

Faculté des bioingénieurs

Bénéfices et risques liés à l'application de biochar dans les sols agricoles de Wallonie :

Résultats d'enquêtes en ferme concernant les effets des aires de faulde sur le système sol- plante

Auteur : Jans Lorane

Promoteurs : Hardy Brieuc
Agnan Yannick

Lecteurs : Bielders Charles
Lambert Richard

Année académique 2021-2022

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : Sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas pu être possible sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes.

Je tenais à remercier avant tout Brieuc HARDY et Yannick AGNAN, mes promoteurs, d'avoir été disponibles, à l'écoute, positifs et de bons conseils, toujours avec beaucoup de bienveillance. Merci à eux pour le soutien apporté, les messages encourageants avec les oraux et les relectures du mémoire.

Je remercie également Manon Ferdinand et Frédéric Vanwindekens pour leurs conseils et prêt de matériel qui m'ont permis d'avancer dans le mémoire.

Je remercie également toute l'équipe du laboratoire SOLS de l'UCLouvain d'avoir organisé les midis mémorants qui m'ont apporté des informations essentielles quant à la réalisation du mémoire.

Un grand merci à Charles Bielders et Richard Lambert d'avoir accepté de faire partie du jury et d'avoir consacré une partie de leur temps dans la lecture de ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi aux agriculteurs qui ont accepté de répondre à mes questions et de me consacrer du temps.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis et particulièrement mes parents, pour leur présence, leur écoute, les nombreuses relectures, leurs encouragements dans la réalisation de ce mémoire, ainsi que tout au long de mes études.

Table des matières

1. Introduction	1
2. État de l'art	3
2.1. Le biochar	3
2.1.1. La pyrolyse	4
2.1.2. L'impact du biochar sur les propriétés du sol et des plantes	5
a) La CEC et la rétention de nutriments	5
b) Le pH du sol	5
c) La gestion de l'eau.....	5
L'agrégation du sol	6
d).....	6
e) Les microorganismes du sol	6
2.1.3. La dégradation et la durée de vie du biochar dans les sols	7
2.2. Le biochar sur le marché Européen	8
2.2.1. Règlement européen (CE) n°2019/1009.....	8
2.2.2. Fertilisant	11
2.2.3. Parlement de Wallonie	12
2.3. Les aires de faulde en Belgique	13
2.3.1. Teneur en MO des aires de faulde	15
2.3.2. Le lien avec le biochar	15
2.4. Le cas de la Région limoneuse et du Condroz	15
2.4.1. Région limoneuse	15
2.4.2. Région du Condroz	16
2.4.3. Teneur en MO du Condroz et de de la Région limoneuse.....	17
3. Objectifs et démarche	21
3.1. Objectifs	21
3.2. Démarche	21
4. Matériels et méthode	25
Les zones d'études.....	25
4.1.	25
4.2. Sélection des sites d'études	25
4.3. Création d'un guide d'entretien	30
4.4. Réalisation et retranscription des interviews téléphoniques.....	30
4.5. Traitement des données via NVivo	31
4.6. Réalisation de MindMap avec CmapTools.....	31
5. Résultats	33
5.1. Région du Condroz	33
5.1.1. Origine des aires de faulde	33
5.1.2. Effets sol/plante et contradictions des effets des aires de faulde vus par les agriculteurs.....	33
a) Effets en lien avec la plante vus par les agriculteurs.....	36
b) Effets en lien avec le sol vus par les agriculteurs	37
c) Synthèse	37

5.2.	Région limoneuse	39
5.2.1.	Origine des aires de faulde sur la parcelle vue par les agriculteurs	39
5.2.2.	Effets sol/plante et contradictions des effets des aires de faulde vus par les agriculteurs.....	39
a)	Effets en lien avec la plante vus par les agriculteurs.....	41
b)	Effets en lien avec le sol vus par les agriculteurs	41
c)	Synthèse	41
5.3.	Confrontation Condroz-Région limoneuse	42
5.4.	Perception des agriculteurs concernant l'utilisation du biochar en tant qu'amendement	44
5.5.	Synthèse des résultats	45
		46
6.	Discussion	49
6.1.	Les modifications des propriétés du sol par un amendement biochar provoquant les effets sur le système sol-plante.....	49
6.1.1.	Les effets liés au complexe d'échange du sol	53
a)	La capacité d'échange cationique et la rétention de nutriments.....	53
b)	Phénomène d'adsorption et de complexation.....	55
6.1.2.	Les effets liés à la structure du sol.....	57
a)	Porosité	57
b)	Résistance à la traction	59
6.1.3.	Les effets liés à la couleur du sol	59
6.1.4.	Les effets liés à la concentration en charbon de bois dans le sol en fonction du contexte agronomique	60
6.2.	Vision prospective sur l'utilisation du biochar en agriculture	61
6.2.1.	Enjeu climatique.....	61
6.2.2.	Législation.....	62
6.2.3.	Économie	64
6.2.4.	Notion de risque.....	65
6.2.5.	Aspects techniques.....	66
7.	Conclusion.....	69
8.	Bibliographie.....	71
9.	Annexes	81

Table des illustrations

Figure 1 Les améliorations possibles des propriétés et de la fertilité du sol après l'application de biochar (Ding et al., 2016)	7
Figure 2 Les dates clés du Règlement Fertilisant. BELAC est le laboratoire belge reconnu par une autorité agréée.....	11
Figure 3 Critères liés au CMC et PFC ("Règlement Fertilisant," n.d.).....	12
Figure 4 Dessin schématique des différentes étapes de la production traditionnelle de charbon de bois par la technique de la meule charbonnière (Panckoucke, 1783)	13
Figure 5 Anciennes forges inventoriées par Evrard (1956) et surface forestière cartographiée par Ferraris en 1770-1778 (Hardy, n.d.; Kervyn et al., 2014)	14
Figure 6 Évolution de la répartition des OTE dans la région limoneuse (SPW, 2022)	16
Figure 7 Évolution de la répartition des OTE dans le Condroz (SPW, 2022).....	17
Figure 8 Teneurs en carbone organique total (COT) des sols agricoles en Wallonie (2015 - 2019) (SPW, 2020)	18
Figure 9 Stock de CO ₂ dans les sols en Région Wallonne en 2000 (DGRNE, 2005).	19
Figure 10 Importance du secteur des grandes cultures dans les communes de Wallonie en 2018 en % de la valeur, exprimée en production brute standard, de la production agricole totale de la commune (SPW).....	20
Figure 11 Importance des prairies dans la SAU communale en 2018 (SPW).....	20
Figure 12 Schéma global reprenant le contexte, les objectifs et la démarche de la recherche et les résultats	23
Figure 13 Localisation du Condroz et de la Région limoneuse par rapport à la Sambre et à la Meuse.....	25
Figure 14 Schéma reprenant les différentes étapes de la méthodologie pour la sélection des sites d'étude	26
Figure 15 Localisation des zones de déboisement des anciennes forêts présentes sur la carte des mutations de la forêt wallonne depuis 1775 (Kervyn et al. 2014)	27
Figure 16 Aires de faulde via des orthophotos (SPW) Échelle 1 :10000.....	27
Figure 17 Localisation des aires de faulde présentes sur le Condroz et la Région limoneuse.	28
Figure 18 Localisation des parcelles agricoles possédant des aires de faulde	29
Figure 19 Centre des parcelles (rectangle bleu) par rapport à la localisation des aires de faulde (point rose). Les parcelles sont en verts.....	29
Figure 20 Origine des aires de faulde dans le Condroz d'après les 25 agriculteurs interrogés.	33
Figure 21 Effets des aires de faulde rapportés par les agriculteurs du Condroz accompagnés du nombre d'agriculteurs touchés par l'effet. Les cases de couleur verte indiquent les effets sur les plantes. Les cases de couleur jaune indiquent les effets sur le sol. La police de couleur rouge indique les effets négatifs. La police de couleur verte indique les effets positifs.....	35
Figure 22 Effets des aires de faulde dans le Condroz détectés par les agriculteurs en fonction du nombre d'agriculteurs. La couleur verte indique les effets sur les plantes. La couleur jaune indique les effets sur le sol. Les motifs hachurés indiquent un effet négatifs.	38
Figure 23 Origine des aires de faulde dans la Région Limoneuse d'après les 20 agriculteurs interrogés.	39
Figure 24 Effets des aires de faulde rapportés par les agriculteurs de la Région limoneuse accompagnés du nombre d'agriculteurs touchés par l'effet. Les cases de couleur verte indiquent les effets sur les plantes. Les cases de couleur jaune indiquent les effets sur le sol.	

La police de couleur rouge indique les effets négatifs. La police de couleur verte indique les effets positifs.	40
Figure 25 Effets des aires de faulde dans la Région limoneuse détectés par les agriculteurs en fonction du nombre d'agriculteurs. La couleur verte indique les effets sur les plantes. La couleur jaune indique les effets sur le sol. Les motifs hachurés indiquent un effet négatif et les couleurs unies des effets positifs.	42
Figure 26 Effets sol-plante des aires de faulde sur les Régions agricoles limoneuses et du Condroz accompagnés du nombre d'agriculteurs touchés par l'impact. Les cases de couleur verte indiquent les effets sur les plantes. Les cases de couleur jaune indiquent les effets sur le sol. La police de couleur rouge indique les effets négatifs. La police de couleur verte indique les effets positifs.....	43
Figure 27 Pourcentage d'agriculteurs concernés par les effets de la Région limoneuse et du Condroz.	44
Figure 28 Arguments pour et contre l'application du biochar des agriculteurs sur leurs parcelles ainsi que leurs questionnements à propos de celui-ci. Les cases jaunes sont les arguments liés au sol et les vertes liées aux plantes.	46
Figure 29 Synthèse de la méthode et des principaux résultats des effets du biochar sur le long terme en Région wallonne perçus par les agriculteurs. Les cases oranges indiquent la méthode. Les cases jaunes indiquent les effets sur le sol les plus fréquemment mentionnés par les agriculteurs. Les cases vertes indiquent les effets sur la plante les plus fréquemment mentionnés par les agriculteurs. Les cases bleus indiquent les thèmes repris dans une vision prospective d'une utilisation du biochar.	47
Figure 30 Zoom sur les effets les plus cités par les agriculteurs dans chacune des régions. Les zones hachurées représentent les effets négatifs.....	49
Figure 31 Hypothèses des causes des effets les plus fréquemment observés par les agriculteurs. Les effets sont dans les cases jaunes et vertes. Les cases vertes représentent les effets en lien avec la plante. Les cases jaunes représentent les effets en lien avec le sol.	51
Figure 32 Causes approfondies par la littérature menant aux effets les plus fréquemment observés par les agriculteurs. Les effets sont dans les cases jaunes et vertes. Les cases vertes représentent les effets en lien avec la plante. Les cases jaunes représentent les effets en lien avec le sol.	52
Figure 33 Application de biochar pour l'efficacité de l'utilisation des pesticides (Ding et al., 2017).....	56
Figure 34 Questionnaire d'enquête utilisé lors des interviews.....	81

Liste des abréviations

BC - Black Carbon
MO - Matière organique
C - Carbone
Ca - Calcium
CEC - Capacité d'échange cationique
Cl - Chlore
CMC - Catégorie de Matières Constitutives
CO - Carbone organique
COS - Carbone organique du sol
COT - Carbone organique total
Cu - Cuivre
EBC - European Biochar Certificate
EJP-SOIL - European Joint Programme Soil
Eq - Equivalent
Fe - Fer
H - Hydrogène
HAP - Hydrocarbure aromatique polycyclique
IBI - International Biochar Initiative
JCR - Joint Research Centre
K – Potassium
Ksat - Conductivité hydraulique à saturation
Mg - Magnésium
MOS - Matière organique du sol
N - Azote
Na - Sodium
O - Oxygène
OTE - Orientations technico-économiques
PCB – Polychlorobiphényle
PCDD/F - Polychloro-dibenzo dioxine et furane
PFC - Catégorie Fonctionnelle de Produit
REU - Réserve en eau utile
S - Soufre
SAU - Superficie agricole utilisée
SIG - Système d'information géographique
SIGEC - Système intégré de gestion et de contrôle
TEQ – Equivalent toxique
UE - Union Européenne

1. Introduction

Les variations actuelles du climat sont principalement dues à l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, augmentant la température à la surface de la Terre. Les spécialistes estiment que, au-delà d'une augmentation de la température moyenne de 2 °C, les conséquences pourraient être importantes et incertaines. Pour contrebalancer les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, il est proposé d'utiliser les terres cultivées en modifiant les pratiques agricoles pour stocker du carbone de manière durable dans les sols (GIEC, 2021). Le biochar fait partie des solutions prometteuses pour stocker du carbone dans les sols tout en maintenant, voire en améliorant, leur fertilité.

Le biochar est défini comme le produit solide issu de la pyrolyse de biomasse, voué à être utilisé comme amendement de sol. L'amendement des sols agricoles avec du biochar a le potentiel d'améliorer le piégeage du carbone dans le sol, d'accroître la productivité agronomique et d'entrer sur les futurs marchés du carbone. Le biochar a récemment été reconnu comme une matière constitutive des fertilisants dans le nouveau règlement européen (CE) n° 2019/1009 sur les fertilisants qui sera d'application à partir de juillet 2022. Les biochars répondant aux critères requis par le Règlement 2019/1009 pourront donc circuler librement dans l'Union européenne, dans un contexte où l'on pousse à la séquestration du carbone dans les sols, avec l'essor du *Carbon Farming*.

Néanmoins, dans les sols agricoles tempérés, l'effet du biochar sur la productivité des sols et des plantes reste incertain. Le biochar n'améliore pas toujours tous les services écosystémiques rendus par les sols. L'impact du biochar sur la fertilité du sol dépend de différents facteurs, tels que la matière première carbonisée et les conditions de pyrolyse (qui vont conditionner les propriétés du biochar), le taux d'application et les conditions pédo-climatiques. Le principal manque de connaissances concerne les effets à long terme, peu documentés dans la littérature.

La certification de l'UE se concentre sur les propriétés du biochar mais ne fournit pas d'instructions pour une utilisation bénéfique quant à la productivité des cultures. Dans ce contexte, il y a un besoin urgent de mieux évaluer les avantages et les risques associés à une application de biochar sur le long terme sur les sols agricoles de Wallonie et de réglementer les conditions d'application sur les sols agricoles, sous peine d'engendrer des problèmes irréversibles en raison de leur faible biodégradabilité dans les sols.

En Région wallonne, de nombreuses terres agricoles contiennent des *aires de faulde*, anciens sites de production de charbon de bois datant de la période préindustrielle. La plupart des

zones boisées de Wallonie, au XVIII^e siècle, étaient utilisées pour la production de charbon de bois, ce qui rend ces sites assez communs dans la zone qui a été déboisée pour la culture depuis cette époque. Ils ont été largement enrichis en charbon de bois au XVIII^e siècle, ce qui les rend comparables aux sols amendés avec du biochar. Ces sites représentent ainsi un cas d'étude particulièrement intéressant pour documenter les effets à long terme du biochar sur les sols agricoles de Wallonie.

La Région limoneuse et le Condroz possèdent des aires de faulde à différentes concentrations en charbon de bois. La Région limoneuse correspond à des sols déficients en matière organique (MO) en raison d'un long historique de mise en culture. Dans cette région agricole, des années de travail du sol ont dilué le charbon de bois latéralement pour atteindre des concentrations généralement inférieures à 40 t_c/ha, ce qui correspond à une application réaliste du biochar sur les sols. En Région condruzienne, de nombreuses aires de faulde se trouvent dans d'anciennes terres de prairies récemment retournées et mises en rotation pour la production de cultures fourragères. Dans cette situation, l'historique de travail du sol est plus court, et la dilution latérale du charbon de bois également. Dans de telles conditions, il est fréquent d'observer des concentrations en charbon de bois >100 t_c/ha, ce qui correspond à des concentrations en biochar « irréalistes », à une application excessive de biochar.

Cette étude a pour but d'évaluer les effets à long terme du biochar sur les parcelles agricoles en Région wallonne au niveau des effets sol-plante par le biais d'interviews d'agriculteurs en Région limoneuse et au Condroz. La Région limoneuse a été choisie afin de documenter les potentiels bénéfiques d'un amendement biochar dans une région carencée en MO, tandis que le Condroz pourrait apporter des éléments de réponse quant aux risques sous-jacents à une application excessive de biochar. Trois thèmes ont été traités au cours des interviews : (i) les effets des aires de faulde sur le sol ; (ii) les effets des aires de faulde sur les plantes cultivées ; (iii) la perception des agriculteurs quant à l'utilisation de biochar. Les principaux effets retenus lors des interviews vont être discutés et comparés à la littérature afin de confirmer ou d'infirmer les hypothèses émises par les agriculteurs pour justifier les différents effets observés.

2. État de l'art

2.1. Le biochar

Le *black carbon* (BC) ou carbone pyrogène est le résidu solide de la combustion incomplète ou le résidu de la pyrolyse de la biomasse et des combustibles fossiles. La structure chimique hautement aromatique du BC est une caractéristique qui le différencie de tout autre composé organique (si l'on exclut la MO qui a été transformée par des processus géogéniques). Le BC est un composant important du réservoir de carbone organique du sol (COS) omniprésent dans le sol qui possède de nombreuses propriétés particulières tel que son caractère hautement réfractaire. Parmi les différents types de matériaux inclus dans la définition du BC, on peut retrouver le charbon de bois ou le biochar (Hardy, n.d.). Le biochar diffère du charbon de bois par son objectif d'utilisation : le charbon de bois étant destiné à être brûlé comme combustible domestique ou industriel. Le biochar, lui, est produit intentionnellement pour être amendé au sol pour apporter des avantages environnementaux et agronomiques (Hardy, n.d.).

Le biochar est un résidu solide riche en carbone obtenu par la pyrolyse de la biomasse en l'absence d'oxygène (ou avec une quantité très limitée) à des températures de traitement normalement comprises entre 400 et 600 °C (Lehmann and Joseph, 2009). Celui-ci est produit intentionnellement pour être amendé au sol pour apporter des avantages environnementaux et agronomiques (Hardy, n.d.). Les propriétés du biochar sont régies par deux principaux facteurs : le type de matière première et les conditions de pyrolyse (Atkinson et al., 2010; Glaser et al., 2002). Le type de matière première peut influencer sa surface spécifique, sa composition chimique, sa teneur en cendres.. Le processus de pyrolyse peut modifier également la température, le temps de réaction, la vitesse de chauffe... (Jatav et al., 2021)

L'ajout de biochar aux sols est connu comme moyen de stocker du carbone et donc d'atténuer le changement climatique (Lehmann et al., 2006). En effet, en raison de leur résistance chimique intrinsèque à la biodégradation, les composés carbonés du biochar ne se dégradent pas facilement (Singh et al., 2012; Solomon et al., 2007) et peuvent rester stables dans les sols pendant des centaines d'années (Lehmann, 2007a; Singh et al., 2012; Solomon et al., 2007). Le biochar est également connu comme amendement du sol pour améliorer les performances des cultures, grâce à sa capacité à améliorer les propriétés chimiques et physiques du sol et de modifier son fonctionnement biologique (Ding et al., 2016). Son rôle dans le stockage du carbone, ainsi que ses propriétés d'amélioration de la fertilité, permettent d'espérer une augmentation de l'application du biochar sur les sols agricoles (Glaser et al., 2002).

La base scientifique de cette utilisation, alternative du charbon de bois par rapport à son utilisation traditionnelle comme combustible, a été inspirée par la découverte des sols riches en carbone de l'Amazonie centrale, connus sous le nom de « Terra Preta de Indios » (Montanarella and Lugato, 2013). Malgré les recherches croissantes sur le biochar et bien que les effets à court terme du biochar sur les propriétés du sol soient bien connus, les effets à moyen et long terme (>5 ans) sont encore peu documentés (Zanutel et al., 2021).

2.1.1. La pyrolyse

La pyrolyse est une décomposition thermique de biomasse se produisant en l'absence d'oxygène ou dans des conditions d'oxygène appauvri. La pyrolyse de la biomasse produit du charbon, du gaz et des huiles en quantités différentes. Les conditions de pyrolyse tels que la température, la pression, le temps de séjour et les types de matières premières sont les principaux facteurs qui régissent les quantités relatives et les caractéristiques de chaque fraction (Subedi et al., 2016).

La pyrolyse lente, basée sur une température plus basse et un temps de séjour plus long que la pyrolyse rapide, produit généralement 35 % de charbon (Brown, 2021) permettant d'obtenir le pourcentage de char le plus élevé (Bridgwater, 2003). La pyrolyse lente entraîne une augmentation du rendement du biochar et une diminution de la fraction carbonée du biochar, la teneur en C du biochar étant inversement proportionnelle au rendement du biochar (Chen et al., 2011). Plus la température de pyrolyse est élevée, plus la teneur en C du biochar augmente, ceci est dû à la libération de volatiles tout au long de la pyrolyse qui conduit à l'élimination des espèces non carbonées et donc à l'enrichissement en carbone (Rafiq et al., 2016).

Le processus de pyrolyse comporte deux étapes principales. L'étape initiale est la dévolatilisation (réactions de déshydratation, de déshydrogénation et de décarboxylation) et la seconde étape, connue sous le nom de craquage, implique les réactions de décomposition finale entre les volatiles générés et les restes carbonacés (Demirbaş, 2000; Lanzetta et al., 1997).

Différents types de biomasse peuvent être utilisés comme matière première : (i) les produits et les sous-produits agricoles et forestiers ; (ii) les sous-produits agro-industriels et de bioraffinage ; et (iii) les déchets animaux (Abdelhafez et al., 2017).

2.1.2. L'impact du biochar sur les propriétés du sol et des plantes

Le biochar peut affecter principalement les propriétés chimiques, physiques et biologiques (Figure 1) du sol tels que la capacité d'échange cationique (CEC), le pH, la rétention des nutriments, la densité apparente, la porosité, l'agrégation du sol et la capacité en eau disponible pour les plantes.

a) La CEC et la rétention de nutriments

Le biochar peut retenir davantage les cations que d'autres MO du sol (Lehmann, 2007b). Il est intéressant d'étudier la capacité du biochar à retenir et libérer les cations : la CEC définie comme la quantité totale de cations échangeables que le sol peut adsorber (Ferraro et al., 2021). Cette augmentation de la CEC du sol peut être due à l'oxydation de groupes fonctionnels spécifiques tels que les groupes carboxyliques à la surface du biochar (Brennan et al., 2001). Le biochar se comporte comme une résine échangeuse de cations qui peut retenir ou échanger différentes espèces cationiques (Chen et al., 2014; Liang et al., 2010).

De plus, la surface élevée du biochar, la présence de pores, et des différents groupes fonctionnels tels que des hydroxyles, acides carboxyliques, et petites chaînes alkyles ((Brewer et al., 2014; Kameyama et al., 2012) augmentent la capacité de rétention des nutriments du biochar (Kameyama et al., 2012; Prommer et al., 2014).

b) Le pH du sol

Le pH du sol augmente après l'application de divers types de biochar (Chintala et al., 2014; Stewart et al., 2013) grâce à l'apport de cendres, responsables du pH neutre à légèrement alcalin des biochars. L'ajout de biochar alcalin peut augmenter le pH des sols acides de 0,1 à 0,2 unité. A des taux d'application élevés de biochar, le pH des sols acides peut augmenter jusqu'à 2 unités (Jatav et al., 2021).

c) La gestion de l'eau

Le biochar peut modifier de manière significative les relations hydriques dans le sol. Les facteurs clés influençant la performance du biochar sont la taille des particules, la surface spécifique et la porosité du biochar. La chimie de surface et l'hydrophobicité du biochar sont également des facteurs importants pouvant affecter la capacité à retenir et libérer l'eau (Lehmann and Joseph, 2009).

Il a été démontré que le biochar augmente la porosité totale du sol, la connectivité de l'espace poreux et le nombre de pores (Quin et al., 2014). Cela a un effet direct sur le stockage et la mobilité de l'eau dans le sol. Au-delà des espaces poreux formés entre les particules de biochar et les particules de sol, les intrapores du biochar (pores à l'intérieur des particules de biochar) contribuent également à la rétention d'eau (Hyväluoma et al., 2018). L'ajout de biochar à un sol à texture grossière conduit à un passage des macropores aux méso/micropores car les grands pores sont remplis, ce qui entraîne une réduction du mouvement de l'eau et donc une diminution de la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) et par conséquent une plus grande réserve en eau utile (REU). Dans les sols à texture fine, l'ajout de biochar entraîne un passage des ultramicropores aux micro et macropores, et une formation accrue de macroagrégats ouvrant effectivement la structure du sol et augmentant son K_{sat} (Amer et al., 2009; Zaffar and Lu, 2015). Un bénéfice plus important est remarqué dans les sols sableux par rapport aux sols argileux (Edeh et al., 2020). En moyenne, quel que soit le type de sol, l'application de biochar augmente la teneur en eau du sol et la porosité totale, tandis qu'elle en réduit la densité apparente (Edeh et al., 2020).

d) L'agrégation du sol

Une amélioration des propriétés hydriques du sol après l'ajout de biochar peut également être attribuée à un effet indirect dû à l'augmentation de l'agrégation du sol (Herath et al., 2013). La formation de macroagrégats et la stabilité des agrégats (Ouyang et al., 2013) améliorent la conductivité hydraulique et la rétention d'eau des sols. Une surface spécifique plus élevée augmente la capacité d'adsorption du biochar, ce qui conduit à une rétention d'eau accrue (Freeman et al., 1995). La diminution de la densité apparente peut être un indicateur de l'augmentation de l'agrégation du sol (Burrell et al., 2016).

e) Les microorganismes du sol

L'influence du biochar sur les microorganismes du sol comprend la création d'un nouvel habitat pour la colonisation grâce à la structure poreuse du biochar (Gorovtsov et al., 2020). Les pores du biochar servent d'habitat sécurisé pour les microorganismes (Quilliam et al., 2013b, 2013a) en les protégeant des prédateurs (Warnock et al., 2007). Le biochar frais libère des substances organiques que les microorganismes peuvent utiliser comme source de C, soutenant la croissance bactérienne et favorisant la colonisation (Dutta et al., 2017). De plus, le biochar peut servir de source de nutriments minéraux qui peut provenir des cendres pyrolysées (Liang et al., 2014).

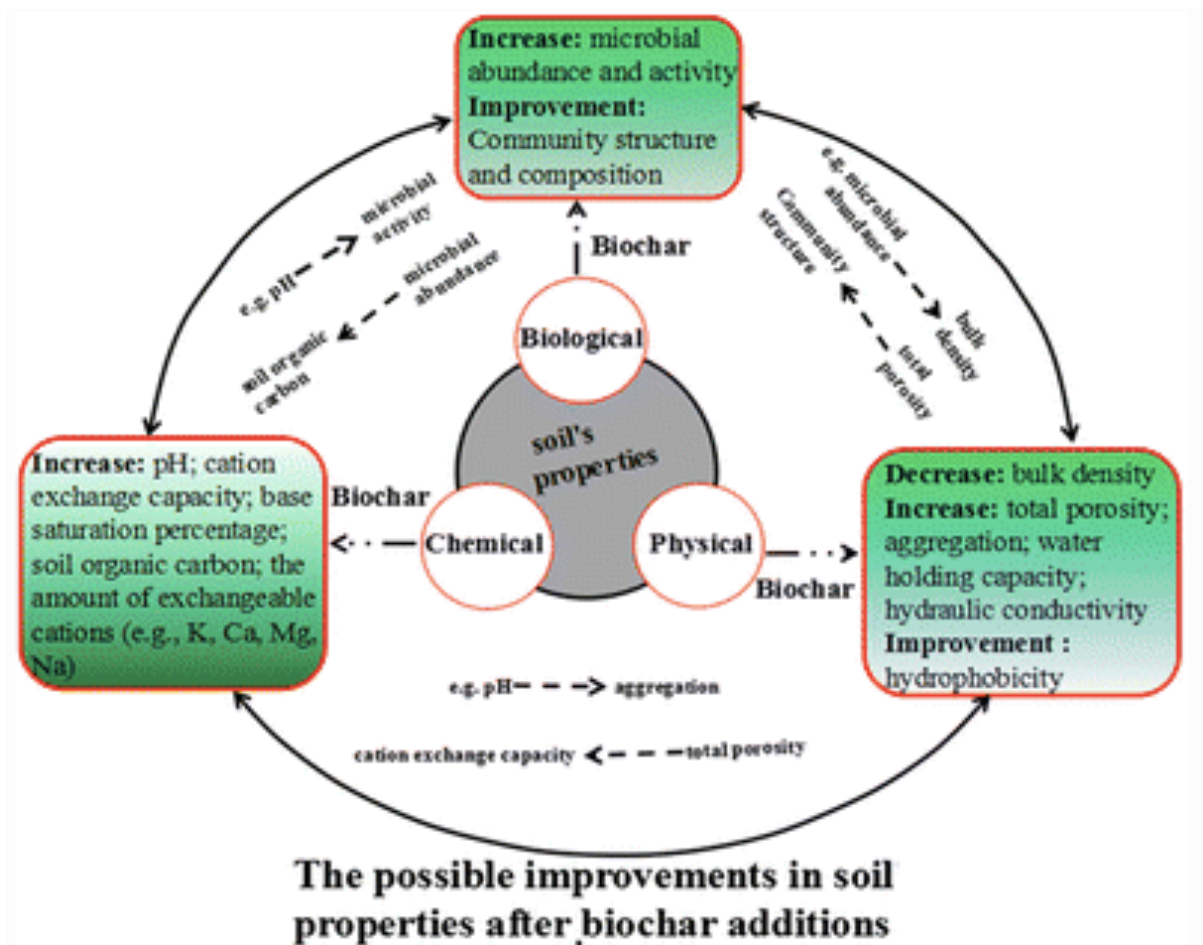


Figure 1 Les améliorations possibles des propriétés et de la fertilité du sol après l'application de biochar (Ding et al., 2016)

2.1.3. La dégradation et la durée de vie du biochar dans les sols

Les analyses actuelles des sols forestiers en Europe du Nord et dans les steppes russes ont indiqué un renouvellement du biochar à l'échelle centennale (Hammes et al., 2008; Ohlson et al., 2009). Cependant, la dégradation du biochar reste assez imprécise (Ameloot et al., 2013; Lehmann et al., 2011; Lorenz and Lal, 2014). Bien que les études disponibles aient examiné le sort du biochar dans divers environnements (Forbes et al., 2006; Preston and Schmidt, 2006; Schmidt and Noack, 2000), la compréhension scientifique actuelle de la stabilité et de la persistance du biochar dans le sol reste clairsemée et incomplète. Deux raisons à ce manque de connaissances sur la décomposition du biochar dans le sol émergent.

Premièrement, la contribution du biochar à l'efflux total de CO_2 du sol est trop faible pour le différencier de l'efflux élevé de CO_2 provenant d'autres sources (MO des sols, résidus de plantes mortes, carbone organique dissous (Kuzakov et al., 2009)). Deuxièmement, sans information sur le stock ou l'apport initial de biochar ou d'autre carbone pyrogène dans les

sols, toute estimation de la décomposition du biochar basée sur sa teneur dans le sol peut être biaisée (Marschner et al., 2008; Ohlson et al., 2009; Singh et al., 2012).

La persistance du biochar dans les sols serait constante grâce à la forte aromaticité du C du biochar (Marschner et al., 2008). En effet, les glycolipides, les phospholipides et les lipides neutres sont les principaux constituants du biochar décomposé (sur une étude de 3,5 ans d'incubation), tandis que les aromatiques condensés restent presque inchangés pendant cette période (Kuzakov et al., 2014). Cette longévité du biochar dans le sol provient non seulement de sa structure chimique aromatique polycondensée, mais aussi des associations organo-minérales favorisées par le vieillissement du biochar (Brodowski et al., 2005; Burgeon et al., 2021).

La récalcitrance biochimique intrinsèque du biochar est principalement déterminée par les matières premières et les conditions de pyrolyse. En effet, ce sont les facteurs de production majeure qui influencent l'aromaticité et le degré de condensation aromatique du biochar et, donc, sa stabilité dans les sols (Brodowski et al., 2005; Kuzakov et al., 2014). Les biochars dérivés de diverses sources ont des compositions chimiques différentes qui affectent la dégradabilité biologique (Lehmann et al., 2011) et la température de pyrolyse est critique pour le potentiel de séquestration de C du biochar, car elle affecte la proportion de C non aromatique et aromatique, ainsi que le degré de condensation du C aromatique dans le biochar (Preston and Schmidt, 2006).

2.2. Le biochar sur le marché Européen

2.2.1. Règlement européen (CE) n°2019/1009

Selon la réglementation européenne, le biochar est considéré comme un sous-produit de l'industrie énergétique (Montanarella and Lugato, 2013) et est donc classé comme un déchet. Pour cette raison, il est soumis à la directive européenne sur les déchets (2008/98/CE), ce qui entrave son éventuelle utilisation agricole (Montanarella and Lugato, 2013).

En 2019, le Journal officiel de l'Union européenne (UE) publiait « Pour certains déchets valorisés au sens de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil européen, tels que la struvite, le biochar et les produits à base de cendres, une demande du marché en vue de leur utilisation en tant que fertilisants a été mise en évidence. En outre, certaines exigences sont nécessaires pour les déchets utilisés en tant qu'intrants dans l'opération de valorisation, pour les procédés et techniques de traitement ainsi que pour les fertilisants issus de l'opération de valorisation afin de veiller à ce que l'utilisation de ces fertilisants n'ait pas d'incidences globales négatives sur l'environnement ou la santé humaine. Pour les fertilisants

UE, il y a lieu de définir ces exigences dans le présent règlement. Par conséquent, dès lors qu'ils sont conformes à l'ensemble des exigences du présent règlement, il convient que ces produits cessent d'être considérés comme des déchets au sens de la directive 2008/98/CE et, dès lors, les fertilisants contenant de tels déchets valorisés ou consistant en de tels déchets valorisés devraient pouvoir accéder au marché intérieur (...) ».

L'Union européenne a adopté le 5 juin 2019 le nouveau règlement « Fertilisants » 2019/1009 (*Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE, modifiant les règlements (CE) no 1069/2009 et (CE) no 1107/2009 et abrogeant le règlement (CE) no 2003/2003 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*, 2019). Celui-ci est entré en vigueur le 16 juillet 2019 et sera d'application en juillet 2022 (Figure 2).

Le Règlement « Fertilisant » concerne l'ensemble des engrais et des amendements de sol, que leur origine soit issue de l'extraction, de procédés chimiques, ou encore de matières recyclées ou organiques. Le Règlement « Fertilisant » s'adapte, la Catégorie de Matière Constitutive (CMC) dédiée aux cendres, au biochar et à la struvite pourrait y être intégrée (conjointement dénommée sous l'acronyme Strubias). Ce Règlement vient remplacer le Règlement « Engrais » 2003/2003. L'évolution principale par rapport au Règlement Engrais 2003/2003 est l'ouverture à l'ensemble des engrais, y compris aux fertilisants issus de MO (*Règlement (CE) n° 2003/2003 du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 relatif aux engrais (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*, 2003).

La volonté de ce Règlement est de couvrir l'ensemble des matières fertilisantes (les engrais « chimiques » mais également des matières organiques et/ou recyclées) permettant de réaliser un marquage CE¹ pour tous ces types de matières. Il s'agit également d'harmoniser les règles entre les États membres autour d'une base commune. Une autre volonté est d'intégrer la notion de recyclage et de circularité en profitant de la libre circulation dans l'UE des fertilisants porteurs du « marquage CE ». Enfin, le Règlement permet l'innovation et la mise sur le marché de nouveaux produits bio- et/ou éco-sourcés (Géradon, 2021).

Dès lors, à partir du 15 juillet 2019 et selon l'article 42 du chapitre IV (Pouvoirs délégués, actes délégués et comité) du Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE, modifiant les règlements (CE) n° 1069/2009 et (CE) n° 1107/2009 et abrogeant le

¹ Le marquage CE est « un marquage réglementaire qui atteste la conformité d'un produit vis-à-vis de la législation en vigueur qui lui est applicable. Cela confère au produit le droit de libre circulation sur l'ensemble du territoire. » (Géradon, 2021).

règlement (CE) n° 2003/2003, la Commission évalue le biochar. S'il ressort de l'évaluation que les critères suivants sont remplis, la libre circulation des fertilisants UE sur le marché intérieur sera facilitée et autorisée, pour lesquels il est scientifiquement prouvé :

- i) qu'ils ne présentent pas de risque pour la santé humaine, animale ou végétale, pour la sécurité ou pour l'environnement ;
- ii) qu'ils assurent l'efficacité agronomique.

Le projet d'acte a été adopté par la Commission le 7 juillet 2021. Dès lors, les textes de lois sont actuellement en cours de rédaction : « *RÈGLEMENT DÉLÉGUÉ (UE) .../... DE LA COMMISSION du 7.7.2021 modifiant les annexes II, III et IV du règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil en vue d'ajouter les matières issues de la pyrolyse et de la gazéification en tant que catégorie de matières constitutives des fertilisants UE* ». La Commission a conclu cette évaluation sur base d'un rapport effectué par son Centre commun de recherche, le JRC (Joint Research Centre). Le JRC a achevé en 2019 l'évaluation du biochar dans la perspective de l'adoption du Règlement (UE) 2019/1009.

Dans ce contexte, le Règlement délégué modifie l'annexe II du règlement (UE) 2019/1009 en ajoutant les matières issues de la pyrolyse en tant que nouvelle CMC, l'annexe III en ajoutant des exigences liées à l'étiquetage pour les fertilisants UE contenant des matières issues de la pyrolyse et l'annexe IV en fixant le cadre juridique pour l'évaluation de la conformité applicable à ces produits. Les experts désignés par chaque État membre ont été consultés au sein du groupe d'experts de la Commission sur les fertilisants et étaient largement favorables à l'adoption de ce Règlement délégué.

Dans le JRC, se trouvent des propositions techniques pour de nouvelles matières fertilisantes sélectionnées dans le cadre du règlement sur les produits fertilisants du règlement (UE) (2019/1009). Parmi elles, s'y retrouvent des conditions pour les matériaux de pyrolyse (Huygens et al., 2019) telles que:

- Une liste de matière première autorisée ;
- Le processus de conversion thermochimique doit se dérouler dans des conditions limitant l'oxygène de telle sorte qu'une température d'au moins 180 °C pendant au moins 2 secondes soit atteinte dans le réacteur ;
- Les matériaux obtenus de la pyrolyse doivent avoir :
 - un rapport molaire H/C organique < à 0,7 (les essais devant être effectués sur la fraction sèche et sans cendres pour les matières dont la teneur en CO est inférieure à 50 %).
 - pas plus de 6 mg/kg de matière sèche de hydrocarbures aromatiques polycycliques₁₆ (HAP)

- pas plus de 0,8 mg/kg de matière sèche de polychlorobiphényles (PCB)
- pas plus de 20 ng TEQ (équivalent toxique)/kg de matière sèche de polochloro-dibenzo et les furanes (PCDD/F)
- Toutes les substances des matériaux de pyrolyse incorporées dans le produit fertilisant de l'UE doivent avoir été enregistrées conformément au Règlement (CE) n° 1907/2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances.

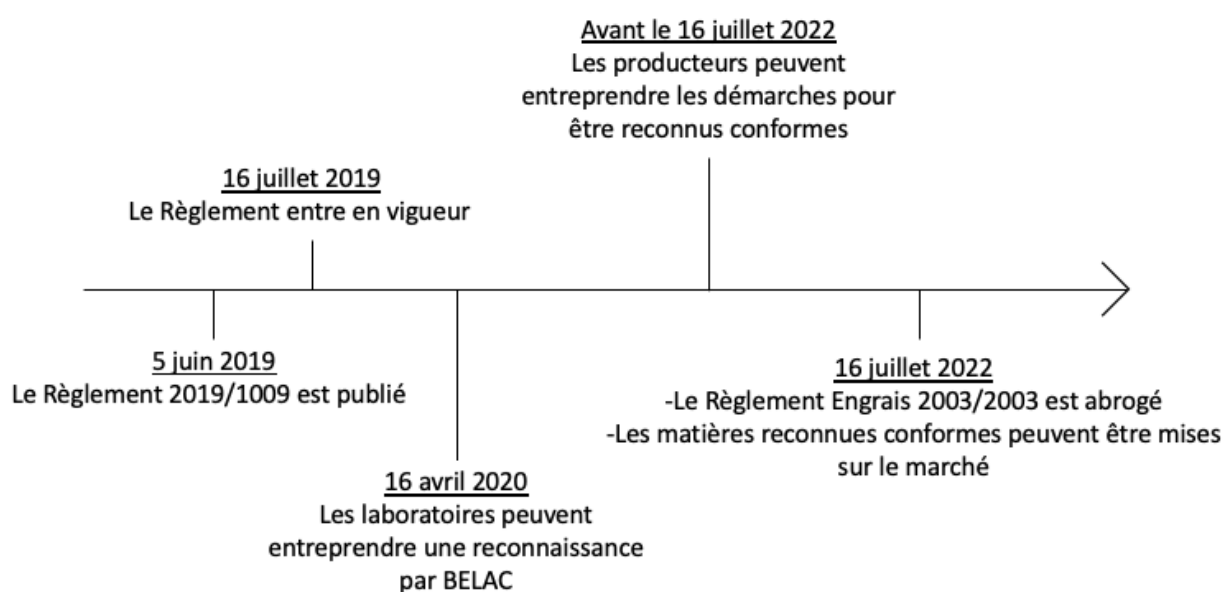


Figure 2 Les dates clés du Règlement Fertilisant. BELAC est le laboratoire belge reconnu par une autorité agréée.

2.2.2. Fertilisant

Ce Règlement concerne uniquement les fertilisants :

« Un fertilisant est une substance, un mélange, un micro-organisme ou toute autre matière appliqués ou destinés à être appliqués sur des végétaux ou leur rhizosphère ou sur des champignons ou leur mycosphère, ou destinés à constituer la rhizosphère ou la mycosphère, seuls ou mélangés avec une autre matière, dans le but d'apporter aux végétaux ou aux champignons des éléments nutritifs ou d'améliorer leur efficacité nutritionnelle ». Un fertilisant UE est donc un fertilisant au sens du Règlement et possédant le marquage CE lors de sa mise à disposition sur le marché (Evlard et al., 2020).

Chaque fertilisant (Figure 3) est constitué d'une ou de plusieurs matières constitutives (végétaux, composts, digestats, minéraux...) répertoriées en CMC et possède une fonction (engrais minéral, engrais organique, amendement du sol, support de culture...) répertoriée en PFC (Catégorie Fonctionnelle de Produit). Pour être mis sur le marché, il doit donc satisfaire aux critères liés à sa/ses CMC et à sa/ses PFC), et être étiqueté selon les prescriptions du Règlement (Evlard et al., 2020).

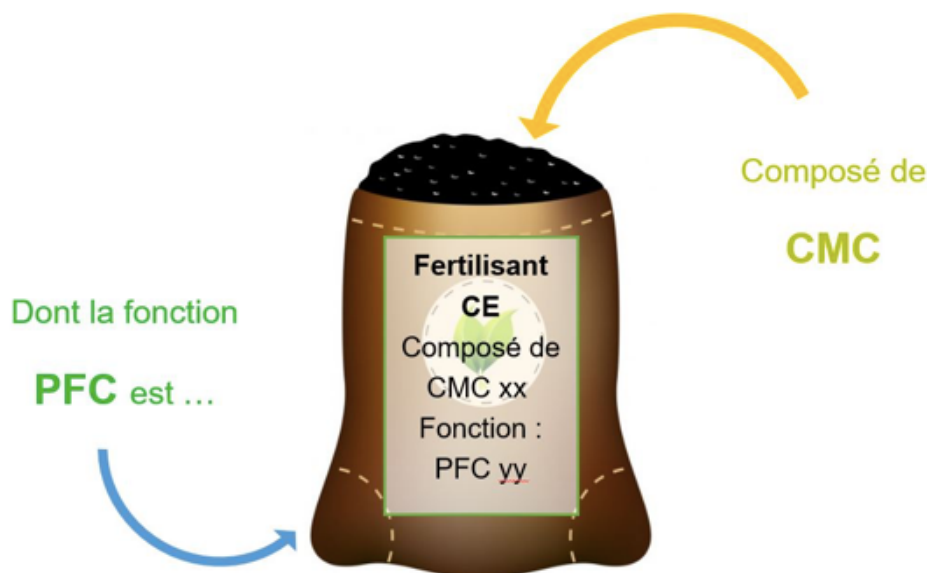


Figure 3 Critères liés au CMC et PFC ("Règlement Fertilisant," n.d.)

Pour faire reconnaître son fertilisant, le fabricant doit réaliser des analyses de chaque lot dans un laboratoire agréé. Dès que la déclaration de conformité est reçue, la matière peut être mise sur le marché, accompagnée d'une étiquette reprenant les informations requises par le Règlement Fertilisant de cette matière. Le laboratoire (appelé dans le Règlement « organisme d'évaluation de la conformité ») doit être reconnu par une autorité agréée. En Belgique, il s'agit de BELAC (Evlard et al., 2020).

2.2.3. Parlement de Wallonie

Céline Tellier, Ministre de l'Environnement, de la Nature, de la Forêt, de la Ruralité et du Bien-être animal a déclaré le 1 juin 2021 : « L'analyse de l'impact du règlement fertilisant est en cours, afin d'identifier et de distinguer les mesures et les enjeux environnementaux concernés (...). À ce stade, il est prévu de faire évoluer la réglementation wallonne relative aux sols afin de mieux encadrer l'utilisation de l'ensemble des matières valorisées sur les sols, indépendamment de leur statut de produit ou de déchet. Pour ce faire, un arrêté relatif à l'utilisation des matières organiques et fertilisants sur et dans les sols, sur base de l'article 4, 2° du Décret du 1er mars 2018 relatif à la gestion et à l'assainissement des sols, va être

élaboré. Le projet d'arrêté s'articulera de façon cohérente avec les autres dispositions du décret sols, et tiendra également compte des dispositions décrétales et réglementaires existantes pour des thématiques connexes » (Tellier, 2021).

2.3. Les aires de faulde en Belgique

A la fin du XVIII^e siècle, la production intensive de charbon de bois était liée à la fonte et à la fabrication d'acier préindustrielles. Les traces de ces anciens sites de fabrication de charbon de bois existent toujours et se nomment « les aires de faulde » (Hardy and Dufey, 2015a) et se trouvent donc à l'emplacement des anciennes meules de charbonnage (Hardy, n.d.).

La production de charbon de bois pour obtenir un combustible industriel et domestique était réalisée par la technique de la meule charbonnière (Figure 4). Différentes étapes étaient nécessaires au processus qui pouvait durer jusqu'à deux semaines pour les plus grands monticules contenant jusqu'à 100 stères de bois (Hardy et al., 2016).

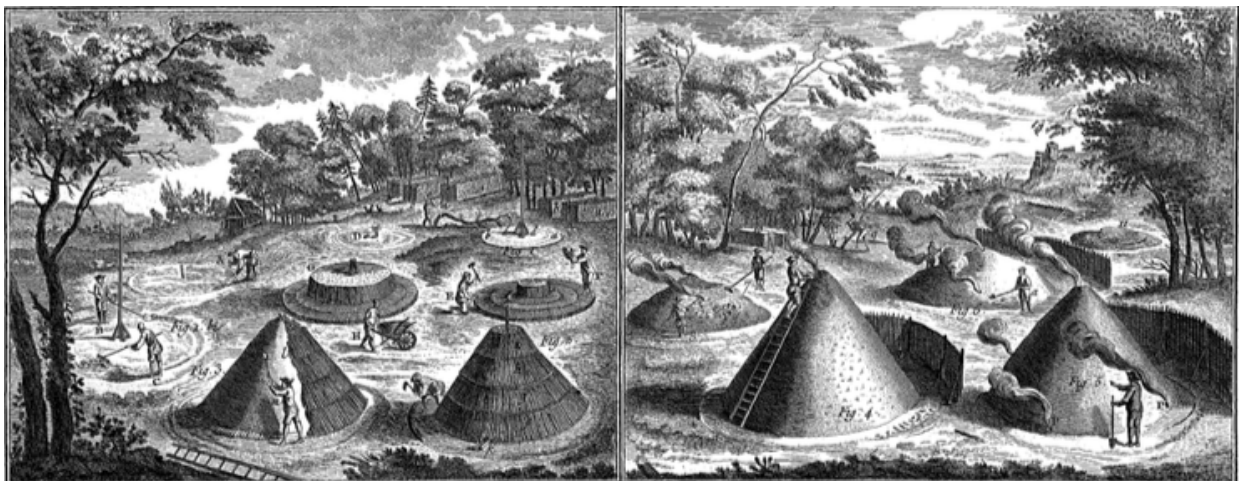


Figure 4 Dessin schématique des différentes étapes de la production traditionnelle de charbon de bois par la technique de la meule charbonnière (Panckoucke, 1783)

Au total, 325 000 hectares de forêt étaient nécessaires pour alimenter l'ensemble des hauts fourneaux actifs à la fin du XVIII^e siècle et représentant 75 % des superficies forestières wallonnes (Hardy and Dufey, 2012a). Peu d'études existent sur l'effet des anciens fours à charbon de bois sur les propriétés du sol dans la littérature internationale. L'effet du four à charbon de bois peut dépendre du site, des différences dans les facteurs pédogénétiques (matériau parental, climat, végétation) ou de facteurs liés à la production de charbon de bois (âge du site, type de bois pyrolysé ou pratiques utilisées).

En Wallonie, les hauts fourneaux se trouvaient principalement dans les provinces de Namur, du Hainaut et du Luxembourg. De nombreux hauts fourneaux étaient situés dans l'Entre-Sambre-et-Meuse (Figure 5) car selon Heuschling et Van der Maelen (1838), il s'agit du

territoire contenant la plus grande ressource de minerai de fer de toute l'Europe. La présence de minerai de fer mais aussi la présence de forêts et de rivières, ressources indispensables à la sidérurgie, dictaient l'emplacement des hauts fourneaux (Hardy and Dufey, 2012b). La distribution de la densité des sites à charbon de bois concorde avec la distribution des hauts fourneaux actifs à la fin du XVIII^e siècle. Cela confirme l'idée qu'une grande partie des ressources en bois était destinée à la production de charbon de bois à la fin du XVIII^e siècle, et que le charbon de bois était principalement utilisé comme combustible par l'industrie sidérurgique pré-industrielle (Hardy, n.d.). Les aires de faulde, sur sol agricole nu, sont représentées sous forme de taches noires circulaires ou elliptiques atteignant 40 m de diamètre (Hardy et al., 2016).

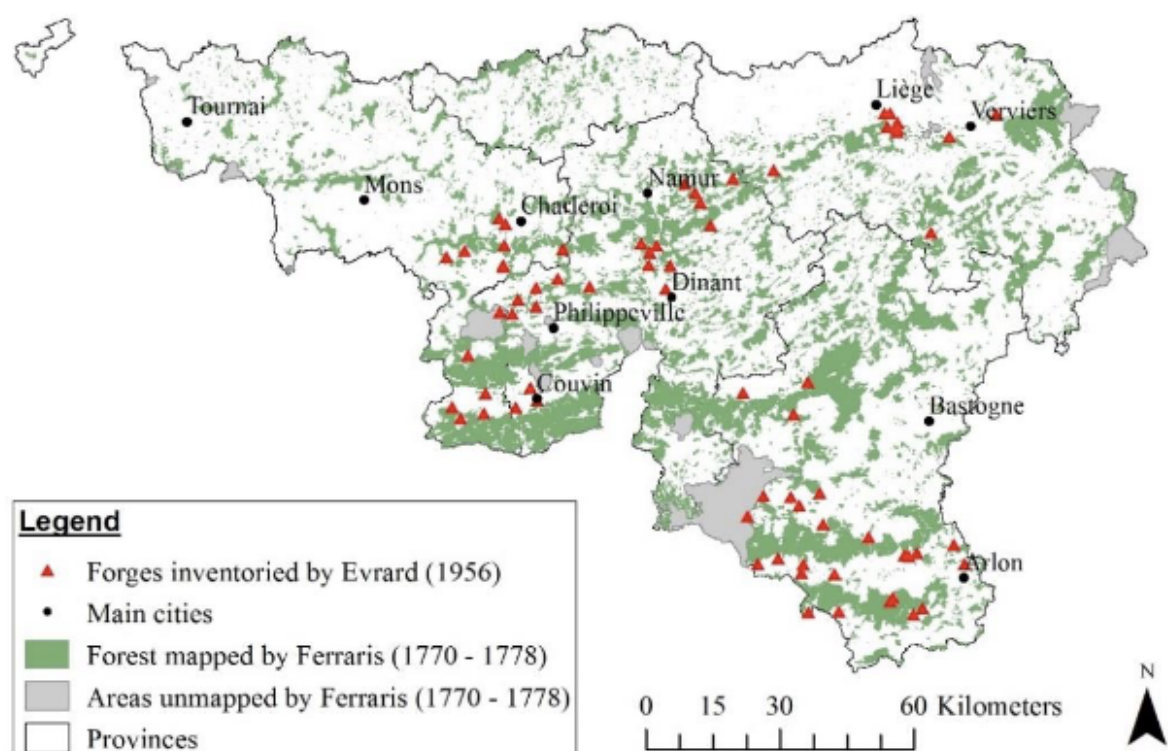


Figure 5 Anciennes forges inventoriées par Evrard (1956) et surface forestière cartographiée par Ferraris en 1770-1778 (Hardy, n.d.; Kervyn et al., 2014)

Les sols qui ont été déboisés depuis l'époque de la production de charbon de bois pour la culture sont presque exclusivement des Luvisols développés sur du loess quaternaire. Ces sols ont été déboisés en raison de leur fort potentiel agricole. Le loess est probablement le matériau parental du sol le plus homogène à l'échelle de la Wallonie, néanmoins la teneur en limon peut varier à l'échelle du champ en fonction du relief, car il s'accumule préférentiellement dans les dépôts colluviaux (Hardy, n.d.).

2.3.1. Teneur en MO des aires de faulde

Dans la couche arable des terres cultivées, la teneur en carbone organique total (COT) varie de 14,3 à 64,4 g/kg dans le sol des anciens sites à charbon de bois préindustriel et varie de 9,0 à 26,4 g/kg dans des sols de référence. Le sol des sites de fours à charbon de bois préindustriels contient de 1,8 à 33,1 g/kg de charbon de bois-C, ce qui correspond à $36,1 \pm 10,6$ % de la teneur en COT. Le sol d'un site d'un four actuellement actif contient 83,1 g/kg de COT, dont 73,6 g/kg de charbon de bois-C (Hardy et al., 2016).

2.3.2. Le lien avec le biochar

Les effets à long terme du biochar restent largement inconnus, mais il est important de les quantifier étant donnée la persistance du biochar dans les sols. Il est possible d'évaluer l'effet à long terme du biochar en utilisant les anciens sites de fours à charbon de bois datant de plus de 150 ans (Zanutel et al., 2021). En effet, ces sites offrent une opportunité d'évaluer l'effet à long terme de l'enrichissement en charbon de bois sur les sols tempérés.

2.4. Le cas de la Région limoneuse et du Condroz

2.4.1. Région limoneuse

La Région limoneuse (3 941 km²) est la région typique des grandes cultures. On y trouve principalement des céréales, betteraves sucrières et pommes de terre ou le lin. Les cultures fruitières sont également localement présentes (Figure 6). En 2020, plus de 4000 exploitations dites « professionnelles » sont localisées dans cette région (36 % des exploitations wallonnes). Parmi ces dernières, un peu plus de la moitié sont spécialisées en grandes cultures et 19 % orientées en polyculture-élevage. La répartition entre ces deux orientations technico-économiques (OTE) s'est inversée au cours du temps (SPW, 2022) avec une déconnexion progressive de l'élevage. Les prairies diminuent, contrairement aux cultures de printemps (maïs, pomme de terre), laissant généralement le sol nu en hiver (DGRNE, 2005).

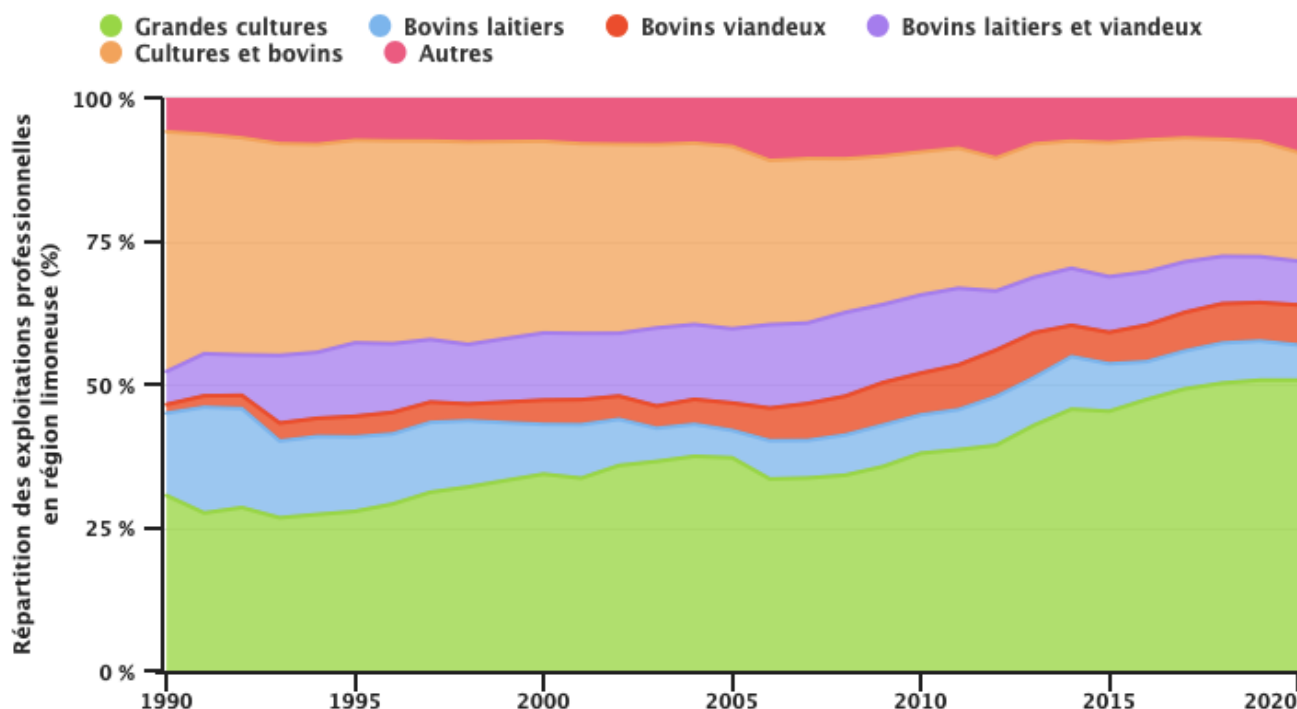


Figure 6 Évolution de la répartition des OTE dans la région limoneuse (SPW, 2022)

Le recul progressif des fermes traditionnelles (polyculture et élevage) au profit d'exploitations spécialisées, la simplification des rotations culturales entraînent des risques de dégradation des sols, qui varient selon les productions et les pratiques agricoles. Le développement des cultures de légumes-racines (pommes de terre, betterave...) a un impact environnemental important : dégradation de la structure des sols et perte de MO du fait d'un travail intensif de la terre, perte de terre importante à chaque récolte (de l'ordre de 6 t/ha), problèmes de compaction liés aux engins de récolte... (Direction de l'état environnemental, 2022).

2.4.2. Région du Condroz

Les terres agricoles du Condroz (2 632 km²) sont consacrées aux céréales (35 % de la superficie agricole utilisée SAU), aux prairies (31 %), aux betteraves sucrières et aux plantes oléagineuses. La région présente des plateaux entrecoupés de vallées, de rivières et de dépressions (SPW, 2022). Le Condroz présente un paysage plus diversifié (Figure 7) avec une moins grande dominance des grandes cultures et une activité agricole tournée vers l'exploitation des animaux, essentiellement des bovins.

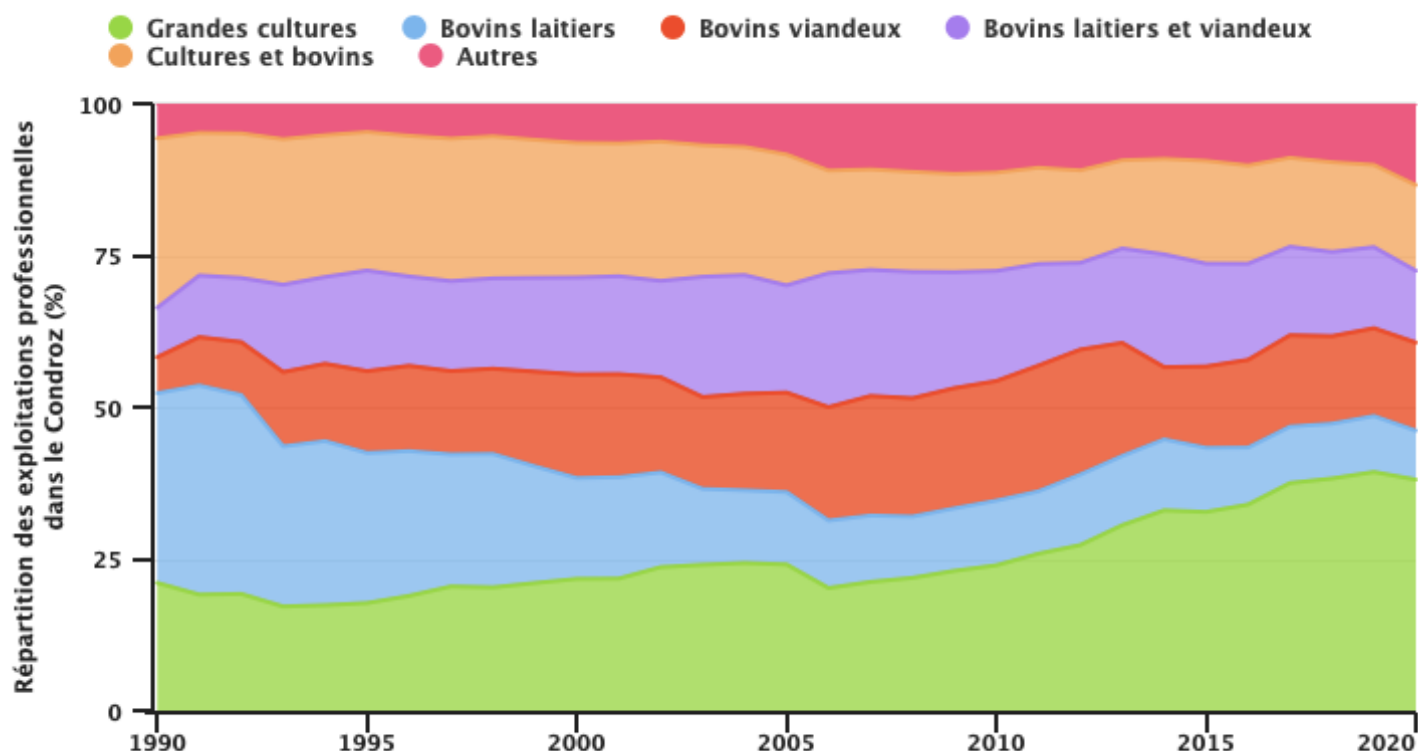


Figure 7 Évolution de la répartition des OTE dans le Condroz (SPW, 2022)

2.4.3. Teneur en MO du Condroz et de de la Région limoneuse

Due aux nombreux bénéfices que la MO apporte, une teneur en CO élevée est recommandée pour les sols cultivés. Cependant, la mise en culture des sols et les pratiques liées à l'agriculture intensive provoquent de nombreuses pertes de MO, cela s'explique par : l'accélération de la minéralisation des MO à cause du travail du sol et les apports en engrais minéraux, les pertes de terres liées à l'érosion, la diminution des apports en MO suite à la dissociation des activités d'élevage et de culture au sein des exploitations agricoles et, dans une moindre mesure, la perturbation de la microfaune qui est liée au tassement causé par les passages répétés d'engins lourds ainsi qu'à l'utilisation de pesticides divers (DGRNE, 2005).

La distribution de la teneur en COT (Figure 8) des terres de culture est en relation avec les zones agro-écologiques. Il existe un gradient de richesses croissant en MO dans les sols agricoles du nord-ouest au sud-est de la Région wallonne, des bas plateaux limoneux aux

hauts plateaux ardennais (plus au sud, en région jurassique, les teneurs moyennes de CO dans les terres sont inférieurs à ceux observés en Ardenne (Bock et al., n.d.).

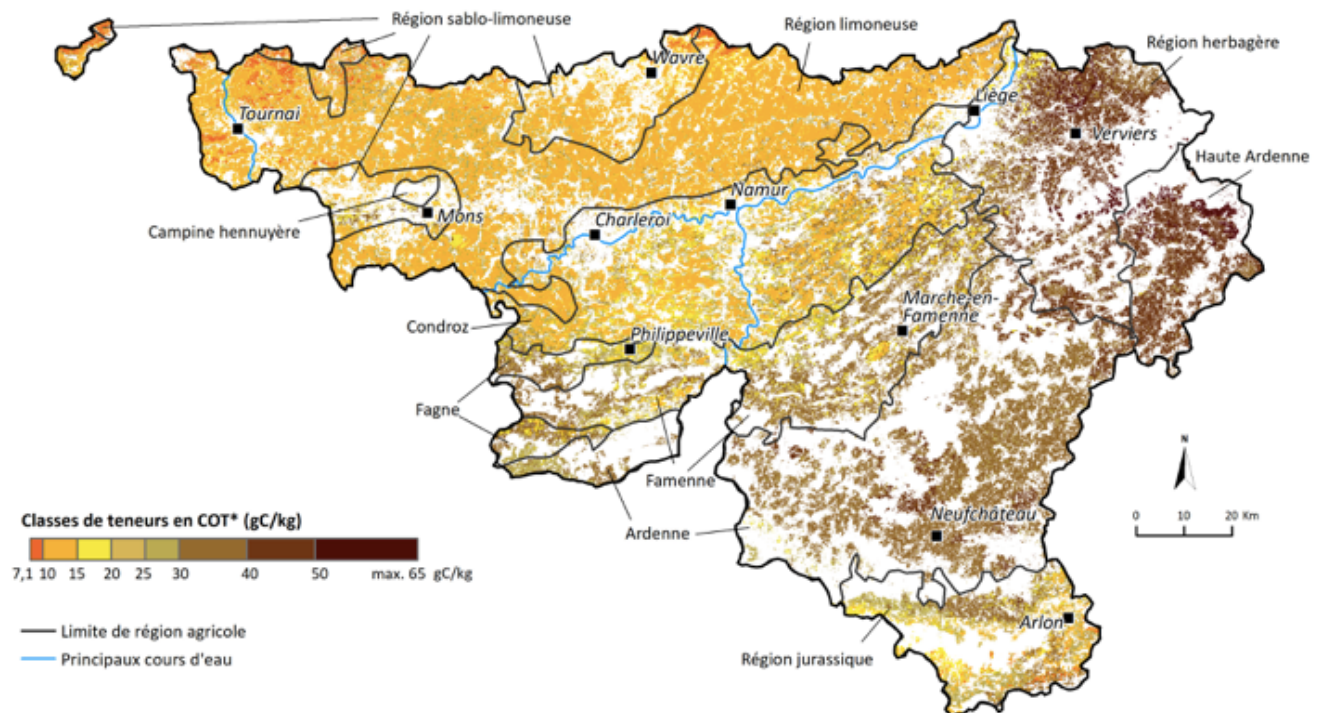


Figure 8 Teneurs en carbone organique total (COT) des sols agricoles en Wallonie (2015 - 2019) (SPW, 2020)

Une diminution de la teneur en MO du sol au-dessous d'un certain seuil menace l'ensemble des propriétés du sol et donc de son bon fonctionnement. Ce seuil critique, généralement fixé à une concentration de 2 % de CO et dont les teneurs en CO sont inférieures à 20 gC/kg, varie selon le type de sol (sensibilité plus ou moins grande liée à sa texture). En Région wallonne, les sols dont la teneur en CO est inférieure à 1,2 % (2,4% de MO) sont considérés comme instables. Cette faible teneur en CO affecte essentiellement les zones de grandes cultures, comme la Région limoneuse (Figure 9) où les quantités de MO sont les plus faibles, de 25 à 50 tC/ha (DGRNE, 2005) et des teneurs inférieures à 20 gC/kg. En effet, la Région limoneuse présente un état de dégradation parmi les plus avancés de Wallonie (Vanhove, 2018). Environ 70 % de la superficie de la Région limoneuse est occupée par des sols dont les réserves en MO ont diminué entre 1960 et 2000 (DGRNE, 2005). Le Condroz, quant à lui, présente des stocks de MO plus élevée, de 50 à plus de 100 tC/ha.

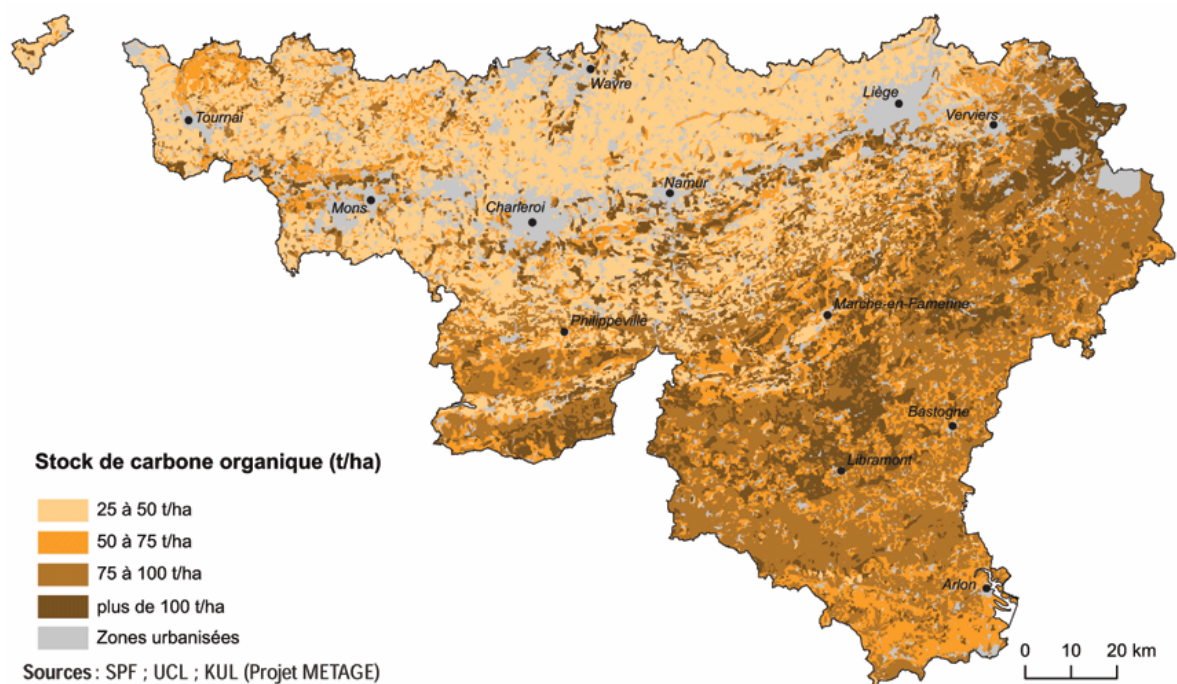


Figure 9 Stock de CO dans les sols en Région wallonne en 2000 (DGRNE, 2005).

L'explication de ces disparités peut être justifiée par la différence d'utilisation du sol : les terres de la Région limoneuse sont majoritairement utilisées pour les grandes cultures (Figure 10) comme expliqué précédemment, le reste de la SAU (Figure 11) est plutôt occupé par des prairies. Or, les prairies ont une capacité de stockage de MO bien plus élevée que celle des sols cultivés (Goidts and van Wesemael, 2007). Cette évolution peut aussi être mise en relation avec la sensibilité des sols limoneux à l'érosion hydrique. Enfin, sont mises en cause certaines pratiques culturales comme le labour et la réduction des apports en MO exogènes, dues notamment à une gestion plus restrictive des effluents d'élevage (DGRNE, 2005). Le Condroz présente une plus faible importance du secteur dans les grandes cultures et une plus grande importance dans les prairies.

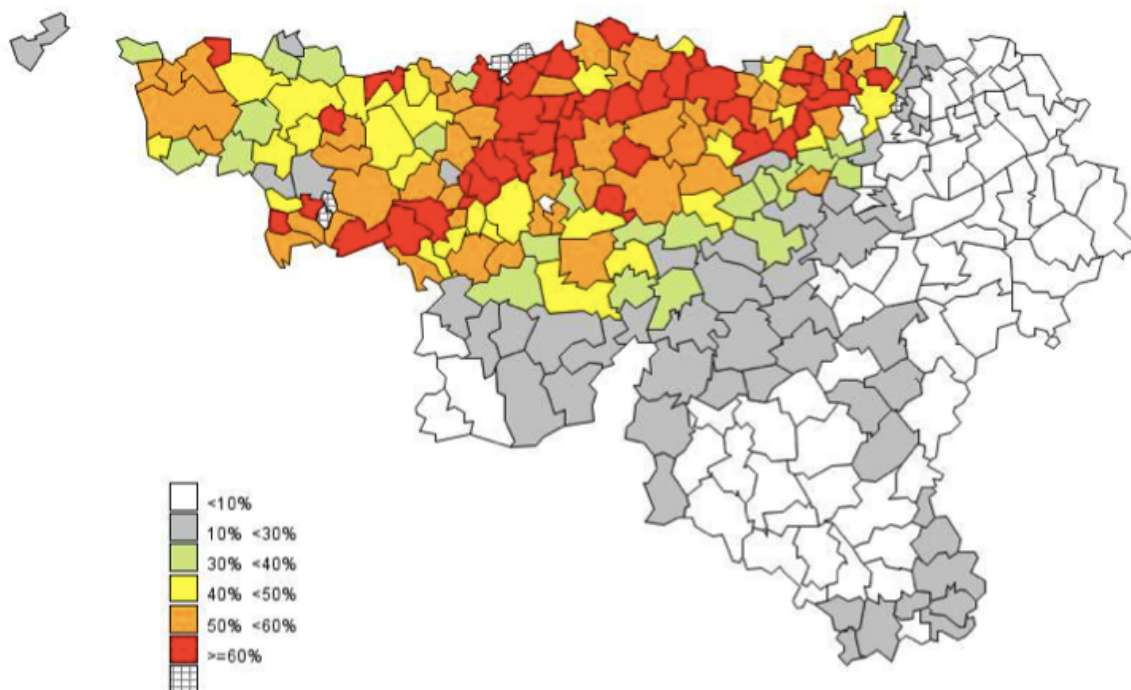


Figure 10 Importance du secteur des grandes cultures dans les communes de Wallonie en 2018 en % de la valeur, exprimée en production brute standard, de la production agricole totale de la commune (SPW).

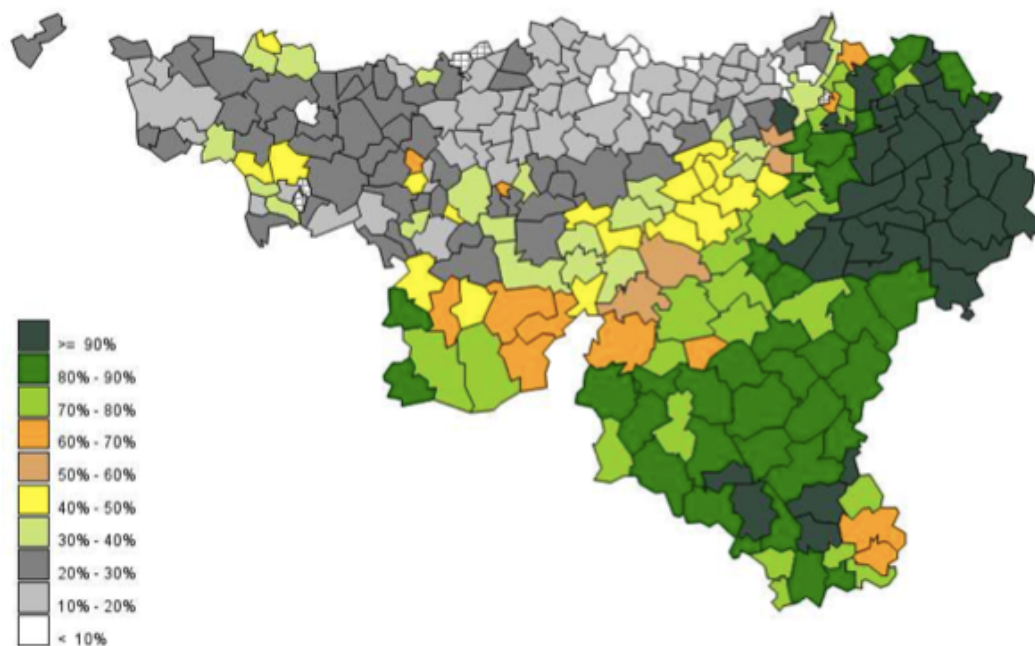


Figure 11 Importance des prairies dans la SAU communale en 2018 (SPW)

3. Objectifs et démarche

3.1. Objectifs

Le biochar a été récemment reconnu comme matière constitutive des fertilisants dans le nouveau règlement européen (CE) n°2019/1009 sur les fertilisants qui sera d'application à partir de juillet 2022. Cela signifie que le biochar sera en vente libre sur les marchés européens, sous réserve d'obtenir au préalable une certification garantissant sa qualité. Cependant, un des gros manquements de connaissance face au biochar, est son effet sur le long terme. En effet, peu de littérature et d'expériences existent à cette échelle.

L'objectif général est donc de définir les effets à long terme du biochar sur les sols agricoles et les plantes cultivées en Région wallonne à l'aide des aires de faulde. Pour atteindre cet objectif, les deux objectifs spécifiques sont : (1) d'identifier les effets des aires de faulde perçus par les agriculteurs au niveau des plantes cultivées et du sol dans deux régions agricoles, le Condroz et la Région limoneuse, par le biais d'interviews ; et (2) d'obtenir leurs perceptions à propos d'un potentiel amendement de leur sol avec du biochar.

La Figure 12 reprend le contexte général, l'objectif général, les objectifs spécifiques, la démarche ainsi que les résultats attendus.

3.2. Démarche

Les sites de fours à charbon préindustriels qui ont été déboisés au XVIII^e siècle en Wallonie, appelés « aires de faulde », vont être utilisés pour évaluer l'effet à long terme du biochar sur les sols des cultures tempérées. Ces sols ont été largement enrichis en charbon de bois au XVIII^e siècle, ce qui les rend comparables aux sols amendés avec du biochar dans le passé. Deux régions agricoles sont étudiées : la Région limoneuse et le Condroz, afin d'obtenir les points de vue des agriculteurs dans deux contextes différents d'un point de vue agronomique (historique cultural, type de sol, teneur en MO, concentrations en charbon de bois au sein des aires de faulde).

La Région limoneuse est dominée par des Luvisols développés sur loess, un limon nivéo-éolien datant du Quaternaire. En raison du haut potentiel agronomique de ces sols, les exploitations agricoles de cette région tendent à se spécialiser vers la production de cultures industrielles (céréales, pommes de terre, betteraves, chicorées, légumes...), avec une déconnexion progressive de l'élevage au cours du temps. La fréquence croissante des cultures de printemps, au détriment des cultures d'hiver et de la prairie temporaire, avec des profondeurs

de travail du sol qui n'ont cessé d'augmenter au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, ont appauvri les sols en MO, ce qui les rend particulièrement sensibles aux problèmes d'érosion hydrique et de compaction. En Région limoneuse, les aires de faulde ont été diluées par un long historique de travail du sol (>150 ans). En conséquence, les concentrations en charbon de bois n'excèdent généralement pas $40 \text{ t}_C/\text{ha}$ au centre des aires de faulde (soit environ 1 % de C). La Région limoneuse sera donc prise comme étude de cas en ce qui concerne les effets à long terme d'un amendement biochar appliqué selon des doses « réalistes » sur des sols carencés en MO.

Le Condroz est une région agricole dominée par des fermes de polyculture-élevage. La plupart des sols de culture de cette région possèdent en conséquence des taux de MO plus élevés, maintenus par les prairies temporaires et permanentes et un accès privilégié aux engrais de ferme. Depuis la fin du xx^e siècle, de nombreuses prairies permanentes y ont été retournées pour cultiver d'autres cultures fourragères, en particulier de maïs ensilage. Sur ces terres, les aires de faulde sont encore très concentrées en charbon de bois car l'historique de travail du sol est relativement court. Il est dès lors fréquent d'y retrouver des concentrations en charbon de bois $>100 \text{ t}_C/\text{ha}$ au centre des aires de faulde, ce qui représente des doses excessives et peu réalistes pour un amendement biochar. Le Condroz sera donc pris comme étude de cas concernant les effets à long terme d'une application excessive de biochar, afin de documenter les risques liés à cette application trop importante.

Pour évaluer les effets à long terme du biochar sur les sols agricoles et les cultures en Région wallonne, des enquêtes ont été menées auprès d'agriculteurs ayant des aires de faulde sur leurs parcelles dans les deux zones d'étude. Les parcelles des agriculteurs interrogés sont identifiées à l'aide d'une approche de système d'information géographique (SIG), en se basant premièrement sur la carte de Ferraris pour cibler les anciennes forêts déboisées. Ensuite, sur base d'orthophotos de différentes années, les aires de faulde sont détectées par photo-interprétation sur les parcelles agricoles de sol nu. Le parcellaire agricole du Système intégré de gestion et de contrôle (SIGEC) permet enfin de recenser toutes les parcelles agricoles remplissant ces conditions.

Deux thèmes principaux sont discutés lors des interviews : l'effet des aires de faulde sur le système sol-plante et la perception des agriculteurs d'amender leur sol avec du biochar, à l'applicabilité de celui-ci. Les interviews sont retranscrites, puis analysées *via* le logiciel NVivo pour le traitement des données qualitatives et le logiciel CmapTools pour créer des cartes cognitives.

Les résultats sont ensuite interprétés. Cela consiste à confronter les résultats mentionnés par les agriculteurs à la littérature scientifique.

Biochar = fertilisant dans le nouveau règlement européen (CE) n°1009/2019

Effets à long terme du biochar sur les sols agricoles et les plantes cultivées en Région wallonne



Figure 12 Schéma global reprenant le contexte, les objectifs et la démarche de la recherche et les résultats attendus.

4. Matériels et méthode

4.1. Les zones d'études

La première zone d'étude est la Région limoneuse, la seconde zone d'étude est le Condroz, situées toutes les deux en Région wallonne (Figure 13).

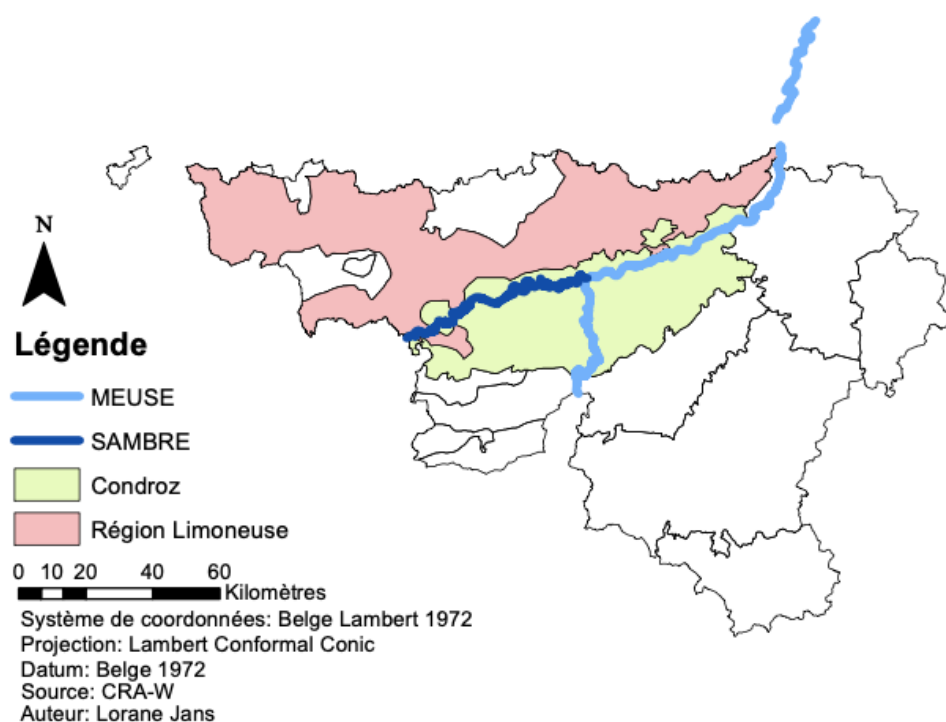


Figure 13 Localisation du Condroz et de la Région limoneuse par rapport à la Sambre et à la Meuse

4.2. Sélection des sites d'études

Pour chacune des zones d'études, la même démarche a été réalisée afin d'identifier (Figure 14) les parcelles agricoles possédant des aires de faulde pour y effectuer des enquêtes auprès des agriculteurs les cultivant. Les différents traitements et créations de cartes ont été réalisés à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8.

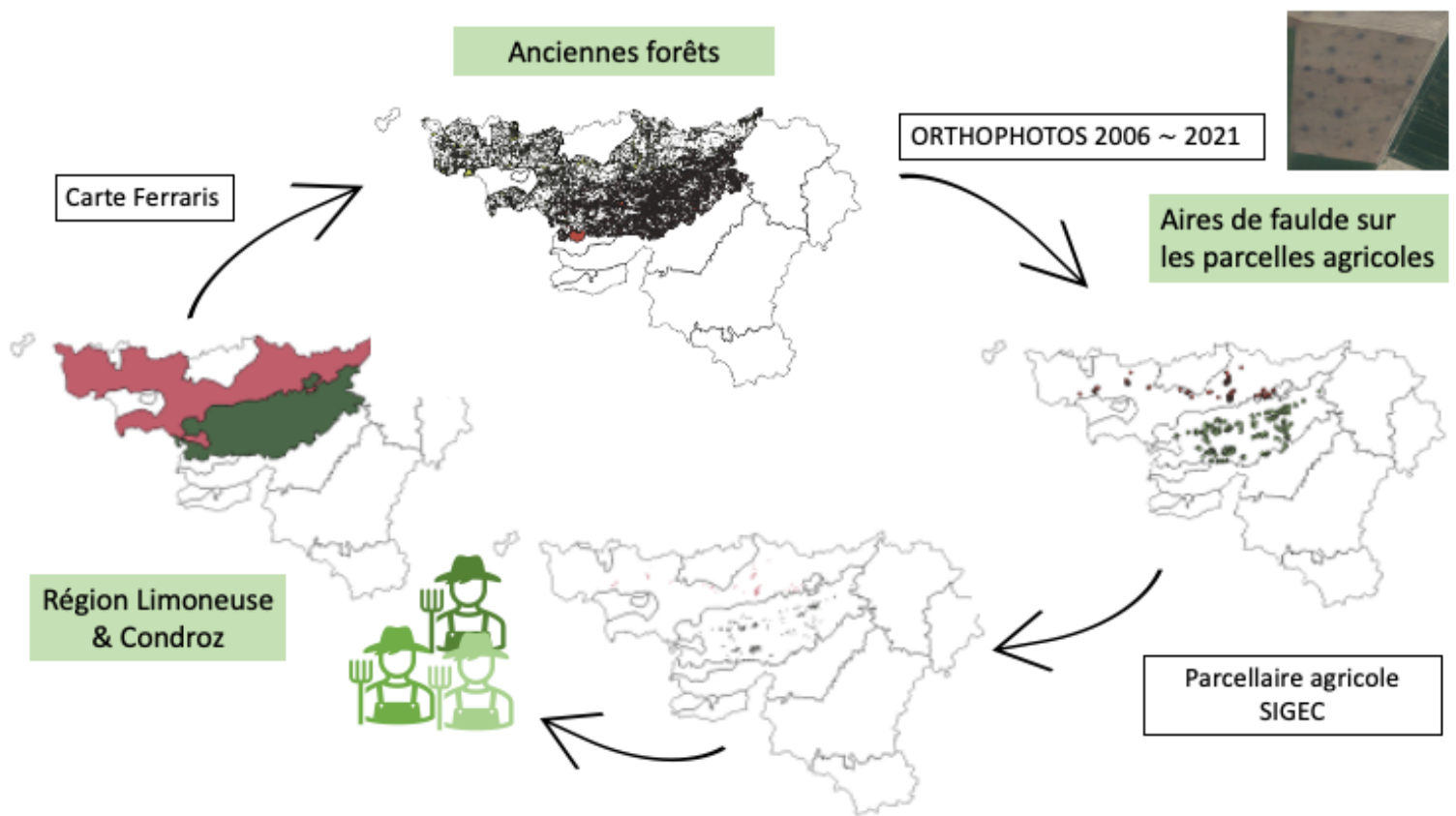


Figure 14 Schéma reprenant les différentes étapes de la méthodologie pour la sélection des sites d'étude

Dans un premier temps, la carte de Ferraris (Figure 15) a été utilisée pour détecter les anciennes zones forestières cartographiées vers 1775 et qui ont été défrichées durant le XIX^e siècle pour de la mise en culture (Hardy and Dufey, 2015b). Les aires de faulde étant liées à l'utilisation des ressources forestières pour la sidérurgie préindustrielle, le charbon de bois est produit en forêt pour minimiser le transport du bois et du matériel (Lepoivre, 1941). Sur la carte de mutation de la forêt wallonne depuis le XVIII^e siècle, il s'agit de la catégorie « déboisement » qui est utilisée.

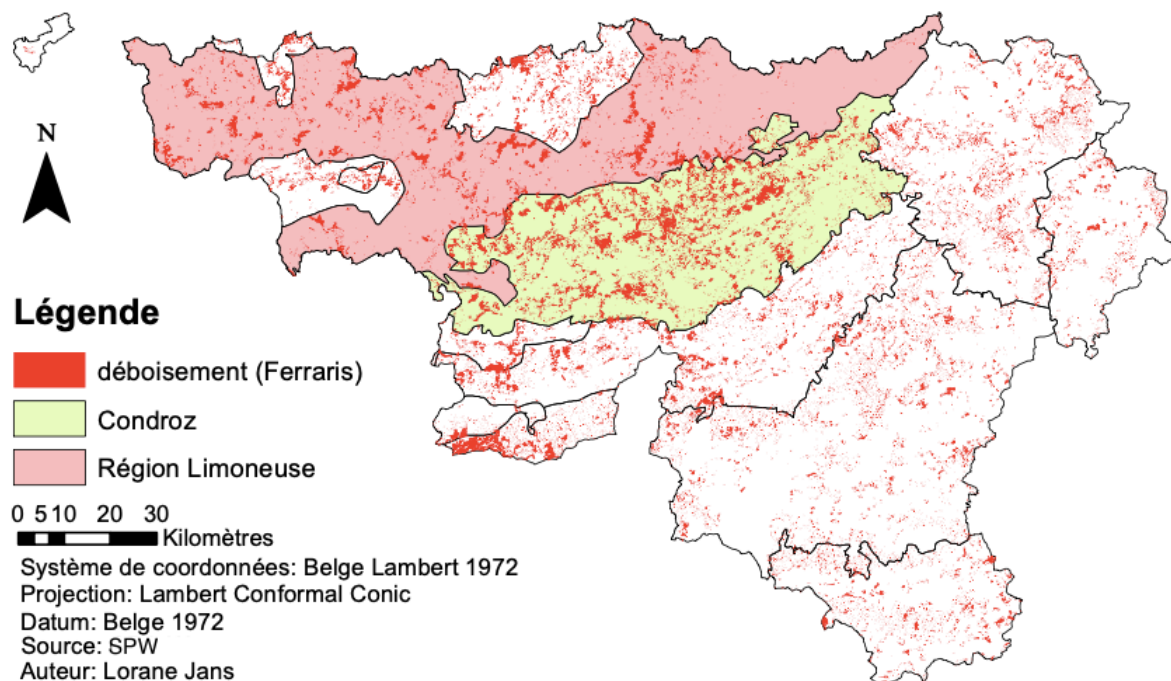


Figure 15 Localisation des zones de déboisement des anciennes forêts présentes sur la carte des mutations de la forêt wallonne depuis 1775 (Kervyn et al. 2014)

Les aires de faulde sont ensuite repérées à l'aide des orthophotos disponibles sur Wallonmap de 2006 à 2020 (Figure 16). Les orthophotos sont des imageries orthorectifiées et mosaïquées couvrant l'entièreté du territoire wallon à une résolution de 25 à 50 cm selon les années. Plusieurs années d'orthophoto sont nécessaires afin de pouvoir trouver les images correspondantes aux parcelles des sols à nu. En effet, les aires de faulde sont détectables plus facilement sur les parcelles agricoles de sols à nu à l'époque des labours et de la préparation des semis (Hardy and Dufey, 2015b). Lorsque la culture se développe, les taches noires sont difficilement détectables.



Figure 16 Aires de faulde via des orthophotos (SPW) Échelle 1 :10000

Les aires de faulde sont indiquées par des points sur une couche à l'aide d'Arcmap en identifiant manuellement les aires de faulde par photointerpretation sur base des orthophotos (Figure 17). Les points correspondants à des aires de faulde sont ainsi ajoutés sur la couche au fur et à mesure. Le nombre d'aires de faulde pointées n'est pas exhaustif. En effet, en continuant ce même travail de détection des aires de faulde sur les parcelles de sols nus, d'autres aires de faulde peuvent encore être détectées.

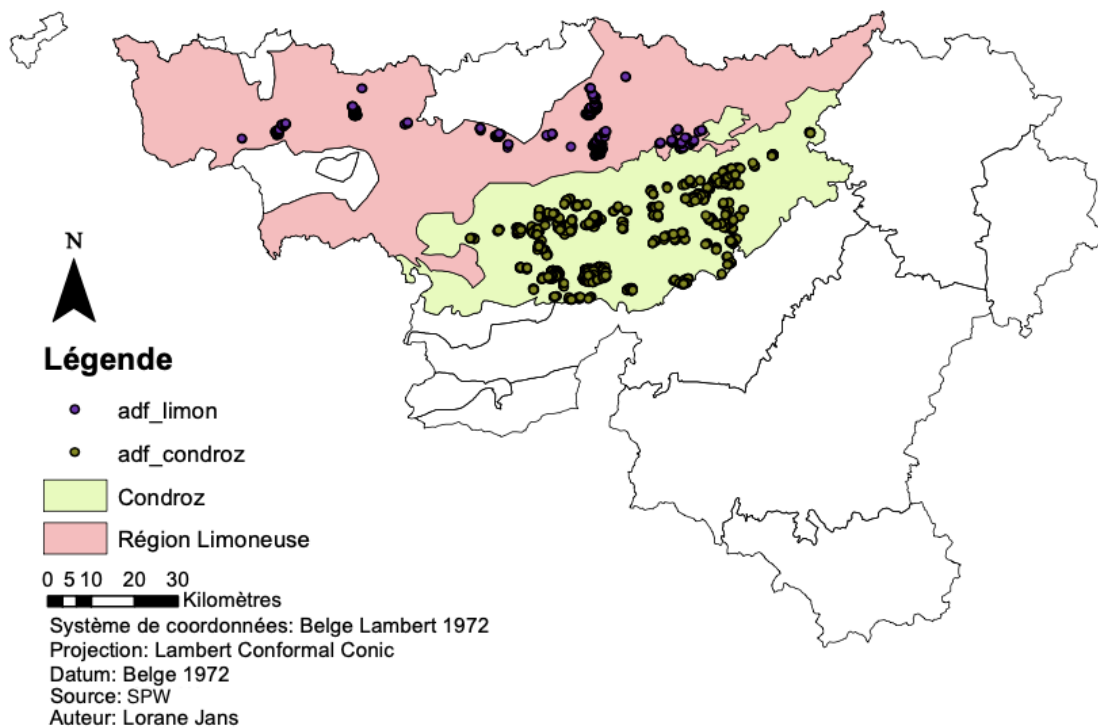


Figure 17 Localisation des aires de faulde présentes sur le Condroz et la Région limoneuse

Le parcellaire agricole (SIGEC) permet de relever les différentes parcelles possédant des aires de faulde (Figure 18). Le parcellaire localise, sous la forme de polygones, l'emprise des parcelles agricoles exploitées ainsi que la culture principale qui y est effectuée par année (ce qui n'exclut pas un usage éventuel en interculture). Ceux-ci sont disponibles sur le géoportail de Wallonie (SPW).

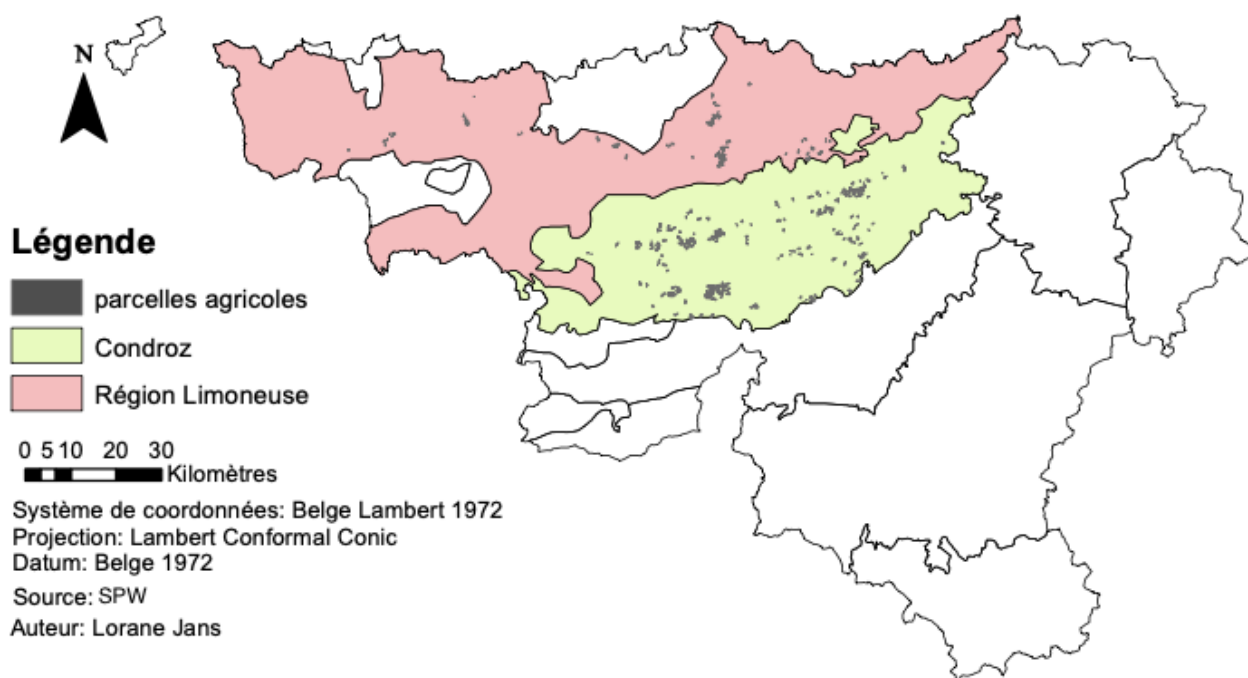


Figure 18 Localisation des parcelles agricoles possédant des aires de faulde

Les surfaces des parcelles sont modifiées d'année en année pouvant parfois aboutir à une parcelle correspondant à deux ou trois parcelles l'année suivante. Pour éviter ce problème, (contour des parcelles non identiques d'année en année), dans la fenêtre « Rechercher », « Entités vers points (Gestion des données) » est utilisé en entrant la couche des parcelles en entrée et en obtenant une classe d'entités en sortie avec le centre des parcelles. Celui-ci permet d'obtenir le centre de la parcelle contenant la ou les aires de faulde et en limitant les problèmes des contours non identiques (Figure 19).

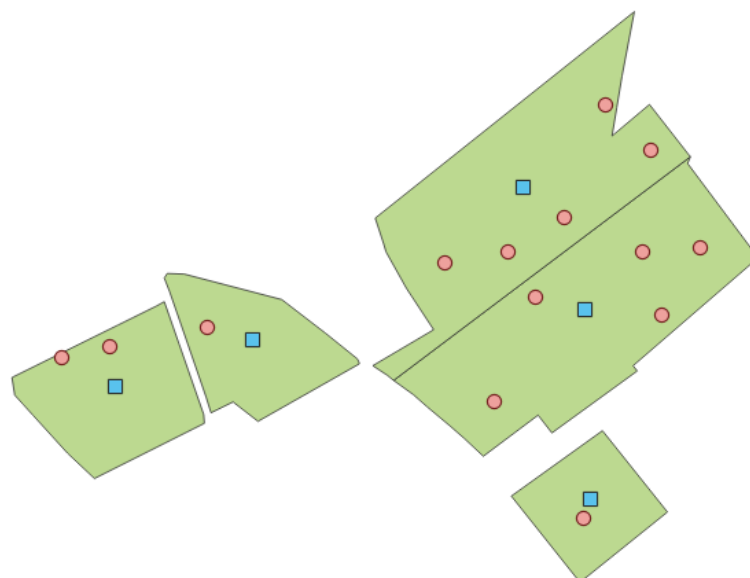


Figure 19 Centre des parcelles (rectangle bleu) par rapport à la localisation des aires de faulde (point rose). Les parcelles sont en verts.

A partir des tables, un fichier Excel reprenant toutes les parcelles avec des aires de faulde est obtenu et sert de fichier de référence pour la recherche d'agriculteurs pour les interviews. Les fichiers Excel des tables d'attributs sont exportés *via* l'ArcToolbox en utilisant l'outil de conversion « Table vers Excel ».

Les outils de « Sélection » selon les attributs et selon les emplacements ont également été de nombreuses fois nécessaires ainsi que les différents outils de « Géotraitement » telles que les fonctions : combiner, intersecter et fusionner. Les cartes ont été confectionnées à l'aide du mode de mise en page.

4.3. Création d'un guide d'entretien

Grâce aux connaissances établies durant la phase de recherche d'informations afin de réaliser l'état de l'art, différentes thématiques à aborder lors des entretiens ont été identifiées. Les entretiens sont semi-dirigés (aussi appelés semi-directifs). Cela signifie qu'ils sont directifs dans leur contenu mais non directifs dans leur forme. Dès lors, l'ordre et la manière d'aborder les thématiques dans la discussion dépendent du cours de celle-ci (Ferdinand, 2019; Palinkas et al., 2015). Un guide d'entretien (Figure 34) a été construit pour aider à n'oublier aucun thème à aborder. Le choix a été de réaliser un guide ciblé et court afin de pouvoir augmenter le nombre d'agriculteurs interrogés. En effet, les réponses étant uniquement qualitatives, il s'agit de leur ressenti principal sur ces taches et les réponses sont souvent assez brèves.

Un premier guide d'entretien a été utilisé et celui-ci a été ajusté au fur et à mesure des premiers appels afin de créer le guide le plus performant possible. Ce guide est subdivisé en trois parties. Dans un premier temps, après une présentation et une explication de l'objectif de l'appel, il est demandé aux agriculteurs de confirmer la présence ou non de « taches noires » sur leurs parcelles et si ceux-ci peuvent expliquer à quoi elles correspondent et leurs origines. La première catégorie de questions concerne l'effet des aires de faulde sur leurs cultures et les différences observées par rapport au reste de leur parcelle sans tache. La seconde catégorie de questions concerne les effets sur le sol des taches. Enfin, le dernier thème de question est lié à leur envie ou non d'appliquer du biochar sur leurs parcelles et à quelles conditions.

4.4. Réalisation et retranscription des interviews téléphoniques

Les enquêtes sont réalisées par téléphone sous forme d'interview. Le choix s'est porté sur des interviews à distance car celles-ci sont de type court (allant de quelques minutes à un maximum de 30 minutes selon l'intérêt de l'agriculteur sur ces « taches noires » présentes sur les parcelles). Les interviews sont enregistrées via le dictaphone d'un ordinateur. Les numéros des agriculteurs sont trouvés à l'aide de recherche internet. Ensuite, sur base des

enregistrements audio, les interviews sont retranscrites dans un document Word pour mieux visualiser l'ensemble du contenu de chaque entretien. Les interviews ont été stoppées lorsque les informations reçues des agriculteurs semblaient converger et qu'un niveau de saturation en terme de contenu ait été atteint, à savoir 20 interviews pour la région limoneuse et 25 pour le Condroz.

4.5. Traitement des données via NVivo

Le logiciel NVivo est utilisé pour aider à traiter les données qualitatives récoltées. Il permet de faciliter l'analyse de données et de donner des pistes dans le traitement des données qualitatives. NVivo permet de gérer différentes sources telles que des interviews et des résultats d'enquêtes. Le choix du logiciel de traitement de données qualitatives s'est porté sur NVivo car celui a été vivement conseillé pour sa simplicité d'utilisation.

Le fichier Word, contenant les retranscriptions des interviews, est importé dans un nouveau projet NVivo. Ce programme permet d'organiser et de déchiffrer les données en rassemblant par thématique toutes les informations recueillies lors des entretiens. Le premier objectif est de faire émerger les thématiques centrales à partir des préoccupations principales des agriculteurs. En pratique, les thématiques choisies se représentent sous forme de « nœuds », correspondant à un sujet que l'on désire mettre en évidence (Ferdinand, 2019).

4.6. Réalisation de MindMap avec CmapTools

Les différents concepts classés en nœuds, ont pu être mis en forme dans une série de MindMap. L'outil « CmapTools » a été utilisé afin de confectionner les MindMap. Ce logiciel permet de relier les concepts entre eux et de mettre en évidence certains liens. Il est possible d'indiquer sur chaque lien, le nombre d'agriculteurs ayant évoqué ce concept, d'indiquer une couleur par case et une police d'écriture différente à chaque concept afin d'ajouter des compartimentations supplémentaires à la MindMap. Les cases de couleur verte indiquent les effets sur les plantes. Les cases de couleur jaune indiquent les effets sur le sol. La police de couleur rouge indique les effets négatifs. La police de couleur verte indique les effets positifs. Une série de différentes MindMaps a donc été réalisée afin de mettre en forme les résultats obtenus à l'aide de NVivo.

5. Résultats

Cette section présente les résultats des interviews de la région du Condroz et ensuite de la Région limoneuse. Les origines des aires de faulde, les effets sur le sol et la plante vus par les agriculteurs sont présentés ci-dessous. Enfin, la perception des agriculteurs concernant l'utilisation du biochar en tant qu'amendement est présentée. Les propos des agriculteurs sont des observations couplées à des hypothèses explicatives non vérifiées.

5.1. Région du Condroz

Vingt-cinq agriculteurs provenant du Condroz ont été interrogés.

5.1.1. Origine des aires de faulde

A l'exception d'un agriculteur, toutes les personnes interviewées ont justifié la présence de taches noires sur leurs parcelles par un déboisement suivi de feu avec les bois déboisés. Seuls neuf d'entre eux ajoutent que ces feux de bois avaient pour objectif la production de charbon de bois (Figure 20).

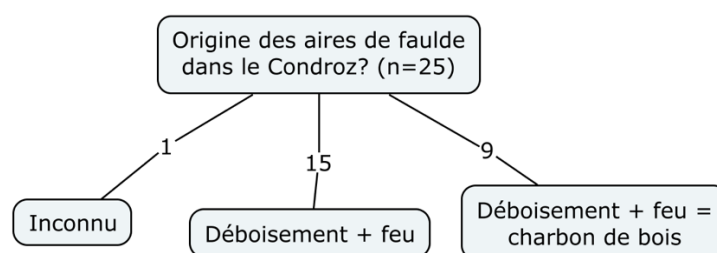


Figure 20 Origine des aires de faulde dans le Condroz d'après les 25 agriculteurs interrogés.

5.1.2. Effets sol/plante et contradictions des effets des aires de faulde vus par les agriculteurs

Parmi les vingt-cinq agriculteurs interrogés, trois n'avaient pas d'avis sur les effets provoqués par les aires de faulde et ne voyaient pas de différence avec le reste de leur parcelle. Vingt-deux d'entre eux ont relevé au moins un effet des aires faulde sur le système sol-plante. Différents effets sur le sol et les plantes sont identifiés dans les interviews à l'aide de NVivo et sont représentés dans la MindMap suivante (Figure 21). Sur cette carte mentale qui reprend les résultats des interviews du Condroz, les effets des aires de faulde identifiés par les agriculteurs du Condroz ont été classés en deux catégories principales, à savoir les effets sur

le sol et les effets sur la plante. Chaque lien reprend le nombre de fois qu'un effet a été observé. Quand la cause présumée d'un effet a été mentionnée par un agriculteur, un lien de cause à effet a également été établi. Les effets perçus comme positifs sont indiqués en vert tandis que les effets perçus comme négatifs apparaissent en rouge.

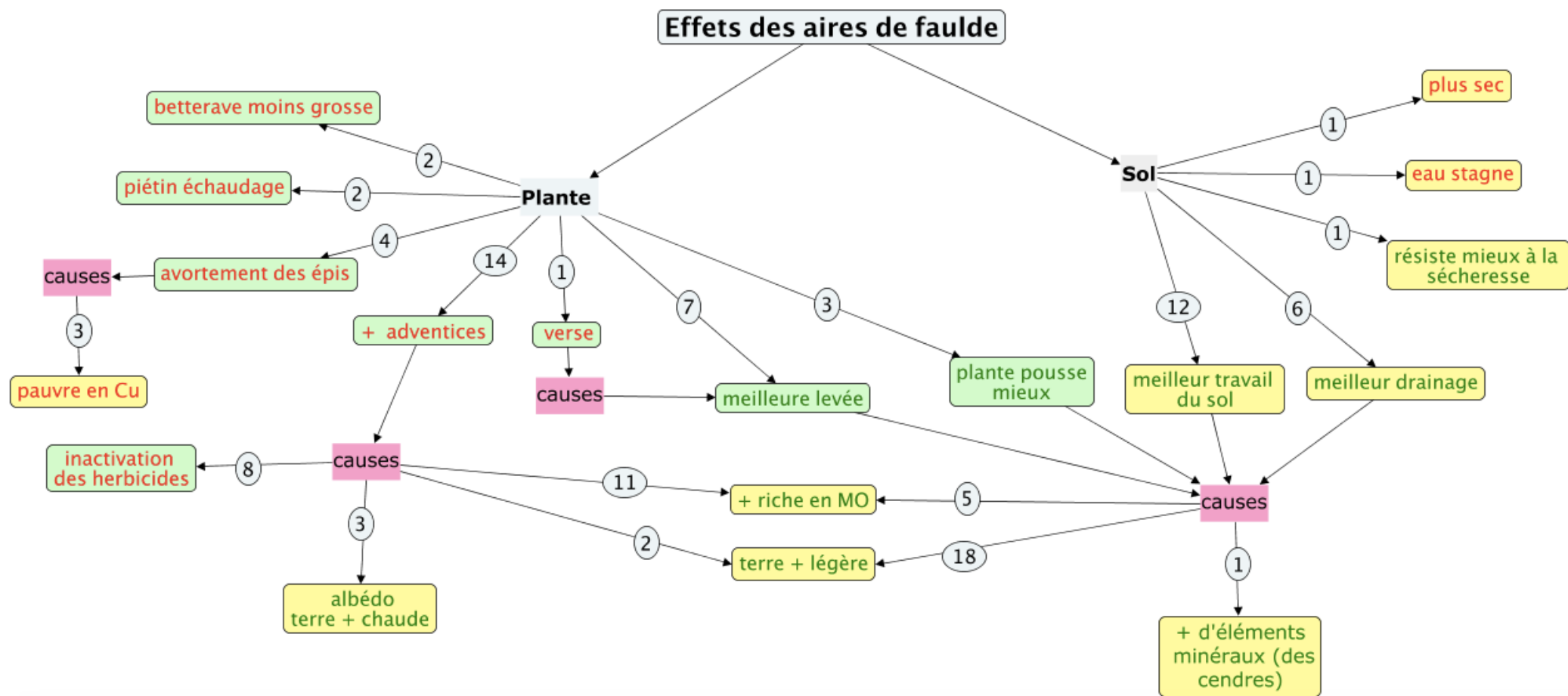


Figure 21 Effets des aires de faulde rapportés par les agriculteurs du Condroz accompagnés du nombre d'agriculteurs touchés par l'effet. Les cases de couleur verte indiquent les effets sur les plantes. Les cases de couleur jaune indiquent les effets sur le sol. La police de couleur rouge indique les effets négatifs. La police de couleur verte indique les effets positifs.

a) Effets en lien avec la plante vus par les agriculteurs

Premièrement, l'effet le plus fréquemment observé par les agriculteurs est la présence plus importante d'adventices sur les aires de faulde (n=14). Il peut s'agir d'une quantité et d'un nombre d'espèces différentes plus importants mais également d'une levée plus précoce. Le vulpin, la « fenasse », les jouets du vent, de « mauvaises graminées », des dicotylés ont été cités. Pour expliquer ces différences observées sur la flore adventice, différentes causes sont proposées par les agriculteurs telles que : (1) une terre plus riche en matière organique qui permet un meilleur développement des adventices (n=11) ; (2) une inactivité des herbicides comme les herbicides de pré-émergence et les antigraminées qui ne travaillent pas bien (n=8). Une des hypothèses citée par un agriculteur est que les herbicides se dégradent plus vite, sont détruits et n'agissent donc plus. De plus, il est nécessaire de traiter en contact, par les feuilles, car en racinaire cela fonctionne moins bien ; (3) la terre est stimulée par le soleil grâce à sa couleur noire pouvant faire office d'albédo et dès lors se réchauffer plus vite (n=3). Les adventices absorbent ainsi les nutriments de manière plus efficace et rapide. (4) Une terre plus légère permet une meilleure levée de l'adventice (n=2).

Deuxièmement, l'effet le plus important en terme de mentions, est une meilleure levée (n=7) comprenant un meilleur début de croissance de la plante et une germination plus rapide. Les agriculteurs proposent que cet effet se déroule grâce à la terre plus riche en MO (n=2) et un sol plus léger (n=4). En général, les agriculteurs observent un meilleur début de croissance malgré l'absence de différence par la suite.

Troisièmement, l'effet le plus relevé par les agriculteurs se trouve être l'avortement des épis et dès lors, des problèmes de fécondité (n=4). En effet, dans les taches, il arrive qu'un escourgeon lève en premier, qu'il fasse un épi et ensuite avorte. L'épi est alors vide, sans grain, sans paille ou encore que l'escourgeon ne fasse aucun épi. Des problèmes de fécondité apparaissent aussi chez d'autres céréales, telles que le froment. Il peut y avoir beaucoup de feuilles mais les grains ne sont pas remplis. Lorsque l'agriculteur ajoute du cuivre sur ses cultures, cet effet s'arrête. Une carence en cuivre pourrait être la cause des problèmes d'épiaison selon les agriculteurs (n=3).

Quatrièmement, les agriculteurs remarquent que la plante pousse mieux (n=3). Les hypothèses explicatives de cet effet émis par les agriculteurs seraient une terre plus riche en MO (n=2) et une terre plus légère (n=2). Les agriculteurs précisent que les plantes poussent mieux mais le rendement n'est pas pour autant meilleur. Les agriculteurs n'observent pas de différence ou celles-ci ne sont pas mesurées car cela demande une carte de rendement à la moissonneuse, ce que les agriculteurs interrogés n'ont pas effectué.

Parmi les observations notables citées moins fréquemment, deux agriculteurs ont mentionné une sensibilité accrue au piétin échaudage sur la culture de froment d'hiver sur les aires de faulde. Des problèmes de verse ont également été observés. A cause de la croissance plus rapide et précoce de la plante, la paille n'est pas assez résistante pour supporter la masse de biomasse aérienne et de l'épi face au vent et la pluie. Cette croissance légèrement plus précoce des céréales complique la planification des applications de raccourcisseurs. Finalement, parmi les effets mentionnés de manière peu récurrente, on peut retenir des différences morphologiques observées sur les racines des betteraves (défaut de forme, betteraves plus petites ou plus « boulottes »).

b) Effets en lien avec le sol vus par les agriculteurs

Premièrement, l'effet le plus souvent évoqué par les agriculteurs est un sol plus facile à travailler (n=12). Cet effet est justifié par les agriculteurs par une terre plus légère, friable, fine, meuble et aérée (n=9) et une teneur en MO plus élevée (=1) ainsi qu'en éléments minéraux pouvant provenir des cendres (n=1). Cet effet comprend également une reprise du labour plus facile pour les cultures de printemps après l'hiver.

Le deuxième effet le plus cité correspond à un meilleur drainage du sol (n=6), qu'il n'y ait pas de stagnation d'eau. Les agriculteurs attribuent cela à une terre plus riche en MO (n=5) et un sol plus léger (n=4). Certains effets ne sont cités qu'à une seule reprise, avec des éléments qui se contredisent entre eux, tels que « un sol qui résiste mieux à la sécheresse », « une terre plus sèche » ou encore des problèmes de stagnation d'eau.

c) Synthèse

Certaines contradictions apparaissent entre les effets et principalement au niveau de l'infiltration de l'eau dans le sol (Figure 22). En effet, seul un agriculteur émet que l'eau stagne plus dans les aires de faulde contre cinq affirmant un meilleur drainage et pas de stagnation d'eau dans celles-ci. Un agriculteur affirme que le sol est plus sec tandis qu'un autre confirme que les taches résistent mieux à la sécheresse. Parmi les cinq premiers effets, trois effets sont positifs et deux sont négatifs. Parmi les trois premiers effets en lien avec les plantes, deux sont négatifs pour un sur le sol. De plus, ce sont des effets sur les plantes qui sont le plus recensés.

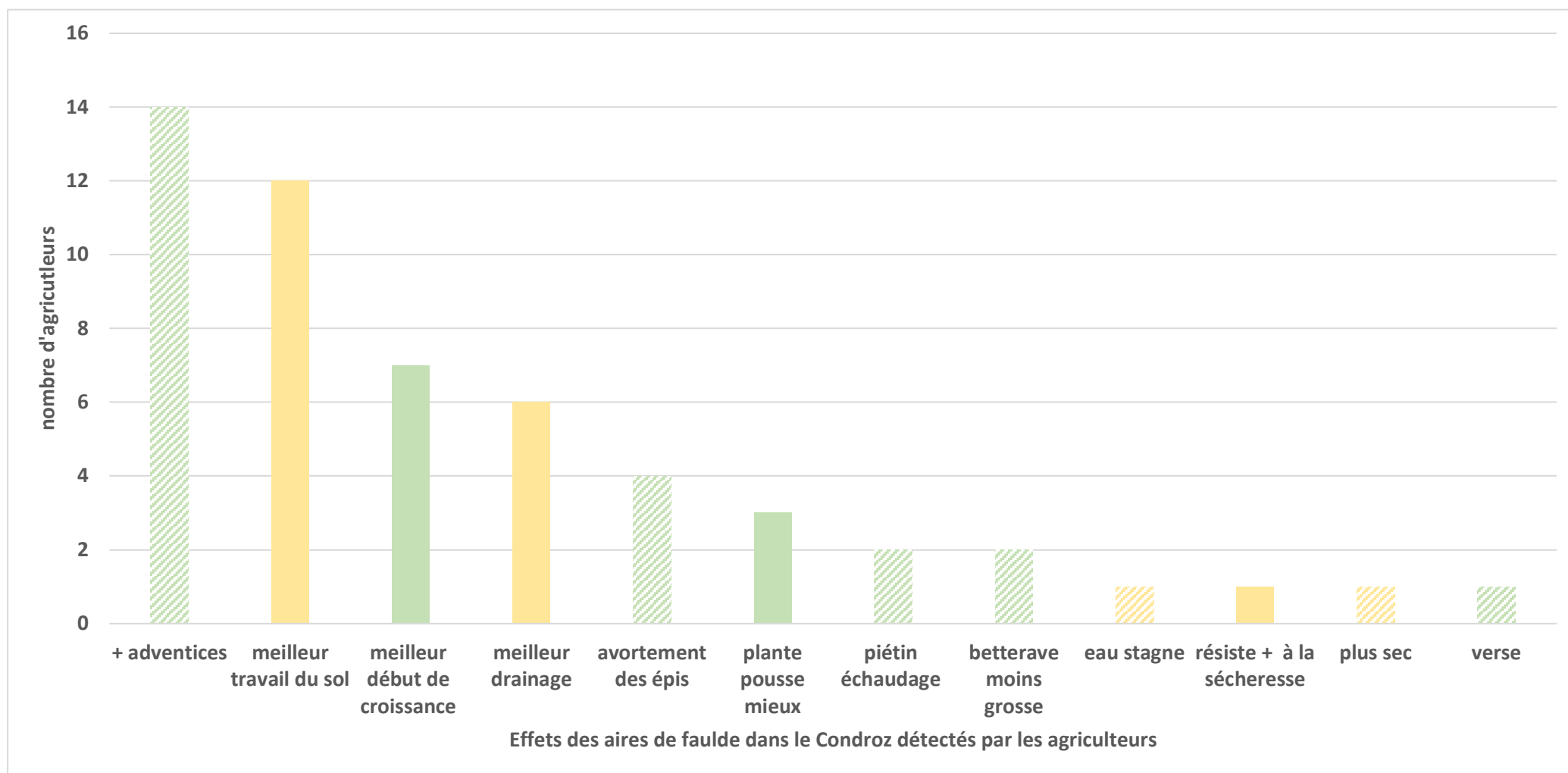


Figure 22 Effets des aires de faulde dans le Condroz détectés par les agriculteurs en fonction du nombre d'agriculteurs. La couleur verte indique les effets sur les plantes. La couleur jaune indique les effets sur le sol. Les motifs hachurés indiquent un effet négatifs.

5.2. Région limoneuse

Vingt agriculteurs provenant de la Région limoneuse ont été interrogés.

5.2.1. Origine des aires de faulde sur la parcelle vue par les agriculteurs

Comme pour le Condroz, la majorité des agriculteurs expliquent la présence de taches noires par un déboisement et un feu de bois réalisés dans le passé. Cependant, dans cette région agricole, une nouvelle catégorie de réponse apparaît. Trois agriculteurs sur les vingt interrogés ignorent complètement la raison des taches (Figure 23). Quatorze d'entre eux expliquent la présence des taches par un déboisement suivi d'un feu et trois mentionnent que ceci était réalisé dans le but d'obtenir du charbon de bois.

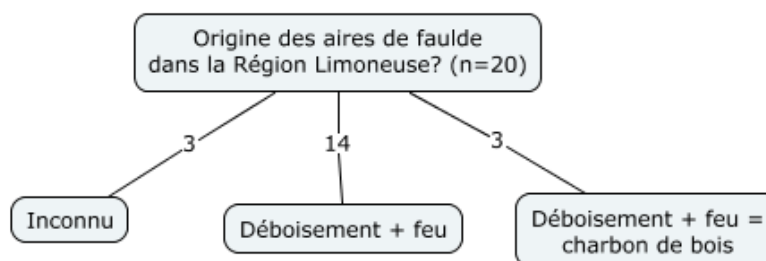


Figure 23 Origine des aires de faulde dans la Région Limoneuse d'après les 20 agriculteurs interrogés.

5.2.2. Effets sol/plante et contradictions des effets des aires de faulde vus par les agriculteurs

Dans la Région limoneuse, six agriculteurs sur vingt n'ont pas d'avis sur les effets que les aires de faulde peuvent avoir sur leurs parcelles et ne remarquent pas de différence avec le reste de la parcelle. Différents effets en lien avec la plante ou sol sont identifiés au cours des interviews à l'aide de NVivo et sont représentés dans la MindMap suivante (Figure 24).

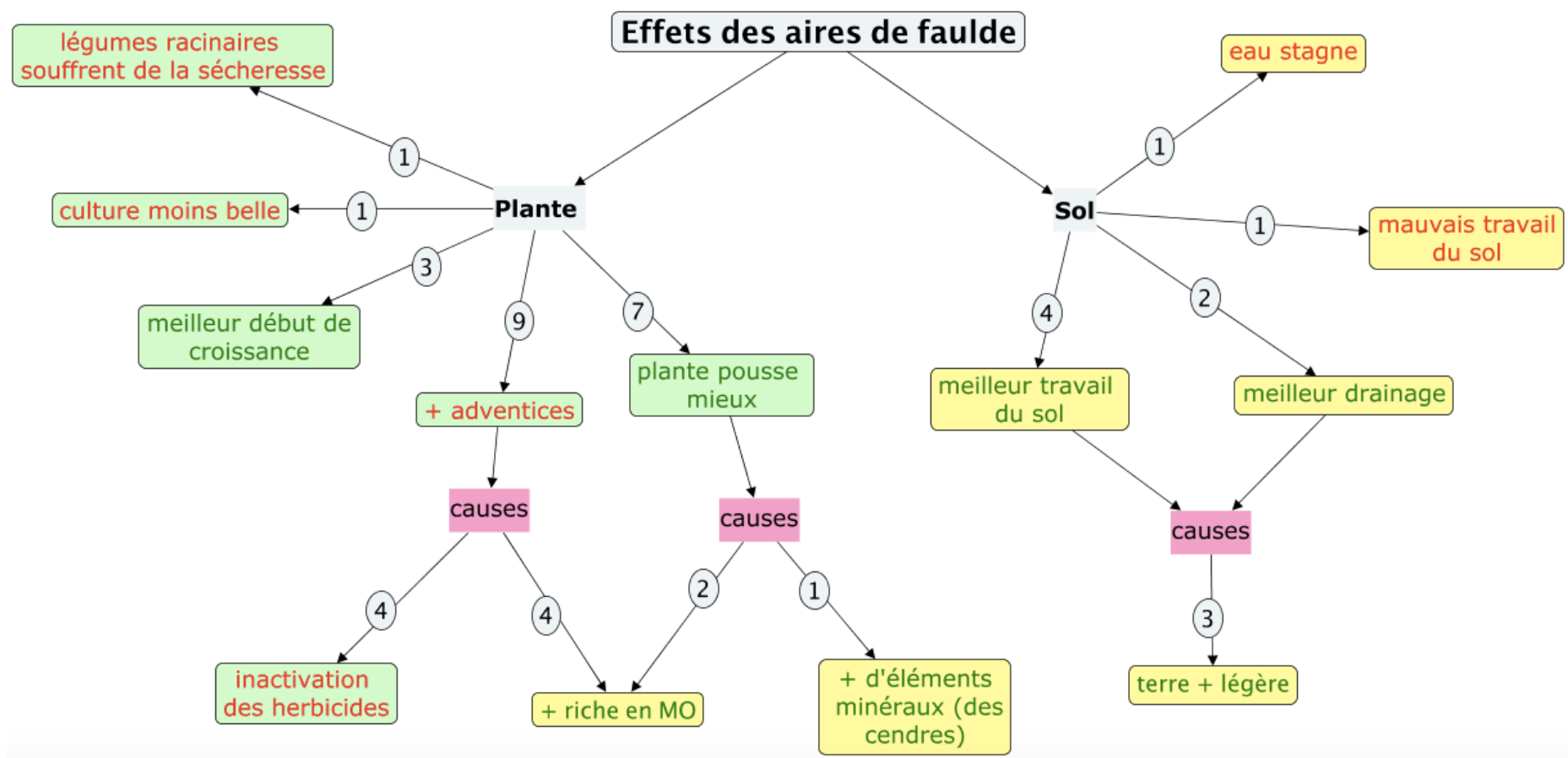


Figure 24 Effets des aires de faulde rapportés par les agriculteurs de la Région limoneuse accompagnés du nombre d'agriculteurs touchés par l'effet. Les cases de couleur verte indiquent les effets sur les plantes. Les cases de couleur jaune indiquent les effets sur le sol. La police de couleur rouge indique les effets négatifs. La police de couleur verte indique les effets positifs.

a) Effets en lien avec la plante vus par les agriculteurs

Premièrement, c'est la présence plus nombreuse d'adventices (n=9) qui est l'effet le plus fréquemment remarqué par les agriculteurs. Les causes de cet effet, selon les agriculteurs, seraient une inactivation des herbicides sur les taches noires (n=4) ainsi qu'un sol plus riche en MO (n=4). En effet, certains agriculteurs remarquent que les produits phytosanitaires ne fonctionnent pas sur les taches, qu'il est nécessaire de repasser une seconde fois (surtout sur les cultures de printemps telles que la betterave...) ou d'ajouter 10 % de produit en plus. Les traitements phytosanitaires semblent poser problème qu'ils soient de pré-émergence ou de post-émergence. De plus, il peut s'agir d'un nombre plus important d'adventices mais également une diversité plus importante d'adventices.

Deuxièmement, l'effet le plus important en terme de mentions est une culture qui pousse mieux (n=7). Les hypothèses de la cause de cet effet selon les agriculteurs seraient un sol plus riche en MO (n=2) et éléments minéraux (n=1).

Troisièmement, l'effet le plus souvent observé par les agriculteurs est un meilleur début de croissance (n=3). Ensuite, différents effets ne sont retenus qu'une seule fois, tels qu'une culture moins belle et des légumes racinaires souffrant de la sécheresse.

b) Effets en lien avec le sol vus par les agriculteurs

Du côté des effets sur le sol, un meilleur travail du sol est l'effet le plus fréquemment observé par les agriculteurs (n=4). Les agriculteurs attribuent cet effet à une terre plus légère (n=1). Ensuite, un meilleur drainage (n=2) et une terre plus filtrante sont également justifiés par une terre plus légère (n=2) par les agriculteurs. D'autres effets ne sont cités qu'une seule fois tels qu'un mauvais travail du sol à cause d'une terre qui se « défait » moins bien et une eau stagnante selon les agriculteurs.

c) Synthèse

Davantage de contradictions sont recensées dans les résultats de la Région limoneuse (Figure 25). Un agriculteur trouve que l'eau stagne sur les taches contre deux qui remarquent un meilleur drainage. Ensuite, une majorité d'agriculteurs trouve que le sol se travaille mieux et que la culture pousse mieux contre une seule voix du côté opposé. Les légumes racinaires font aussi débat : un agriculteur remarque que ceux-ci souffrent de la sécheresse plus rapidement, tandis qu'un autre est plutôt d'avis que les légumes sont plus beaux et plus gros.

Parmi les cinq effets les plus fréquemment rapportés, un effet est négatif et les quatre autres sont positifs. Parmi les trois premiers effets en lien avec les plantes, deux sont positifs et parmi

les trois premiers effets en lien avec le sol, deux sont également positifs. La répartition des effets plantes-sol est équilibrée.

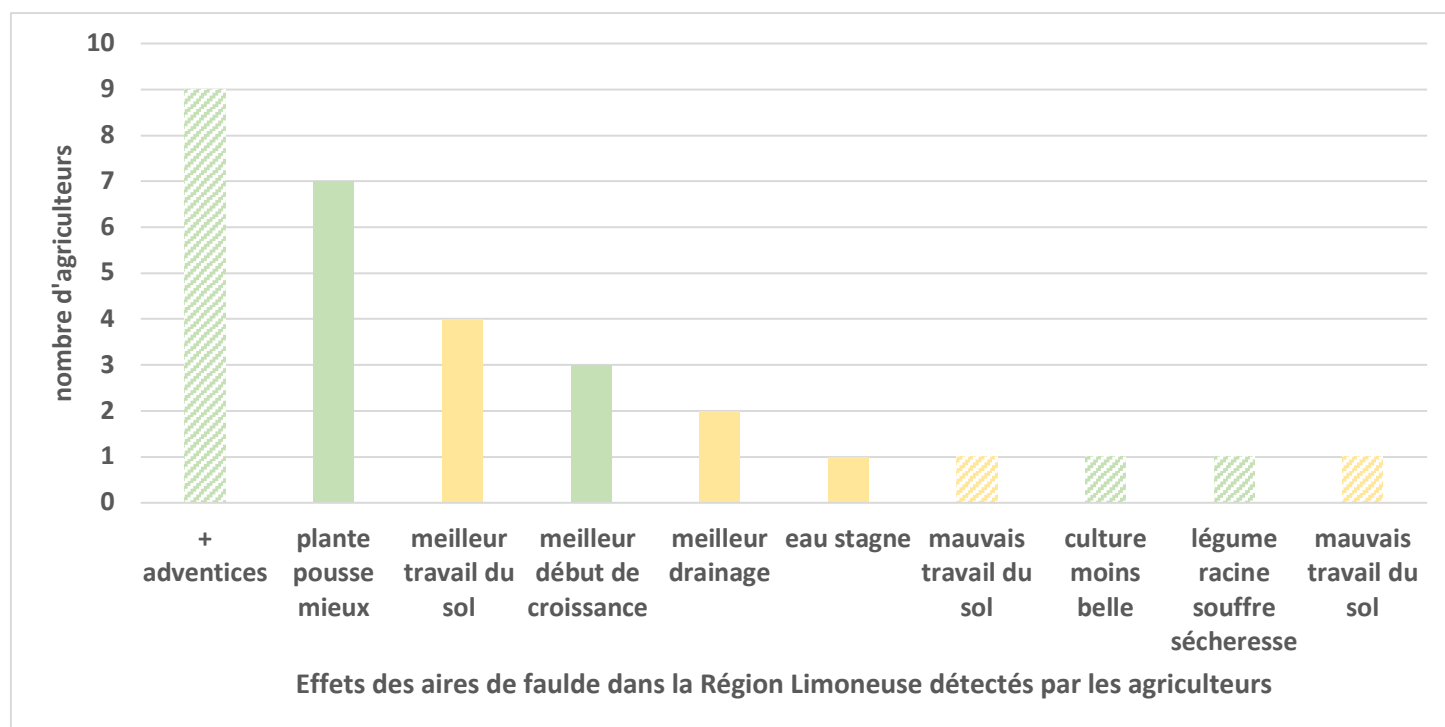


Figure 25 Effets des aires de faulde dans la Région limoneuse détectés par les agriculteurs en fonction du nombre d'agriculteurs. La couleur verte indique les effets sur les plantes. La couleur jaune indique les effets sur le sol. Les motifs hachurés indiquent un effet négatif et les couleurs unies des effets positifs.

5.3. Confrontation Condroz-Région limoneuse

Il est alors possible de comparer les résultats des effets des deux régions agricoles (Figure 26) au niveau des effets sur le sol et les plantes. Moins d'effets différents sont relevés dans la Région limoneuse que dans Condroz. Pour rappel, parmi les agriculteurs interrogés, seuls 60 % des agriculteurs de la région limoneuse remarquent une différence par rapport aux restes de leurs terres contre 88 % pour les agriculteurs du Condroz. Les premiers effets au niveau du sol et des plantes sont identiques dans chacune des régions. En outre, si plusieurs agriculteurs ont rapporté une meilleure croissance végétale, aucun n'a mentionné que les rendements étaient meilleurs sur les aires de faulde. soit parmi les effets les plus cités, cela n'équivaut pas à un meilleur rendement.

De plus, il est à noter que lors des interviews, les agriculteurs précisent souvent que certains effets énoncés ne se remarquent plus aujourd'hui ou que ceux-ci s'atténuent au fur et à

mesure des années. Dans le Condroz, sept agriculteurs précisent cette atténuation et six en Région limoneuse.

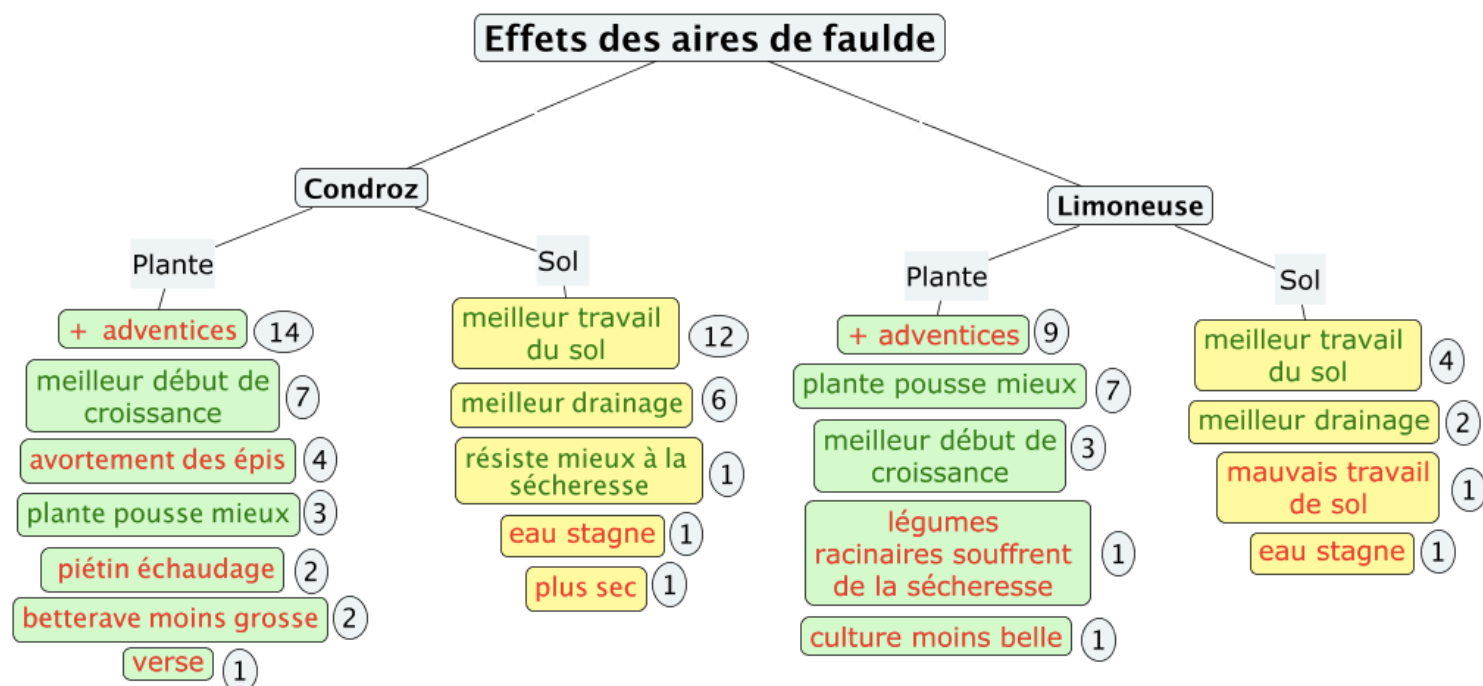


Figure 26 Effets sol-plante des aires de faulde sur les Régions agricoles limoneuses et du Condroz accompagnés du nombre d'agriculteurs touchés par l'impact. Les cases de couleur verte indiquent les effets sur les plantes. Les cases de couleur jaune indiquent les effets sur le sol. La police de couleur rouge indique les effets négatifs. La police de couleur verte indique les effets positifs.

La Figure 27 permet de comparer les effets entre les deux régions en pourcentage d'agriculteurs concernés, le nombre d'agriculteurs interrogés n'étant pas identique dans les deux régions. Un effet négatif se démarque, celui de la présence importante d'adventices sur la parcelle. C'est l'effet le plus souvent rapporté sur l'ensemble des deux régions. Les résultats des deux régions s'accordent également quant au travail du sol plus facile, un meilleur drainage et une meilleur début de croissance. Il s'agit des réponses les plus fréquemment citées par les agriculteurs. *A contrario*, les observations concernant une meilleure croissance des cultures divergent entre les deux régions, cet effet ayant été rapporté par 35 % des agriculteurs en Région limoneuse contre 12 % seulement dans le Condroz. En général les agriculteurs du Condroz ressentent davantage les effets (exceptés le fait que la plante pousse mieux) avec un pourcentage plus important d'agriculteurs concernés.

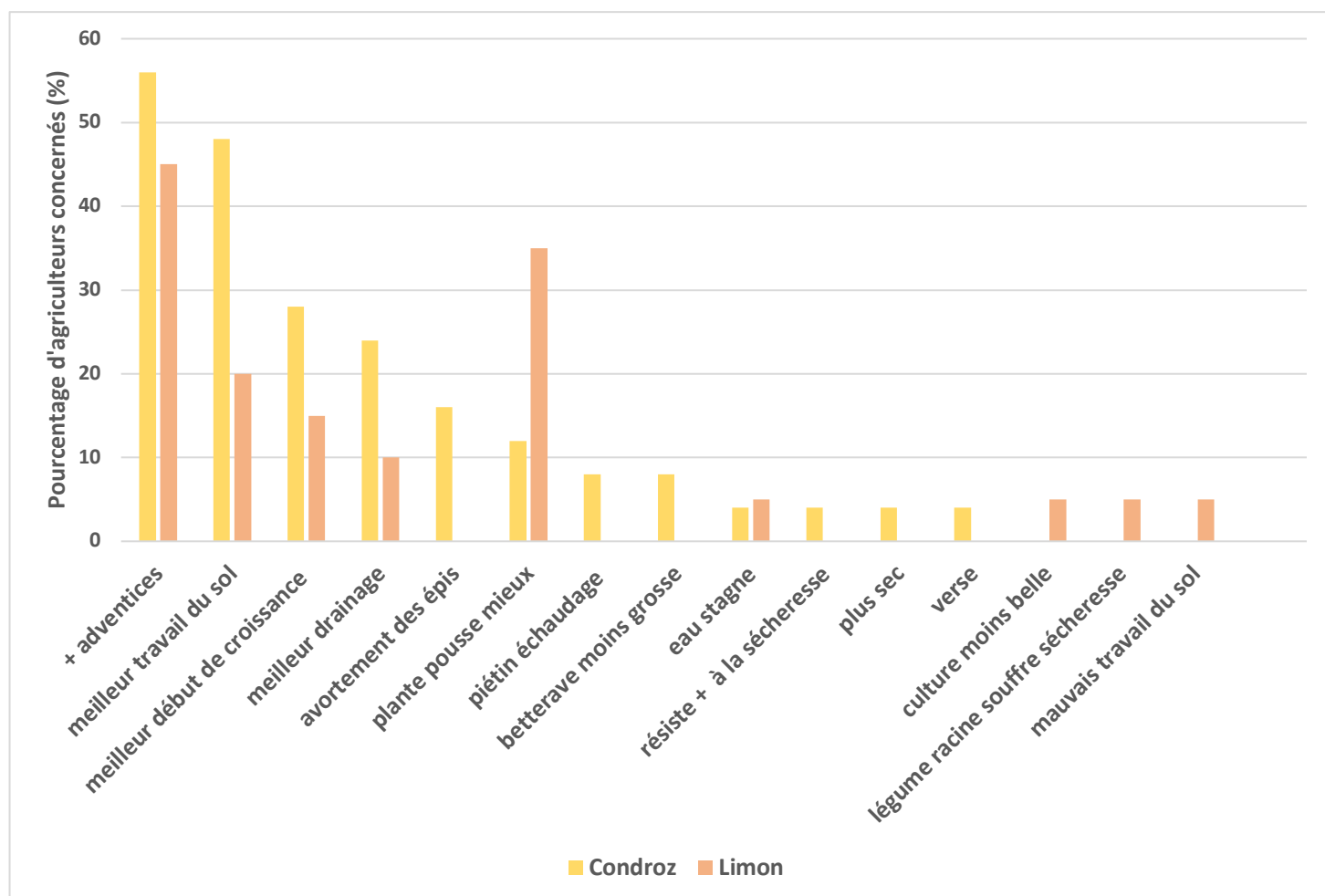


Figure 27 Pourcentage d'agriculteurs concernés par les effets de la Région limoneuse et du Condroz.

5.4. Perception des agriculteurs concernant l'utilisation du biochar en tant qu'amendement

La troisième grande thématique abordée durant les interviews concerne la perception des agriculteurs quant à la perspective d'amender leur sol avec du biochar (Figure 28). Les réponses sont divisées en trois catégories : (i) les arguments en faveur de l'utilisation du biochar comme amendement de sol ; (ii) les arguments en défaveur de l'application du biochar ; et (iii) les incertitudes et questionnement à propos de l'utilisation du biochar en tant qu'amendement. L'argument en faveur de l'application du biochar le plus cité par les agriculteurs est le potentiel du biochar pour remédier au problème du C (n=8), la capacité d'en séquestrer dans le sol. L'argument en défaveur du biochar le plus cité est le problème de gestion des adventices (n=6), les herbicides ne fonctionnant pas correctement et le désherbage des adventices prenant un temps non négligeable. Parmi les interrogations des agriculteurs sur la question du biochar, c'est le côté économique qui revient le plus souvent

(n=7). Combien cela va-t-il coûter ou rapporter aux agriculteurs ? La question de la quantité à appliquer revient également régulièrement (n=6).

Les résultats peuvent être répartis en cinq principales catégories intéressantes à traiter :

- les enjeux climatiques ;
- le point de vue législatif ;
- le point de vue économique ;
- la notion de risque lié à l'application ;
- les aspects techniques liés à l'application.

5.5. Synthèse des résultats

Sur ce dernier schéma, est reprise une synthèse de la méthode. Celle-ci aboutit aux principaux résultats obtenus. Il s'y trouve les effets les plus cités sur le sol et les plantes des aires de faulde ainsi que les cinq grands thèmes repris dans une vision prospective d'une utilisation du biochar (Figure 29).

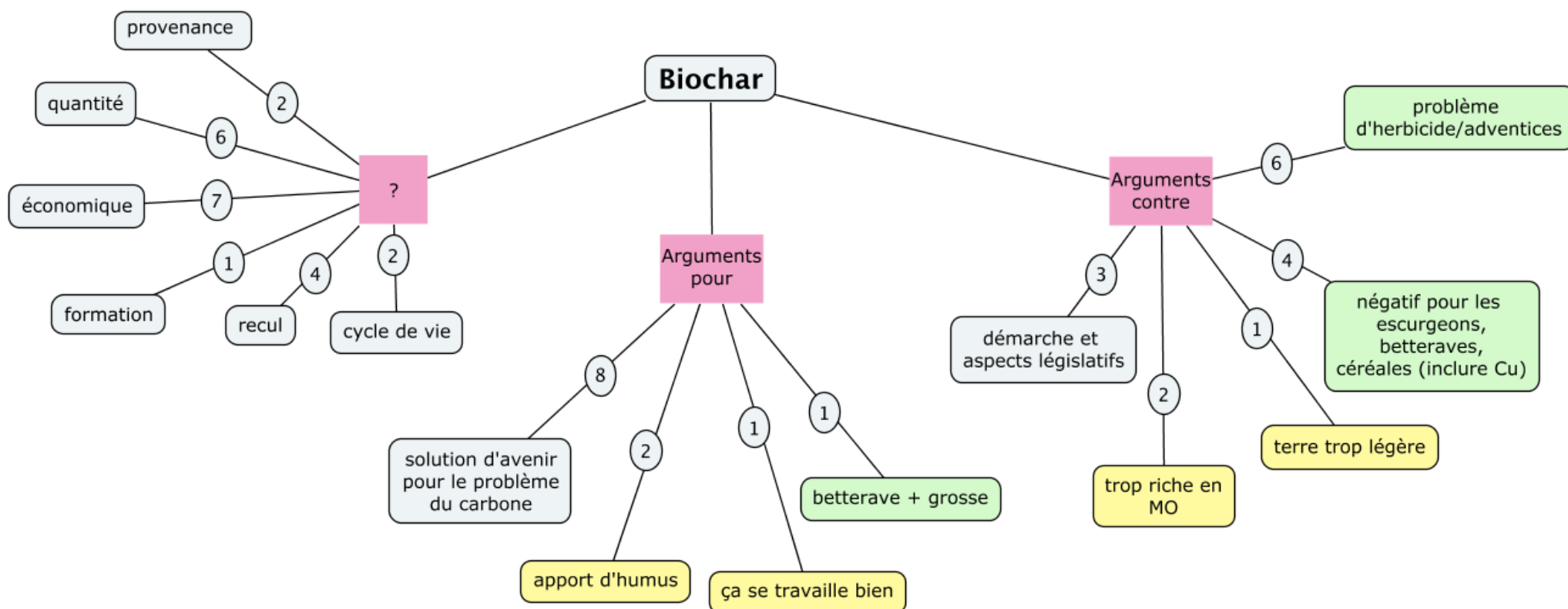


Figure 28 Arguments pour et contre l'application du biochar des agriculteurs sur leurs parcelles ainsi que leurs questionnements à propos de celui-ci. Les cases jaunes sont les arguments liés au sol et les vertes liées aux plantes.

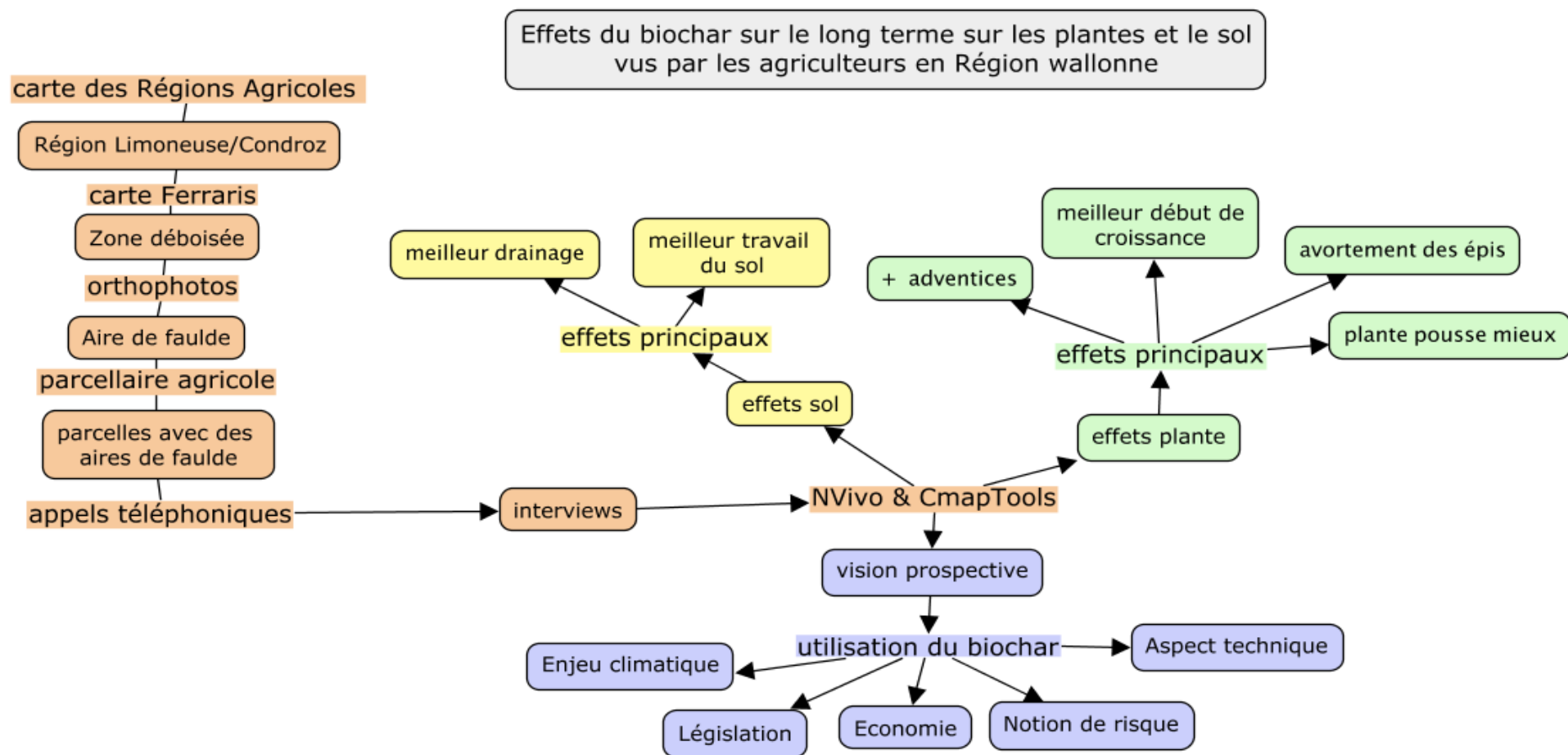


Figure 29 Synthèse de la méthode et des principaux résultats des effets du biochar sur le long terme en Région wallonne perçus par les agriculteurs. Les cases oranges indiquent la méthode. Les cases jaunes indiquent les effets sur le sol les plus fréquemment mentionnés par les agriculteurs. Les cases vertes indiquent les effets sur la plante les plus fréquemment mentionnés par les agriculteurs. Les cases bleus indiquent les thèmes repris dans une vision prospective d'une utilisation du biochar.

6. Discussion

Au cours de la discussion, deux points vont être abordés. Premièrement, les effets les plus fréquemment mentionnés par les agriculteurs vont être discutés et comparés à la littérature afin de confirmer ou d'infirmer les hypothèses émises par les agriculteurs pour justifier les différents effets observés. Deuxièmement, les cinq thèmes de la vision prospective de l'utilisation du biochar vont être discutés. Ceux-ci représentent les freins et motivations et questionnements des agriculteurs quant à l'application du biochar sur leurs sols. L'objectif de cette partie est de proposer une réponse aux agriculteurs par rapport à ces questions.

6.1. Les modifications des propriétés du sol par un amendement biochar provoquant les effets sur le système sol-plante

Les principaux effets retenus (Figure 30) lors des interviews vont être discutés et comparés à la littérature afin de confirmer ou d'infirmer les hypothèses émises par les agriculteurs pour justifier les différents effets observés. Au niveau des effets des aires de faulde sur le sol, les réponses mentionnées par un seul agriculteur ont été écartées de la discussion. Deux effets vont donc être discutés et confrontés à la littérature : **le meilleur travail du sol** et **le meilleur drainage**. Pour les effets sur les plantes, les réponses mentionnées par un ou deux agriculteurs ont été écartées de la discussion. Trois effets vont donc être discutés et confrontés à la littérature : **la présence importante d'adventices**, **la meilleure croissance des plantes** (principalement au début de la croissance et de la levée) et **l'avortement des épis**.

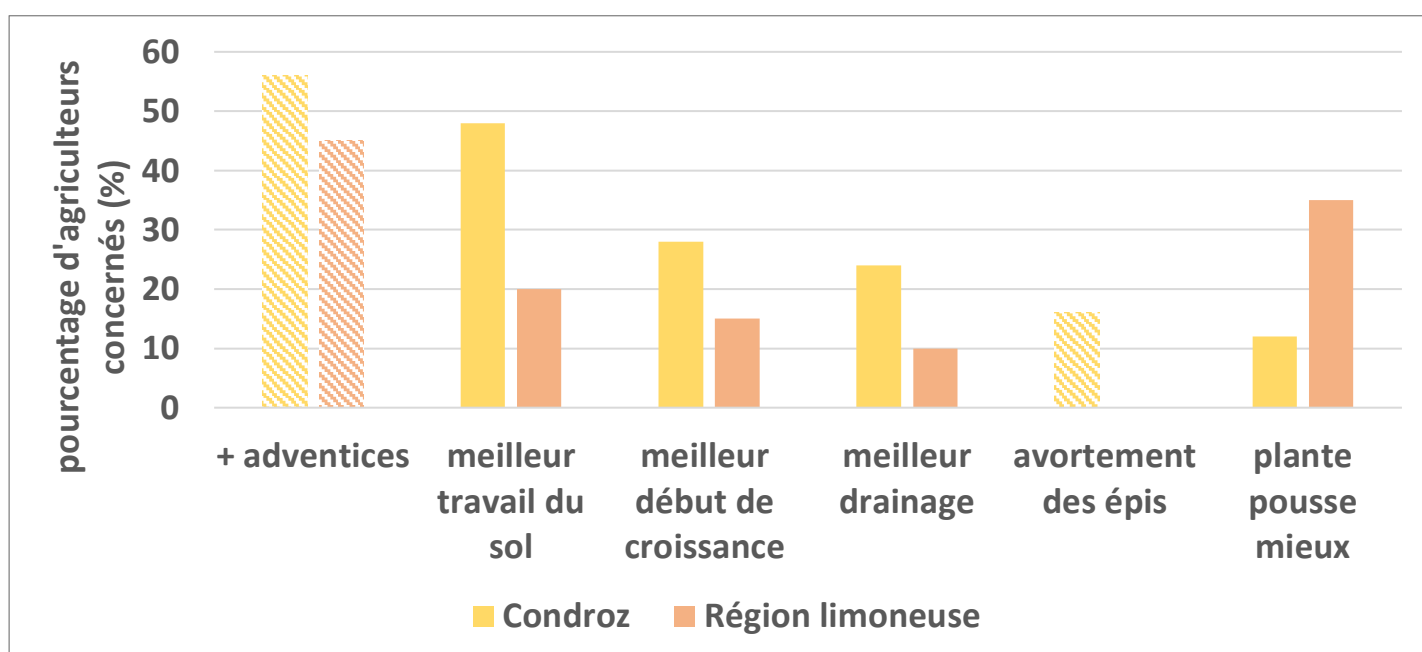


Figure 30 Zoom sur les effets les plus cités par les agriculteurs dans chacune des régions. Les zones hachurées représentent les effets négatifs.

Les 6 effets les plus fréquemment observés par les agriculteurs ont été justifiés par différentes hypothèses des agriculteurs (Figure 31). Ces différentes causes peuvent être approfondies grâce à la littérature (Figure 32). Il est important de noter que certains effets évoluent en fonction de l'âge du biochar. Les liens de cause à effet et, le cas échéant, leurs évolutions temporelles, sont expliquées ci-dessous, ceux-ci sont rappelés en **gras** à la fin de chaque section les expliquant.

Que les effets observés par les agriculteurs portent sur le compartiment sol ou le compartiment plante, il semble logique qu'ils trouvent leur origine dans une modification des propriétés du sol par la présence du charbon de bois (ou plus largement, de l'aire de faulde). Les effets exercés par les aires de faulde sur les propriétés du sol ont été regroupés en trois grand type : (i) les effets liés au complexe d'échange du sol ; (ii) les effets liés à la structure du sol ; et (iii) les effets liés à la couleur du sol. Une quatrième catégorie d'effets pourrait également être mise en avant, (iv), les effets liés à la concentration en charbon de bois dans le sol en fonction du contexte agronomique, ce qui semble expliquer certains contrastes observés entre les deux régions agricoles.

Certains effets observés par les agriculteurs peuvent être expliqués par plusieurs modifications des propriétés du sol. Les agriculteurs ont justifié les effets par différentes hypothèses qui s'avèrent être justifiées ou non par la littérature. Les effets ont presque tous été justifiés par les agriculteurs (excepté le meilleur travail du sol et le meilleur drainage en Région limoneuse) par une terre plus riche en MO. Cela étant la caractéristique même du biochar, cette cause n'a pas été rediscutée à chaque effet.

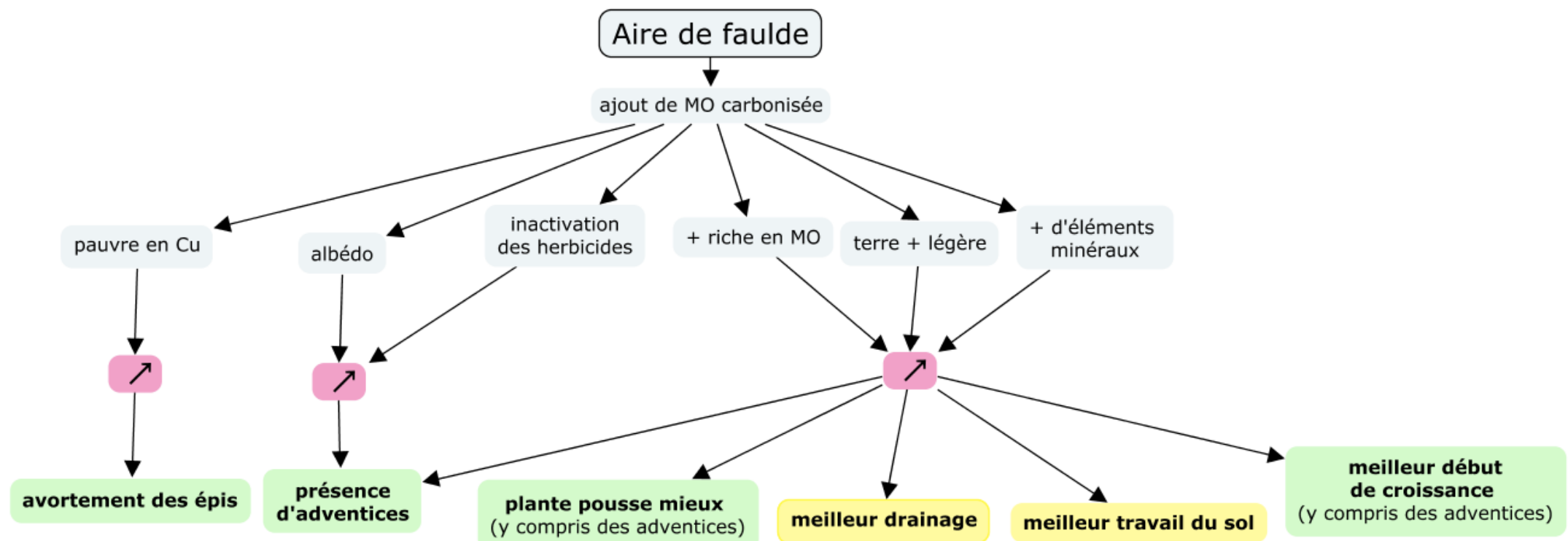


Figure 31 Hypothèses des causes des effets les plus fréquemment observés par les agriculteurs. Les effets sont dans les cases jaunes et vertes. Les cases vertes représentent les effets en lien avec la plante. Les cases jaunes représentent les effets en lien avec le sol.

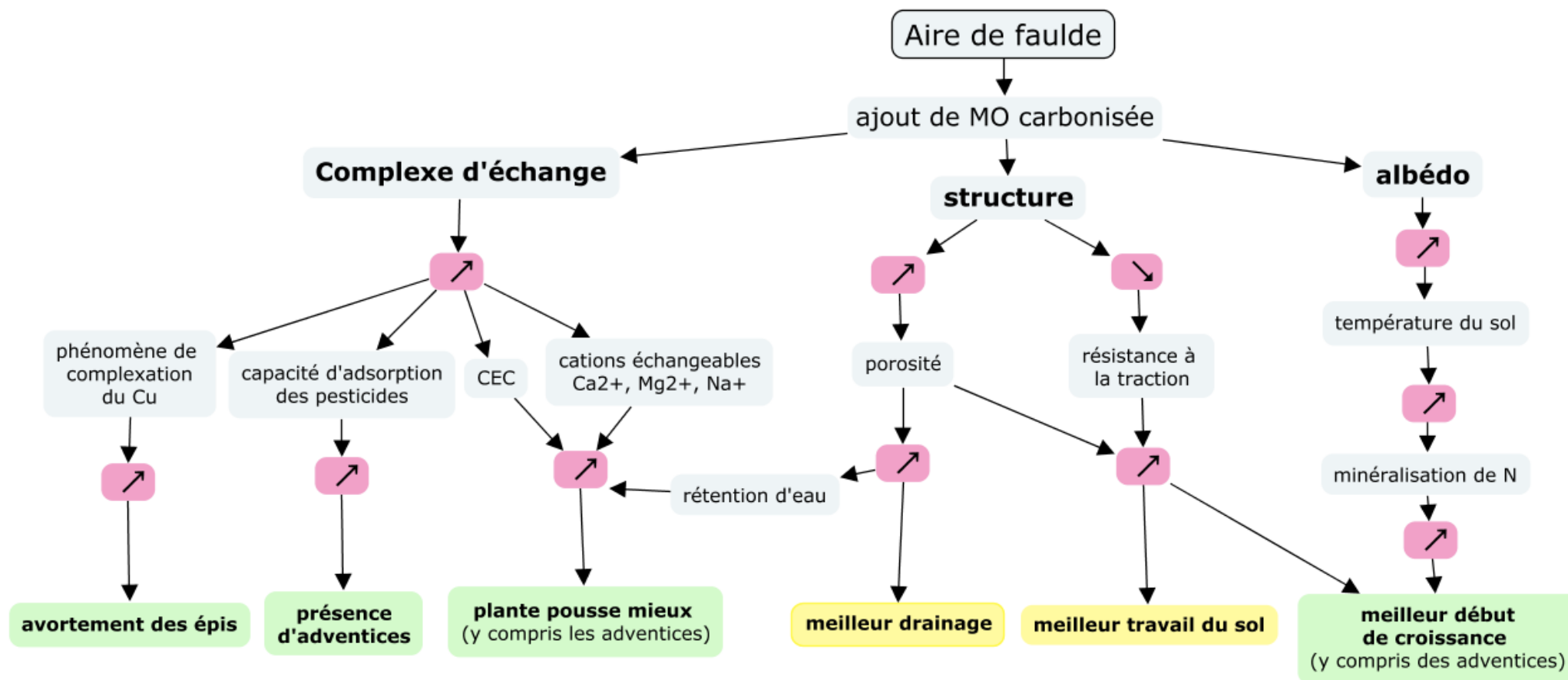


Figure 32 Causes approfondies par la littérature menant aux effets les plus fréquemment observés par les agriculteurs. Les effets sont dans les cases jaunes et vertes. Les cases vertes représentent les effets en lien avec la plante. Les cases jaunes représentent les effets en lien avec le sol.

6.1.1. Les effets liés au complexe d'échange du sol

Les effets mentionnés par les agriculteurs ayant un lien au complexe d'échange du sol sont la meilleure croissance végétale, la présence d'adventices et l'avortement des épis. La CEC, la rétention de nutriments ainsi que les phénomènes d'adsorption et complexation sont les paramètres étudiés du complexe d'échange expliquant les effets.

a) La capacité d'échange cationique et la rétention de nutriments

Un des effets les plus connus du biochar est sa propension à augmenter la CEC du sol, particulièrement sur le long terme, ce qui peut augmenter en conséquence les réserves nutritives du sol et donc sa fertilité chimique. Cet aspect, qui pourrait expliquer une meilleure croissance végétale au sein des aires de faulde, l'effet davantage remarqué par les agriculteurs de Région limoneuse que ceux du Condroz, est décrit en détail dans cette section.

Peu de temps après la pyrolyse, le sol enrichi en charbon de bois présente une faible CEC provoquée par une petite charge négative du charbon de bois frais (Cheng et al., 2006), charge qui varie généralement de 2 à 60 cmol_c/kg (Ippolito et al., 2015). Cependant celle-ci augmente considérablement au fil du temps (Laird et al., 2010). Une CEC de 414 cmol_c/kg par unité de charbon de bois est recensée dans la terre végétale des sites préindustriels de fours à charbon de bois, ce qui dépasse d'environ deux fois la CEC de 213 cmol_c/kg obtenue pour le COS non carbonisé (Hardy et al. 2017).

L'augmentation de la quantité de cations échangeables dans les sols amendés est due à :

- la grande surface spécifique du charbon de bois expliquant la densité de charge par unité de CO plus grande que celle de la matière organique non carbonisée (Liang et al., 2006),
- à la charge négative importante à la surface des particules de charbon de bois (Cheng et al., 2008) liée aux groupes carboxyliques et, dans une moindre mesure, aux phénoliques formés principalement par l'oxydation abiotique au fil du temps (Cheng et al., 2006; Lehmann et al., 2005),
- à l'adsorption de la matière organique naturelle à la surface des particules de charbon de bois (Cheng et al., 2006; Pignatello et al., 2006).

Par conséquent, après plus de 150 ans, la CEC par unité du CO du sol enrichi en charbon de bois est beaucoup plus importante que celle du sol naturel. La CEC élevée dans la couche arable des aires de faulde est donc fortement corrélée à la teneur en CO. En milieu forestier, les plus grandes CEC par unité de carbone ont été observées plutôt sur les sols à texture plus grossière (Hardy et al., 2016) que sur les sols de texture plus fine. Ceci encourage l'idée que la

CEC du charbon de bois pourrait continuer à augmenter suite à la dégradation progressive du charbon de bois sur de plus longues périodes dans les sites de fours à charbon de bois préindustriels de Wallonie (Chen et al., 2014).

Au moment de son application, le biochar agit comme une source de nutriments (Spokas et al., 2012). En effet, les quantités des éléments nutritifs extractibles (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ échangeables) peuvent augmenter après l'application du biochar peu de temps après la pyrolyse (Wang et al., 2014), et ce, grâce à la fraction cendreuse du charbon de bois qui agit comme une source de macro- et micronutriments à court terme (Demeyer et al., 2001; Nigussie and Kissi, 2011; Oguntunde et al., 2004). La présence de biochar frais dans le sol conduit également à une augmentation à court terme de la quantité de P (contenu sous forme d'orthophosphate soluble dans les cendres) et K disponible (Burgeon et al., 2022).

Des études rapportent des valeurs de pH proches de la neutralité dans le sol enrichi en charbon de bois peu après la carbonisation du bois (Cheng et al., 2006). En effet, la présence de biochar frais dans le sol conduit à une augmentation des valeurs de pH suite à l'ajout de cendres au sol. L'effet de chaulage provient de la capacité de neutralisation de l'acidité des oxydes, hydroxydes et carbonates de métaux alcalins et alcalino-terreux tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ dans les cendres produites par la combustion partielle de la biomasse carbonisée (Demeyer et al., 2001).

Dans les sols cultivés avec du biochar âgé, une plus grande concentration en cations divalents relevée (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) est due à l'augmentation de la CEC du biochar centenaire. Le biochar âgé peut influencer la dynamique des cations divalents dans le système sol-plante-eau (Burgeon et al., 2022). Quel que soit le type de sol, la couche arable des aires de faulde est fortement appauvrie en K^+ échangeable. Ce phénomène peut être dû à la faible affinité du K^+ pour les groupes fonctionnels à la surface du charbon de bois, qui est alors préférentiellement lixivié. Il y a également une diminution de la disponibilité du P avec le temps dans la couche arable des aires de faulde. De plus, le charbon de bois âgé ne participe pas au cycle biologique des nutriments en raison de sa faible dégradabilité (Hardy, n.d.). Une fois que les nutriments ont été lixiviés du sol ou adsorbés aux minéraux après plus de 150 ans, il reste de faibles concentrations de nutriments disponibles : le charbon de bois vieilli joue un rôle limité dans le recyclage des nutriments car il se décompose très lentement (Hardy, n.d.).

Sur les sols initialement acides, l'effet de chaulage de la cendre de bois s'atténue au fil du temps par la réacidification du sol et par l'épuisement des oxydes métalliques alcalins initialement présents dans les cendres (Cheng et al., 2006; Hardy et al., 2016), qui ont un effet de chaulage dans le cas du biochar jeune (Cheng et al., 2006). Les valeurs de pH du sol âgé enrichi en charbon de bois deviennent plus acides mais restent généralement supérieures aux valeurs de pH du sol de référence (Criscuoli et al., 2014; Mikan and Abrams, 2011; Young et

al., 1996) alors que l'acidité des sols naturellement riches en carbonates n'est pas réduite (Cambisol). Cela indique que l'avantage du biochar lié à l'action chaulante des cendres est de courte durée (Hardy, n.d.).

Dès lors, l'augmentation à long terme de la CEC et les teneurs en cations échangeables dans les sols permettant une amélioration de la fertilité du sol et de la rétention des nutriments. Cela peut renforcer l'agrégation du sol, ce qui entraîne une structure du sol plus favorable (Bronick and Lal, 2005).

Ces améliorations des propriétés chimiques et physiques du sol peuvent accroître la fertilité du sol en augmentant la teneur et la disponibilité des nutriments (Ding et al., 2016). Cela peut provoquer l'**augmentation de la croissance végétale** (Asai et al., 2009; Chan et al., 2007) et ainsi expliquer la meilleure croissance végétale observée par les agriculteurs interviewés. Cette croissance améliorée avait été justifiée par les agriculteurs par des causes plus globales telles qu'une terre plus riche en MO, plus légère et davantage fournie en éléments minéraux. Dès lors, l'augmentation de nutriments relevée par certains agriculteurs ne peut pas être due à l'apport de nutriments par les cendres, cet effet étant à court terme. Par contre, une meilleure rétention des nutriments en raison d'une CEC supérieure peut permettre d'expliquer le meilleur bilan nutritif évoqué par les agriculteurs.

b) Phénomène d'adsorption et de complexation

Les propriétés de surface des biochar, à savoir sa surface spécifique élevée et ses propriétés d'adsorption peuvent également expliquer d'autres effets observés par les agriculteurs tels que l'inactivation des herbicides radiculaires ou de pré-émergence, ou encore les symptômes de carence en Cu incriminés dans l'avortement des épis de céréales.

Dans la littérature, différentes causes expliquent la dégradation des pesticides. Le biochar est l'un des sorbants les plus efficaces pour plusieurs groupes de pesticides (Martin et al., 2012; Schaumann, 2006) en raison de sa nature poreuse et de ses propriétés adsorbantes piégeant ainsi les pesticides (Safaei Khorram et al., 2016). L'adsorption des pesticides, dans les sols amendés en biochar peut réduire leur mobilité, leur volatilisation, leur lixiviation et leur absorption par les plantes (Larsbo et al., 2013; Li et al., 2013; Marín-Benito et al., 2013).

D'autres causes supplémentaires (Figure 33) peuvent expliquer l'inactivation des pesticides dans les sols enrichis en charbon de bois. Le biochar peut améliorer dans certains cas la dégradation des pesticides par les microorganismes dans le sol (Ren et al., 2016), en améliorant l'environnement local en faveur de l'activité microbienne (Ding et al., 2017) en terme de pH (Wang et al., 2014), de MO minéralisable (Lin et al., 2012) ou d'humidité du sol (Peake et al., 2014). La dégradation chimique est également un autre moyen d'élimination

des pesticides dans le sol avec le biochar (Ren et al., 2016). L'hydrolyse chimique est une voie importante de la dégradation chimique et de la dégradation abiotique dans le sol (Zhang et al., 2013) qui pourrait être catalysée par l'amendement avec du biochar.

L'inactivation des pesticides par adsorption ou par une dégradation accélérée est sans doute le facteur principal qui explique la présence accrue **d'adventices** sur les aires de faulde. C'est d'ailleurs l'effet le plus fréquemment mentionné par les agriculteurs. L'inactivation des herbicides est une cause qui avait été identifiée par les agriculteurs et qui est en phase avec la littérature scientifique. Cet effet avait également été justifié par les agriculteurs par une terre plus riche en MO, une terre plus chaude (expliquée dans la suite) et une terre plus légère.

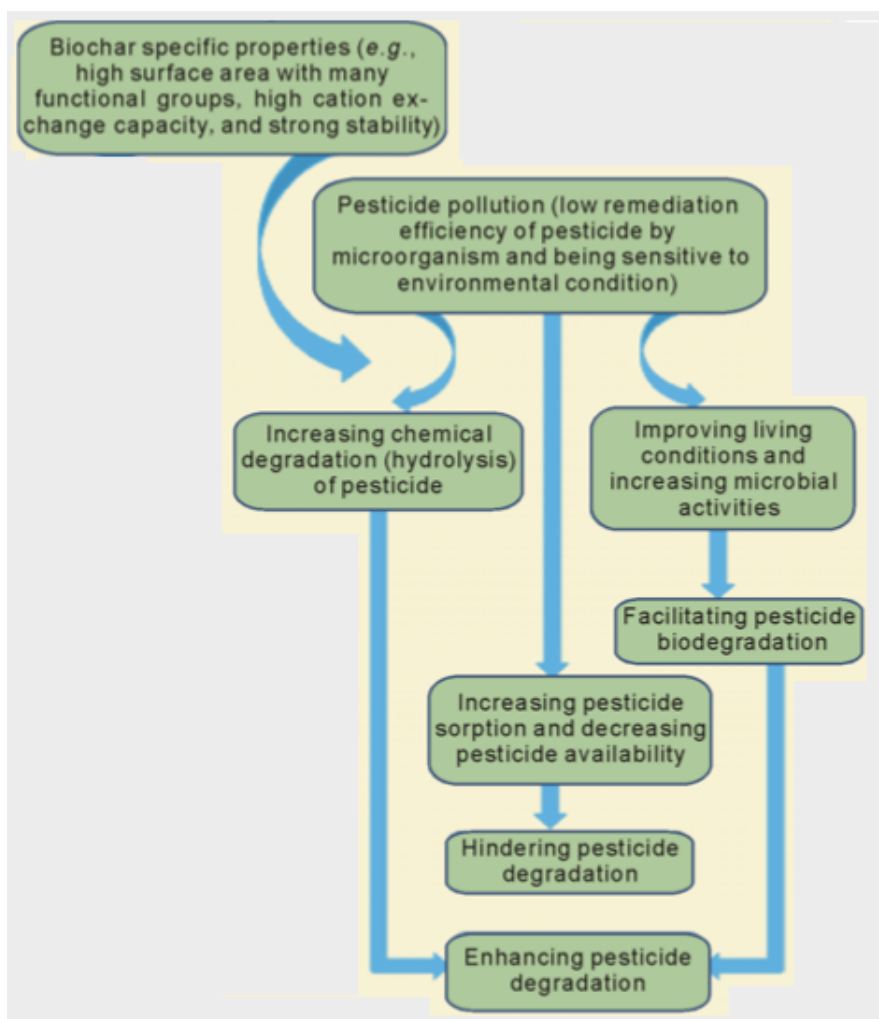


Figure 33 Application de biochar pour l'efficacité de l'utilisation des pesticides (Ding et al., 2017)

La diminution de la disponibilité du Cu peut provenir du fort effet complexant des groupes fonctionnels de la surface du charbon de bois pour le Cu, qui peut encore être accentuée par le vieillissement (Chen et al., 2014). En effet, il a été prouvé que la surface du charbon de bois

développe au fil du temps une forte densité de groupements carboxyliques, qui sont connus pour avoir une forte affinité pour certains cations divalents ou trivalents (Hardy et al., 2017). Le charbon de bois semble fortement diminuer la biodisponibilité du Cu en l'insolubilisant par complexation (Hardy et al., 2017).

Il est très probable que cette diminution de la biodisponibilité du Cu soit responsable de l'effet de **l'avortement des épis de céréales** mentionné par les agriculteurs. Néanmoins, le lien entre carence en Cu et avortement des épis n'a pas été trouvé directement dans la littérature consultée sur le biochar, même si les données chimiques relevées sur les aires de faulde (Hardy et al., 2017) suggèrent que cet effet est tout à fait plausible. La piste de la carence en Cu avait été évoquée par les agriculteurs mentionnant les avortements d'épis et était la seule.

6.1.2. Les effets liés à la structure du sol

Les effets remarquables par les agriculteurs concernant le meilleur travail du sol, le meilleur drainage et la meilleure levée des cultures sur les aires de faulde, ont été justifiés principalement par les agriculteurs par une terre plus légère et plus riche en MO. Ces effets peuvent être effectivement expliqués par les modifications de la structure du sol avec le biochar, en lien avec ce constat de terre « plus légère ».

a) Porosité

Le biochar est très poreux, son application au sol peut améliorer une gamme de propriétés physiques du sol, y compris la porosité totale, la distribution de la taille des pores, la teneur en humidité du sol, la capacité de rétention d'eau ou la teneur en eau disponible pour les plantes et l'infiltration ou la conductivité hydraulique (Atkinson et al., 2010; Major et al., 2009; Sohi et al., 2009). Notons que ces effets sont toutefois largement dépendant des propriétés du sol récepteur, notamment sa texture.

Les études, sous climat tempéré, documentent également une densité apparente plus faible (Faghih et al., 2019; Schneider et al., 2020), une teneur en eau disponible pour les plantes plus élevée (Faghih et al., 2019; Kerré et al., 2017) et un Ksat plus élevé (Faghih et al., 2019) dans les sites historiques de fours à charbon de bois par rapport au sol adjacent (Zanutel et al., 2021).

La densité apparente dans les sols contenant du biochar est réduite par l'effet de mélange ou de dilution de la plus faible densité apparente du biochar ($<0,6 \text{ g/cm}^3$) avec celle du sol ($\sim 1,25 \text{ g/cm}^3$). Étant donné que le charbon de bois des sites de four est présent dans le sol depuis plus de 150 ans et que ces sols ont vraisemblablement été cultivés pendant une grande

partie de cette période, on peut s'attendre à un mélange des particules minérales et de charbon de bois. Le biochar pourrait également réduire la densité apparente à long terme en interagissant avec les particules du sol et en améliorant l'agrégation et la porosité (Blanco-Canqui, 2017). Le biochar peut donc augmenter la porosité du sol en réduisant la densité apparente celui-ci, en augmentant l'agrégation du sol, en interagissant avec les particules minérales du sol, et en réduisant le tassement du sol. Enfin, la présence de charbon de bois centenaire est connue pour affecter l'agrégation du sol et pourrait donc avoir un effet structurant (Brodowski et al., 2005; Kerré et al., 2017).

Cependant, selon une étude effectuée en Wallonie, sur du vieux biochar, bien que la densité des particules du sol et la densité apparente diminuent légèrement en fonction de la teneur en charbon de bois (dus à la plus faible densité des particules de biochar par rapport aux particules minérales du sol), sa présence dans les aires de faulde n'a pas affecté la porosité totale (Zanutel et al., 2021). Seule la mésoporosité augmente avec la teneur en charbon de bois contrairement à la macroporosité et microporosité (Zanutel et al., 2021). Cela ne signifie pas pour autant que le biochar n'a pas d'effet sur la structure du sol, car il peut affecter la distribution de la taille des pores à porosité totale constante et leur connectivité (Zanutel et al., 2021). L'ajout de biochar peut modifier la porosité interne du sol via différents mécanismes (Zanutel et al., 2021) : (i) par la porosité intrinsèque des particules de biochar, dont certaines peuvent être ouvertes à la porosité du sol environnant, occluses ou remplies de matériau du sol au fil du temps (Brewer et al., 2014; Hyväluoma et al., 2018; Lehmann and Joseph, 2009) , (ii) en remplissant les vides entre les grains minéraux, comme dans les sols à texture grossière (Edeh et al., 2020), (iii) en occupant l'espace précédemment occupé par les particules minérales ou organo-minérale, ou (iiii) en agissant comme un élément structurant ou déstructurant, contribuant à l'agrégation du sol (Burgeon et al., 2021) ou à sa désagrégation (Pituello et al., 2018).

En effet, la plupart des études rapportent un effet positif des ajouts de biochar sur la porosité du sol (Blanco-Canqui, 2017). Cependant, cet effet positif n'est pour le moment observé que pour le biochar fabriqué à partir de résidus de culture (+11,6 %), et non pour le biochar fabriqué à partir de matières ligneuses (Omondi et al., 2016). Sur les sites de four en Wallonie, la matière ligneuse dérivée des principales essences forestières des forêts naturelles de nos régions est la source dominante de charbon de bois (Hardy et al., 2017) ce qui peut en partie expliquer l'absence d'effet sur la porosité dans nos régions.

Certaines études divergent sur les points de vue physique du sol, avec l'apport du biochar à cause de la grande variation spatiale dans la taille et l'architecture des pores sur le sol mais également du type de sol. Ce sont les sols sableux, par exemple, qui bénéficient le plus de l'apport de biochar en termes de rétention d'eau (Zanutel et al., 2021). Cependant, des études s'accordent à dire qu'une fois mélangé au sol, le biochar peut affecter la croissance des plantes

en modifiant les propriétés hydrologiques du sol, lui conférant un **meilleur drainage** et une meilleure rétention d'eau. Le meilleur drainage avait été justifié par les agriculteurs principalement par une terre plus légère, en phase avec la moindre densité apparente du sol en présence accrue de MO.

b) Résistance à la traction

Une observation rapportée par plusieurs agriculteurs est la plus grande facilité de travail du sol sur les aires de faulde, qui suggère une résistance à la traction diminuée en présence de vieux biochar.

La résistance à la traction est un paramètre de la force du sol et se rapporte à la capacité inhérente du sol à résister aux forces perturbatrices qui provoquent la fracture ou la rupture du sol. Les changements dans la résistance à la traction peuvent influencer la facilité de travail du sol, et donc la consommation de carburant du tracteur ainsi que l'efficacité du travail. L'ajout de matériaux enrichis en C, tels que le biochar, pourrait réduire la résistance à la traction. Les changements dans la résistance à la traction dépendent fortement de la porosité du sol, des liaisons interparticulaires, du C organique du sol... Ainsi, la diminution de la résistance à la traction du sol après l'ajout de biochar indique que celui-ci affaiblit probablement les liaisons interparticulaires et réduit la densité et la cohésion globale du sol (Busscher et al., 2011; Chan et al., 2007; Zong et al., 2016). L'ajout de biochar peut donc contribuer au développement microstructurel et à la résilience du sol contre les forces externes (Ajayi and Horn, 2016).

La résistance à la traction du sol diminue avec l'application de biochar, ce qui pourrait **faciliter les opérations de travail du sol**, l'émergence des semis et la croissance des racines (Blanco-Canqui, 2017) et donc un meilleur début de croissance. Tout cela profite directement à la fertilité du sol (Nelissen et al., 2015) et peut augmenter la production végétale (Amézketa, 1999). La facilité du travail du sol avait également été justifiée par les agriculteurs principalement par une terre plus légère, en phase avec la moindre densité apparente du sol en présence accrue de MO. Cette observation de terrain apparaît donc cohérente en regard de la littérature.

6.1.3. Les effets liés à la couleur du sol

La couleur foncée du biochar a également été mentionnée par les agriculteurs comme hypothèse pour un meilleur début de croissance des cultures et des adventices. Ceux-ci mentionnaient la modification d'albédo permettant un réchauffement du sol mais ne donnaient pas plus d'informations.

En effet, la couleur sombre du biochar peut assombrir le sol et diminuer l'albédo de la surface du sol. L'albédo est la proportion de rayonnement solaire ou de lumière réfléchi par le sol vers l'atmosphère. Les sols foncés peuvent absorber plus de lumière solaire et ont une réflectance de surface plus faible que les sols de couleur plus claire. Les sols enrichis au biochar peuvent avoir une réflectance plus faible que les sols sans biochar. Les changements dans l'albédo du sol peuvent être plus importants dans les sols dégradés avec une couverture végétale limitée que dans les sols avec une couverture végétale abondante, qui minimise les différences d'albédo (Usowicz et al., 2016).

Une diminution de la réflectance du sol peut se traduire par une augmentation de la température du sol quand celui-ci est à nu, par exemple en sortie d'hiver lorsque les cultures de printemps ne sont pas encore en place et que les céréales d'hiver ne sont pas encore très couvrantes. L'augmentation de la température du sol associée à un flux de chaleur du sol plus important peuvent avoir un effet direct sur la décomposition de la matière organique du sol, la minéralisation du carbone du sol et la respiration (Fang and Moncrieff, 2001). Un réchauffement plus rapide du sol dû à la couleur noire du charbon de bois, diminuant l'albédo, couplé à un meilleur drainage résultant de l'augmentation de la macroporosité en présence de charbon de bois pourraient contribuer à augmenter les taux de nitrification (Hardy et al., 2017). En effet, un surplus de nitrates a été mesuré en sortie d'hiver sur les sols d'aires de faulde par rapport aux sols adjacents (Hardy et al., 2017).

L'augmentation de la température du sol et donc de la minéralisation de N en sortie d'hiver peut avoir des conséquences positives sur la germination des graines et la levée des plantules et ainsi expliquer **le meilleur début de croissance** observé sur les aires de faulde par les agriculteurs des cultures mais également des adventices (Licht and Al-kaisi, n.d.). L'hypothèse du réchauffement du sol par les agriculteurs est donc confirmée, l'explication supplémentaire de la minéralisation de N provient de la littérature.

6.1.4. Les effets liés à la concentration en charbon de bois dans le sol en fonction du contexte agronomique

Après plus de 150 ans, le sol des aires de faulde est toujours largement enrichi en charbon de bois, jusqu'à 33,1 g/kg (Hardy et al., 2017). Le biochar permet toujours un stockage efficace du carbone organique dans l'horizon de la couche arable des sites de fours sur une période de deux siècles (Burgeon et al., 2021). Ceci est en accord avec le consensus général sur la stabilité à long terme de la matière organique pyrogénique dans les sols (Lehmann et al., 2006).

Au niveau des différences des régions agricoles, 30 % des agriculteurs de la Région limoneuse n'a constaté aucun effet des aires de faulde sur leurs parcelles contre 12 % dans le Condroz. Au niveau des effets les plus fréquemment cités par les agriculteurs, on distingue également

des différences entre les deux régions, à savoir qu'il y a plus d'effets positifs sur la croissance végétale rapportés par les agriculteurs en Région limoneuse et plus d'effets négatifs (prolifération d'adventices, avortement des épis de céréales) rapportés par les agriculteurs en Condroz () . Le résultat est en phase avec notre hypothèse de travail comme quoi la concentration en charbon de bois tend à être excessive en Condroz.

La différence de pourcentage des effets peut être justifiée par le niveau de dilution des aires de faulde. En fonction de l'historique du travail du sol de la parcelle et des labours répétés, les sites sont plus dilués en région limoneuse, comme en témoigne notamment le diamètre des sites (40 à 50 m de diamètre équivalent en région limoneuse pour des sites d'une taille initiale de 10 m environ, Hardy et al., 2016). Pour rappel, la Région limoneuse a été choisie comme zone d'étude pour sa plus faible concentration en charbon de bois due à la dilution de ses aires de faulde (historique de travail du sol plus long, surface de grandes cultures plus élevée que le Condroz).

En Région limoneuse, avec de plus faibles concentrations en MO dans les aires de faulde, les problèmes d'épiaison ne sont jamais cités et le fait que la plante pousse mieux est plus souvent recensé qu'en région condruzienne. Les concentrations plus faibles en charbon de bois (<40 t_C/ha) paraissent apporter plus d'effets positifs que des concentrations en charbon de bois plus importantes (jusqu' à 100 t_C/ha). En effet, sur les six effets les plus recensés toutes régions confondues, la Région limoneuse n'observe qu'un effet négatif (commun au Condroz) contre deux effets négatifs au Condroz. Cela peut confirmer que le **taux d'application** du biochar sur la parcelle est un facteur important à prendre en compte lors de son utilisation.

6.2. Vision prospective sur l'utilisation du biochar en agriculture

Au cours des interviews, les agriculteurs ont pu également exprimer leurs motivations, freins et questionnements quant à l'utilisation du biochar sur leurs parcelles agricoles. Cinq grands thèmes sont fréquemment revenus dans cette vision prospective sur l'utilisation du biochar. L'objectif de ce second point de discussion est de trouver des réponses à apporter aux agriculteurs face à ces questionnements.

6.2.1. Enjeu climatique

Une des grandes motivations des agriculteurs pour l'application du biochar est à propos de son potentiel de séquestration de C et par conséquent sur le changement climatique. Le rôle des sols dans le cycle global du C et dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre due à l'agriculture est de plus en plus reconnu. Il est estimé qu'entre 0,1% et 27% des émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture peuvent potentiellement être compensées par la

séquestration du carbone dans les sols au cours des prochaines décennies. L'initiative " 4 pour 1000 " est un plan d'action d'atténuation du climat basée sur les sols visant également à assurer la sécurité alimentaire grâce à une augmentation annuelle des stocks de COS de 0,4 %, dans les 40 premiers cm du sol (Rodrigues et al., 2021).

Parmi les pratiques agricoles (les cultures de couverture, la gestion des résidus, les changements d'utilisation des terres...) qui pourraient contribuer à augmenter les stocks de COS et aider à éliminer le CO₂ de l'atmosphère en tant que mesures efficaces d'atténuation du changement climatique (Bolinder et al., 2020; Lal, 2004; Paustian et al., 2016) , l'application de biochar dans les sols agricoles est une solution. Le potentiel du biochar pour augmenter la séquestration du C dans le sol est lié à sa plus grande résistance à la décomposition que la MOS non carbonisée. La faible dégradabilité du biochar vient principalement de la récalcitrance chimique intrinsèque liée à une structure aromatique polycyclique (Brodowski et al., 2005; Glaser et al., 2000; Knicker, 2011; Solomon et al., 2007). En Norvège, sur une surface de 84 kha et sur une échelle de temps de 100 ans, le biochar a un potentiel de séquestration de C dans le sol de 0,245 Tg de C par an (Rodrigues et al., 2021)..

Cependant, la faisabilité du scénario « 4 pour 1000 » et la capacité des pays à mettre en œuvre des mesures de séquestration du C dans les sols restent incertaines (Rodrigues et al., 2021).. Il n'est donc pas aisé de répondre exactement à la question du stockage de COS à l'aide du biochar mais les recherches progressent et de nombreuses études peuvent déjà rendre optimistes les agriculteurs.

6.2.2. Législation

De plus, les démarches et les aspects législatifs de l'application du biochar font partie des questionnements récurrents des agriculteurs. Le biochar est une des pratiques parmi d'autres en cours d'étude dans le cadre de EJP-SOIL (European Joint Programme Soil). EJP-SOIL développe notamment le projet CARBOSEQ, dont l'objectif est d'estimer le potentiel de séquestration additionnel de C dans les sols via des modifications de pratiques agricoles, en prenant en compte les contraintes techniques et socio-économiques. Il existe également le projet EOM4SOIL dont l'objectif est de proposer les meilleures pratiques de gestion des MO exogènes en termes de traitement et d'application au sol pour contribuer à l'atténuation du changement climatique et à la gestion durable des sols. Au final, le projet fournira une feuille de route aux décideurs politiques pour favoriser l'adoption de ces pratiques innovantes et vertueuses (Borsus, 2022). Au mieux les politiques seront informés sur l'utilisation bénéfique du biochar, au mieux les agriculteurs connaîtront l'utilisation de celui-ci

Les efforts de standardisation des techniques des matériaux de pyrolyse ont donné lieu à des normes de produits et à des actions d'harmonisation volontaires venant de l'industrie. Les normes de qualité qui ont été élaborées par l'Initiative internationale sur le biochar (IBI) et le certificat européen de biochar (EBC) sont particulièrement pertinentes (Huygens et al., 2019).

L'EBC garantit des biochars de qualité et d'un faible niveau de risques pour les systèmes agronomiques en présentant un mécanisme d'évaluation basé sur les dernières recherches, pratiques et législations. En exigeant l'utilisation de ce système d'évaluation, l'EBC permettra et garantira une production, un traitement et une vente durables du biochar. Il est introduit pour fournir aux clients une norme de qualité fiable, tout en donnant aux producteurs l'opportunité de prouver que leurs produits répondent à des normes de qualité bien définies et reconnues. Il vise également à fournir un transfert de connaissances qui servira de base à la législation future (par exemple, les Règlements européens sur les engrais ou les règlements sur les puits de carbone). Le certificat est continuellement mis à jour pour aider les utilisateurs et les décideurs à appliquer correctement le biochar et les produits à base de biochar dans l'agriculture et dans toutes les industries où ils sont potentiellement utiles (EBC, 2022). Pour faire face au nombre croissant d'utilisations du biochar, l'EBC a introduit un certain nombre de classes de certification (EBC-urbain, EBC-alimentation...). Selon les exigences et les règles de sécurité des différentes applications variées, différents paramètres sont contrôlés et des valeurs limites s'appliquent. Au total, 8 conditions doivent être respectées concernant le choix des matières premières de la biomasse pour qu'un biochar soit certifié EBC-Agro. Le biochar doit respecter 12 propriétés tels que :

1. La teneur en CO du biochar doit être déclarée ;
2. Le rapport molaire H/CO doit être inférieur à 0,7 ;
3. Le rapport molaire O/CO doit être inférieur à 0,4 ;
4. Les composés organiques volatils sont déterminés par analyse thermogravimétrique ;
5. La teneur en éléments nutritifs du biochar doit être déclarée au moins pour l'N, P, K, Mg, Ca et Fe ;
6. Les valeurs limites déterminées pour les métaux lourds ne doivent pas être dépassées ;
7. Le pH, la teneur en sel, la densité apparente et la teneur en eau doivent être déclarés ;
8. La détermination de la capacité de rétention d'eau ;
9. La détermination de la conductivité électrique du biochar solide ;
10. La surface spécifique et la distribution de la taille des pores sont recommandées comme paramètres supplémentaires ;
11. Les valeurs limites pour les PCB et les PCDD/F doivent être respectées : 0,2 mg/kg de matière sèche pour les PCB et 20 ng TEQ/kg pour les PCDD/F ;
12. Les valeurs limites pour les teneurs en HAP ne doivent pas être dépassées : 6 g/t de matière sèche pour les HAP₁₆.

Il y également quatre conditions concernant la pyrolyse qui sont à respecter :

1. La pyrolyse de la biomasse doit être exploitée de manière efficace sur le plan énergétique ;
2. Les gaz produits lors de la pyrolyse doivent être récupérés ou brûlés. Ils ne doivent pas s'échapper dans l'atmosphère ;
3. La combustion du gaz de synthèse doit respecter les valeurs limites d'émission nationales ;
4. La production de biochar doit être efficace en termes d'énergie et de C.

D'autres indications concernent les réglementations en matière de santé et de sécurité, les exigences de vente, de gestion de qualité existent également dans ces certifications EBC pouvant aider les agriculteurs à faire les bons choix de biochar et être sûr de la qualité des produits qu'ils utilisent.

6.2.3. Économie

Du côté des inquiétudes des agriculteurs concernant le biochar, c'est le côté économique qui est le plus fréquemment mentionné. Combien cela va coûter mais aussi rapporter. Le prix du biochar limite, pour le moment, son utilisation à des cultures à haut rendement dans des conditions hors sols et sous couverts en production horticole (fruits, légumes, viticulture ou arboriculture) ainsi que pour les plantations d'arbres en milieux urbains. Néanmoins, l'ascension des « soil carbon farming markets » pourrait rapidement changer la donne (Borsus, 2022).

Le « Carbon Farming » consiste à piéger et à stocker le C et/ou à réduire les émissions de gaz à effet de serre au niveau de l'exploitation. Ce stockage offre un potentiel d'atténuation important, mais incertain, et peut procurer des avantages aux agriculteurs et à la société, mais comporte également des risques qu'il convient de gérer. Le « Carbon Farming » comprend une série de pratiques agronomiques, de modifications de l'utilisation des terres et de solutions plus technologiques (McDonald et al., n.d.). Les agriculteurs peuvent alors gagner de l'argent sur base de leurs actions, de leurs résultats ou d'un paiement hybride sur base de leurs résultats et actions (McDonald et al., n.d.).

Au cœur du Green Deal, récemment mis en place par l'Europe, visant à rendre les pays européens neutres pour le climat d'ici à 2050, la séquestration de C dans le sol constitue un enjeu de société majeur. Il émerge alors de nouveaux modèles économiques mettant en œuvre des mécanismes de financement publics (Politique Agricole Commune...) ou privés (compensation volontaire de l'émission des gaz à effet de serre par les entreprises) dans le but de participer à l'effort climatique mais aussi d'y trouver un moyen de préserver la

réputation de l'entreprise, de faire valoir leurs convictions climatiques ou de se conformer à des engagements. De plus, depuis quelques années, se développe la notion de « crédits carbone ». Un crédit carbone équivaut à une réduction d'une tonne de CO₂eq (équivalent) et fonctionne comme un certificat attestant qu'un projet a bien évité ou séquestré un certain nombre de CO₂eq. Si une entreprise réduit les émissions de gaz à effet de serre de son projet, elle peut commercialiser ses crédits carbone.

En Belgique, existent les premières initiatives de rémunération de C. Les programmes tels que Soil Capital Carbon ou Farming4Climate accompagnent et rémunèrent les agriculteurs qui développent une agriculture régénérative au bénéfice du climat et de la biodiversité. Pour les agriculteurs, stocker du C peut devenir rentable. Un réel marché du C avec une série d'initiative de financement se met en place depuis quelques années pouvant intéresser davantage d'agriculteurs dans un futur proche et davantage les convaincre à l'utilisation du biochar en levant les freins économiques de cette démarche.

6.2.4. Notion de risque

Les agriculteurs remettent également en question le biochar quant aux risques que celui peut engendrer au niveau de l'environnement et des êtres vivants. La notion de recul d'application du biochar était également largement mentionnée au cours des interviews. En effet, l'application du biochar peut engendrer des problèmes comme expliqué précédemment sur les adventices, pour certaines cultures... Cependant, l'application du biochar peut également amener une série de risques tant pour l'environnement que pour la santé humaine et animale.

Pendant le processus de pyrolyse, plusieurs polluants organiques, tels que des HAP, les dioxines ou les furanes, sont produits. La concentration et la composition des HAP dans le biochar dépendent dans une certaine mesure de la matière première (Zhurinsk et al., 2005) ainsi que de la température du processus de pyrolyse. L'utilisation d'une matière première ligneuse et une pyrolyse lente à une température plus élevée (500-600 °C) pourraient être utiles pour maintenir une concentration plus faible de HAP et de dioxines dans le biochar (Hale et al., 2012).

Il y a aussi des préoccupations concernant le biochar comme une source possible de polluants inorganiques. La principale source de contaminants inorganiques dans le biochar est la matière première utilisée pour sa production. Celle-ci peut contenir une grande quantité de métaux lourds (Pb, Ni, Cu, Zn et Cr...), qui ne sont pas volatilisés pendant la pyrolyse. La sélection minutieuse de la matière première et des conditions de pyrolyse est nécessaire pour réduire le risque de pollution par les composés organiques hydrophobes et par les métaux

afin que la charge polluante puisse être évitée avant son utilisation comme amendement du sol (Lucchini et al., 2014).

L'application de biochar sur le sol pour les cultures peut constituer une menace potentielle pour la santé humaine et animale. L'inhalation de particules de biochar pendant sa préparation et son incorporation peuvent provoquer une maladie respiratoire (Jatav et al., 2021). Les concentrations élevées de métaux dans le biochar augmentent le risque pour la santé humaine (Uski et al., 2012). Les polluants en suspension dans l'air sur les particules de biochar peuvent irriter les yeux et les muqueuses (Wilczyńska-Michalik et al., 2018). Les éventuels contaminants présents dans le biochar sont lessivés à travers le sol, pénètrent dans les eaux souterraines et sont accumulés par les organismes du sol entraînant une toxicité. Le risque maximal pour la santé pourrait être rencontré en consommant des plantes cultivées qui ont accumulé de grandes quantités de métaux dans leurs parties comestibles, en particulier les plantes racines (Wilczyńska-Michalik et al., 2018).

Dès lors, certains agriculteurs préfèrent avoir un peu de recul sur l'utilisation du biochar et s'assurer que les risques soient maîtrisés.

6.2.5. Aspects techniques

En dernier lieu, ce sont les aspects techniques de fabrication et d'application du biochar qui sont au cœur des questionnements des agriculteurs. En effet, le choix des matières premières, la température de pyrolyse et le type de pyrolyse influencent les caractéristiques physico-chimiques finales du biochar. Cependant, les choix de pré-création du biochar et les corrélations avec les caractéristiques du biochar font parfois défaut (Ippolito et al., 2020).

La température de pyrolyse joue un rôle clé dans la création de biochars avec diverses propriétés chimiques et structurelles. Par exemple, la disponibilité des nutriments change radicalement lorsque la température de pyrolyse est augmentée (Clough et al., 2013; Nguyen et al., 2017). Plus précisément, avec l'augmentation de la température de pyrolyse, on observe généralement une augmentation de la teneur du biochar en C, P, K, Ca, cendres, pH, surface spécifique, et une diminution de la teneur en N, H et O (Ippolito et al., 2015; Weber and Quicker, 2018). Ces caractéristiques du biochar sont déterminées par le C dans des formes plus condensées et récalcitrantes, la création de phases minérales oxyde/carbonate (par exemple, P, K, Ca) conduisant à une plus grande teneur en cendres et à un pH plus élevé, et la perte de N, H et O par volatilisation. Les pertes par volatilisation concentrent davantage les autres éléments restants (Kim et al., 2012; Kinney et al., 2012). Des températures de pyrolyse plus élevées peuvent également favoriser des potentielles améliorations dans l'aération du sol, la percolation, l'infiltration, et la structure globale. Cela peut mener à des améliorations du sol et à l'augmentation des propriétés de rétention d'eau du sol. L'ajout de biochar produit

à haute température par rapport à celui produit à basse température (300-400 °C) augmente la porosité du biochar à mesure que la température de pyrolyse augmente (Jeffery et al., 2015; Lei and Zhang, 2013). À des températures plus élevées, la taille des pores sera plus grande en raison de la volatilisation de l'eau et de la MO (Brewer et al., 2014). Cependant, une simple augmentation de la température de pyrolyse n'augmentera probablement pas la capacité du biochar à améliorer la rétention d'eau dans le sol, car elle n'augmente pas le volume des pores nécessaire à la rétention de l'eau disponible pour les plantes (Gray et al., 2014; Hyväluoma et al., 2018).

Il semble que le type de pyrolyse (rapide ou lente) joue un rôle moins important dans les caractéristiques physico-chimiques (inorganiques) du biochar. Cependant, il ressort qu'en général, la pyrolyse lente tend à produire des biochars avec plus de N, S, P disponible, Ca, Mg, Fe, surface spécifique, cendres et CEC par rapport à la pyrolyse rapide (Ippolito et al., 2020).

Le choix de la matière première a une grande influence sur les propriétés du biochar (Funke and Ziegler, 2010; Novak et al., 2019). Les matières premières à base de bois ont conduit à des biochars contenant le plus de surface spécifique, contiennent plus de C et moins de nutriments disponibles pour les plantes, par rapport aux autres matières premières. Ceci, en combinaison avec la température de pyrolyse, pourrait grandement influencer l'amélioration des sols. Les matières premières à base de cultures, d'herbe et de fumier et autres graminées conduisent à des biochars contenant des CEC élevées par rapport aux biochars à base de bois, ce qui pourrait affecter la sorption des nutriments après l'application sur le sol. Combiné à la température de pyrolyse, cela pourrait potentiellement entraîner des changements à plus long terme dans la rétention des nutriments du sol (Ippolito et al., 2020).

Il est possible de raisonnablement prédire la disponibilité de divers éléments nutritifs du biochar (par exemple, N, P, K, Ca, Mg, Fe et Cu) en fonction du choix de la matière première et de la teneur totale en éléments nutritifs. Cela peut être utile lors de la création de biochars sur mesure pour des applications nutritives spécifiques, en mélangeant plusieurs matières premières. Cependant, l'effet du biochar sur les rendements des cultures est très difficile à prévoir car il dépend d'interactions complexes entre la qualité du biochar et le taux d'application, les conditions environnementales et le contexte agricole (Ippolito et al., 2020).

Dans le rapport du JRC, qui reprend également d'autres études, il est indiqué que grâce à l'amendement de biochar riche en C aux sols dans les régions tempérées, les effets positifs des matériaux de pyrolyse ont été observés à un taux d'application de 31-50 t/ha (Huygens et al., 2019). Des taux d'application plus faibles n'ont pas montré de différences significatives par rapport aux sols de contrôle, tandis que les taux d'application plus élevés ont parfois même montré des impacts négatifs sur les rendements des plantes. Ces résultats sont en accord avec des études précédentes (Biederman and Harpole, 2013; Jeffery et al., 2017). Il est

donc important de déterminer le taux d'application optimal de biochar pour chaque biochar et type de sol (Bruun et al., 2014; de Melo Carvalho, 2014; Lim et al., 2016).

Différentes enseignes belges proposent déjà du biochar. A titre indicatifs :

- La Microferme du Ponceret près de Bastogne propose du biochar à appliquer sur ses potagers et pelouses avec une recommandation de base de minimum 1 litre par m² et par an durant trois ans, mélangé avec un amendement (compost, fumier...). Le sac de 30 litres est proposé au prix de 36,25 €.
- La Plaine Chassart près de Gembloux propose du biochar à ajouter au terreau pour le potager à raison de 1 L/m². Il faut appliquer une quantité de biochar tel qu'il représente 10% du compost ou lisier et 2 % dans le fumier.
- Green Poch, recommande également des doses à 1 L/m² à incorporer dans les premiers centimètres du sol. Il recommande également 5 à 10 % de biochar dans le compost, la terre végétale, le terreau ou lisier et 2 % dans le fumier.

La quantité à appliquer de biochar dans les sols étant une question qui revenait régulièrement auprès des agriculteurs, ceux-ci ayant plusieurs hectares de terres, son application doit rester facile et plausible.

7. Conclusion

Cette étude se situe dans le contexte d'un changement législatif à venir concernant l'utilisation des biochars en tant qu'amendement de sol. En effet, le biochar a été récemment reconnu comme matière constitutive des fertilisants dans le nouveau règlement européen (CE) n°2019/1009 sur les fertilisants qui sera d'application à partir de juillet 2022. Cela signifie que le biochar sera alors en vente libre sur les marchés européens, sous réserve d'obtenir au préalable une certification garantissant sa qualité. Bien que l'épandage de biochar représente un levier intéressant pour contrebalancer les émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole, l'agrération des matières au niveau européen ne va pas de pair avec des préconisations d'usage pour optimiser les bénéfices agronomiques, ou diminuer les risques liés à leur épandage. Il est, dès lors, nécessaire de combler le manque de connaissances sur les effets à long terme. L'objectif de cette étude est donc de s'intéresser aux effets à long terme du biochar sur les sols agricoles et les plantes cultivées, en utilisant les aires de faulde comme cas d'étude. À cette fin, des interviews auprès des agriculteurs ont été réalisées sur deux régions agricoles possédant des aires de faulde, anciens sites de production de charbon de bois qui ont été utilisés comme proxy pour documenter les effets à long terme d'un amendement biochar sur les sols et les plantes cultivées en Wallonie. La Région limoneuse correspond à une situation considérée comme « réaliste » en terme d'application de biochar tandis que le Condroz correspond à une application excessive de biochar, en raison de la concentration élevée en charbon de bois au centre des aires de faulde.

Les effets les plus fréquemment mentionnés par les agriculteurs sont, par ordre d'importance : (i) une présence d'adventices accrue ; (ii) un meilleur travail du sol ; (iii) un meilleur début de croissance des cultures ; (iv) un meilleur drainage des eaux de pluie ; (v) l'avortement des épis de céréales ; et (vi) une meilleure croissance culturale. Les agriculteurs ont émis des hypothèses pour expliquer ces effets, qui ont ensuite été mises en regard de la littérature scientifique. Les effets exercés par les aires de faulde sur les propriétés du sol ont été regroupés en trois grands types : (i) les effets liés au complexe d'échange du sol ; (ii) les effets liés à la structure du sol ; et (iii) les effets liés à la couleur du sol.

Le complexe d'échange du biochar, en raison de sa grande surface spécifique et de ses groupements fonctionnels de surface, augmente la CEC du sol et permet ainsi une rétention accrue des cations nutritifs. Cette hausse de fertilité chimique pourrait contribuer à expliquer à la fois l'effet de la meilleure croissance des cultures mais aussi l'effet des adventices plus nombreuses remarqué par les agriculteurs. Les phénomènes de complexation et d'adsorption spécifiques entraînent une insolubilisation du Cu jusqu'à atteindre des seuils de carence en région condruzienne, ce qui semble expliquer l'effet des problèmes d'épiaison des céréales, en particulier pour l'escourgeon. Cela peut confirmer l'hypothèse des agriculteurs quant au

manque en Cu provoquant l'avortement des épis. De même, certains herbicides radiculaires ou de pré-émergence semblent être inactivés par adsorption sur les surfaces du charbon de bois, entraînant des problèmes de désherbage. Cette cause était identifiée par les agriculteurs pour justifier l'effet des problèmes d'adventices. La structure du sol et la manière dont les pores et les agrégats sont agencés permettent de justifier et de confirmer la piste des effets d'une meilleure dynamique de l'eau ainsi qu'un meilleur travail du sol remarqué par les agriculteurs. En effet, la présence de charbon de bois augmente la macroporosité et diminue la densité du sol, ce qui favorise l'infiltration de l'eau en période humide et rend le sol plus léger, facilitant les opérations de travail du sol. En outre, les taux de matière organique supérieurs semblent augmenter la résilience des plantes en situation de sécheresse. La couleur noire du biochar peut assombrir le sol et diminuer l'albédo de la surface du sol, conduisant à un réchauffement plus rapide du sol en sortie d'hiver. Le réchauffement du sol émis par les agriculteurs couplé à un meilleur drainage pourrait légèrement accélérer la minéralisation de l'azote en sortie d'hiver, et donc permettre une meilleure croissance printanière des cultures mais aussi des adventices, remarquée par les agriculteurs.

Il a également été remarqué que les effets en Région limoneuse sont moins nombreux et moins prononcés que dans le Condroz. De plus, parmi les effets les plus recensés toutes régions confondues, un seul effet est négatif dans la Région limoneuse contre deux au Condroz. Cela confirme que le taux d'application du biochar est un facteur important.

Enfin, cinq grands thèmes pour une vision prospective de l'application du biochar sont ressortis des interviews : les enjeux climatiques, la législation, le côté économique, la notion de risque et les aspects techniques. Le Green Deal vise à rendre l'Europe neutre pour le climat, le biochar semble une solution dont se développent divers projets (les projets EJP-SOIL) et certification venant des industries (IBI et EBC) afin de développer le stockage de carbone dans le sol via cette pratique. La séquestration de C devient alors un enjeu de société majeur développant des « soil carbon farming markets » mettant en œuvre des mécanismes de financement. Cependant, l'application de biochar sur les sols agricoles peut constituer une menace potentielle pour la santé humaine et animale due aux polluants organiques (HAP, dioxines, furanes..) et inorganiques (les métaux lourds,..). De plus, les aspects techniques de formation et d'application du biochar sont à prendre en compte pour obtenir des résultats bénéfiques de son application.

8. Bibliographie

- Abdelhafez, A.A., Abbas, M.H.H., Li, J., 2017. Biochar: The Black Diamond for Soil Sustainability, Contamination Control and Agricultural Production, in: Huang, W.-J. (Ed.), *Engineering Applications of Biochar*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68803>
- Abdel-Monem M. Amer, Sally D. Logsdon, Dedrick Davis, 2009. Prediction of Hydraulic Conductivity as Related to Pore Size Distribution in Unsaturated Soils. *Soil Sci.* 174, 508–515. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181b76c29>
- Ajayi, A.E., Horn, R., 2016. Modification of chemical and hydrophysical properties of two texturally differentiated soils due to varying magnitudes of added biochar. *Soil Tillage Res.*, Current and future challenges in biochar research 164, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.01.011>
- Ameloot, N., Graber, E.R., Verheijen, F.G.A., De Neve, S., 2013. Interactions between biochar stability and soil organisms: review and research needs. *Eur. J. Soil Sci.* 64, 379–390. <https://doi.org/10.1111/ejss.12064>
- Amézketa, E., 1999. Soil Aggregate Stability: A Review. *J. Sustain. Agric.* 14, 83–151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08
- Antal, M.J., Grønli, M., 2003. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 42, 1619–1640. <https://doi.org/10.1021/ie0207919>
- Asai, H., Samson, B.K., Stephan, H.M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T., Horie, T., 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Res.* 111, 81–84. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.008>
- Atkinson, C., Fitzgerald, J., Hipps, N., 2010. Potential Mechanisms for Achieving Agricultural Benefits from Biochar Application to Temperate Soils: A Review. *Plant Soil* 337, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5>
- Blanco-Canqui, H., 2017. Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81, 687–711. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>
- Bock, L., Genot, V., Colinet, G., Brahy, V., n.d. L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4 - sol 1 de " L'Etat de l'Environnement wallon 2006-2007 ") [WWW Document]. <https://popups.uliege.be/1780-4507>. URL <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=3746&format=print> (accessed 3.9.22).
- Borsus, W., 2022. Le développement de la filière du biochar en Wallonie [WWW Document]. Parlem. Wallonie. URL <http://www.parlement-wallonie.be> (accessed 5.23.22).
- Brennan, J.K., Badosz, T.J., Thomson, K.T., Gubbins, K.E., 2001. Water in porous carbons. *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.* 187–188, 539–568. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00644-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00644-6)
- Brewer, C.E., Chuang, V.J., Masiello, C.A., Gonnermann, H., Gao, X., Dugan, B., Driver, L.E., Panzacchi, P., Zygourakis, K., Davies, C.A., 2014. New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass Bioenergy* 66, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.059>
- Brewer, C.E., Schmidt-Rohr, K., Satrio, J.A., Brown, R.C., 2009. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 28, 386–396. <https://doi.org/10.1002/ep.10378>
- Bridgwater, A.V., 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chem. Eng. J.* 91, 87–102. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)
- Brodowski, S., Rodionov, A., Haumaier, L., Glaser, B., Amelung, W., 2005. Revised black

carbon assessment using benzene polycarboxylic acids. *Org. Geochem.* 36, 1299–1310. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2005.03.011>

Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>

Brown, R.C., 2021. The Role of Pyrolysis and Gasification in a Carbon Negative Economy. *Processes* 9, 882. <https://doi.org/10.3390/pr9050882>

Bruun, E.W., Petersen, C.T., Hansen, E., Holm, J.K., Hauggaard-Nielsen, H., 2014. Biochar amendment to coarse sandy subsoil improves root growth and increases water retention. *Soil Use Manag.* 30, 109–118. <https://doi.org/10.1111/sum.12102>

Burgeon, V., Fouché, J., Garré, S., Dehkordi, R.H., Colinet, G., Cornelis, J.-T., 2022. Young and century-old biochars strongly affect nutrient cycling in a temperate agroecosystem. *Agric. Ecosyst. Environ.* 328, 107847. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107847>

Burgeon, V., Fouché, J., Leifeld, J., Chenu, C., Cornélis, J.-T., 2021. Organo-mineral associations largely contribute to the stabilization of century-old pyrogenic organic matter in cropland soils. *Geoderma* 388, 114841. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114841>

Burrell, L.D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., Soja, G., 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma* 282, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.019>

Busscher, W.J., Novak, J.M., Ahmedna, M., 2011. Physical Effects of Organic Matter Amendment of a Southeastern US Coastal Loamy Sand. *Soil Sci.* 176, 661–667. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3182357ca9>

Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S., 2007. Agronomic Values of Green Waste Biochar as a Soil Amendment. *Aust. J. Soil Res.* 45, 629–634. <https://doi.org/10.1071/SR07109>

Chen, B., Chen, Z., Lv, S., 2011. A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresour. Technol.* 102, 716–723. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.067>

Chen, T., Zhang, Yaxin, Wang, H., Lu, W., Zhou, Z., Zhang, Yuancheng, Ren, L., 2014. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. *Bioresour. Technol.* 164, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.048>

Cheng, C.-H., Lehmann, J., Engelhard, M.H., 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 1598–1610. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.01.010>

Cheng, C.-H., Lehmann, J., Thies, J.E., Burton, S.D., Engelhard, M.H., 2006. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Org. Geochem.* 37, 1477–1488. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.06.022>

Chintala, R., Schumacher, T.E., Kumar, S., Malo, D.D., Rice, J.A., Bleakley, B., Chilom, G., Clay, D.E., Julson, J.L., Papiernik, S.K., Gu, Z.R., 2014. Molecular characterization of biochars and their influence on microbiological properties of soil. *J. Hazard. Mater.* 279, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.074>

Criscuoli, I., Alberti, G., Baronti, S., Favilli, F., Martinez, C., Calzolari, C., Pusceddu, E., Rumpel, C., Viola, R., Miglietta, F., 2014. Carbon Sequestration and Fertility after Centennial Time Scale Incorporation of Charcoal into Soil. *PLOS ONE* 9, e91114. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091114>

Crombie, K., Mašek, O., Sohi, S.P., Brownsort, P., Cross, A., 2013. The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. *GCB Bioenergy* 5, 122–131. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12030>

de Melo Carvalho, M.T., 2014. The impact of wood biochar as a soil amendment in aerobic rice systems of the Brazilian Savannah (phd). University of Tasmania.

Demeyer, A., Voundi Nkana, J.C., Verloo, M.G., 2001. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresour. Technol.* 77, 287–295. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00043-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00043-2)

Demirbaş, A., 2000. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass. *Energy Convers. Manag.* 41, 633–646. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00130-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00130-2)

DGRNE, 2005. Tableau de bord de l’environnement wallon 2005 154.

Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Huang, X., Li, Z., Tan, X., Zeng, G., Zhou, L., 2017. Potential Benefits of Biochar in Agricultural Soils: A Review. *Pedosphere* 27, 645–661. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60375-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60375-8)

Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Li, Z., Tan, X., Huang, X., Zeng, G., Zhou, L., Zheng, B., 2016. Biochar to improve soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 36. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>

Direction de l’état environnemental (DEE), S., 2022. L’ENVIRONNEMENT WALLON EN 10 INFOGRAPHIES.

Dutta, T., Kwon, E., Bhattacharya, S.S., Jeon, B.H., Deep, A., Uchimiya, M., Kim, K.-H., 2017. Polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile organic compounds in biochar and biochar-amended soil: a review. *GCB Bioenergy* 9, 990–1004. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12363>

EBC, E.B.F., 2022. EBC (2012-2022) “European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.”

Edeh, I.G., Mašek, O., Buss, W., 2020. A meta-analysis on biochar’s effects on soil water properties – New insights and future research challenges. *Sci. Total Environ.* 714, 136857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857>

Evlard, A., Schmitt, M., Heneffe, C., 2020. Règlement Fertilisant : quels impacts et/ou quelles potentialités pour les digestats en Wallonie ? | valbiomag.labiomasseenwallonie.be [WWW Document]. URL <https://valbiomag.labiomasseenwallonie.be/news/reglement-fertilisant-quels-impacts-etou-quelles-potentialites-pour-les-digestats-en-wallonie> (accessed 5.21.22).

Eyring, V., Gillett, N.P., Achutarao, K.M., Barimalala, R., Barreiro Parrillo, M., Bellouin, N., Cassou, C., Durack, P.J., Kosaka, Y., McGregor, S., Min, S.-K., Morgenstern, O., Sun, Y., 2021. Human influence on the climate system, in: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, Ö., Yu, R., Zhou, B. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Fang, C., Moncrieff, J.B., 2001. The Dependence of Soil CO₂ Efflux on Temperature. *Soil Biol. Biochem.* 33, 155–165. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00125-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00125-5)

Ferdinand, M., 2019. Agriculture de conservation et glyphosate : diversité, stratégies et verrouillages en Région wallonne.

Ferraro, G., Pecori, G., Rosi, L., Bettucci, L., Fratini, E., Casini, D., Rizzo, A.M., Chiamonti, D., 2021. Biochar from lab-scale pyrolysis: influence of feedstock and operational temperature. *Biomass Convers. Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01303-5>

Forbes, M.S., Raison, R.J., Skjemstad, J.O., 2006. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. *Sci. Total Environ.* 370, 190–206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.06.007>

Frank, S., Schmid, E., Havlík, P., Schneider, U., Böttcher, H., Balkovič, J., Obersteiner, M., 2015. The dynamic soil organic carbon mitigation potential of European cropland. *Glob. Environ. Change* 35, 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.08.004>

Freeman, J.J., Tomlinson, J.B., Sing, K.S.W., Theocharis, C.R., 1995. Adsorption of nitrogen

and water vapour by activated Nomex® chars. *Carbon* 33, 795–799.
[https://doi.org/10.1016/0008-6223\(95\)00005-X](https://doi.org/10.1016/0008-6223(95)00005-X)

Gao, S., DeLuca, T.H., Cleveland, C.C., 2019. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 654, 463–472. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.124>

Gérardon, C., 2021. Cendres, biochar et struvite : prochainement inclus dans le Règlement Fertilisant ? | valbiomag.labiomasseenwallonie.be [WWW Document]. URL <https://valbiomag.labiomasseenwallonie.be/news/cendres-biochar-et-struvite-prochainement-inclus-dans-le-reglement-fertilisant> (accessed 11.9.21).

Glaser, B., Balashov, E., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W., 2000. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Org. Geochem.* 31, 669–678. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00044-9)

Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W., 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biol. Fertil. Soils* 35, 219–230. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>

Goidts, E., van Wesemael, B., 2007. Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in Southern Belgium (1955-2005). *Geoderma* 141, 341.

Gorovtsov, A.V., Minkina, T.M., Mandzhieva, S.S., Perelomov, L.V., Soja, G., Zamulina, I.V., Rajput, V.D., Sushkova, S.N., Mohan, D., Yao, J., 2020. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil. *Environ. Geochem. Health* 42, 2495–2518. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00412-5>

Gray, M., Johnson, M.G., Dragila, M.I., Kleber, M., 2014. Water uptake in biochars: The roles of porosity and hydrophobicity. *Biomass Bioenergy* 61, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.010>

Hale, S.E., Lehmann, J., Rutherford, D., Zimmerman, A.R., Bachmann, R.T., Shitumbanuma, V., O’Toole, A., Sundqvist, K.L., Arp, H.P.H., Cornelissen, G., 2012. Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxins in biochars. *Environ. Sci. Technol.* 46, 2830–2838. <https://doi.org/10.1021/es203984k>

Hammes, K., Torn, M.S., Lapenas, A.G., Schmidt, M.W.I., 2008. Centennial black carbon turnover observed in a Russian steppe soil. *Biogeosciences* 5, 1339–1350. <https://doi.org/10.5194/bg-5-1339-2008>

Hardy, B., n.d. Pre-industrial charcoal kiln sites in Wallonia, Belgium: spatial distribution, effects on soil properties and long-term fate of charcoal in soil. 325.

Hardy, B., n.d. La détection des aires de faulde en milieu forestier à l’aide du LiDAR 22.

Hardy, B., Cornelis, J.-T., Houben, D., Lambert, R., Dufey, J.E., 2016. The effect of pre-industrial charcoal kilns on chemical properties of forest soil of Wallonia, Belgium: Effect of pre-industrial charcoal kilns on forest soil properties. *Eur. J. Soil Sci.* 67, 206–216. <https://doi.org/10.1111/ejss.12324>

Hardy, B., Dufey, J., 2015a. Les aires de faulde en forêt wallonne : repérage, morphologie et distribution spatiale 12.

Hardy, B., Dufey, J., 2015b. La forêt wallonne, composante vitale de la sidérurgie préindustrielle 10.

Hardy, B., Dufey, J.E., 2012a. Estimation des besoins en charbon de bois et en superficie forestière pour la sidérurgie wallonne préindustrielle (1750-1830). Deuxième partie : Les besoins en superficie forestière. *Rev. For. Fr.* <https://doi.org/10.4267/2042/51117>

Hardy, B., Dufey, J.E., 2012b. Estimation des besoins en charbon de bois et en superficie forestière pour la sidérurgie wallonne préindustrielle (1750-1830). Première partie : Les besoins en charbon de bois. *Rev. For. Fr.* <https://doi.org/10.4267/2042/48747>

Herath, H.M.S.K., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. *Geoderma* 209–210, 188–197.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.016>

Hyvälä, J., Kulju, S., Hannula, M., Wikberg, H., Källi, A., Rasa, K., 2018. Quantitative characterization of pore structure of several biochars with 3D imaging. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 25648–25658. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8823-x>

Ippolito, J., Spokas, K.A., Novak, J., Lentz, R., Cantrell, K.B., Lehmann, J., Joseph, S., 2015. Biochar elemental composition and factors influencing nutrient retention. *Biochar Environmental Manag. Sci. Technology Implement.* 137–161.

Jatav, H., Rajput, V., Minkina, T., Singh, S., . S., Gorovtsov, A., Barakhov, A., Bauer, T., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Burachevskaya, M., Kalinichenko, V., 2021. Sustainable Approach and Safe Use of Biochar and Its Possible Consequences. *Sustainability* 13. <https://doi.org/10.3390/su131810362>

Jatav, H.S., Rajput, V.D., Minkina, T., Singh, S.K., Chejara, S., Gorovtsov, A., Barakhov, A., Bauer, T., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Burachevskaya, M., Kalinichenko, V.P., 2021. Sustainable Approach and Safe Use of Biochar and Its Possible Consequences. *Sustainability* 13, 10362. <https://doi.org/10.3390/su131810362>

Jeffery, S., Meinders, M.B.J., Stoof, C.R., Bezemer, T.M., van de Voorde, T.F.J., Mommer, L., van Groenigen, J.W., 2015. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. *Geoderma* 251–252, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.022>

Jien, S.-H., Wang, C.-S., 2013. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *CATENA* 110, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.021>

Jones, D.L., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T.H., Murphy, D.V., 2012. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biol. Biochem.* 45, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.10.012>

Kameyama, K., Miyamoto, T., Shiono, T., Shinogi, Y., 2012. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil. *J. Environ. Qual.* 41, 1131–1137. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0453>

Kervyn, T., Jacquemin, F., Branquart, É., Delahaye, L., Dufrêne, M., Claessens, H., 2014. LES FORÊTS ANCIENNES EN WALLONIE 2ÈME PARTIE : CARTOGRAPHIE 15.

Kim, S.S., Ly, H.V., Choi, G.H., Kim, J., Woo, H.C., 2012. Pyrolysis characteristics and kinetics of the alga *Saccharina japonica*. *Bioresour. Technol.* 123, 445–451. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.097>

Knicker, H., 2011. Pyrogenic organic matter in soil: Its origin and occurrence, its chemistry and survival in soil environments. *Quat. Int.* 243, 251–263. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.02.037>

Kuzyakov, Y., Bogomolova, I., Glaser, B., 2014. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis. *Soil Biol. Biochem.* 70, 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.021>

Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H., Bogomolova, I., Xu, X., 2009. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. *Soil Biol. Biochem.*

Laird, D.A., Fleming, P., Davis, D.D., Horton, R., Wang, B., Karlen, D.L., 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158, 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.013>

Lanzetta, M., Di Blasi, C., Buonanno, F., 1997. An Experimental Investigation of Heat-Transfer Limitations in the Flash Pyrolysis of Cellulose. *Ind. Eng. Chem. Res.* 36, 542–552. <https://doi.org/10.1021/ie960551r>

Larsbo, M., Löfstrand, E., de Veer, D. van A., Ulén, B., 2013. Pesticide leaching from two Swedish topsoils of contrasting texture amended with biochar. *J. Contam. Hydrol.* 147, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.01.003>

Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J.P., Engelbrecht, F., Fischer, E., Fyfe, J.C., Jones, C., Maycock, A., Mutemi, J., Ndiaye, O., Panickal, S., Zhou, T., 2021. Future global climate: scenario-based projections and near-term information, in: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, Ö., Yu, R., Zhou, B. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Lehmann, J., 2007a. A handful of carbon. *Nature* 447, 143–144.
<https://doi.org/10.1038/447143a>

Lehmann, J., 2007b. Bio-energy in the black. *Front. Ecol. Environ.* 5, 381–387.
[https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[381:BITB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2)

Lehmann, J., Gaunt, J., Rondon, M., 2006. Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 11, 403–427. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>

Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), 2009. *Biochar for environmental management: science and technology*. Earthscan, London ; Sterling, VA.

Lehmann, J., Liang, B., Solomon, D., Lerotic, M., Luizão, F., Kinyangi, J., Schäfer, T., Wirick, S., Jacobsen, C., 2005. Near-edge X-ray absorption fine structure (NEXAFS) spectroscopy for mapping nano-scale distribution of organic carbon forms in soil: Application to black carbon particles. *Glob. Biogeochem. Cycles* 19.
<https://doi.org/10.1029/2004GB002435>

Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., Crowley, D., 2011. Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biol. Biochem.*, 19th International Symposium on Environmental Biogeochemistry 43, 1812–1836.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>

Lei, O., Zhang, R., 2013. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. *J. Soils Sediments* 13, 1561–1572.
<https://doi.org/10.1007/s11368-013-0738-7>

Lepoivre, A., 1941. *Le charbon de bois : traité pratique de carbonisation*. Chiron, Paris, France. Chiron, Paris, France.

Li, J., Li, Y., Wu, M., Zhang, Z., Lü, J., 2013. Effectiveness of low-temperature biochar in controlling the release and leaching of herbicides in soil. *Plant Soil* 370, 333–344.
<https://doi.org/10.1007/s11104-013-1639-7>

Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S., Thies, J., O'Neill, B., Trujillo, L., Gaunt, J., Solomon, D., Grossman, J., Neves, E., Luizão, F., 2010. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Org. Geochem.* 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.09.007>

Liang, C., Zhu, X., Fu, S., Méndez, A., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., 2014. Biochar alters the resistance and resilience to drought in a tropical soil. *Environ. Res. Lett.* 9, 064013.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064013>

Licht, M.A., Al-kaisi, M., n.d. 2005b. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. *Soil Tillage Res. J.*

Lim, T.J., Spokas, K.A., Feyereisen, G., Novak, J.M., 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere* 142, 136–144.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.069>

Lin, Y., Munroe, P., Joseph, S., Henderson, R., Ziolkowski, A., 2012. Water extractable organic carbon in untreated and chemical treated biochars. *Chemosphere* 87, 151–157.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.12.007>

Lorenz, K., Lal, R., 2014. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177, 651–670.

<https://doi.org/10.1002/jpln.201400058>

Lucchini, P., Quilliam, R.S., DeLuca, T.H., Vamerali, T., Jones, D.L., 2014. Does biochar application alter heavy metal dynamics in agricultural soil? *Agric. Ecosyst. Amp Environ.* 184, 149–157.

Lugato, E., Bampa, F., Panagos, P., Montanarella, L., Jones, A., 2014. Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices. *Glob. Change Biol.* 20, 3557–3567. <https://doi.org/10.1111/gcb.12551>

Marín-Benito, J.M., Brown, C.D., Herrero-Hernández, E., Arienzo, M., Sánchez-Martín, M.J., Rodríguez-Cruz, M.S., 2013. Use of raw or incubated organic wastes as amendments in reducing pesticide leaching through soil columns. *Sci. Total Environ.* 463–464, 589–599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.051>

Marschner, B., Brodowski, S., Dreves, A., Gleixner, G., Gude, A., Grootes, P.M., Hamer, U., Heim, A., Jandl, G., Ji, R., Kaiser, K., Kalbitz, K., Kramer, C., Leinweber, P., Rethemeyer, J., Schäffer, A., Schmidt, M.W.I., Schwark, L., Wiesenberger, G.L.B., 2008. How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 171, 91–110. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700049>

Martin, S.M., Kookana, R.S., Van Zwieten, L., Krull, E., 2012. Marked changes in herbicide sorption-desorption upon ageing of biochars in soil. *J. Hazard. Mater.* 231–232, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.040>

McDonald, H., Frelih-Larsen, A., Lorant, A., Duin, L., Andersen, S.P., Costa, G., Bradley, H., n.d. Carbon farming | Making agriculture fit for 2030 67.

Mikan, C.J., Abrams, M.D., 2011. Altered forest composition and soil properties of historic charcoal hearths in southeastern Pennsylvania. *Can. J. For. Res.* <https://doi.org/10.1139/x95-076>

Montanarella, L., Lugato, E., 2013. The Application of Biochar in the EU: Challenges and Opportunities. *Agronomy* 3, 462–473. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020462>

Nelissen, V., Ruyschaert, G., Manka'Abusi, D., D'Hose, T., Beuf, K.D., Al-Barri, B., Cornelis, W., Boeckx, P., 2015. Impact of a woody biochar on properties of a sandy loam soil and spring barley during a two-year field experiment. *Eur. J. Agron.*

Nigussie, A., Kissi, E., 2011. Effect of charcoal production on soil properties in Southwestern Ethiopia. *Middle East J. Sci. Res.* 9, 807–813.

Novak, J.M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J.W., Steiner, C., Das, K.C., Ahmedna, M., Rehrh, D., Watts, D.W., Busscher, W.J., Schomberg, H., 2009. Characterization of Designer Biochar Produced at Different Temperatures and Their Effects on a Loamy Sand. *Ann. Environ. Sci.* 3.

Oguntunde, P., Fosu, M., Ajayi, A., van de Giesen, N., 2004. Oguntunde P.G., M. Fosu, A. E. Ajayi and van de Giesen N. 2004. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 39: 295-299. *Biol. Fertil. Soils* 39, 295–299.

Ohlson, M., Dahlberg, B., Økland, T., Brown, K.J., Halvorsen, R., 2009. The charcoal carbon pool in boreal forest soils. *Nat. Geosci.* 2, 692–695. <https://doi.org/10.1038/ngeo617>

Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L., Zhang, R., 2013. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 13, 991–1002. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000078>

Palinkas, L.A., Horwitz, S.M., Green, C.A., Wisdom, J.P., Duan, N., Hoagwood, K., 2015. Purposeful sampling for qualitative data collection and analysis in mixed method implementation research. *Adm. Policy Ment. Health* 42, 533–544.

<https://doi.org/10.1007/s10488-013-0528-y>

Panckoucke, C.-J., 1783. *Encyclopédie méthodique*. A Paris, chez Panckoucke, libraire, hôtel de Thou, rue des Poitevins.

Peake, Lewis R., Reid, Brian J., Tang, Xiangyu, Peake, L. R., Reid, B. J., Tang, X., 2014. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma Complete*, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.002>

Pignatello, J.J., Kwon, S., Lu, Y., 2006. Effect of natural organic substances on the surface and adsorptive properties of environmental black carbon (char): attenuation of surface activity by humic and fulvic acids. *Environ. Sci. Technol.* 40, 7757–7763. <https://doi.org/10.1021/es061307m>

Preston, C.M., Schmidt, M.W.I., 2006. Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions. *Biogeosciences* 3, 397–420. <https://doi.org/10.5194/bg-3-397-2006>

Prommer, J., Wanek, W., Hofhansl, F., Trojan, D., Offre, P., Urich, T., Schleper, C., Sassmann, S., Kitzler, B., Soja, G., Hood-Nowotny, R.C., 2014. Biochar Decelerates Soil Organic Nitrogen Cycling but Stimulates Soil Nitrification in a Temperate Arable Field Trial. *PLoS ONE* 9, e86388. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086388>

Quilliam, R.S., Glanville, H.C., Wade, S.C., Jones, D.L., 2013a. Life in the “charosphere” - Does biochar in agricultural soil provide a significant habitat for microorganisms? *Soil Biol. Biochem.* 65, 287–293. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.004>

Quilliam, R.S., Rangescroft, S., Emmett, B.A., Deluca, T.H., Jones, D.L., 2013b. Is biochar a source or sink for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) compounds in agricultural soils? *GCB Bioenergy* 5, 96–103. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12007>

Quin, P.R., Cowie, A.L., Flavel, R.J., Keen, B.P., Macdonald, L.M., Morris, S.G., Singh, B.P., Young, I.M., Van Zwieten, L., 2014. Oil mallee biochar improves soil structural properties—A study with x-ray micro-CT. *Agric. Ecosyst. Environ., Environmental Benefits and Risks of Biochar Application to Soil* 191, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.022>

Rafiq, M.K., Bachmann, R.T., Rafiq, M.T., Shang, Z., Joseph, S., Long, R., 2016. Influence of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties of Corn Stover (*Zea mays* L.) Biochar and Feasibility for Carbon Capture and Energy Balance. *PLOS ONE* 11, e0156894. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156894>

Règlement (CE) n° 2003/2003 du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 relatif aux engrais (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), 2003. , OJ L.

Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE, modifiant les règlements (CE) no 1069/2009 et (CE) no 1107/2009 et abrogeant le règlement (CE) no 2003/2003 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), 2019. , OJ L.

Ren, X., Zhang, P., Zhao, L., Sun, H., 2016. Sorption and degradation of carbaryl in soils amended with biochars: influence of biochar type and content. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 23, 2724–2734. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5518-z>

Roe, S., Streck, C., Beach, R., Busch, J., Chapman, M., Daioglou, V., Deppermann, A., Doelman, J., Emmet-Booth, J., Engelmann, J., Fricko, O., Frischman, C., Funk, J., Grassi, G., Griscom, B.W., Havlík, P., Hanssen, S., Humpenöder, F., Landholm, D., Lomax, G., Lehmann, J., Mesnildrey, L., Nabuurs, G.-J., Popp, A., Rivard, C., Sanderman, J., Sohngen, B., Smith, P., Stehfest, E., Woolf, D., Lawrence, D., 2021. Land-based measures to mitigate climate change: potential and feasibility by country. *Glob. Change Biol.* 27, 6025–6058. <https://doi.org/10.1111/gcb.15873>

Safaei Khorram, M., Zhang, Q., Lin, D., Zheng, Y., Fang, H., Yu, Y., 2016. Biochar: A review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications. *J. Environ. Sci.* 44, 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.027>

Schaumann, G.E., 2006. Soil organic matter beyond molecular structure Part I: Macromolecular and supramolecular characteristics. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 145–156.

<https://doi.org/10.1002/jpln.200521785>

- Schmidt, M., Noack, A., 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Glob. Biogeochem. Cycles* 14, 777–793.
- Singh, B.P., Cowie, A.L., Smernik, R.J., 2012. Biochar Carbon Stability in a Clayey Soil As a Function of Feedstock and Pyrolysis Temperature. *Environ. Sci. Technol.* 46, 11770–11778. <https://doi.org/10.1021/es302545b>
- Solomon, D., Lehmann, J., Thies, J., Schäfer, T., Liang, B., Kinyangi, J., Neves, E., Petersen, J., Luizão, F., Skjemstad, J., 2007. Molecular signature and sources of biochemical recalcitrance of organic C in Amazonian Dark Earths. *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 2285–2298. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.02.014>
- Spokas, K.A., Cantrell, K.B., Novak, J.M., Archer, D.W., Ippolito, J.A., Collins, H.P., Boateng, A.A., Lima, I.M., Lamb, M.C., McAloon, A.J., Lentz, R.D., Nichols, K.A., 2012. Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *J. Environ. Qual.* 41, 973–989. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0069>
- SPW, 2022. Régions agricoles de Wallonie [WWW Document]. URL https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-A_I_d_2.html# (accessed 5.22.22).
- Stewart, C.E., Zheng, J., Botte, J., Cotrufo, M.F., 2013. Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils. *GCB Bioenergy* 5, 153–164. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12001>
- Subedi, R., Taupe, N., Pelissetti, S., Petruzzelli, L., Bertora, C., Leahy, J.J., Grignani, C., 2016. Greenhouse gas emissions and soil properties following amendment with manure-derived biochars: Influence of pyrolysis temperature and feedstock type. *J. Environ. Manage.* 166, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.007>
- Suliman, W., Harsh, J.B., Abu-Lail, N.I., Fortuna, A.-M., Dallmeyer, I., Garcia-Pérez, M., 2017. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Sci. Total Environ.* 574, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.025>
- Tellier, C., 2021. Site internet du Parlement de Wallonie [WWW Document]. Parlem. Wallonie. URL <http://www.parlement-wallonie.be> (accessed 5.21.22).
- Uski, O., Happonen, M., Jalava, P., Brunner, T., Kelz, J., Obernberger, I., Jokiniemi, J., Hirvonen, M.-R., 2012. Acute systemic and lung inflammation in C57Bl/6J mice after intratracheal aspiration of particulate matter from small-scale biomass combustion appliances based on old and modern technologies. *Inhal. Toxicol.* 24, 952–965. <https://doi.org/10.3109/08958378.2012.742172>
- Usowicz, B., Lipiec, J., Łukowski, M., Marczewski, W., Usowicz, J., 2016. The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow. *Soil Tillage Res., Current and future challenges in biochar research* 164, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.03.009>
- Vanhove, P., 2018. Classification des pratiques d’agriculteurs et relation avec les caractéristiques structurales et biologiques des sols en régions limoneuse et sablo-limoneuse de Wallonie.
- Wang, H.Z., Zuo, H.G., Ding, Y.J., Miao, S.S., Jiang, C., Yang, H., 2014. Biotic and abiotic degradation of pesticide Dufulin in soils. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 21, 4331–4342. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2380-8>
- Wang, Y., Yin, R., Liu, R., 2014. Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 110, 375–381. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.10.006>
- Warnock, D.D., Lehmann, J., Kuyper, T.W., Rillig, M.C., 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. *Plant Soil* 300, 9–20. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9391-5>

Wilczyńska-Michalik, W., Gasek, R., Michalik, M., Dańko, J., Plaskota, T., 2018. Mineralogy, chemical composition and leachability of ash from biomass combustion and biomass–coal co-combustion. *Mineralogia* 49. <https://doi.org/10.2478/mipo-2018-0008>

Young, M.J., Johnson, J.E., Abrams, M.D., 1996. Vegetative and edaphic characteristics on relic charcoal hearths in the Appalachian mountains. *Plant Ecol.* 125, 43–50. <https://doi.org/10.1007/BF00045203>

Zaffar, M., Lu, S.-G., 2015. Pore Size Distribution of Clayey Soils and Its Correlation with Soil Organic Matter. *Pedosphere* 25, 240–249. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60009-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60009-1)

Zanutel, M., Garré, S., Biielders, C.L., 2021. Long-term effect of biochar on physical properties of agricultural soils with different textures at pre-industrial charcoal kiln sites in Wallonia (Belgium). *Eur. J. Soil Sci. ejss.13157*. <https://doi.org/10.1111/ejss.13157>

Zhang, P., Sun, H., Yu, L., Sun, T., 2013. Adsorption and catalytic hydrolysis of carbaryl and atrazine on pig manure-derived biochars: impact of structural properties of biochars. *J. Hazard. Mater.* 244–245, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.11.046>

Zhurinsh, A., Zandersons, J., Dobeles, G., 2005. Slow pyrolysis studies for utilization of impregnated waste timber materials. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 1–2, 439–444. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.11.009>

Zong, Y., Xiao, Q., Lu, S., 2016. Acidity, water retention, and mechanical physical quality of a strongly acidic Ultisol amended with biochars derived from different feedstocks. *J. Soils Sediments* 16, 177–190. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1187-2>

9. Annexes

Questionnaire agriculteurs mémoire Lorane Jans ADF

- **Est-ce que vous avez des tâches noires sur vos parcelles ? Est-ce que vous savez ce que c'est ?**
- **On se dirige vers l'utilisation des biochars (charbons végétaux) comme amendements agricoles pour stocker du carbone dans les sols et lutter contre les changements climatiques. J'aimerais avoir votre avis sur l'effet de ces tâches noires sur les sols et les cultures**
- **Est-ce que ça pousse mieux ? Observez-vous des différences sur vos cultures ?**
 - o Levée ? début de croissance ? Fin de croissance ?
 - o Rendements ?
 - o Résistance aux maladies
 - o Réponse aux intrants
 - o Signes de carence ?
 - o Défauts de forme des légumes racines ?
- **Il y-a-t-il des différences au niveau des adventices ?**
 - o Type de flore adventice
 - o Réponse aux herbicides
- **Comment le sol se comporte-t-il sur les taches noires ?**
 - o Stagnation d'eau en surface, drainage de l'eau
 - o Facilité de travail du sol ; la terre s'émiette-t-elle ?
 - o Le sol résiste-t-il mieux à l'érosion ? à la compaction ?
 - o Structure, agrégation du sol
- **Y a-t-il plus ou moins de vers de terre sur ces taches ?**
- **Seriez-vous prêt à en mettre volontairement dans vos sols (des biochars)?**
 - o A quelles conditions ?
 - o On est en train d'inventer des systèmes de rémunération du stockage de C (initiatives privées cfr SoilCapital et le projet de MAE du SPW)
- **Avez-vous des voisins qui auraient aussi des taches noires sur leur terre et qui seraient disposés à répondre à quelques questions ?**

Figure 34 Questionnaire d'enquête utilisé lors des interviews.

Bénéfices et risques liés à l'application de biochar dans les sols agricoles de Wallonie : résultats d'enquêtes en ferme concernant les effets des aires de faulde sur le système sol-plante.

Lorane Jans

Face à la crise climatique actuelle, l'utilisation des terres cultivées et les pratiques agricoles peuvent permettre de stocker du carbone de manière durable dans les sols. Le biochar, produit issu de la pyrolyse de la biomasse a récemment été reconnu comme matière constitutive des fertilisants dans le nouveau règlement européen (CE) n°2019/1009 sur les fertilisants qui sera d'application à partir de juillet 2022. Celui-ci est reconnu pour ses propriétés agronomiques bénéfiques mais aussi environnementales en ayant la capacité de stocker du carbone dans les sols. Néanmoins, dans les sols agricoles tempérés, l'effet du biochar sur la productivité des sols et des plantes reste incertain, en particulier concernant les effets à long terme. Dans cette étude, les aires de faulde (anciens sites de production de charbon de bois) ont été utilisées afin d'évaluer les effets à long terme du biochar sur les sols agricoles et les plantes cultivées en région wallonne. La collecte de données a été réalisée par le biais d'interviews d'agriculteurs possédant des aires de faulde sur leurs parcelles. La région limoneuse a été choisie afin de documenter les potentiels bénéfiques d'un amendement biochar dans une région carencée en MO, tandis que le Condroz a servi à documenter les risques liés à une application excessive de biochar. Trois principaux thèmes ont été traités au cours des interviews : (i) les effets des aires de faulde sur le sol ; (ii) les effets des aires de faulde sur les plantes cultivées ; (iii) la perception des agriculteurs quant au biochar. Parmi les effets les plus fréquemment mentionnés, on retrouve la présence accrue d'adventices, un meilleur travail du sol, un meilleur début de croissance des cultures, un meilleur drainage, l'avortement des épis d'escourgeon et une meilleure croissance des cultures. Les effets exercés par les aires de faulde sur les propriétés du sol ont pu être regroupés en trois grands types : les effets liés au complexe d'échange du sol, à la structure et à la couleur du sol. Des différences ont également été mises en avant entre les deux régions agricoles, avec une occurrence accrue des effets négatifs en région condruzienne. Ce résultat suggère que le taux d'application du biochar est un facteur important et qu'une application excessive de biochar peut être néfaste pour la croissance culturale ou la gestion phytotechnique des parcelles. En terme de vision prospective concernant l'application du biochar, cinq grands thèmes sont ressortis des interviews : les enjeux climatiques, la législation, le rôle économique, la notion de risques et les aspects techniques liés à l'épandage. Afin de garantir une utilisation durable et bénéfique des biochars, ces différents aspects devraient être balisés dans les meilleurs délais.