, P. (2016). Climate-smart soils. Nature 532, 49–57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>.

Pellerin, S., Bamière, L., Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., Angers, D., Augusto, L., Balesdent, J., Doelsch, I.B., Bellassen, V., Cardinael, R., Cécillon, L., Ceschia, E., Chenu, C., Constantin, J., Darroussin, J., Delacote, P., Delame, N., Gastal, F., Gilbert, D., Graux, A.-I., Guenet, B., Houot, S., Klumpp, K., Letort, E., Litrico, I., Martin, M., Menasseri-Aubry, S., Meziere, D., Morvan, T., Mosnier, C., Roger-Estrade, J., Saint-André, L., Sierra, J., Therond, O., Viaud, V., Grateau, R., Perchec, S.L., Savini, I., Rechauchère, O. (2019). Stocker du carbone dans les sols français, quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût?

Pellerin, S., Bamière, L., Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., et al. (2020). Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? : Rapport scientifique de l'étude. Étude réalisée pour l'ADEME et le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. [Autre] INRA. pp.528. hal-03163517.

Pique, G. (2021) *Apport de la télédétection pour la simulation spatialisée des composantes du bilan carbone des cultures et des effets d'atténuation biogéochimiques et biogéophysiques des cultures intermédiaires*. phdthesis. Université Paul Sabatier - Toulouse III. Available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03325160>.

Poepplau, C., Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment 200, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>.

Poesen, J.W.A., Verstraeten, G., Soenens, R., Seynaeve, L (2001). Soil losses due to harvesting of chicory roots and sugar beet: an underrated geomorphic process? CATENA 43, 35–47. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00125-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00125-9).

Politique Agricole Commune (PAC) [WWW Document]. (2022). <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/cap-introduction/cap-future-2020-common-agricultural-policy-2023-2027/>. Dernière consultation le 22/07/22.

Prabhakara, K., Hively, W.D., McCarty, G.W. (2015). Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 39, 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.002>.

Ruyschaert, G., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G. (2006). Soil losses due to mechanized potato harvesting. *Soil and Tillage Research* 86, 52–72. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.016>.

Seitz, D., Fischer, L.M., Dechow, R., Wiesmeier, M., Don, A. (2022). The potential of cover crops to increase soil organic carbon storage in German croplands. *Plant Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05438-w>.

Singh, R., Singh, G.S. (2017). Traditional agriculture: a climate-smart approach for sustainable food production. *Energ. Ecol. Environ.* 2, 296–316. <https://doi.org/10.1007/s40974-017-0074-7>.

Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Field, D.J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A.B., Courcelles, V. de R. de, Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D.A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P.C., Chenu, C., Jastrow, J.D., Lal, R., Lehmann, J., O'Donnell, A.G., Parton, W.J., Whitehead, D., Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 164, 80–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>.

Taghizadeh-Toosi, A., Christensen, B.T., Hutchings, N.J., Vejlin, J., Kätterer, T., Glendining, M., Olesen, J.E. (2014). C-TOOL: A simple model for simulating whole-profile carbon storage in temperate agricultural soils. *Ecological Modelling* 292, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.016>.

Tal, A. (2018). Making Conventional Agriculture Environmentally Friendly: Moving beyond the Glorification of Organic Agriculture and the Demonization of Conventional Agriculture. *Sustainability* 10, 1078. <https://doi.org/10.3390/su10041078>.

Thieme, A., Yadav, S., Oddo, P.C., Fitz, J.M., McCartney, S., King, L., Keppler, J., McCarty, G.W., Hively, W.D. (2020). Using NASA Earth observations and Google Earth Engine to map winter cover crop conservation performance in the Chesapeake Bay watershed. *Remote Sensing of Environment* 248, 111943. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111943>.

UNFCCC. (1997) Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change adopted at COP3 in Kyoto, Japan, on 11 December 1997. <http://unfccc.int/resource/docs/cop3/07a01.pdf>.

USGS, landsat7 [WWW Document]. (1999). <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7> Dernière consultation le 08/04/22.

USGS, landsat8 [WWW Document]. (2013). <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> Dernière consultation le 08/04/22.

Van Wesemaele, B. (2021). Applied Geomorphology (LGEO2120). Syllabus destiné aux étudiants de master en sciences géographiques, orientation générale de l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve.

Voormansik, K., Zalite, K., Sünter, I., Tamm, T., Koppel, K., Verro, T., Brauns, A., Jakovels, D., Praks, J. (2020). Separability of Mowing and Ploughing Events on Short Temporal Baseline Sentinel-1 Coherence Time Series. *Remote Sensing* 12, 3784. <https://doi.org/10.3390/rs12223784>.

WalOnMap [WWW Document] (2022). <https://geoportail.wallonie.be/walonmap>. Dernière consultation le 04/08/22.

Xie, Q., Dash, J., Huete, A., Jiang, A., Yin, G., Ding, Y., Peng, D., Hall, C.C., Brown, L., Shi, Y., Ye, H., Dong, Y., Huang, W. (2019). Retrieval of crop biophysical parameters from Sentinel-2 remote sensing imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 80, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.019>.

UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Faculté des sciences

Place des sciences, 2 bte L6.06.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

[www.uclouvain.be](http://www.uclouvain.be)